

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI OKSİT YAKIT PİLİ ENTEGRELİ BİR**  
**GAZ TÜRBİNİ SİSTEMİNİN**  
**TERMODİNAMİK MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**MİRAÇ BURAK KAYA**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2021**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI OKSİT YAKIT PİLİ ENTEGRELİ**  
**BİR GAZ TÜRBİNİ SİSTEMİNİN**  
**TERMODİNAMİK MODELİNİN**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**MİRAC BURAK KAYA**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**PROF. DR. FEVZİ BEDİR**

**GEBZE**  
**2021**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DEVELOPMENT OF THERMODYNAMIC  
MODEL OF A SOLID OXIDE FUEL CELL  
INTEGRATED GAS TURBINE SYSTEM**

**MİRAC BURAK KAYA**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR  
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

**GEBZE**  
**2021**

|                                  |                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| <b>GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ</b> | <b>YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU</b> |
|----------------------------------|--------------------------------------|

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/07/2021 tarih ve 2021/32 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26/07/2021 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Miraç Burak KAYA 'ın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### **JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE

: Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ

ÜYE

:Dr. Öğr. Üyesi Recep ÖNLER

### **ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Artan ekonomik ve teknolojik gelişme ile beraber küresel elektrik tüketimi hızlıca artmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisi çoğunlukla fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bununla birlikte fosil yakıt kaynaklı çevre kirliliği de artış göstermektedir. Bu da bizi daha temiz kaynaklardan elektrik enerjisi elde etmeye itmektedir. Bu anlamda katı oksit yakıt pilleri sağladığı avantajlar ile popüler hale gelmektedir. Bu çalışmada katı oksit yakıt pili ve entegre gaz türbin çevriminin 0-D dinamik modeli , termodinamik eşitlikler kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Önerilen sistem bir katı oksit yakıt pili, gaz türbini, ısı değiştirici ve hava kompresöründen meydana gelmektedir. Çalışmada yakıt hücresi modeli performans verileri referans model ile karşılaştırılmıştır. Akabinde 250 hücreden oluşan bir katı oksit yakıt pili yığını entegre edilmiş, gaz türbin sisteminin performans verileri birtakım parametreler üzerinden incelenmiştir. Bu parametreler ; yakıt kullanım verimliliği, yakıt pili yığını çalışma basıncı ve değişken akım yüklemeleridir. Çalışmada, sistem verimliliğini artırmada en etkili parametrenin çalışma basıncı olduğu görülmüştür. Tüm çalışmada, hibrit sistem için elde edilebilecek maksimum güç 138 kW iken maksimum elektriksel verim %65,19 olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler: Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP), Termodinamik Model , Dinamik Model, KOYP/GT Hibrit Sistem.**

## SUMMARY

Global electricity demand and consumption are increasing rapidly due to increasing economic and technological developments. Nowadays, electrical energy is commonly obtained from fossil fuel sources. Consequently, fossil fuel-based air pollution is also increasing. This led us to electricity generation from clean energy sources. In this sense, solid oxide fuel cells are promising technology due to the with some advantages . In this study, 0-D dynamic model of solid oxide fuel cell and integrated gas turbine cycle is developed in MATLAB/Simulink environment by using thermodynamic equations. The proposed system consists of a solid oxide fuel cell, gas turbine, heat exchanger and air compressor. In the present work, SOFC model results were compared with the experimental results. The solid oxide fuel cell stack consists of 250 cells. The solid oxide fuel cell stack consists of 250 cells. The integrated gas turbine system results have been obtained for some parameters. These parameters are; fuel utilization rate, fuel cell operating pressure and load current changes. In the study, it was seen that the most effective parameter to be increasing the efficiency of the system was the fuel cell stack operating pressure. The maximum power which can be obtained from the hybrid system is 138 kW and the maximum electrical conversion efficiency is 65.19%.

**Key Words: Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Thermodynamic Model, Dynamic Model, SOFC/GT Hybrid System.**

## TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Fevzi BEDİR'e,

bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli Arş. Gör. Alper Can İNCE 'ye,

ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                      | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                 | v                   |
| SUMMARY                                              | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                             | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                          | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                       | x                   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                      | xiii                |
| TABLolar DİZİNİ                                      | xv                  |
| <br>                                                 |                     |
| 1. GİRİŞ                                             | 1                   |
| 2. YAKIT PİLLERİ                                     | 2                   |
| 2.1. Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi              | 4                   |
| 2.2. Yakıt Pillerinin Sınıflandırılması              | 5                   |
| 2.2.1. Alkali Yakıt Pilleri (AYP)                    | 6                   |
| 2.2.2. Polimer Değişim Membran Yakıt Pilleri (PEMYP) | 6                   |
| 2.2.3. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)            | 7                   |
| 2.2.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)          | 7                   |
| 3. KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ                          | 9                   |
| 3.1. Katı Oksit Yakıt Pili Bileşenleri               | 9                   |
| 3.1.1. Anot                                          | 9                   |
| 3.1.2. Katot                                         | 10                  |
| 3.1.3. Elektrolit                                    | 11                  |
| 3.2. Katı Oksit Yakıt Pili Konfigürasyonları         | 12                  |
| 3.2.1. Düzlemsel KOYP                                | 12                  |
| 3.2.2. Boru Tipi KOYP                                | 14                  |
| 4. YAKIT PİLİ UYGULAMALARI                           | 16                  |
| 4.1. Sabit Güç Uygulamaları                          | 16                  |
| 4.2. Yakıt Pilli Araçlar                             | 17                  |
| 4.3. Taşınabilir Güç Kaynağı                         | 18                  |
| 5. KATI OKSİT YAKIT PİLİ HİBRİT SİSTEMLER            | 19                  |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 6. KATI OKSİT YAKIT PİLİ- GAZ TÜRBİN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ | 22 |
| 6.1. Kimyasal Tepkimelerin Termodinamiği                     | 22 |
| 6.2. Yakıt Pilinde Elektrokimyasal Süreçler                  | 25 |
| 6.2.1. Nernst Potansiyeli                                    | 26 |
| 6.2.2. Voltaj Kayıpları                                      | 27 |
| 6.2.2.1. Ohmik Kayıplar                                      | 27 |
| 6.2.2.2. Aktivasyon Kayıpları                                | 28 |
| 6.2.2.3. Butler-Volmer Denklemi                              | 29 |
| 6.2.2.4. Konsantrasyon Kayıpları                             | 31 |
| 6.3. Yakıt Reformasyonu                                      | 33 |
| 6.4. Gaz Türbin Çevrimi Prensipleri                          | 37 |
| 6.4.1. Gaz Türbini                                           | 37 |
| 6.4.2. Kompresör                                             | 38 |
| 6.4.3. Isı Değiştirici                                       | 39 |
| 6.5. Katı Oksit Yakıt Pili Enerji Dengesi                    | 41 |
| 7. BULGULAR ve YORUMLAR                                      | 44 |
| 8. SONUÇLAR                                                  | 58 |
| KAYNAKLAR                                                    | 61 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                     | 67 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler ve</u><br><u>Kısaltmalar</u> | <u>Açıklamalar</u>                            |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $\Delta H$                               | : Reaksiyon ısısı (kJ/mol)                    |
| $\varepsilon$                            | : Yüzey faktörü                               |
| $\epsilon$                               | : Isı değiştirici etkenlik değeri             |
| $\eta$                                   | : Politropik verim                            |
| $\Delta G$                               | : Gibbs serbest enerjisi değişimi (kJ/mol)    |
| $\mu$                                    | : Kimyasal potansiyel (G)                     |
| $\sigma_j$                               | : Elektrotların iyonik iletkenliği (1/Ωcm)    |
| $A_h$                                    | : Aktif hücre alanı (m <sup>2</sup> )         |
| AYP                                      | : Alkali yakıt pili                           |
| CGO                                      | : Gadolinium doped ceria                      |
| CH <sub>4</sub>                          | : Metan                                       |
| CO <sub>2</sub>                          | : Karbondioksit                               |
| CO                                       | : Karbonmonoksit                              |
| CR                                       | : Kimyasal reaksiyon                          |
| $C^*$                                    | : Isıl kapasite debilerinin oranı             |
| $D_{eff}$                                | : Efektif difüzyon sabiti (m <sup>2</sup> /s) |
| DMYP                                     | : Doğrudan metanollu yakıt pili               |
| $dP$                                     | : Basınç değişimi (bar)                       |
| $dV$                                     | : Hacim değişimi (m <sup>3</sup> )            |
| $E$                                      | : Elektromotor Kuvveti (V)                    |
| EKYP                                     | : Erimiş karbonat yakıt pili                  |
| $F$                                      | : Faraday Sabiti (coulomb/mol)                |
| FAYP                                     | : Fosforik asit yakıt pili                    |
| $G$                                      | : Gibbs serbest enerjisi (kJ/mol)             |
| GDC                                      | : Gadolinium doped ceria                      |

|              |                                                  |
|--------------|--------------------------------------------------|
| GT           | : Gaz türbini                                    |
| $H$          | : Entalpi (kJ/mol)                               |
| $H_2$        | : Hidrojen                                       |
| HRSG         | : Atık ısı kazanı                                |
| $I$          | : Akım (A)                                       |
| IEA          | : Uluslararası Enerji Ajansı                     |
| $i$          | : Akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )             |
| $i_0$        | : Akım yoğunluğu değişimi (A/m <sup>2</sup> )    |
| $i_l$        | : Limitleyici akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> ) |
| $K_2CO_3$    | : Kalsiyum karbonat                              |
| KOYP         | : Katı oksit yakıt pili                          |
| KTD          | : Karbon tutma ve depolama                       |
| $LHV_{CH_4}$ | : Hidrojenin alt ısı değeri (MJ/kg)              |
| LSM          | : Lantanyum stronsiyum manganate                 |
| MSR          | : Metan- buhar reformasyonu                      |
| Ni-GDC       | : Nickel gadalonia doped ceria                   |
| NiO          | : Nikel oksit                                    |
| Ni-SDC       | : Nickel samaria doped ceria                     |
| Ni-YSZ       | : Nickel yttria stabilize zirconia               |
| $NTU$        | : Birim geçiş sayısı                             |
| $P$          | : Basınç (bar)                                   |
| PEMYP        | : Proton elektrolit membran yakıt pili           |
| PEN          | : Pozitif –Elektrot-Negatif                      |
| Pt           | : Platin                                         |
| PTFE         | : Politetrafloroetilen                           |
| $Q$          | : Isı transfer oranı (W)                         |
| $R$          | : Evrensel gaz sabiti (J/Kmol)                   |
| ReSOC        | : Reversible solid oxide cell                    |
| $S$          | : Entropi (J/K)                                  |

|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| $S/C$ | : Buhar- karbon oranı                   |
| ScSZ  | : Scandia stabilized zirconia           |
| SiC   | : Silisyum karbür                       |
| ST    | : Buhar türbini                         |
| $t$   | : Zaman (s)                             |
| $T$   | : Sıcaklık (K)                          |
| TPB   | : Üçlü faz sınırı                       |
| $UA$  | : Toplam ısı transfer katsayısı (W/K)   |
| $U_h$ | : Hava kullanım verimliliği             |
| $U_y$ | : Yakıt kullanım verimliliği            |
| $w$   | : Komponent kalınlığı ( $\mu\text{m}$ ) |
| $W$   | : Mekanik İş (J)                        |
| WGSR  | : Su-gaz değişim reaksiyonu             |
| $V$   | : Voltaj (V)                            |
| YSZ   | : Yttria stabilize zirconia             |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                                                     | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: Temel bir yakıt hücresi prensip şeması.                                                                | 2                   |
| 3.1: Tipik bir düzlemsel KOYP konfigürasyonu.                                                               | 13                  |
| 3.2: Radyal tabanlı düzlemsel KOYP konfigürasyonu .                                                         | 13                  |
| 3.3: KOYP PEN konfigürasyonları (a) elektrolit destekli (b) katot destekli (c) anot destekli.               | 14                  |
| 3.4: Boru tipi bir KOYP konfigürasyonu.                                                                     | 15                  |
| 4.1: ReSOC tabanlı enerji depolama sisteminin şematik gösterimi.                                            | 17                  |
| 4.2: Yakıt pili /sistemlerinin bataryalar ile operasyon süresi ve toplam kütle açısından kıyaslanması.      | 19                  |
| 6.1: Bir yakıt hücresine ait polarizasyon eğrisi.                                                           | 32                  |
| 6.2: Boru tipi KOYP'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi.                                              | 34                  |
| 6.3: Zıt akışlı ısı değiştiricisi şeması.                                                                   | 39                  |
| 6.4: Zıt akışlı ısı değiştiricisine ait sıcaklık profili.                                                   | 39                  |
| 6.5: Boru tipi KOYP'de ısı geçişinin şematik gösterimi.                                                     | 42                  |
| 7.1: Tasarlanan KOYP/GT hibrit sistemin çalışma prensip şeması.                                             | 45                  |
| 7.2: KOYP/GT hibrit sisteminin MATLAB/Simulink modeli.                                                      | 46                  |
| 7.3: Bu çalışmada kullanılan yakıt pilinine ait performans eğrileri.                                        | 48                  |
| 7.4: Bu çalışmada kullanılan KOYP yığınının ait performans eğrileri.                                        | 48                  |
| 7.5: Uygulanan akım yüklemesi.                                                                              | 49                  |
| 7.6: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığın voltajı değişimi.                                             | 50                  |
| 7.7: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığın gücü davranışı.                                               | 50                  |
| 7.8: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığını sıcaklık davranışı.                                          | 51                  |
| 7.9: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığını ve hibrit sistemin elektriksel verimleri.                    | 51                  |
| 7.10: KOYP yığın voltajının verilen akım yüklemesi ve $U_y$ ile değişimi.                                   | 51                  |
| 7.11: KOYP yığın gücünün verilen akım yüklemesi ve $U_y$ ile değişimi.                                      | 51                  |
| 7.12: Gaz türbini ve KOYP/GT hibrit sistemin güç çıktılarının verilen akım yüklemesi ve $U_y$ ile değişimi. | 53                  |

|       |                                                                                                                 |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.13: | KOYP yığını ve KOYP/GT hibrit sistemin elektriksel verimlerinin verilen akım yüklemesi ve $U_y$ ile değişimi.   | 54 |
| 7.14: | KOYP yığını sıcaklığının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.                                | 55 |
| 7.15: | Gaz türbini egzoz sıcaklığının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.                          | 55 |
| 7.16: | KOYP yığın voltajının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.                                   | 56 |
| 7.17: | KOYP yığın gücünün verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.                                      | 57 |
| 7.18: | Gaz türbini ve hibrit sistemin güç çıktılarının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.         | 57 |
| 7.19: | KOYP yığını ve hibrit sistemin elektriksel verimlerinin verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi. | 58 |

## TABLolar DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                             | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: Yakıt pillerinin konvansiyonel sistemler ve bataryalar ile karşılaştırılması . | 4                   |
| 2.2: Yakıt pillerinin karşılaştırılması.                                            | 8                   |
| 3.1: Günümüzde sıklıkla kullanılan elektrolitlerin çalışma göre karşılaştırılması.  | 12                  |
| 3.2: Boru ve düzlemsel KOYP'lerin avantajları ve dezavantajları                     | 15                  |
| 4.1: Tipik yakıt pilli araçların menzilleri, yakıt tüketimi ve depolama koşulları.  | 18                  |
| 6.1: Standart potansiyel denkleminde ait a ve b sabitleri.                          | 27                  |
| 6.2: KOYP komponentlerine ait $\sigma_j$ ve $E_j$ değerleri.                        | 28                  |
| 6.3: Anot ve katoda ait akım yoğunluğu değişimi ( $i_0$ ) değerleri.                | 31                  |
| 6.4: Anot ve katoda ait efektif difüzyon sabitleri ( $D_{eff}$ ).                   | 32                  |
| 6.5: Anot gazları için kütle dengesi.                                               | 34                  |
| 6.6: Katot gazları için kütle dengesi.                                              | 35                  |
| 6.7: Metan-buhar reformasyonu ve su-gaz değişim reaksiyonlarına ait sabitler.       | 36                  |
| 7.1: KOYP/GT hibrit sisteme ait operasyonel veriler.                                | 47                  |
| 7.2: KOYP hücresi performans verilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması.    | 49                  |
| 8.1: Elde edilen sonuçların literatürde yer alan çalışmalar ile karşılaştırılması.  | 60                  |

# 1. GİRİŞ

Enerji, tüm insanlık medeniyetinin kuvvetle bağılı olduğu temel bir ihtiyaç ve güçtür. Dünyada toplam enerji tüketimi, sanayi devriminden itibaren teknolojinin gelişmesi ile beraber hızlıca artmaktadır. Dünya enerji tüketimine bakacak olursak enerji arzının büyük bir bölümü fosil yakıt kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu fosil yakıt kaynaklarına bağılılık ve kontrolsüz bir biçimde kullanılması hem fiyatların artmasına hemde çevresel birtakım sorunların çıkmasına sebep olmuştur.

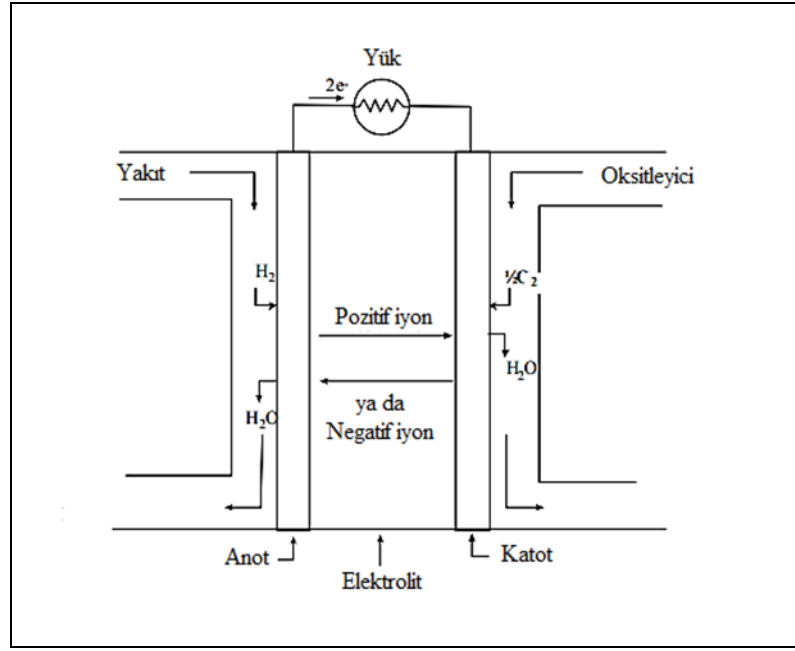
Yenilemez enerji kaynaklardan elektrik enerjisi eldesi küresel ısınma başta olmak üzere hava kirliliği, asit yağmurları, ozon tabakasının incilmesi gibi çevre problemlerine sebebiyet vermiştir ve vermeye devam etmektedir. Dünya nüfusunun artması ile beraber bu tüketiminde hızlı bir biçimde artacağı apaçık ortadadır. Bir çalışmada mevcut enerji talebine 2050 yılına kadar yaklaşık %3'lük bir artış olacağı ortaya konmuştur [1]. Ayrıca yine fosil yakıtlar ve diğer yenilenemez enerji kaynaklarının etkisi ile dünya sıcaklığı artış göstermektedir. Toplam verimliliğin maksimize edildiği, çevresel etkilerin minimize edildiği elektrik enerjisi elde etme yöntemlerine yönelinmelidir.

Bu anlamda hem günümüz hem de gelecek için katı oksit yakıt pili (KOYP) teknolojisi, yüksek enerji dönüşüm verimliliği, güvenilirliği ve düşük çevresel etkisi nedeniyle büyük bir potansiyele sahiptir. Hibrit sistemlerin için literatürde birçok konfigürasyon mevcuttur. Her konfigürasyonda hibrit sistemler kendine özgün bileşenler ve sistem entegrasyonları ile çeşitli amaçlar için kullanılırlar.

Ayrıca hibrit sistemler CO<sub>2</sub>'nun tutulmasında rekabetçi bir teknoloji olarak görülmektedir. Bu sistemlerde mevcutta kullanılan yakalama tekniklerinden daha az enerji tüketerek CO<sub>2</sub> tutulmasına olanak sağlayabilmektedir. Akabinde CO<sub>2</sub> ayırma teknikleri ile entegre edilerek %90'lara varan verimlere ulaşılabilir.

## 2. YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri elektrokimyasal süreçler dahilinde çalışan ve yakıt reaksiyonun kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen cihazlardır. Bir yakıt hücresi yapısal olarak, gözenekli anot ve katot elektrotlar ile katalist yüzeyi ile temas halinde, seperatör olarak kullanılan bir elektrolitten oluşur. Bir yakıt piline ait temel şematik temsili Şekil 2.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Temel bir yakıt hücresi prensip şeması [2].

Yakıt piline yakıt anot kanalından sürekli olarak beslenir, oksidant ise katot kanalından beslenir. Reaktif gazların geçişine izin veren bu anot ve katot elektrotlar bir elektrolit vasıtasıyla birbirlerinden ayrılırlar. Katalist tabakada meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oksidant ve hidrojen iyonlarına ayrılırlar. Açığa çıkan serbest elektron harici bir devre ile katoda taşınır. Bu sırada iyonlar elektrolitten anot tarafına geçer.

Günümüzde birçok yakıt pili tasarımı mevcuttur. Bunlar kullandıkları yakıt ve komponentlerdeki değişimlerle birbirlerinden farklılaşırlar. Ancak kimyasal süreçlerle ısı ve elektrik enerjisi üretimi ortaktır. Uygulamalarda birçok hücrenin bir araya getirilerek yığın oluşturması suretiyle kullanılması düşünülür. Unutulmamalıdır ki

yakıt hücreleri doğru akım üretirler [3]. Son yıllarda yakıt pilleri sağladığı avantajlarla umut verici bir teknoloji hale gelmektedir. Bu teknolojinin birçok avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır ;

- Yakıt pilleri, diğer fosil yakıt kullanımından kaynaklanan kirliliğin azaltılmasında etkili olabilmektedir. Saf H<sub>2</sub> , yakıt olarak kullanıldığı takdirde emisyon sıfır olmaktadır .
- Konvansiyonel güç sistemlerine nazaran yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahiptirler. Bu tip sistemlerde verimlilik Carnot prensibine göre hesaplanırken, yakıt pilleri için enerji dönüşüm verimi Gibbs serbest enerjisinin standart reaksiyon entalpisine oranı olarak Denklem (2.1)'deki gibi hesaplanır.

$$\eta_{maks} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2.1)$$

- Ayrıca yakıt pillerinin yapısında hareket eden parça bulunmadığından daha az bakım gerektiren, titreşimsiz ve gürültüsüz operasyonel koşullara olanak sağlar.
- Bataryalar ile mukayese edildiğinde çok daha hızlı şarj olma kabiliyetine sahiptirler [4], [5].
- Günümüzde yakıt pilleri birçok farklı alanda örneğin; harici güç üniteleri, uzay aracı, otomobiller gibi sabit ve mobil uygulamaları mevcuttur.
- Bu cihazlar birkaç mW'tan onlarca MW gibi geniş bir aralıkta güç üretebilirler.
- Yakıt pilleri yakıt esnekliği açısından avantaj sağlar. Hidrojen (H<sub>2</sub>), metanol (CH<sub>3</sub>OH), biyokütle, metan (CH<sub>4</sub>), bütan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), doğalgaz (NG), ve sentezgaz (Syngas) vb. yakıtlar yakıt pillerinde kullanılabilir.
- Geniş bir sıcaklık aralığında uzun operasyon sürelerine olanak tanır.
- Bunlara ek olarak yüksek maliyet, yakıt pili teknolojilerinin ticarileşmesine engel teşkil etmektedir.

Yakıt pilleinin, konvansiyonel güç sistemleri ve bataryalar ile karşılaştırılması Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 : Yakıt pillerinin konvansiyonel sistemler ve bataryalar ile karşılaştırılması [6].

| <b>Konvansiyonel Güç Sistemleri<br/>ile Karşılaştırıldığında</b> | <b>Bataryalar ile<br/>Karşılaştırıldığında</b> |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Yüksek verimlilik                                                | Uzun çalışma süreleri                          |
| Düşük emisyon                                                    | Geniş çalışma sıcaklığı aralığı                |
| Sessiz çalışma                                                   | Bertarafında azaltılmış çevresel etki          |
| Daha az bakım                                                    | Anlık şarj olabilme                            |
| Yakıt esnekliği                                                  |                                                |

## 2.1. Yakıt Pili Tarihsel Gelişimi

Yakıt pilleri kimin keşfettiği kesin olmamakla beraber 1800 yılında İngiliz bilim insanları Sir Anthony Calisle ve William Nicholson tarafından elektrik kullanılarak su hidrojen ve oksijene ayrıştırıldı. Suyun elektrolizi elektrolizi keşfedildi. [7],[8]. Suyun elektrolizi, hücre içerisinde meydana gelen elektrokimyasal sürecin tam tersidir. Bu anlamda, bahsi geçen iki bilim insanı elektrik kullanarak ilk kimyasal reaksiyon gerçekleştiren kişilerdir. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı'na [9] göre, 1838'de bir yakıt hücresi üzerine ilk bilimsel anlamda araştırmayı yapan Alman bilim insanı Christian Friedrich Schönbein'di. Schöben'nin çalışmaları Philosophical Magazine'de 1839 Ocak sayısında [10] yakıt hücresini konsept bakımından ilk olarak ortaya koyanın Sir William Robert Grove olduğunu ortaya atmıştır. Grove, sülfürik asit çözeltisine batırılmış birinde hidrojen diğerinde oksijen bulunduran iki sızdırmaz tüpün içerisinden geçen iki platin elektrot arasında sabit bir akım keşfetti. 1889 yılında Ludwig Mond ve Car Langer, delikli platin elektrotlar kullanarak  $6,5 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu ve 0,73 V ile nikel saflaştırma (Mond İşlemi) sürecini ortaya koydu [11]. 1896 yılında William W. Jacques [12] pratik uygulamalar için ilk yakıt hücresini geliştirdi.

1900'de Walther Nernst, katı elektrolit olarak ilk kez zirkonyumu kullandı [7]. 1921'de Baur [13] ilk erimiş karbonat yakıt hücresini geliştirdi. 1933 yılının başlarında Thomas Francis Bacon alkali yakıt pilini geliştirdi. Hidrojenin ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonundan elektrik enerjisi elde edilen ilk yakıt pilidir. 1950

yılına gelindiğinde politetrafloroetilen (PTFE) membran olarak yakıt pilinde kullanıldı. Bu gelişme ile beraber sıvı elektrolitli yakıt pillerinin mevcut duruma getirilmesinin önü açıldı. 1955 yılında Thomas Grubb, sülfatlanmış polstirenden imal edilen bir membran kullandı [7]. 1959 yılında Marshall Havacılığın destekleriyle 5 kW güç sağlayan ve % 60 verimlilikle çalışan 40 hücreli bir yakıt pili geliştirdi.

1959 yılında Harry Ihrig ve ekibi Allis-Chalmers marka bir traktör için 15 kW güç sağlayan bir yakıt pili üretti [9]. 1961 yılında G. V. Elmore ve H. A. Tanner, “Ara Sıcaklık Yakıt Hücreleri” [14] adlı çalışmasında bir fosforik asit yakıt hücresi çalıştı. Yığın bazda, herhangi bir bozulma meydana gelmeden, 90 mA / cm<sup>2</sup> ve 0,25 V çıktıklarıyla 6 ay çalışabileceğini deklere ettiler. 1965 yılında, Fort Belvoir'deki ABD Ordusu Mühendis Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı, Texas Instruments tarafından üretilen çeşitli erimiş karbonat yakıt hücrelerini testi gerçekleştirdi. 1990 yılında, Güney Kaliforniya Üniversitesi ile birlikte NASA'nın Jet Tahrik Laboratuvarı bir metanol (CH<sub>3</sub>OH) bataryası geliştirdi.

Günümüzde çeşitli türlerde yakıt pili ve uygulamaları mevcuttur. Bu hususta uygulamalar noktasında çalışan birçok üretici bulunmaktadır. İlk yıllarında gerek maliyet gerek de teknik kısıtlar nedeniyle eğilim azdı. Fakat yeni materyallerin gelişimi, konvansiyonel sistemlere nazaran üstünlüklerinin anlaşılması ile beraber cazip hale gelmektedir. Ek olarak fosil yakıt kaynakları ile ilgili çevresel, politik, ekonomik kaygılarla beraber artan enerji talebi yakıt pillerini çevre dostu bir teknoloji olarak öne çıkarmaktadır.

## 2.2. Yakıt Pillerinin Sınıflandırılması

Yakıt pillerinin, genel anlamda kullanılan elektrolit, yakıt ve oksidant gibi parametreler temelinde tasnifi mümkündür. Diğer yandan çalışma sıcaklığı da ayırıcı bir parametredir ve üç kısımda incelenebilir; yüksek sıcaklık, orta sıcaklık ve düşük sıcaklık. Çalışma sıcaklığı kullanılan elektrolit ile ilişkilidir [15]. Düşük sıcaklık yakıt pilleri;

- Alkali Yakıt Pili (AYP),
- Polimer Elektrolit-Membranlı Yakıt Pili (PEMYP),

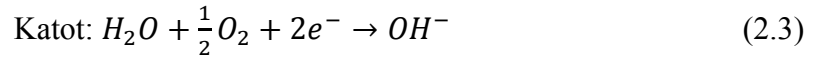
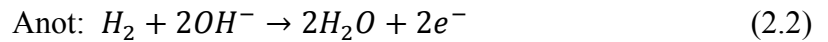
şeklinde sıralanabilir. Tipik olarak 200 °C ve altındaki sıcaklıklarda faaliyet gösterirler. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri;

- Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP),
- Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP),

şeklinde sıralanabilir. 600 °C ve üzeri sıcaklıklarda faaliyet gösterirler. Fosforik asit yakıt pilleri (AYP) ise orta sıcaklık yakıt pilleri sınıfında yer alır. Yakıt pili türlerine ait karşılaştırmalı özet bilgiler Tablo 2.2' de gösterilmektedir.

### 2.2.1. Alkali Yakıt Pilleri (AYP)

Alkali yakıt pilleri (AYP) 1960'lı yılların başlarında uzay gemilerinde elektrik sistemlerine güç sağlamak amacıyla kullanıldı. Bu anlamda pratik kullanımı olan ilk yakıt pilidir. AYP'de genellikle elektrolit olarak alkali bazlı potasyum hidroksit (KOH) bir çözelti kullanılır. Bu yakıt pilleri 60 - 90 °C gibi düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Yüksek verimlik ve güç yoğunluğu gibi avantajları olmasına karşın hidrokarbonların yakıt olarak kullanılması durumunda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ile sıvı elektrolit potasyum karbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) oluşturur. Bu bir dezavantajdır ve elektrolitin iyonik iletkenliğini olumsuz etkiler. Sonuç olarak hücrede performans kaybı ile sonuçlanır. Hücre içi reaksiyonları ;

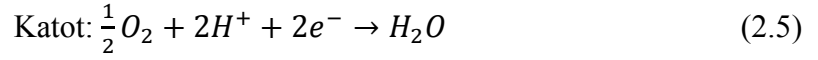


olarak ifade edilir.

### 2.2.2. Polimer Elektrolit-Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)

Polimer elektrolit-membranlı yakıt pilleri (PEMYP) nispeten düşük sıcaklıklarda (50 – 120 °C) çalışır. İki gözenekli elektrot ve proton transferini sağlayan polimer bir elektrolitten oluşur. Reaktantların nemlendirilmesi ile polimer elektrolitin

kurumasının önüne geçilmelidir. Nafion'nun olarak membran kullanımı ile daha iyi iyonik iletkenlik ve kararlılık elde edilmiştir. Tipik olarak kimyasal reaksiyonları hızlandırmak için platin (Pt) katalizör kullanılır. Günümüzde yakıt kullanımı H<sub>2</sub> ile kısıtlıdır. Hidrokarbon yakıtların kullanımı için karmaşık yakıt reform süreçleri tesis edilmelidir. Uygulamaları arasında, otomobil sistemleri, toplu taşıma sistemleri ve yerleşik güç uygulamaları bulunur. Hücre içi reaksiyonları;

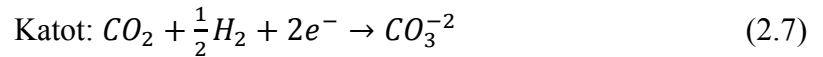


olarak ifade edilir.

### 2.2.3. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)

Fosforik asit yakıt pilleri, 160-200° C sıcaklıkları arasında çalışır. Yakıt olarak genellikle doğalgaz kullanılır. Ancak çalışma sıcaklığı yakıtın doğrudan reformu için uygun değildir. Bu sebeple harici bir reform ünitesi ile karbonmonoksit (CO) içeriği <% 1 olan bir H<sub>2</sub> / CO<sub>2</sub> karışımı hücreye beslenir [15].

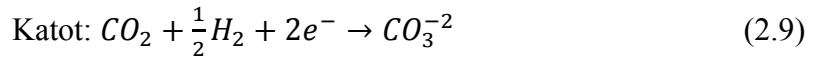
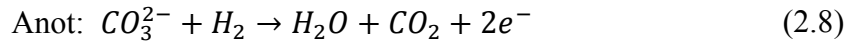
Nispeten yüksek sıcaklıkta çalıştıklarından atık ısı kazanımı için uygundur. Kombine ısı-güç sistemleri için iyi bir seçenektir [16]. Hücre içi reaksiyonları Denklem (2.6) ve Denklem (2.7) ile ifade edilebilir.



### 2.2.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)

Erimiş Karbonat yakıt hücresi (EKYP), çalışma sıcaklıkları 550 ile 700 ° C arasındır ve yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri sınıfında yer alır. Elektrot malzemesi olarak Nikel alaşımları kullanılır. EKYP' de eriyik Li, K ve Na karbonat tuzları elektrolit

olarak kullanılabilir. H<sub>2</sub> ve hidrokarbonlar olmak üzere EKYP' ler için kullanılabilir çeşitli yakıtlar vardır [17], [18] . EKYP' ler ayrıca yüksek verimlilik, ucuz olması, sıvı elektrolit olması sebebiyle yüksek temas, yüksek aktivite ve atık ısının geri kazanımı gibi pek çok avantaj sağlar. Lakin yüksek sıcaklıklar sebebiyle korozyon oluşumu bir dezavantajdır. Yüksek sıcaklıklarda çalıştıklarından pahalı bir katalizör kullanma gereksinimleri yoktur. EKYP sistemleri karbondioksit (CO<sub>2</sub>) yakalamada umut vadeden bir niteliktedir [19]. Hücre içi reaksiyonları;



olarak ifade edilir.

Tablo 2.2: Yakıt pillerinin karşılaştırılması.

|                               | <b>AYP</b>               | <b>PEMYP<br/>(DMYP)</b>                  | <b>FAYP</b>                          | <b>EKYP</b>                                | <b>KOYP</b>                          |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Elektrolit</b>             | 35-50% KOH               | Polimer                                  | Fosforik Asit<br>SiC/PTFE<br>matrisi | (Li,<br>K,Na) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | Seramik                              |
| <b>İyon</b>                   | OH <sup>-</sup>          | H <sup>+</sup>                           | H <sup>+</sup>                       | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>              | O <sup>2-</sup>                      |
| <b>Çalışma Sıcaklığı</b>      | 60-90 °C<br>(200-230 °C) | 50-120 °C                                | 160-220 °C                           | 620-660 °C                                 | 800–1000 °C<br>(600 –800 °C )        |
| <b>Yakıt</b>                  | H <sub>2</sub>           | H <sub>2</sub> -<br>(CH <sub>3</sub> OH) | H <sub>2</sub>                       | H <sub>2</sub> , CO                        | H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> |
| <b>Katalizör</b>              | Ag, Pt, Pd, Ru           | Pt, Ru                                   | Pt                                   | -                                          | -                                    |
| <b>Oksidant</b>               | O <sub>2</sub> -Hava     | O <sub>2</sub> -Hava                     | O <sub>2</sub> -Hava                 | O <sub>2</sub> -Hava -<br>CO <sub>2</sub>  | O <sub>2</sub> -Hava                 |
| <b>Anot</b>                   | Ni, PTFE, C              | C                                        | C, PTFE                              | Ni<br>Alaşımları                           | Ni/ Seramik<br>kompozit              |
| <b>Katot</b>                  | C, PTFE, NiO             | C                                        | Karbon, PTFE                         | Ag <sub>2</sub> O, NiO                     | Metal oksit                          |
| <b>Elektriksel Verimlilik</b> | % 50 – 60                | %40 – 60                                 | %40 – 50                             | %45 – 55                                   | %50 – 60                             |

## 3. KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ

### 3.1. Katı Oksit Yakıt Pili Bileşenleri

KOYP hücresi üç veya çok katmalı kompozit bir yapıdan meydana gelir [15]. Gözenekli anot ve katot elektrot, yüksek elektriksel dirençli bir elektrolit tarafından birbirinden ayrılır.  $O^{2-}$  iyonları katottan anoda elektrolit vasıtasıyla iletilir. Katı elektrolit özellikle yüksek sıcaklık koşullarında baskın olarak  $O^{2-}$  iyonik iletkenliğe sahiptir. Ayrıca proton ileten katı elektrolitler de alternatif olarak mümkündür [20] . Bu bölümde bu üç ana komponent incelenecektir.

#### 3.1.1. Anot

Anot malzeme seçimi hücrenin performansı açısından önem taşımaktadır. İyi performans için anot malzemelerde birkaç önemli faktöre dikkat edilmesi gereklidir. Bunlar [21];

- Anodik reaksiyonları maksimize etmek için üçlü faz sınırı (TPB) yüzey alanının yeteri kadar geniş olması,
- Yüksek iyonik ve elektriksel iletkenlik,
- Gaz difüzyonunu kolaylaştırabilecek yeterlilikte porozite,
- Hücredeki diğer komponentlerle uyumlu termal genleşme katsayısıdır.

Bu komponent seramik bir yapıya ilave metalik katalizör birleşiminden meydana gelir. Günümüzde Ni-YSZ'nin yaygın olarak anot malzeme olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımı yüksek sıcaklıklarda yükseltgeyici ortamlardaki olumlu performansı, nispeten alternatif anot malzemelerinden ucuz olmasındandır. Burada nikel ağ yapısı yükseltgenme tepkimesi için katalizör görevini üstlenmektedir. Alternatif olarak Fe, Ag, Pt, Co, Ni, Ru, Mn gibi elementler katalizör olarak düşünülebilir. Ayrıca birçok anot malzeme literatürde mevcuttur. İtiryum yerine seramik esaslı gadolinyum (Gd) ve skandiyum (Sc) kullanılabilmektedir. Ni-GDC ve

Ni-SDC örnek olarak gösterilebilir. Reaktantlar ve ürünlerin taşınımı için anot elektrot %20 ila %40 porozite ile imal edilirler [22].

### 3.1.2. Katot

Günümüzde elektriksel ve iyonik iletkenlikleri 1000° C 'ye kadar olan sıcaklıklarda oksitleyici atmosfer koşullarında yeterli stabiliteye sahip olan malzemeler katot malzemesi olarak kullanılabilir [15]. Bir katot malzemenin beklenen özellikler;

- Yüksek elektriksel iletkenlik ve iyonik iletkenlik,
- Yeterli gözenekliliğe sahip olmalı,
- Kimyasal ve boyutsal kararlılık,
- Hücredeki diğer komponentlerle uyumlu termal genleşme katsayısıdır.

Hedeflenen katkılama veya bileşim seçimi yoluyla, elektronik ve iyonik iletkenlik ve ayrıca termal genleşme katsayısı geniş sınırlar içinde değiştirilebilir ve elektrolite uygun hale getirilmiş bir katot malzemesi geliştirilebilir. % 15 ile % 30 arasında stronsiyum (Sr) oranları ile katkılı lantan manganat (La, Sr)  $MnO_3$  (LSM) günümüzde en yaygın kullanılan katot malzemesidir. YSZ ile karşılaştırıldığında LSM biraz daha yüksek bir termal genleşme katsayısına sahiptir ve YSZ ile kimyasal uyumluluk tatmin edicidir.

Ayrıca  $LaCoO_3$  Kobalt (Co)-perovskit malzemesi YSZ bazlı elektrolitlerle oldukça reaktiftir. Bu bir dezavantajdır ve bu reaktiviteyi önlemek/azaltmak için, YSZ elektroliti ve katot malzemesi arasında koruyucu bir GDC tabakası ilave edilebilir. GDC katmanı üzerinden difüzyon eylemleri KOYP'nin uzun vadeli çalışması sırasında problemler ortaya çıkarabilir. LSM ve  $LaCoO_3$  800 °C, yüksek iletkenlik (> 100 S/cm) ,yüksek katalitik aktivite ve yüksek gaz difüzyonu açısından en uygun çalışma sıcaklığıdır [23].

### 3.1.3. Elektrolit

Elektrolitler, iyonların katottan anota taşınmasında ve iki elektrotun arasının elektriksel olarak yalıtılmasında kullanılan seramik esaslı malzemelerdir. Uygun performans için elektrolitten şunlar beklenmelidir [21], [24]–[35] :

- Yüksek derecede iyonik iletkenliğe sahip olmalıdır. Arzu edilen iletkenlik 1–100  $\mu\text{m}$  kalınlıkları için 0,01–0,1 S / cm'dir.
- Katı elektrolitin elektriksel iletkenliği ihmal edilebilir düzeyde olmalıdır. Aksi takdirde voltaj kaybına neden olur.
- Yüksek mekanik dayanıma sahip olmalıdır.
- Düşük maliyet ve kolay üretim
- Katı elektrolit kimyasal, faz, boyutsal ve morfolojik kararlılığa sahip olmalıdır

Son yıllarda ,YSZ ‘nin elektrolit malzemesi olarak kullanımı yaygındır. Bunlara ek olarak skandiyum (Sc) ile stabilize edilmiş zirkonya ( ScSZ), seryum gadolinyum oksit (CGO) veya gadolinyum (Gd) katkılı seryum oksit (GDC) alternatif elektrolit malzemeleridir. Burada ScSZ ,YSZ’ ye kıyasla daha stabildir.

GDC ise düşük sıcaklıklarda yüksek iyonik iletkenliğe sahiptir. Ancak hem gadolinyum (Gd) hem de skandiyum (Sc) kaynaklarına ulaşım zorluğu yaygınlaşmasına engel teşkil etmektedir. Günümüzde kullanılan elektrolitlerin çalışma sıcaklıklarına göre karşılaştırılması Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1: Günümüzde sıklıkla kullanılan elektrolitlerin çalışma sıcaklığına göre karşılaştırılması [21].

| Sıcaklık                | Elektrolit | Tanım                                                                                                                                                                           |
|-------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yüksek<br>(800-1000 °C) | YSZ        | <ul style="list-style-type: none"><li>Yüksek iyonik iletkenlik ( ~0.1 S/cm)</li><li>Ohmik direnci ~ 800 °C'nin altında dengelemek için ince elektrolit tercih edilir.</li></ul> |
| Orta<br>(600-800 °C)    | SDC,GDC    | <ul style="list-style-type: none"><li>Yüksek iyonik iletkenlik ( 0.1S/cm)</li><li>Kimyasal ve mekanik dengesizlikler nedeniyle &lt;600 ° C'de ciddi performans kaybı</li></ul>  |
| Düşük<br>(<600 °C)      | SDDC       | <ul style="list-style-type: none"><li><math>H^+ / O^{2-}</math> &lt;600 ° C'nin süperiyonik iletkenliği</li></ul>                                                               |

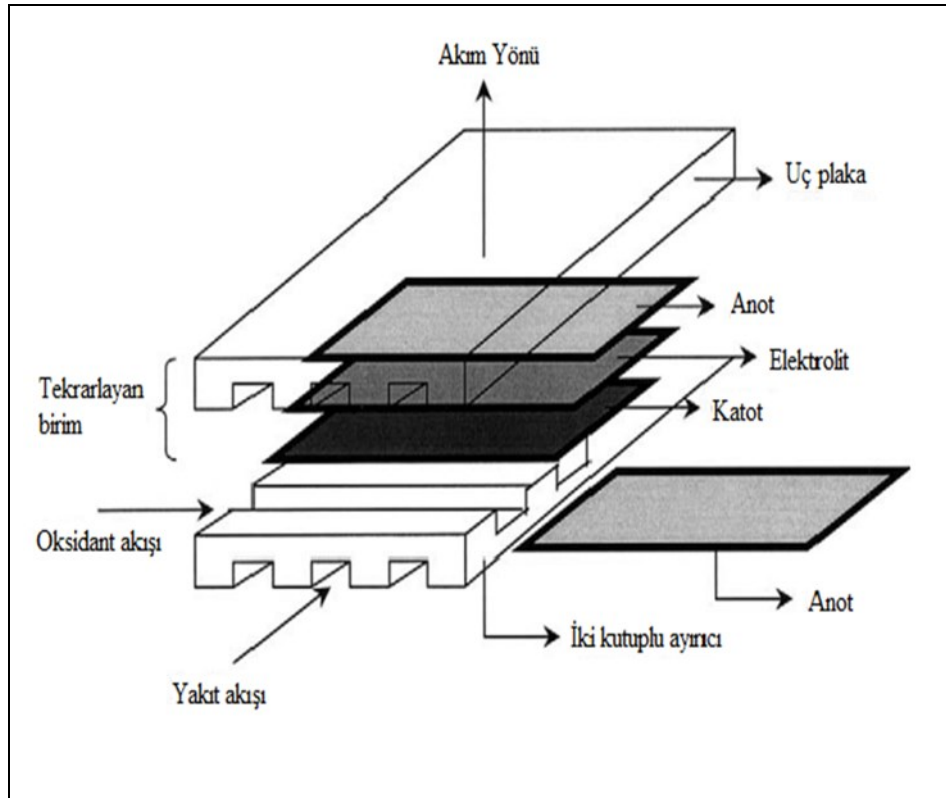
### 3.2. Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) Konfigürasyonları

Katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklık ve basınç gibi operasyonel koşullar altında çalışmaktadır. Bu nedenle çeşitli konfigürasyonların oluşmasına olanak sağlar. Bu bölümde sıklıkla kullanılan konfigürasyonlara çeşitlerine genel bir bakış verilecektir. KOYP tasarımında 2 ana konfigürasyonun kullanımı mevcuttur: Düzlemsel ve boru tipi konfigürasyon.

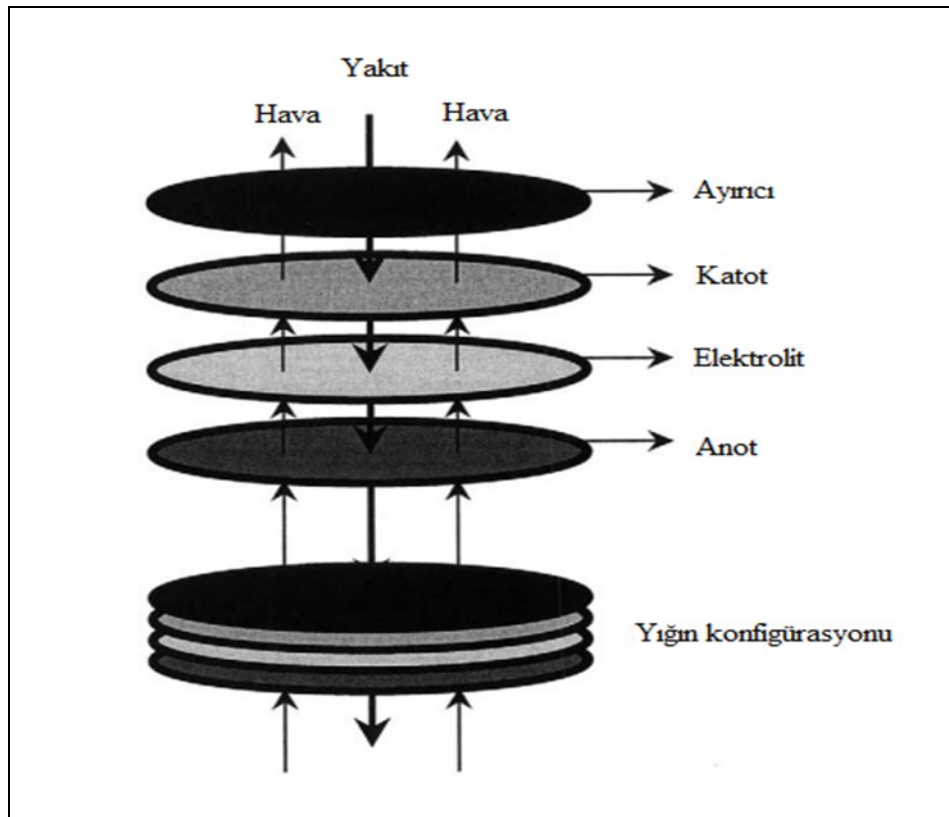
#### 3.2.1. Düzlemsel KOYP

Yakıt pilleri tasarımında sıklıkla kullanılan konfigürasyon düzlemsel konfigürasyondur. Bu tasarım anot elektrot, elektrolit, katot elektrot ve akım toplayıcı gibi komponentlerin üst üste sıralanması ile oluşturulur. Şekil 3.1'de bu yapının şematik gösterimi mevcuttur.

Düzlemsel KOYP'ler, boru tip ile karşılaştırıldığında daha kolay imal edilebilmekte ve daha yüksek güç yoğunluğuna ulaşabilmektedir. Ancak gaz sızıntısı, yapısal dayanımı en büyük dezavantajıdır.

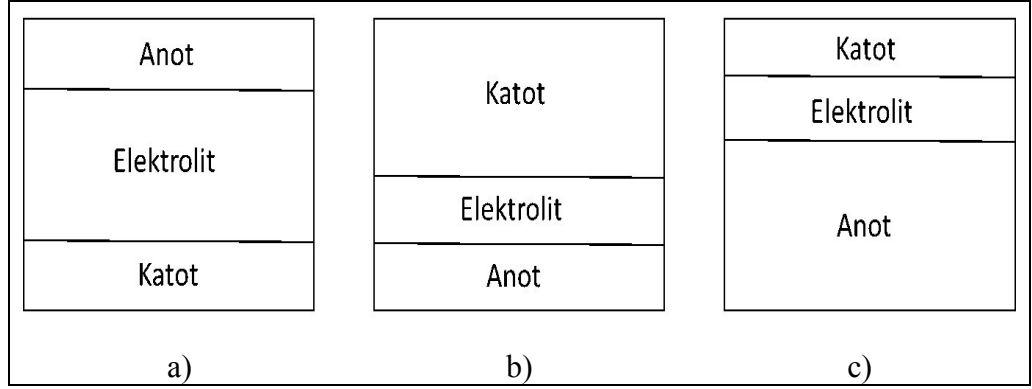


Şekil 3.1: Tipik bir düzlemsel KOYP konfigürasyonu [36].



Şekil 3.2: Radyal tabanlı düzlemsel KOYP konfigürasyonu [37].

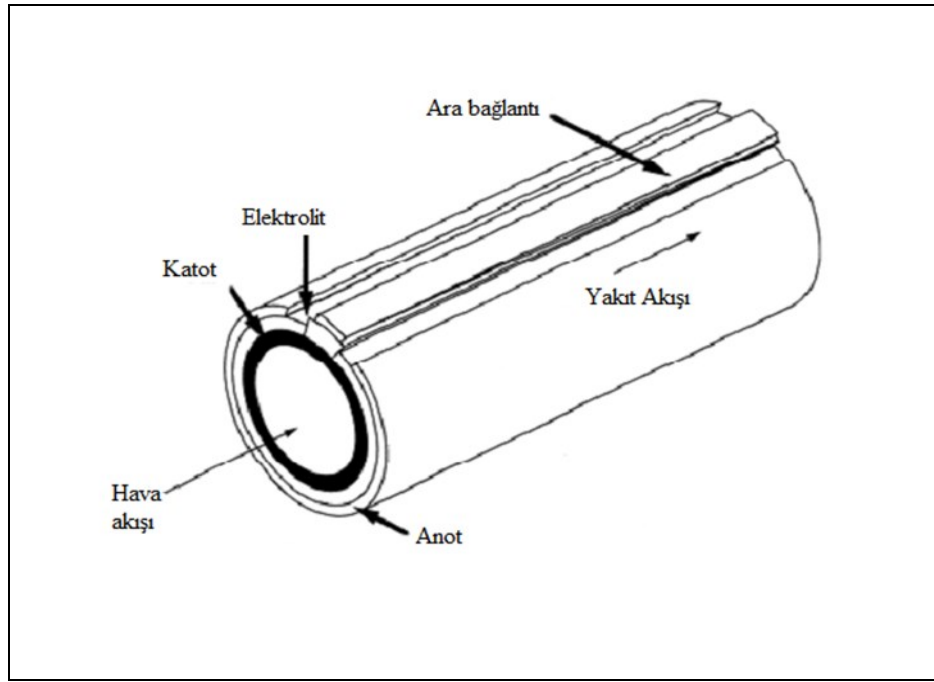
Düzlemsel yakıt pilleri elektrolit veya elektrot destekli olarak da üretilmektedir. Elektrot destekli hücrelerde kütle taşınım problemleri meydana gelirken, ince elektrolit kullanıma izin verir ve bunun sonucu olarak düşük sıcaklıklarda çalışmayı mümkün kılar. Diğer yandan elektrolit destekli hücreler nispeten elektrotlarda meydana gelen gerilmelere karşı güçlü bir yapıya sahiptir [38]. Bu yakıt pillerine ait farklı konfigürasyonlar Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: KOYP PEN konfigürasyonları (a) elektrolit destekli (b) katot destekli (c) anot destekli.

### 3.2.1. Boru Tipi KOYP

Boru tipi konfigürasyon, ilk olarak 1980 yılında Siemens-Westinghouse Electric Corporation tarafından önerildi [34]. Bu konfigürasyonun yüksek sıcaklıkta sızdırmazlığa ihtiyaç duymaması, hızlı devreye alma sağladığı avantajlar arasındadır [39]. Boru tipi yakıt pili bileşenleri, içi boş birer boru olarak tasarlanır ve üretilir. Hücre, oksitleyici ortamın borunun içinden aktığı ve yakıtın borunun dışından aktığı, boru şeklinde bir katot çevresinde katmanlar halinde oluşturulur. Şekil 3.4’de tipik bir boru tipi yakıt pilinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4: Boru tipi bir KOYP konfigürasyonu [37].

Bu konfigürasyonun üretim zorlukları, direnç kayıpları ve gaz difüzyon zorlukları en temel dezavantajlarıdır. Direnç kayıpları akımın toplayıcıya ulaşana değin katettiği uzun bir mesafe ile ilgilidir [40]. Bu sebeple düşük güç yoğunluğuna sahiptir. Düzlemsel konfigürasyonda olduğu gibi benzer şekilde boru tipi yakıt pillerli anot, katot ve/veya elektrolit destekli olarak tasarlanıp imal edilebilmektedirler. İlave olarak bu tasarımlardan anot destekli olan, katot tarafında yüksek verimde oksidant üretimine olanak sağlaması ve yüksek iyonik iletkenlik gibi avantajlardan dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Düzlemsel ve boru tipi KOYP'ler için avantajlar ve dezavantajlar karşılaştırmalı olarak Tablo 3.2' de verilmektedir.

Tablo 3.2: Boru ve düzlemsel KOYP'lerin avantajları ve dezavantajları.

| Özellik                       | Boru Tipi     | Düzlemsel        |
|-------------------------------|---------------|------------------|
| Güç yoğunluğu                 | Düşük         | Yüksek           |
| Hacimsel güç yoğunluğu        | Düşük         | Yüksek           |
| Yüksek sıcaklık sızdırmazlığı | Gerekli değil | Gerekli          |
| Çalıştırma ve kapama          | Hızlı         | Yavaş            |
| Ara bağlantı üretimi          | Zor           | Yüksek maliyetli |
| Üretim maliyeti               | Yüksek        | Düşük            |

## 4. YAKIT PİLİ UYGULAMALARI

Günümüzde yakıt pili uygulamaları 2 ana alana odaklanmıştır : sabit güç uygulamaları ve ulaşım uygulamaları. İlave olarak taşınabilir güç kaynağı olarak kullanımı da mevcuttur. Yakıt pili uygulamaları Bölüm 4.1 , 4.2 ve 4.3'de açıklanmaktadır.

### 4.1. Sabit Güç Uygulamaları

Yakıt pilleri enerji üretimi ve depolanması, emisyonların minimize edilmesi, biyolojik atık yönetimi için kullanılmaktadır. Birincil güç kaynağı olarak kullanılabilirken ve ya yardımcı güç ünitesi olarak kullanılabilir [41]. Ayrıca termodinamik çevrimlerle desteklenerek hibrit sistemler olarak kullanımı da mevcuttur. Bu anlamda katı oksit yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları , diğer yakıt pillerine nazaran yüksek olduğu için hibrit sistemler için kullanımı daha olanağıdır.

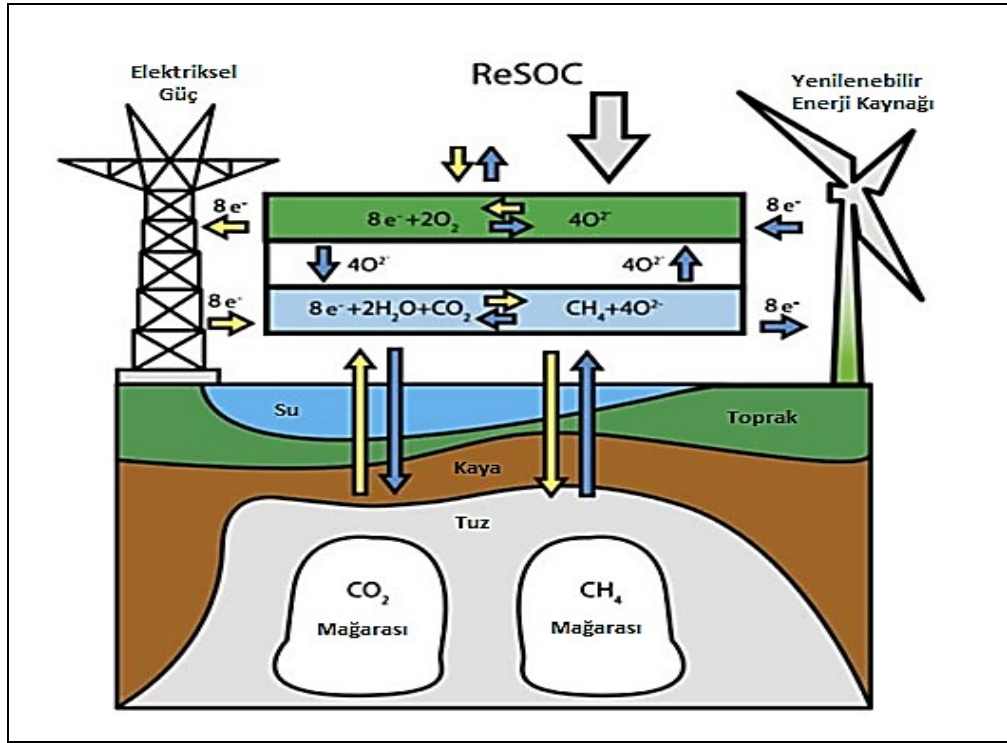
Cheddie vd. [42] çalışmasında KOYP'yi bir gaz türbin çevrimine entegrasyonu ile verimliliğin %30'dan %66.2'ye yükseldiği görülmüştür. Kojenerasyon uygulamaları maliyetlerden %20 tasarruf sağlamakla beraber termal verimi %80'e kadar artırabilmektedir. Bunlara ek olarak DMYP ve PEMYP yüksek enerji güç yoğunluğuna sahip olmaları nedeni ile telekomünikasyon sektöründe kullanımı cazip görülmektedir. Yanı sıra şebekeye erişimi olmayan yerleşim yerlerinde güç temini için bir alternatif yöntemdir.

Avustralya hükümetinin 600000 \$'lık bir yatırım ile Antarktika'da rüzgar enerjisi ile yakıt pilinde kullanmak üzere suyun elektrolize edilerek hidrojen üretilip, yakıt pilinden ısı ve elektriksel güç elde edilmesi planlanmıştır [6]. Bu tip rejeneratif sistemlerde hidrojen su üzerinde depolanır. Yüksek özgül enerji, yüksek verimlilik vb. avantajlarından dolayı uzay çalışmaları için enerji depolamada ve güç elde etmede umut vericidir.

Diğer yandan katı oksit yakıt pillerinde (KOYP) açığa çıkan CO<sub>2</sub>'nin metanasyonu ile tekrardan CH<sub>4</sub> içeren sentez gaz elde edildiği tersine katı oksit hücre sistemleri, güç-gaz teknolojilerinde yenilikçi bir yaklaşım olarak yer almaktadır. Bu sistemlerde CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> yeraltı mağaralarda depolanır.

Rüzgar, solar veya diğer yenilenebilir enerji sistemleri ile desteklenerek ihtiyaç fazlası elektrik olması durumunda metanasyon ile sentez gaz üretilir ve depolanır.

Elektrik talebi oluşması durumunda bu sistem bir katı oksit yakıt pili gibi çalıştırılır. Tekrardan salınan CO<sub>2</sub> yeraltında depolanır. Sisteme ait çalışma diyagramı Şekil 4.1’de ifade edilmektedir.



Şekil 4.1: ReSOC tabanlı enerji depolama sisteminin şematik gösterimi [43].

## 4.2. Yakıt Pilli Araçlar

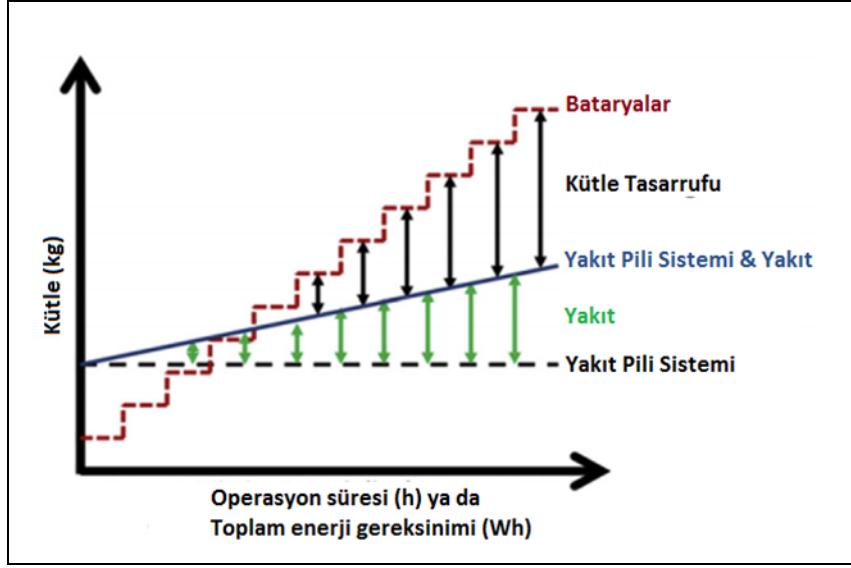
Kitlesel enerji üretiminin yanı sıra, sera gazı emisyonunun büyük bir kısmı ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı azaltılmalı ve daha yenilikçi teknolojilerle kullanımı çevre ile daha uyumlu hale getirilmelidir. Yakıt pilli araçlar bu açıdan önem taşımaktadır. Yakıt hücreleri otomobiller, otobüsler, trenler, bisikletler ve diğer ulaşım araçlarında kullanılabilir. Mobilite açısından yakıt pilleri, enerji yoğunluğu, basit tasarım, dayanıklılık, maliyet ve bataryalara karşı kütle avantajı nedeniyle iyi bir potansiyele sahiptir. Yakıt pilli araçlar yakıt ikmali yapmaksızın yüksek menzillere ulaşabilirler. Tablo 4.1’de günümüzdeki bazı yakıt pilli araçlar ve özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 4.1: Tipik yakıt pilli araçların menzilleri, yakıt tüketimi ve depolama koşulları [43].

| Tip      | Araç                           | Depolama Basıncı (bar) | Menzil (km) | Yakıt Tüketimi (kg/100 km) |
|----------|--------------------------------|------------------------|-------------|----------------------------|
| Otomobil | Daimler B-Klasse F-Cell        | 700                    | 380         | 0,97                       |
| Otomobil | Toyota FHCV-adv                | 700                    | 830         | 0,72                       |
| Otomobil | Honda FCX clarity              | 50                     | 460         | 0,87                       |
| Otobüs   | Daimler citaro FuelCell Hybrid | 350                    | >250        | 10-14                      |

### 4.3. Taşınabilir Güç Kaynağı

Taşınabilir güç kaynağı olarak yakıt hücreleri, bataryaların artan enerji talebi ile beraber artan kütle, uzun şarj süresi ve performans gereksinimleri karşılayamaması sebepleriyle alternatif olarak kullanılmaktadır. Bataryalar ile yakıt pilleri arasındaki en temel fark , yakıt pilinden elektrik eldesi için yakıtın sürekli olarak sisteme beslenmesidir. Taşınabilir güç uygulamalarına dizüstü bilgisayarlar, elektrikli aletler, cep telefonları , insansız hava araçları örnek olarak verilebilir. Çalışma süresi ve ya talep edilen enerji miktarı arttıkça, yakıt pili sistemi net kütle tasarrufu sağlamaktadır. Bunun nedeni yakıtın sahip olduğu özgül enerjidir. Şekil 4.2’de çalışma süresi ve toplam enerji gereksiniminin artması ile beraber kütlenin değişimi bataryalar ve yakıt pili/yakıt pili sistemi için gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Yakıt pili /sistemlerinin bataryalar ile operasyon süresi ve toplam kütle açısından kıyaslanması [44].

## 5. KATI OKSİT YAKIT PİLİ HİBRİT SİSTEMLER

Yüksek sıcaklıklarda çalışan yakıt pilleri atık ısının geri kazanımı için bir termodinamik çevrim ile desteklenebilir. Bu durumda elde edilen hibrit sistemin toplam enerji verimi %70'den daha fazla olabilir [45]. Bilhassa katı oksit yakıt pilleri çalışma sıcaklıkları yüksek olduğundan hibrit sistemler için cazip hale gelmektedir. Ayrıca egzoz emisyonlarının azaltılması, giderilmesinde ve işletme maliyetlerinin düşürmede fayda sağlamaktadır. Literatürde hibrit sistemler için çeşitli konfigürasyonlar çalışılmıştır.

Cheddie vd. [42] fosil yakıtlı bir KOYP/GT güç santrali önermiş ve bunun üzerine çalışmışlardır. Gaz türbini çevrimi tek başına %30 enerji verimliliğine sahipken, bir KOYP entegresi ile sistem verimi %66,2'ye yükselmiştir.

Calise vd. [46], [47] Siemens anot devridaim düzenlemesi ile dahili yakıt reformu içeren bir KOYP'ye entegre edilen bir gaz türbin çevrim sistemi önermişlerdir. Bu çalışmada, sistem kojeneratif ısı değiştiricileri içermektedir. S/C oranı ve yakıt kullanım verimi parametreleri sırasıyla 2 ve 0.85 değerleri esas alınmıştır. Önerilen sistemin net toplam gücü 1,5 MW ve elektriksel verimliliği %67,9 olarak hesaplanmıştır.

Song vd. [48] anot devridaimi içeren dolaylı dahili yakıt dönüşümlü bir KOYP-Hibrit sistem önermişlerdir. Yakıt dönüşümü sürecini tahrik etmek için bir ön dönüştürücü de kullanılmıştır. Ayrıca çevrimin sabit türbin çıkış sıcaklığında çalıştığı kabulünü yapmışlardır. Bu değer 840 °C olarak varsayılmıştır [45]. Basınç oranı 2,9 olarak belirlenmiştir. Hibrit sistemin net toplam gücü 220 kW ve elektriksel verimliliği %60,2 olarak hesaplanmıştır.

Arsalis [49] boru tipi Siemens-Westinghouse bir KOYP modeline, ısı geri kazanım buhar jeneratörü (HRSG) , buhar türbinini (ST) ve gaz türbini (GT) entegre sistem modeli önerilmiştir. Çalışmada önerilen sistemin elektriksel verimi %73,8 olarak hesaplanmıştır.

Zabihian ve Fung [50], çalışmalarında KOYP/GT sistemine iki farklı konfigürasyon önererek, birbirlerine olan avantajlarını araştırmışlardır. Birinci konfigürasyonda atık ısı geri kazanım buhar jeneratörü kullanılmıştır.

İkinci konfigürasyonda ise anot gazı devridaimi sağlanmıştır. Birinci ve ikinci konfigürasyonlara ait hibrit sistemlerin toplam verimlilikleri, sırasıyla % 73,9 ve 74,6 olarak elde edilmiştir .

Chan vd. [51] ‘nin çalışmasında metan-buhar reformasyonu desteklemek amacıyla atık ısı kazanı kullanılan bir KOYP/GT sistemi önerilmiştir. Yakıt pili çalışma sıcaklığı 1000 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca türbin giriş sıcaklığı 1200 °C olarak belirlenmiştir. 1,3 MW net güce sahip KOYP/GT hibrit sistemin elektriksel verimliliği %61,9 iken toplam verimlilik % 86,4 olarak elde edilmiştir.

Dicks vd. [52] ,bir KOYP’ nin yüksek elektriksel verime sahip olabileceğini bunun yanı sıra bir gaz türbini ekleyerek tüm sistemin verimliliğinin %70’e kadar artırılabilceğini ifade etmiştir.

Yi vd. [53] , boru tipi Siemens KOYP kullanılan, egzoz gazının 2 ayrı türbinde genişlediği bir hibrit sistem önermiştir. Türbin egzoz gazları ile ısıtılan atık ısı kazanından elde edilen buhar metan-buhar reformasyonu için kullanılmıştır. Yakıt kullanım verimliliği 0,85 olarak belirlenmiştir. Sistemin toplam gücü 630 kW ve elektriksel verimi %69 olarak hesaplanmıştır. Hava fazlalığı arttıkça sistem verimliliğinin azaldığı, türbin basınç oranı arttıkça sistem verimliliğinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir.

Özcan ve Dinçer [54] KOYP, Organik Rankine Çevrimi, güneş kolektörleri ve adsorbsiyonlu soğutucu esaslı bir trijenerasyon sistemi önermişlerdir. Sistemin toplam

enerji verimliliği %85,1 olarak hesaplanmıştır. İlave güneş kolektörlerinin toplam sistem verimliliğine katkısı %12-16 olarak ifade edilmiştir. Ek olarak sistem performansı KOYP tasarım parametrelerinin uygunluğuna bağlı olduğunu ve önemli ölçüde etkilediğini gösteren bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Böylelikle optimizasyon çalışması sonucu %5-8 sistem iyileşmesi sağlanabileceği ifade edilmiştir.

Jia vd. [55] üç farklı KOYP esaslı güç santrali konfigürasyonunu analiz ettiler. İlk konfigürasyon yalnızca KOYP yığınının, ikinci, KOYP' ye entegre bir gaz türbin çevrimini, üçüncü ise KOYP/GT/ST çevrimlerini içermektedir. Konfigürasyonların tamamında KOYP çalışma sıcaklığı 850 °C olarak belirlenmiştir. İlk yaklaşımda tesisin elektriksel ve toplam verimleri sırasıyla % 49 ve %77 olarak hesaplanmıştır. İkinci yaklaşımda sistemin elektriksel ve net toplam verimi sırasıyla %60,65 ve %79,84 olarak elde edilmiştir. Üçüncü konfigürasyonda ise sistem elektriksel verimi %60,4 olarak elde edilmiştir.

Bu sonuç diğer konfigürasyonlara nazaran düşük bir değerdir. Bu duruma iki açıklama getirilmiştir. İlk açıklama buhar çevrimi için gerekli olan buharın eldesi için gaz türbin egzoz sıcaklığının yüksek bir değerde tutulması gerekliliğidir. Bu sebeple gaz türbinin mekanik güç üretim kapasitesinin kısıtlandığı sonucuna ulaşılır. İkinci açıklama ise atık ısı kazanına giren soğuk akım ile gaz türbin egzoz sıcaklığı arasındaki farkın yüksek olmasından kaynaklanan tersinmezliktir.

## 6. KATI OKSİT YAKIT PİLİ- GAZ TÜRBİN SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

### 6.1. Kimyasal Tepkimelerin Termodinamiği

Yakıt pilleri elektrokimyasal süreçler dahilinde yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. Yakıt pili termodinamik süreçlerin tamamı burada verilecektir. Öncelikle tersinir sistemler için Gibbs serbest enerjisi şöyle ifade edilir;

$$G = H - TS \quad (6.1)$$

burada  $G$  Gibbs serbest enerjisini,  $H$  entalpiyi,  $S$  entropiyi ve  $T$  ise Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. Oluşum entalpisi ise şöyle ifade edilir;

$$H = U + PV \quad (6.2)$$

burada  $U$  iç enerjiyi,  $P$  basıncı ve  $V$  ise hacmi ifade etmektedir. Yukarıdaki ifadelere ek olarak iç enerji şöyle ifade edilir;

$$U = Q + W \quad (6.3)$$

Yukarıdaki ifadelerin materyal türevleri alındığında aşağıdaki Denklem (6.4), (6.5), (6.6) elde edilirler;

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (6.4)$$

$$dH = dU + PdV + VdP \quad (6.5)$$

$$dU = dQ + PdV \quad (6.6)$$

Bu denklemler beraber çözüldüğünde Gibbs serbest enerjisi Denklem (6.7)'deki gibi elde edilir;

$$dG = VdP - SdT \quad (6.7)$$

İzotermal sistemler için yukarıdaki denklem şu hali alır;

$$dG = VdP \quad (6.8)$$

İdeal gaz kanunu ile birleştirip giriş ve çıkış sınır şartlarını kullanarak integre eder isek Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki hale gelir;

$$G_i = G_o + nRT \ln \frac{P_i}{P_o} \quad (6.9)$$

Sabit sıcaklık ve basınç altında gerçekleşen bir rastgele bir kimyasal tepkime düşünürsek;



Burada  $a, b, m, n$  sırasıyla reaktantların ve ürünlerin stokiometrik katsayılarıdır. Sabit basınç ve sıcaklık koşullarında Gibbs serbest enerjisi değişimi Denklem (6.11) ile ifade edilebilir;

$$\Delta G = c\mu_C + d\mu_D - a\mu_A - b\mu_B \quad (6.11)$$

burada  $\mu$  türlerin kimyasal potansiyellerini temsil eder. Ayrıca herhangi bir maddenin kimyasal potansiyeli aşağıdaki eşitlik kullanılarak tanımlanabilir;

$$\mu = \mu_0 - RT \ln a \quad (6.12)$$

burada  $\mu$  türlerin kimyasal potansiyellerini,  $\mu_0$  ise standart kimyasal potansiyeli temsil etmektedir. Yukarıdaki ifadeden sonra Denklem (6.11)'den hareketle standart serbest Gibbs enerji değişimi Denklem (6.13)'deki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta G_0 = c\mu_{C_0} + d\mu_{D_0} - a\mu_{A_0} - b\mu_{B_0} \quad (6.13)$$

burada  $\mu_{C_0}$  ve  $\mu_{D_0}$  ürünlerin standart kimyasal potansiyellerini,  $\mu_{A_0}$  ve  $\mu_{B_0}$  ise reaktantların standart kimyasal potansiyellerini ifade etmektedir. Denklem (6.11) ve (6.13), Denklem (6.12)'de yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln \left( \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} \right) \quad (6.14)$$

Gibbs serbest enerjisi değişimi ifadesi Denklem (6.4) ile sabit sıcaklık ve basınç altında gerçekleşen tersinir bir tepkime için ifadesi Denklem (6.15)'deki gibi verilir;

$$dG = dW + PdV \quad (6.15)$$

Yakıt pili içerisinde herhangi bir genişleme meydana gelmediğinden hacim değişimi olmayacaktır. Böylelikle Denklem (6.15)'de hacim değişimine bağlı terim ihmal edilir. Akabinde Denklem (6.16)'yı elde ederiz;

$$dG = dW_e \quad (6.16)$$

burada  $dW_e$  elektriksel işi temsil etmektedir. Elektriksel iş, elektrotlar arasındaki devre üzerinden aktarılan elektrik yükler sebebiyle oluşur. Bu doğrudan pilin elektromotor kuvveti ile ilintilidir. Nitekim anottan katot elektrotına taşınan  $n$  adet elektron olduğunu düşünülürse elektriksel iş , akım ve elektriksel potansiyelin çarpımına eşittir. Böylece elektriksel iş şöyle formülize edilebilir;

$$W_e = nFE \quad (6.17)$$

burada  $E$  elektromotor kuvvetini,  $F$  Faraday sayısını (96485 coulomb/mol) ve  $n$  ise transfer edilen elektron miktarıdır. Denklem (6.17)'yi, Denklem (6.16)'da yerine yazarsak şöyle elde ederiz;

$$\Delta G = -nFE \quad (6.18)$$

Yukarıdaki eşitliğe benzer biçimde standart Gibbs serbest enerjisi değişimi içinde Denklem (6.19)'u yazabiliriz;

$$\Delta G_0 = -nFE_0 \quad (6.19)$$

burada  $E_0$  standart hücre potansiyelidir. Denklem (6.18) ve Denklem (6.19)'u kullanarak Denklem (6.14)'de yerine yazarsak şu formu elde ederiz;

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{a_C^c a_D^d}{a_A^a a_B^b} \right) \quad (6.20)$$

Denklem (6.20) literatürde Nernst eşitliği ya da nernst potansiyeli olarak anılır. Bu denklem ile hesaplanan nicelik Nernst voltajı olarak isimlendirilir. Tersinir hücre voltajını hesaplamakta kullanılır.

$$a = \frac{P}{P_0} \quad (6.21)$$

burada  $P$  maddenin kısmi basıncı ve  $P_0$  hücre voltajıdır. Denklem (6.21) kullanılarak literatürde sıklıkla kullanılan şu form elde edilir;

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \right) \quad (6.22)$$

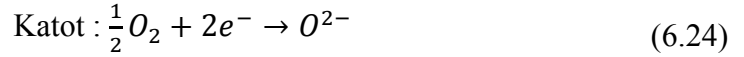
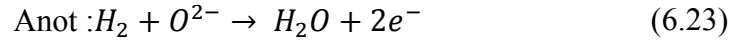
## 6.2. Yakıt Pilinde Elektrokimyasal Süreçler

Yakıt pilinde kimyasal tepkimeler sonucu salınan serbest elektronlar, elektrotlar arasında kurulan harici bir devre taşınır. Bu elektron transferi sonucu potansiyel fark meydana gelir. Bu arada elektrokimyasal süreçlerin tanımlanması gerekmektedir. Doğası gereği bu süreçler karmaşıktırlar. Birçok çalışmalar olmasına karşın bu karmaşıklık halen süre gelmektedir. Doğada yer alan diğer tüm sistemlerdeki gibi yakıt pilleri de tersinmezlikler içermektedir.

Bu tersinmezlikler birtakım kayıplara neden olmaktadır. Elektrokimyasal süreçler dahilinde gerçekleşen tersinmezlikler yakıt pili performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bölümde yakıt piline ait elektrokimyasal süreçler incelenecektir.

### 6.2.1. Nernst Potansiyeli

Yakıt pilinden akım talep edilmediği durumda, yakıt pilinin teorik maksimum çalışma voltajı açık çevrim voltajı olarak adlandırılır. Açık çevrim voltajı, yakıt pili içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonun termodinamiği ile saptanır. Akım talep edilmeye başlandıkça voltaj kayıpları nedeniyle operasyonel voltaj, açık çevrim voltajı değerinden daima küçüktür. Yakıt pili içerisinde gerçekleşen reaksiyon yakıt pili türüne ve yakıt türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada yalnızca hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonu göz önüne alınmıştır. Hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonu;



şeklinde ifade edilir. Ayrıca global tepkime ise;



ile gösterilir. Buradan açık çevrim voltajı Denklem (6.22) kullanılarak Denklem (6.26) olarak elde edilir;

$$E = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (6.26)$$

burada  $R$  evrensel gaz sabitini (8,314 J/molK ) temsil etmektedir.  $E_0$  ise standart potansiyeli ifade etmekle beraber Denklem (6.27) ile hesaplanır;

$$E_o = a + bT \quad (6.27)$$

Tablo 6.1: Standart potansiyel denkleminde ait  $a$  ve  $b$  sabitleri [56].

| $a$ [V] | $b$ [V/K]            |
|---------|----------------------|
| 1,272   | $2,76 \cdot 10^{-4}$ |

Hücre voltajı, Nernst potansiyelinden voltaj kayıplarının çıkarılması ( $\eta_k$ ) ile Denklem (6.28) kullanılarak bulunur.

$$\eta_{SOFC} = E - V_k \quad (6.28)$$

### 6.2.2. Voltaj Kayıpları

Voltaj kayıpları yakıt pili performansını olumsuz etkilemektedir. Yakıt pillerinde voltaj kayıpları akım yoğunluğuyla doğrudan ilintilidir. Voltaj kayıpları 3 ana başlıkta incelenebilir;

- Ohmik Kayıplar,
- Aktivasyon Kayıpları ,
- Konsantrasyon Kayıplar.

Yakıt pilinin performansını karakterize eden polarizasyon eğrisi Şekil 6.1’de verilmiştir.

#### 6.2.2.1. Ohmik Kayıplar

Ohmik kayıpların başlıca sebepleri hücre içerisindeki elektrolitin iyon transferinde gösterdiği güçlük ve elektrotların öz dirençleridir. Ancak bunlardan oldukça etkili olan elektrolitin iyonik direncidir. Ohmik kayıp yerel akım yoğunluğu olan  $i$  ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Genel anlamda Ohm kanunu kullanılarak Denklem (6.29)’deki gibi ifade edilebilir;

$$V_{ohm} = iR_{top} \quad (6.29)$$

burada  $R_{top}$  yakıt hücresi içerisinde kayıplara neden olan komponentlerin toplam direncini ifade eder. Toplam direnç;

$$R_{top} = \sum_j \rho_j w_j \quad (6.30)$$

$$R_{top} = \rho_e w_e + \rho_a w_a + \rho_c w_c \quad (6.31)$$

olarak ifade edilir. Denklem (6.3)'teki  $j$  indeksi katot, anot ve elektrolit gibi komponentleri temsil eder.  $\rho_j$  ilgili komponentin spesifik ohmik dirençleridir.  $w_j$  ise komponentlerin kalınlıklarıdır. Komponentler için spesifik ohmik direnç Denklem (6.32) ile hesaplanır;

$$\rho_j = \frac{w_j}{\sigma_j} \quad (6.32)$$

burada  $\sigma_j$  komponentlerin iyonik iletkenlikleridir ve;

$$\sigma_j = \frac{\sigma_{0,j}}{T} \exp\left(\frac{-E_j}{RT}\right) \quad (6.33)$$

şeklinde ifade edilir.  $E_j$  komponentlere ait iyon transferi için gerekli olan aktivasyon enerjisidir. İlgili değerler Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2: KOYP komponentlerine ait  $\sigma_{0,j}$  ve  $E_j$  değerleri [57].

| Komponentler | $\sigma_{0,j}$ | $E_j$  |
|--------------|----------------|--------|
| Anot         | $9,5.10^7$     | -1150  |
| Katot        | $4,2.10^7$     | -1200  |
| Elektrolit   | $3,34.10^4$    | -10300 |

#### 6.2.2.2. Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıpları, gerçekleşen kimyasal tepkimenin kinetiği ile doğrudan ilişkilidir. Kimyasal veya elektrokimyasal tepkimelerin başlayabilmesi için bir enerji

bariyeri aşılmalıdır. Bu fenomen hücre voltajından kayıp meydana getirir. Bununla beraber bu kayıplar hem anot hem de katot elektrot tarafında meydana gelir. Nitekim oksijenin indirgenme reaksiyonu kinetiği, hidrojenin oksidasyon reaksiyon kinetiğinden oldukça yavaştır ve fazlaca aktivasyon kaybı meydana gelir. Anot tarafında reaksiyon kinetiği görece katot tarafından hızlıdır.

### 6.2.2.3. Butler- Volmer Denklemi

Butler-Volmer eşitliği doğrudan aktivasyon kaybı ile alakalıdır. Butler-Volmer denklemi;

$$i = i_0 \left[ e^{-\frac{\alpha n F V_{act}}{RT}} - e^{-\frac{(1-\alpha) n F V_{act}}{RT}} \right] \quad (6.34)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (6.34)' de  $i_0$  akım yoğunluğu değişimini,  $V_{act}$  aktivasyon voltaj kaybını,  $\alpha$  ise transfer katsayısıdır. Ayrıca Denklem (6.34)' de ilk terim anodik, ikinci terim ise katodik reaksiyon ile ilintilidir. Akım yoğunluğu değişimi, elektrotta meydana gelen tepkimede elektron transfer hızını ifade eder.  $i_0$  ne denli yüksek olursa reaksiyon o denli hızlı gerçekleşir.

- Doğrusal Yaklaşım

Düşük aktivasyon voltaj kayıpları durumunda Butler-Volmer denklemi Taylor Serisi açılımı kullanılarak ;

$$i = i_0 \left[ \frac{n F V_{act}}{RT} + \underbrace{\frac{(1-2\alpha)}{2!} \left( \frac{n F V_{act}}{RT} \right)^2 + \frac{(1-2\alpha-2\alpha^2)}{3!} \left( \frac{n F V_{act}}{RT} \right)^3 + \dots}_{\alpha=0.5 \text{ için ihmal edilirler.}} \right] \quad (6.35)$$

şeklinde yazılır. Yüksek dereceli terimlerim ihmal edilmesi sonrasında aktivasyon kaybı şeklinde;

$$V_{act} = \frac{i R T}{i_0 n F} \quad (6.36)$$

doğrusal bir denklem olarak elde edilir. Bu ifade denge potansiyeli civarında kısıtlı bir aralıkta aktivasyon voltaj kaybı ile akım arasındaki doğrusal ilişkiyi gösterir.

- Tafel Denklemi

Yüksek aktivasyon kayıplarında Butler-Volmer eşitliğindeki iki terimden bir tanesi ihmal edilebilir. Böylelikle Denklem (6.34) şöyle yazılabilir;

$$i = i_0 e^{-\frac{\alpha n F V_{act}}{RT}} \quad (6.37)$$

Denklem (6.37) düzenlenirse Denklem 6.38 elde edilir.

$$V_{act} = \underbrace{\frac{RT}{\alpha n F} \ln i_0}_a + \underbrace{\frac{RT}{\alpha n F} \ln i}_b \quad (6.38)$$

Bu eşitlik genellikle Tafel Denklemi olarak ifade edilir.

- Simetrik Elektron Transferi

Aktivasyon kayıpları için genellikle simetrik elektron transferi kabulü tercih edilir. Nitekim Tafel grafikleriyle uyumluluk gösterir. Butler- Volmer eşitliği,  $\alpha = 0,5$  seçilerek hiperbolik sinüs fonksiyonu ile ifade edilebilir. Matematiksel olarak mümkündür.

$$i = 2i_0 \sinh\left(\frac{n F V_{act}}{RT}\right) \quad (6.39)$$

Düşük akım yoğunluklarında kayıplar fazla, yüksek akım yoğunluklarında ise azdır. Böylelikle aktivasyon kayıplarının düşük akımlarda önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Anodik ve katodik akım büyüklükleri simetrik elektron transferi kabulü altında aynıdır. Bu çalışmada da aktivasyon polarizasyonu için şu Denklem (6.39) düzenlenerek hem anot hem de katot için Denklem (6.40) yazılır.

$$V_{act,j} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1}\left(\frac{i}{i_{0,j}}\right) \quad (6.40)$$

Model için aktivasyon kayıpları Denklem (6.40) kullanılmak suretiyle modellenmiştir. Akım yoğunluğu değişimi değerleri anot ve katot elektrot için Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3: Anot ve katoda ait akım yoğunluğu değişimi ( $i_0$ ) değerleri [58].

| Komponentler | $i_0$ [ $A/m^2$ ] |
|--------------|-------------------|
| Anot         | 6500              |
| Katot        | 2500              |

#### 6.2.2.4. Konsantrasyon Kayıpları

Difüzyon kayıpları olarak ta bilinir. Hücre reaksiyonun devamı ve harici devrede yük elde etmek için gaz kanalları arasında taşımının sürekliliği gereklidir. Difüzyon kayıplarının belirleyicisi akım yoğunluğudur. Akım talep edilmeye başlandıkça yakıtın reaksiyon hızı difüzyon hızını aşmaktadır. Bu da hücre voltajından kayıp meydana getirmektedir. Böylece sonlu difüzyon kayıpları akım yoğunluğunu sınırlar. Anot ve katoda ait sınırlayıcı akım yoğunlukları [58];

$$i_{l,a} = \frac{2FP_{H_2}D_{a,eff}}{RTw_a} \quad (6.41)$$

$$i_{l,c} = \frac{4FP_{O_2}D_{c,eff}}{\left(\frac{P_0 - P_{O_2}}{P_0}\right)RTw_c} \quad (6.42)$$

sırasıyla Denklem (6.41) ve Denklem (6.42)’deki gibi yazılabilirler [59]. Burada  $P_{H_2}$  hidrojenin kısmi basıncı,  $P_{O_2}$  oksijenin kısmi basıncı,  $D_{a,eff}$  anoda ait efektif difüzyon katsayısı,  $D_{c,eff}$  katoda ait efektif difüzyon katsayısıdır. Efektif difüzyon elektrotların kalınlık ve sıcaklıklarına bağlıdır. Konsantrasyon kayıpları, sınırlayıcı akım yoğunlukları kullanılarak;

$$V_{con,a} = \frac{RT}{2F} \left[ \ln \left( 1 + \frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right) - \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{l,a}} \right) \right] \quad (6.43)$$

$$V_{con,c} = -\frac{RT}{4F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_{l,c}} \right) \quad (6.44)$$

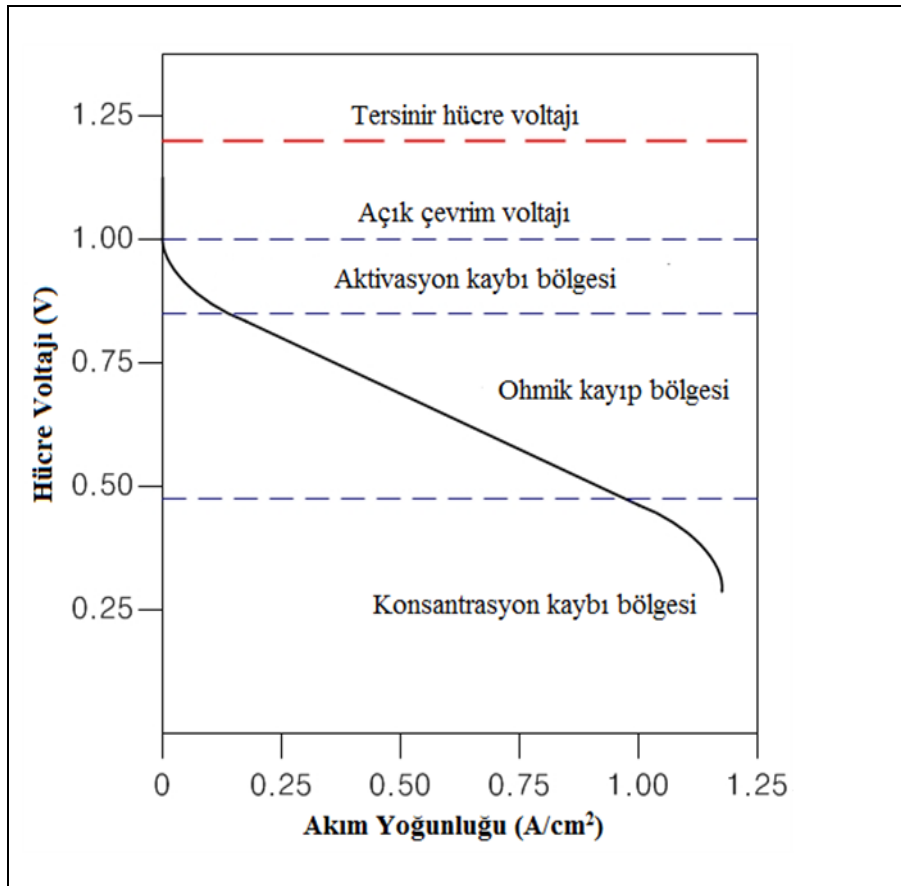
sırasıyla anot ve katot için yazılır [58]. Denklem (6.43)'de  $P_{H_2O}$  suyun kısmi basıncı,  $i_{l,a}$  anoda ait sınırlayıcı akım yoğunluğu,  $i_{l,c}$  katoda ait sınırlayıcı akım yoğunluğudur. Bu değerler Tablo 6.4' verilmiştir. Böylelikle toplam konsantrasyon kaybı;

$$V_{con,t} = V_{con,a} + V_{con,c} \quad (6.45)$$

olarak Denklem (6.45)'deki gibi bulunur.

Tablo 6.4: Anot ve katoda ait efektif difüzyon sabitleri ( $D_{eff}$ ) [58].

| Komponentler | $D_{eff} [m^2/s]$    |
|--------------|----------------------|
| Anot         | $0,2 \cdot 10^{-4}$  |
| Katot        | $0,05 \cdot 10^{-4}$ |



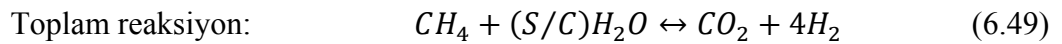
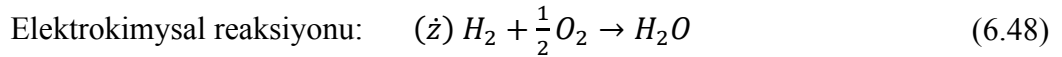
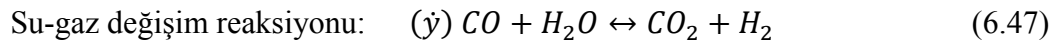
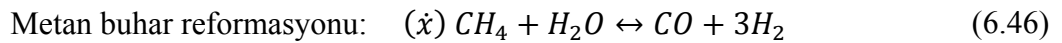
Şekil 6.1: Bir yakıt hücresine ait polarizasyon eğrisi [60].

### 6.3. Yakıt Reformasyonu

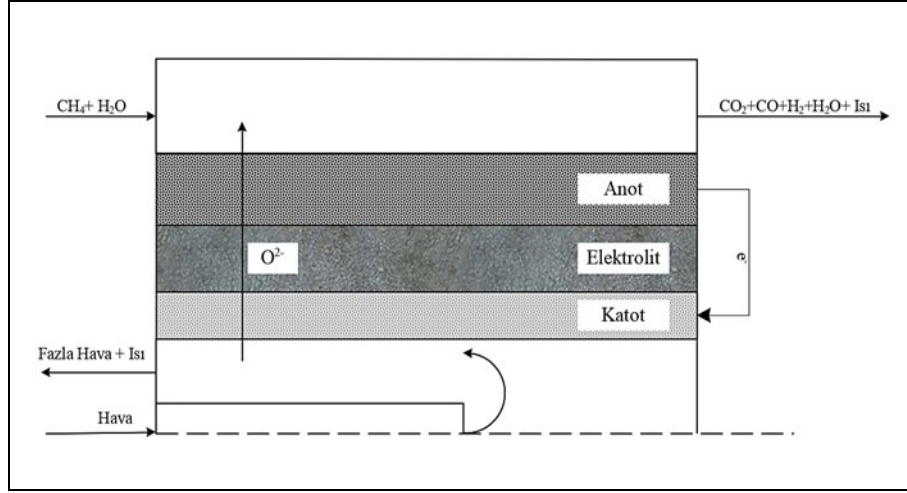
Katı oksit yakıt pillerinde yakıt esnekliği önemli avantajları arasındadır. Metan ( $CH_4$ ), biyogaz, doğalgaz (NG), etanol ( $C_2H_5OH$ ), kaya gazı, amonyak ( $NH_3$ ) ve hidrokarbonlar gibi yakıtlar kullanılabilir. Hidrokarbonların su buharı ile reformasyonu ile hidrojen elde edilir. Ancak bir dizi kimyasal reaksiyon sonucu hidrojen elde edilebilmektedir. Metan literatürde sıklıkla yakıt olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada da yakıt olarak metan gazı kullanılmıştır. Ancak metan bir takım dönüşüm süreçlerinden geçmelidir. Bunlar literatürde birçok şekilde yapılabilmektedir. Bunlar;

- Harici Dönüşüm,
- Dahili Dönüşüm,
  - Doğrudan,
  - Dolaylı,

olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmada doğrudan dahili reformer modellenmiştir. Doğrudan dahili dönüşümde metan buhar reformasyonunu takiben su-gaz değişim reaksiyonu, yakıtın elektrokimyasal reaksiyonu sırasıyla hücre içerisinde gerçekleşir. İlgili denklemler Denklem (6.46), (6.47), (6.48) ve (6.49)'da verilmiştir.



Öncelikle yakıt pili çıkışında türlerin dengedeki gaz kompozisyonu hesap edilmelidir. Şekil 6.2'de görüleceği üzere her bir giriş çıkış noktası işaretlenmiş olup hesaplamalar molar debi üzerinden ifade edilmiştir.



Şekil 6.2: Boru tipi KOYP'nin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

Denge halindeki gaz bileşeni şöyle yazılabilir;

$$\dot{n}_i^s = \dot{n}_o^s + \dot{d}_s \quad (6.50)$$

$\dot{n}_i^s$  KOYP' ye giren türün molar debisi ,  $\dot{n}_o^s$  KOYP' den çıkan türün molar debisi,  $\dot{d}_s$  ise türlerin değişim oranlarıdır. Anot Tarafı için uygulanan Denklem (6.50) özet olarak Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.5 : Anot gazları için kütle dengesi.

| Türler  | Anot Taraf Reaksiyonları |            |            |            | Çıkış                                 |
|---------|--------------------------|------------|------------|------------|---------------------------------------|
|         | Giriş                    | MSR        | WGSR       | CR         |                                       |
| $CH_4$  | $\dot{n}_{f,i}^{CH_4}$   | $-\dot{x}$ | -          | -          | $\dot{n}_{f,i}^{CH_4} - \dot{x}$      |
| $H_2O$  | $(S/C)$                  | $-\dot{x}$ | $-\dot{y}$ | $\dot{z}$  | $(S/C) - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z}$ |
| $CO$    | -                        | $\dot{x}$  | $-\dot{y}$ | -          | $\dot{x} - \dot{y}$                   |
| $CO_2$  | -                        | -          | $\dot{y}$  | -          | $\dot{y}$                             |
| $H_2$   | -                        | $3\dot{x}$ | $\dot{y}$  | $-\dot{z}$ | $3\dot{x} + \dot{y} - \dot{z}$        |
| Denge = |                          |            |            |            | $[1 + (S/C)] + 2\dot{x}$              |

Tablo 6.5'deki bilgiler kullanılarak denge halinde KOYP yakıt kanalı çıkışındaki türlere ait mol kesirleri Denklem (6.51), (6.52), (6.53), (6.54) ve (6.55)'deki gibi yazılır.

$$X_{eq}^{CH_4} = \frac{\dot{n}_{f,i}^{CH_4} - \dot{x}}{[1 + (S/C)] + 2\dot{x}} \quad (6.51)$$

$$X_{eq}^{H_2O} = \frac{(S/C) - \dot{x} - \dot{y} + \dot{z}}{[1 + (S/C)] + 2\dot{x}} \quad (6.52)$$

$$X_{eq}^{CO} = \frac{\dot{x} - \dot{y}}{[1 + (S/C)] + 2\dot{x}} \quad (6.53)$$

$$X_{eq}^{CO_2} = \frac{\dot{y}}{[1 + (S/C)] + 2\dot{x}} \quad (6.54)$$

$$X_{eq}^{H_2} = \frac{\dot{x} + \dot{y} - \dot{z}}{[1 + (S/C)] + 2\dot{x}} \quad (6.55)$$

$X_{eq}^{CH_4}$ ,  $X_{eq}^{H_2O}$ ,  $X_{eq}^{CO}$ ,  $X_{eq}^{CO_2}$ ,  $X_{eq}^{H_2}$  sırasıyla metan gazı, su buharı, karbomonoksit, karbondioksit ve hidrojen gazlarına air mol kesirleridir. Benzer şekilde katot tarafında Denklem (6.50) uygulanır ve özet olarak Tablo 6.6 elde edilir.

Tablo 6.6: Katot gazları için kütle dengesi.

| Türler | Katot Tarafı Reaksiyonlar |             | Çıkış                          |
|--------|---------------------------|-------------|--------------------------------|
|        | Giriş                     | CR          |                                |
| $O_2$  | $\dot{z}/2U_h$            | $\dot{z}/2$ | $\dot{z}/2U_h - \dot{z}/2$     |
| $N_2$  | $79\dot{z}/42U_h$         | -           | $79\dot{z}/42U_h$              |
| Denge= |                           |             | $100\dot{z}/42U_h - \dot{z}/2$ |

Tablo 6.6'deki bilgiler kullanılarak denge halinde KOYP hava kanalı çıkışındaki türlere ait mol kesirleri şöyle yazılabilir;

$$X_{eq}^{O_2} = \frac{1 - U_h}{100/21 - U_h} \quad (6.56)$$

$$X_{eq}^{N_2} = 1 - X_{eq}^{O_2} \quad (6.57)$$

burada  $X_{eq}^{O_2}$   $O_2$ 'nin mol kesri,  $X_{eq}^{N_2}$   $N_2$ 'nin mol kesri,  $U_h$  ise hava kullanım oranıdır.  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  ve  $\dot{z}$  reaksiyon oranları bilinmemektedir. Bu nedenle reaksiyon oranlarının tespiti için kimyasal sabitler için 2 ve  $H_2$ 'nin elektrokimyasal reaksiyonu için 1 adet denklemin beraber çözülmesi gerekmektedir. Kimyasal denge sabitleri sıcaklığın bir fonksiyonudur. Gibbs serbest enerjisinin minimize edildiği klasik yöntemle çözülebileceği gibi denge sabiti katsayıları kullanarak çözülebilir. Kimyasal denge sabitleri her iki kimyasal reaksiyon için şöyle ifade edilir;

$$K_{P,MSR} = \frac{(X_{eq}^{H_2})^3 (X_{eq}^{CO})}{(X_{eq}^{CH_4}) (X_{eq}^{H_2O})} \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \quad (6.58)$$

$$K_{p,WGSR} = \frac{(X_{eq}^{CO_2}) (X_{eq}^{H_2})}{(X_{eq}^{H_2O}) (X_{eq}^{CO})} \quad (6.59)$$

burada  $K_{P,MSR}$  metan-buhar reform reaksiyonuna ait denge sabiti,  $K_{p,WGSR}$  su-gaz değişim reaksiyonuna ait denge sabitidir. Denge sabitleri Denklem (6.60) ile hesaplanabilir.

$$\log K_{p,j} = A_j T^4 + B_j T^3 + C_j T^2 + D_j T + E_j \quad (6.60)$$

burada  $j$  indeksi metan- buhar reform reaksiyonunu ve su-gaz değişim reaksiyonunu temsil eder.  $A_j$  ve diğer sabitler Tablo 6.7'de özetlenmiştir.

Tablo 6.7 : Metan-buhar reformasyonu ve su-gaz değişim reaksiyonlarına ait sabitler [61].

| Sabitler | MSR                              | WGSR                              |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>A</b> | $-2,631212 \cdot 10^{-11}$       | $5,47301 \cdot 10^{-12}$          |
| <b>B</b> | $1,2406499249 \cdot 10^{-7}$     | $-2,574790444 \cdot 10^{-8}$      |
| <b>C</b> | $-2,2523227562279 \cdot 10^{-4}$ | $4,637424146458 \cdot 10^{-5}$    |
| <b>D</b> | $1.95027891237256 \cdot 10^{-1}$ | $-3,91500691429325 \cdot 10^{-2}$ |
| <b>E</b> | $-66,1394885948301$              | $13,2097235346611$                |

Kimyasal reaksiyonlara ek olarak hesaplanması gereken hidrojenin reaksiyon oranı ise Faraday kanunu kullanılarak;

$$\dot{z} = \frac{I}{2F} = \frac{iA_h}{2F} \quad (6.60)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $I$  akımı,  $i$  akım yoğunluğunu,  $A_h$  hücre aktif alanını,  $F$  Faraday sabitini (96485 coulomb/mol) temsil etmektedir.

## 6.4. Gaz Türbin Çevrimi Prensipleri

### 6.4.1. Gaz Türbini

Gaz türbini sistemde ikincil güç üretimi için kullanılır. Yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı türbine gönderilir. Egzoz gazı türbin içinde genişler ve güç üretilir. Bu güç birkaç kW tan MW değişen aralıkta güç sağlanabilir. Gaz türbini doğrudan yakıt pilene entegre edilebileceği gibi dolaylı olarak entegre edilebilir. Türbin politropik dönüşüm esasına göre modellenmiştir. Türbin çıkış sıcaklığı;

$$T_c = T_g (1/r_e)^{\frac{(k_e-1)}{k_e \cdot \eta_t}} \quad (6.61)$$

ile hesaplanır. Burada  $T_g$  türbin çıkış sıcaklığı,  $T_c$  türbin giriş sıcaklığı,  $r_e$  genişleme oranı,  $\eta_t$  türbinin politropik verimi ve  $k_e$  egzoz gazının spesifik ısı oranıdır. Türbin verimi ise Denklem (6.62) ile ifade edilir.

$$\eta_t = \left( \frac{1 - (1/r_e)^{\frac{(k_e-1)}{k_e \eta_t}}}{1 - (1/r_e)^{\frac{(k_e-1)}{k_e}}} \right) \quad (6.62)$$

Gaz türbininde üretilen güç ;

$$P_t = \eta_t \dot{m}_e dH_e \quad (6.63)$$

kullanarak hesaplanır. Denklem (6.63)'de  $\dot{m}_e$  gaz türbinine giren egzoz gazının debisi,  $dH_e$  ise egzoz gazına ait entalpi değişimidir. Türbinden elde edilen net şaft gücü Denklem (6.64)'deki gibi yazılabilir.

$$P_{net} = P_t - P_c \quad (6.64)$$

#### 6.4.2. Kompresör

Ortam koşullarında alınan hava kompresör vasıtasıyla sıkıştırılır ve bir ısı değiştiricide çalışma parametrelerince belirlenmiş sıcaklığa kadar ısıtılır. Kullanılan kompresör politropik süreç esasına bağlı çalışır. Hava giriş sıcaklığı ve sıkıştırma oranı bilinen girdiler olduğundan çıkış sıcaklığı;

$$T_c = T_g (r_c)^{\frac{(k_a-1)}{k_a \eta_c}} \quad (6.65)$$

ile hesaplanır. Burada  $\eta_c$  kompresörün politropik verimi ve  $k_a$  havanın spesifik ısı oranı,  $r_c$  kompresörün sıkıştırma oranıdır. Buradan hareketle yine politropik dönüşüm esas olmak kaydıyla kompresörün verimi;

$$\eta_c = \left( \frac{1 - (r_c)^{\frac{(k_a-1)}{k_a}}}{1 - (r_c)^{\frac{(k_a-1)}{k_a \eta_c}}} \right) \quad (6.66)$$

ile hesaplanır. Kompresörün güç tüketimi ;

$$P_c = \eta_c \dot{m}_a dH_a \quad (6.67)$$

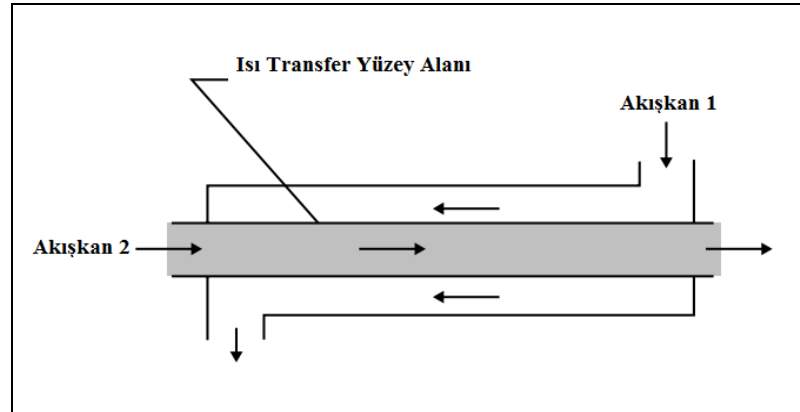
kullanılarak hesaplanır. Denklem (6.67)'de  $\dot{m}_a$  yakıt piline giren havanın kütledebisi,  $dH_a$  ise havaya ait entalpi değişimidir.

### 6.4.3. Isı Değiştirici

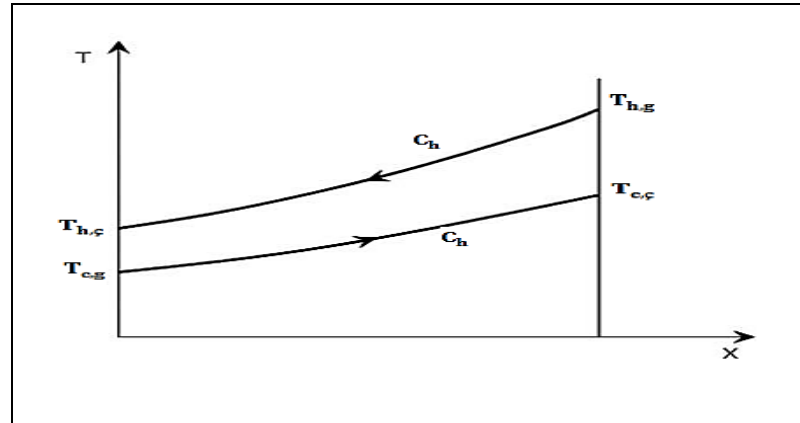
Isı değiştiriciler, sıcaklıkları farklı akışkanlar arasında ısı transfer etmek için kullanılırlar. KOYP/GT sistemlerde egzoz gazının sahip olduğu atık ısıyı havanın ısıtılmasında kullanmak amacıyla tercih edilirler. Çeşitli branşlarda hizmet verebilecek bu cihazlar birkaç konfigürasyon kullanılarak tasarlanırlar. Bu konfigürasyonlar;

- Paralel Akışlı Isı Değiştiriciler,
- Zıt Akışlı Isı Değiştiriciler,
- Çapraz Akışlı Isı Değiştiricilerdir.

Bu çalışmada zıt akışlı bir ısı değiştirici kullanılmıştır. şekil 6.3'te ve şekil 6.4'te ısı değiştiricinin prensip şeması ve sıcaklık profili sırasıyla verilmiştir.



şekil 6.3. Zıt akışlı ısı değiştiricisi şeması [62].



şekil 6.4. Zıt akışlı ısı değiştiricisine ait sıcaklık profili [63].

Isı değiştirici  $\epsilon$ - $NTU$  metodu esas alınarak modellenmiştir. Bu metotta sıcaklıkları farklı olan 2 akışkan için sıcak olandan soğuk olana transfer edilebilecek maksimum ısı miktarı;

$$Q_{maks} = C_{min} (T_{hg} - T_{cg}) \quad (6.68)$$

ile hesaplanır. Denklem (6.68)'de  $C_{min}$  değeri minimum ısıl kapasite debisi,  $T_{hg}$  sıcak akışkanın giriş sıcaklığı ve  $T_{cg}$  ise soğuk akışkanın giriş sıcaklığıdır.  $C_{min}$  değeri sıcak ve soğuk akışkana ait olan ısıl kapasite debilerinden nicelik olarak küçük olanıdır. Isıl kapasite debisi ;

$$C_j = \dot{m}_j C_{p_j} \quad (6.69)$$

ile hesaplanır. Denklem (6.69)'da  $j$  indeksi sıcak ve soğuk akışkanı temsil etmektedir.  $C_j$  ısıl kapasite debisini,  $\dot{m}_j$  kütleel debiyi,  $C_{p_j}$  ise özgül ısı değeridir. Isı değiştiricisinin etkenlik değeri, gerçek ısı geçişinin meydana gelebilecek en yüksek ısı geçişine oranı olarak tanımlanabilir. Etkenlik değeri;

$$\epsilon \equiv \frac{Q}{Q_{maks}} \quad (6.70)$$

ile hesaplanabilir. Her bir ısı değiştiricisi için etkenlik değeri ;

$$\epsilon = f(NTU, C^*) \quad (6.71)$$

geçiş birim sayısı ile ısıl kapasite debileri oranının bir fonksiyonu olarak denklem (6.71)'deki gibi ifade edilebilir. Denklem (6.71)'de  $NTU$  birim geçiş sayısını,  $C^*$  ise ısıl kapasite debileri oranıdır. Isıl kapasite debileri oranı;

$$C^* \equiv \frac{C_{min}}{C_{maks}} \quad (6.72)$$

bağıntısı ile verilebilir. Birim geçiş sayısı;

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{min}} \quad (6.73)$$

bağıntısı ile yazılabilir. Burada  $U$  toplam ısı geçiş katsayısı,  $A$  ısı geçiş alanıdır. Etkenlik bağıntıları kullanılarak  $\epsilon$  değeri  $C^*$ 'nin farklı durumları için;

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C^*)]}{1 - C^*[\exp - NTU(1 - C^*)]} \quad (C^* < 1) \quad (6.74)$$

$$\epsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (C^* = 1) \quad (6.75)$$

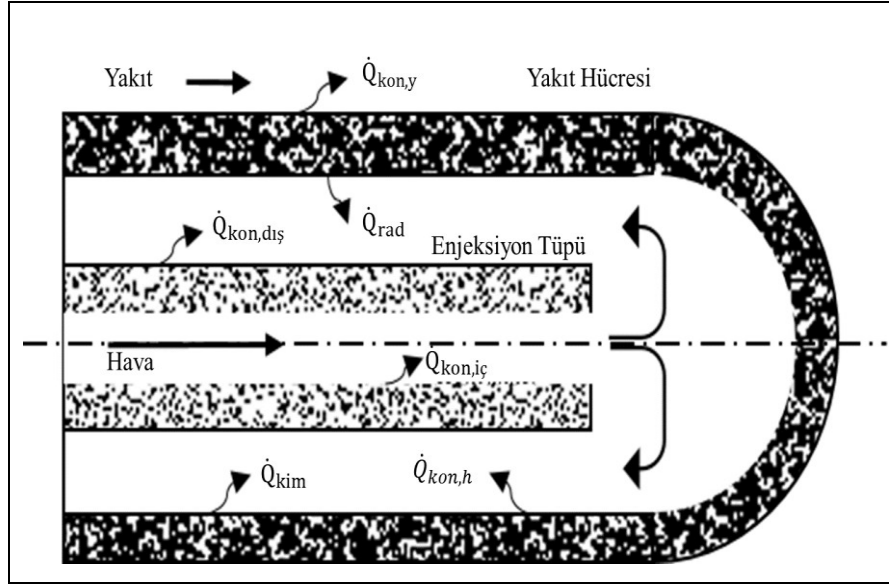
bağıntıları ile hesaplanır.

## 6.5. Katı Oksit Yakıt Pili Enerji Dengesi

Hücre sıcaklığı, elektrokimyasal reaksiyonlar, yakıt hücresi içerisinde komponentler arasındaki ısı transfer olayları, yakıt reformasyonu vb. bağlı olarak bir dinamik termal model kullanılarak saptanabilir. Reaktantlar hücre boyunca taşınır ve tepkimeler sonucu enerji açığa çıkarırlar. KOYP içerisinde taşınım ve ışıyım ile ısı transferi yollarının tamamı dinamik hücre sıcaklığına katkıda bulunur. Gibbs serbest enerjisi, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi elektrik enerjisine dönüştürülür ve oluşum entalpisinin denge durumuna göre ısı açığa çıkar. Hücre sıcaklığı, artan ısı miktarınca yükseldiğinden, yakıt ve hava kanallarına ısı transferi gerçekleşir. Yakıt ve hava kanalları akımlarının sıcaklıkları ısı transfer süreçlerini ve buna bağlı olarak hücre sıcaklığını etkiler. Ayrıca hücre yakıt reformu için gerekli ısıyı sağlar.

KOYP dinamiğinde sıcaklığın etkili bir parametre olduğu görülmektedir. Hücreyi etkileyen sıcaklıklar iki farklı grupta incelenebilir. Bunlar gaz fazı sıcaklıkları ve katı faz sıcaklıklarıdır. Gaz fazı sıcaklıkları, yük değişimine katı faz sıcaklık kadar önemli ölçüde yanıt vermez. Tepki hızları çok düşük ve özgül ısıları görece az olduğundan katı faz sıcaklıkları modellenmiştir. Gaz faz sıcaklıklarının yakıt pili çıkışında katı faz sıcaklıkları ile dengede olduğu kabul edilmiştir.

Yakıt hücreni bir kontrol hacmi olarak düşünüldüğünde gerçekleşen ısı transferi Şekil 6.5’ te gösterilmektedir.



Şekil 6.5 : Boru tipi KOYP’de ısı geçişinin şematik gösterimi.

Enerjinin korunumu prensibi kullanılarak, kontrol hacmi içerisindeki anot tüpü için iç enerji değişimi ;

$$m_{hücre} C_{p,hücre} \frac{dT_{hücre}}{dt} = \dot{Q}_{kim} - \dot{Q}_{ele} - \dot{Q}_{kon,y} - \dot{Q}_{kon,h} - \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{ref} \quad (6.76)$$

zamana bağlı bir diferansiyel denklem olarak yazılır. Aynı şekilde enjeksiyon tüpü için Denklem (6.77) ‘deki gibi yazılır.

$$m_{enj} C_{p,enj} \frac{dT_{enj}}{dt} = \dot{Q}_{rad} - \dot{Q}_{kon,iç} - \dot{Q}_{kon,dış} \quad (6.77)$$

Katı oksit yakıt pilinin elektriksel güç çıkışı ( $\dot{Q}_{ele}$ ) Denklem (6.78) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{ele} = V_{out} I \quad (6.78)$$

burada  $V_{out}$  hücre voltajı çıkış değeri ,  $I$  ise akım değeridir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşen ısı transferi ( $\dot{Q}_{kim}$ ) Denklem (6.79) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{kim} = \frac{I}{2F} H_{H_2} + \frac{I}{4F} H_{O_2} + \frac{I}{2F} H_{H_2O} \quad (6.79)$$

burada  $H_{H_2}$ ,  $H_{O_2}$  ve  $H_{H_2O}$  sırasıyla hidrojen, oksijen ve suyun entalpi değerleridir. İlave olarak yakıt ve havaya doğru gerçekleşen ısı transferi ( $\dot{Q}_{kon,h}$ ,  $\dot{Q}_{kon,y}$ ) ise sırasıyla Denklem (6.80) ve (6.81) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{kon,h} = h_{hava} A_{h,iç} (T_{hücre} - T_{hava}) \quad (6.80)$$

$$\dot{Q}_{kon,y} = h_{yakıt} A_{h,dış} (T_{hücre} - T_{yakıt}) \quad (6.81)$$

burada  $h_{hücre}$  ve  $h_{hava}$  sırasıyla hava ve yakıta ait ısı transfer katsayıları iken  $A_{h,iç}$  ve  $A_{h,dış}$  hücrenin iç ve dış yüzeylerine ait yüzey alanlarını temsil etmektedir. Yakıt hücresi içerisinde radyasyon yolu ile gerçekleşen ısı transferi ( $\dot{Q}_{rad}$ ) Denklem (6.82) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_h (T_{hücre}^4 - T_{enj}^4) \quad (6.82)$$

burada  $\varepsilon$  yüzey faktörü,  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabiti,  $A_h$  ise hücrenin aktif yüzey alanıdır. Yakıtın doğrudan hücre içerisinde reformasyonu sonucu hücreden soğurulan ısı miktarı ( $\dot{Q}_{reform}$ ) ise Denklem (6.83) ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{reform} = r_{rmsr} \Delta H_{ref} \quad (6.83)$$

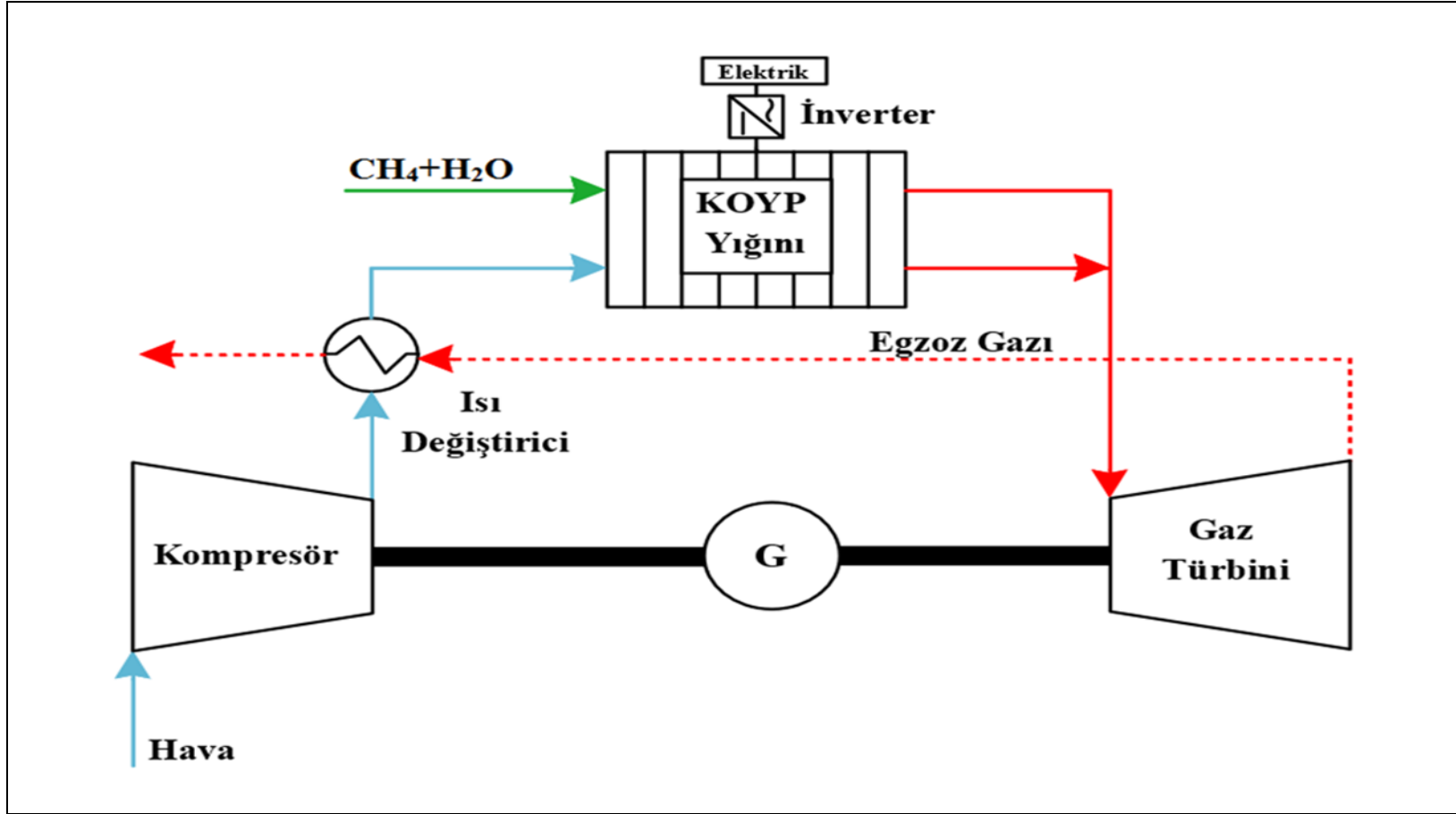
burada  $r_{rmsr}$  yakıt reformasyon oranı ve  $\Delta H_{ref}$  ise reaksiyon ısısıdır.

## 7. BULGULAR ve YORUMLAR

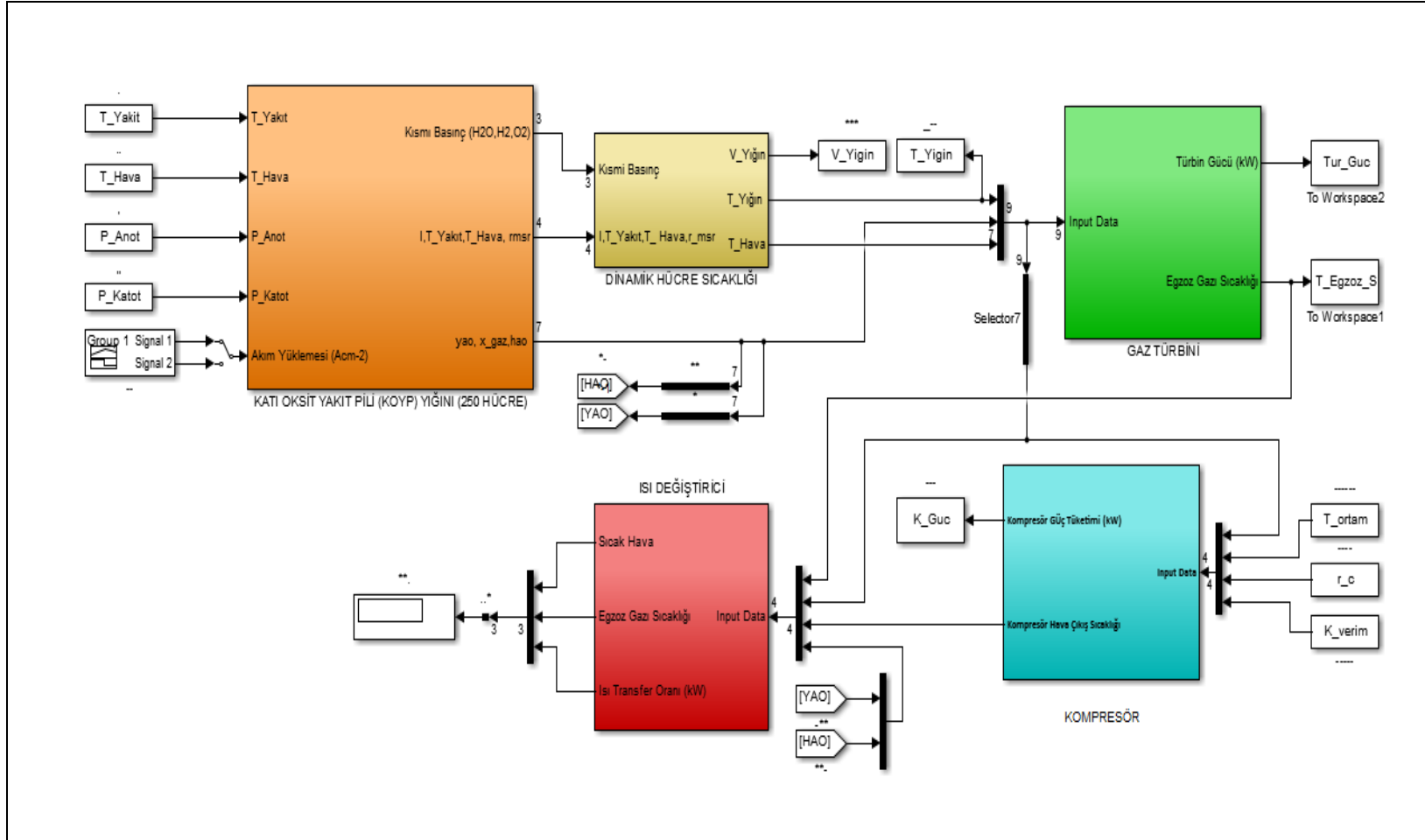
Bu çalışmada KOYP/GT hibrit sisteminin çeşitli yük koşulları altındaki davranışını kestirmek için MATLAB/Simulink ortamında dinamik bir model geliştirilmiştir. Akabinde KOYP dinamik modelinin verileri Tao v.d. deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hibrit sistem içinde sonuçlar literatürde yer alan benzer sistemler ile karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında oluşturulan KOYP/GT hibrit sistemin prensip şeması Şekil 7.1’de verilmiştir. Ek olarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan model Şekil 7.2’de verilmiştir. Sistem bir KOYP yığını, gaz türbini, ısı değiştirici ve hava kompresöründen meydana gelmektedir.

Tasarlanan sistemde yakıt olarak metan ( $CH_4$ ) kullanılmaktadır. İlk olarak, yakıt anota beslenir. Eş zamanlı olarak kompresörde sıkıştırılan hava da ısı eşanjöründen geçerek katoda beslenir. Yakıt bu anot kanalında doğrudan dahili dönüşüm ile reform edilir. Elde edilen  $H_2$  elektrokimsyal süreç dahilinde elektrik üretimi için kullanılır. Akabinde anot ve katot gazları gaz türbinine gönderilir. Burada genleşen karışım gazdan bir shaft gücü elde edilir. Egzoz gazı buradan ısı eşanjörüne, kompresörde şartlandırılmış havanın ısıtılması için gönderilir. Ayrıca anot malzeme olarak Ni-YSZ, katot malzeme olarak LSM ve elektrolit için YSZ kullanılmıştır. Bu çalışmada birtakım kabuller altında gerçekleştirilmiştir. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır;

- Sistem 0-D yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir.
- Gaz türlerinin ideal gaz olarak davrandığı kabul edilmiştir.
- KOYP’nin tüm bileşenleri adyabatik olarak kabul edilmiştir.
- CO’nun elektrokimyasal reaksiyonu , su-gaz değişim reaksiyonun reaksiyon hızından 3-5 kat daha az olması sebebiyle ihmal edilmiştir.
- KOYP yığını hava ve yakıt kanallarında basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Yakıt ve hava sıcaklığı sabittir.
- Hava kullanım verimi ( $U_h$ ) sabittir.



Şekil 7.1: Tasarlanan KOYP/GT hibrit sistemin çalışma prensip şeması.



Şekil 7.2: KOYP/GT hibrit sisteminin MATLAB/Simulink modeli.

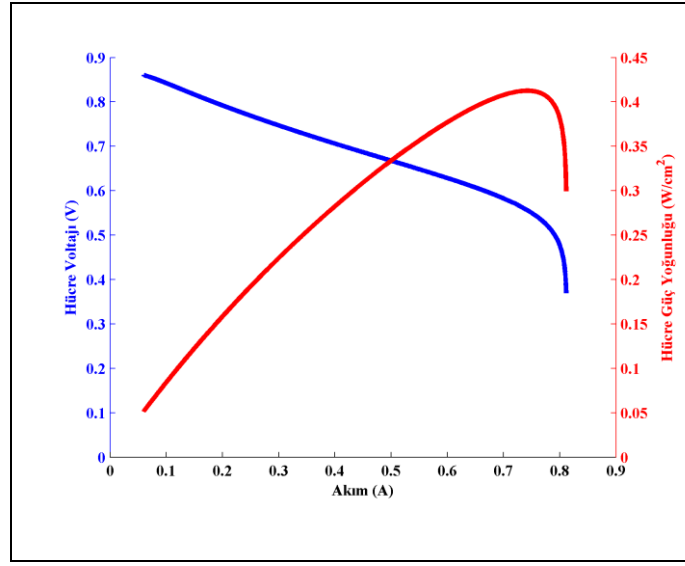
Tablo 7.1: KOYP/GT hibrit sisteme ait operasyonel veriler.

| Parametre                      | Sembol       | Değer | Birim          | Referans |
|--------------------------------|--------------|-------|----------------|----------|
| Ortam sıcaklığı                | $T_o$        | 25    | °C             | Kabul    |
| Ortam basıncı                  | $P_o$        | 1     | bar            | Kabul    |
| Buhar-karbon oranı             | $S/C$        | 2,5   | -              | Kabul    |
| Yakıt sıcaklığı                | $T_y$        | 1073  | K              | Kabul    |
| Hava giriş sıcaklığı (KOYP)    | $T_h$        | 873   | K              | Kabul    |
| Hücre dış yarıçapı             | $r_{h,d}$    | 11    | mm             | [56]     |
| Hücre iç yarıçapı              | $r_{h,i}$    | 8,66  | mm             | [56]     |
| Hücre uzunluğu                 | $L$          | 150   | cm             | [56]     |
| Enjektör dış yarıçapı          | $r_{e,d}$    | 6     | mm             | [56]     |
| Enjektör iç yarıçapı           | $r_{e,i}$    | 5     | mm             | [56]     |
| Metan alt ısı değeri           | $LHV_{CH_4}$ | 50    | MJ/kg          | [64]     |
| Anot elektrot kalınlığı        | $w_a$        | 500   | μm             | [59]     |
| Katot elektrot kalınlığı       | $w_k$        | 50    | μm             | [59]     |
| Elektrolit kalınlığı           | $w_e$        | 10    | μm             | [59]     |
| Hava kullanım verimi           | $U_h$        | 0,25  | -              | Kabul    |
| İnvertör verimi                | $\eta_i$     | 1     | -              | Kabul    |
| Hücre aktif alanı              | $A_h$        | 0,1   | m <sup>2</sup> | [58]     |
| Hücre sayısı                   | $N$          | 250   | adet           | Kabul    |
| Gaz türbin verimi (Politropik) | $\eta_t$     | 0,95  | -              | Kabul    |
| Kompressör verimi (Politropik) | $\eta_k$     | 0,90  | -              | Kabul    |
| Kompressör sıkıştırma oranı    | $r_c$        | 3     | -              | Kabul    |
| Türbin genişleme oranı         | $r_e$        | 3     | -              | Kabul    |
| Toplam ısı transfer katsayısı  | $UA$         | 3000  | W/K            | Kabul    |

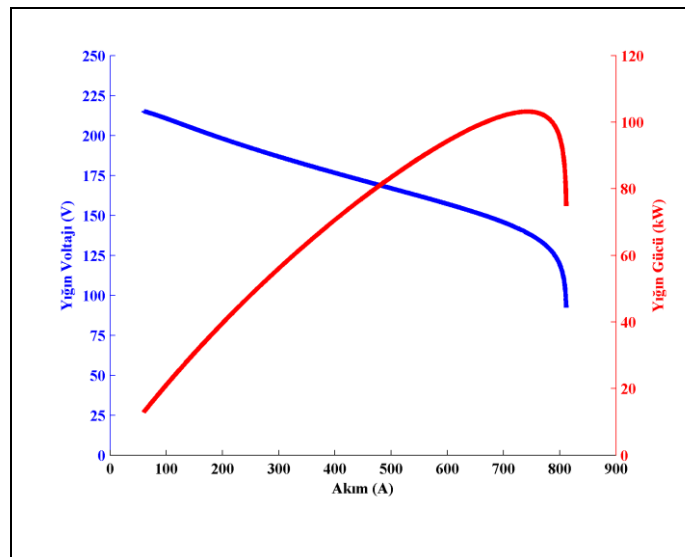
Bu bölümde önerilen modele ait performans verileri verilecektir. KOYP yığını ve KOYP hibrit sistemin sonuçları üç parametre ile elde edilecektir. Bu parametreler;

- Yakıt kullanım verimi,
- Değişken akım yüklemesi,
- KOYP çalışma basıncıdır.

Öncelikle KOYP hücre modeli deneysel datalar ile benzer parametreler üzerinden karşılaştırılacaktır. Yakıt piline ait performans eğrileri Şekil 7.3’de verilmektedir. Sonuçlar ise Tablo 7.2’de alınan referans ile mukayese edilecektir. Ayrıca 250 hücreden oluşan KOYP yığınınına ait performans eğrileride Şekil 7.4’de verilmiştir.



Şekil 7.3: Bu çalışmada kullanılan yakıt pilinine ait performans eğrileri.



Şekil 7.4: Bu çalışmada kullanılan KOYP yığınınına ait performans eğrileri.

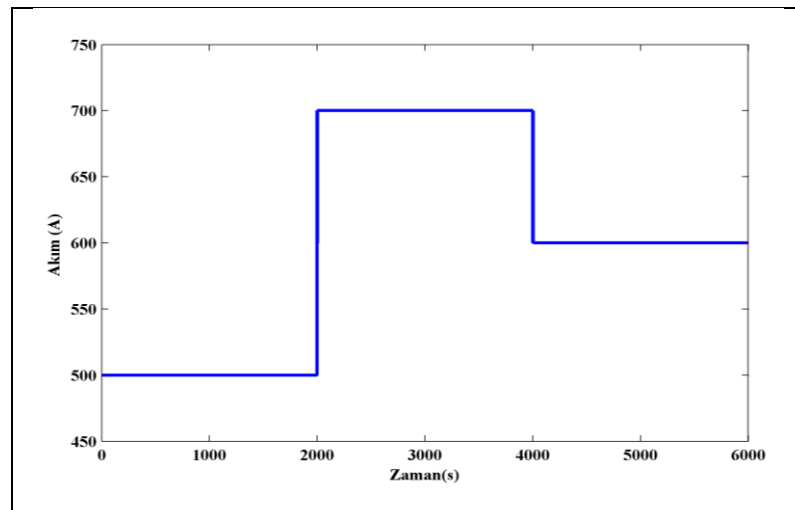
Tablo 7.2: KOYP hücresi performans verilerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması [65].

| Akım Yoğunluğu ( $A/cm^2$ ) | Voltaj (V) | Güç Yoğunluğu ( $W/cm^2$ ) | Voltaj (V) (Deneysel) | Güç Yoğunluğu ( $W/cm^2$ ) (Deneysel) |
|-----------------------------|------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 0,1                         | 0,867      | 0,1                        | 0,86                  | 0,082                                 |
| 0,2                         | 0,8        | 0,17                       | 0,76                  | 0,15                                  |
| 0,3                         | 0,74       | 0,23                       | 0,68                  | 0,21                                  |
| 0,4                         | 0,7        | 0,27                       | 0,62                  | 0,26                                  |
| 0,5                         | 0,67       | 0,36                       | 0,57                  | 0,295                                 |
| 0,6                         | 0,64       | 0,38                       | 0,52                  | 0,315                                 |

Tablo 7.2’deki çalışma verileri ile referans alınan model arasındaki temel farklılık yakıt kanalındaki yakıtın kompozisyonu ve model kabullerinin farklılığından kaynaklanmaktadır.

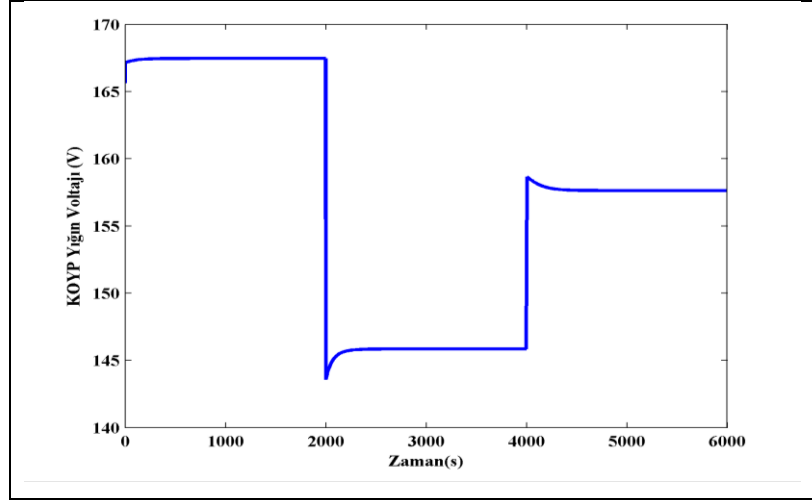
- Değişken Akım Yüklemesinin Etkisi

Bu bölümde akım yoğunluğu çeşitli kademelerde değiştirilerek KOYP yığınının güç çıkışı, KOYP yığının elektriksel verimi, KOYP yığını sıcaklık değişimi , KOYP/GT hibrit sisteminin güç çıkışı ve elektriksel verimi gözlemlenmiştir. Yakıt kullanım verimi  $U_y = 0,85$  , hava kullanım verimi  $U_h = 0,25$  ve KOYP çalışma basıncı 1 bar olarak sabit tutulmuştur. Şekil 7.5 ’de akım yüklemesinin zamana bağlı değişimi verilmektedir.



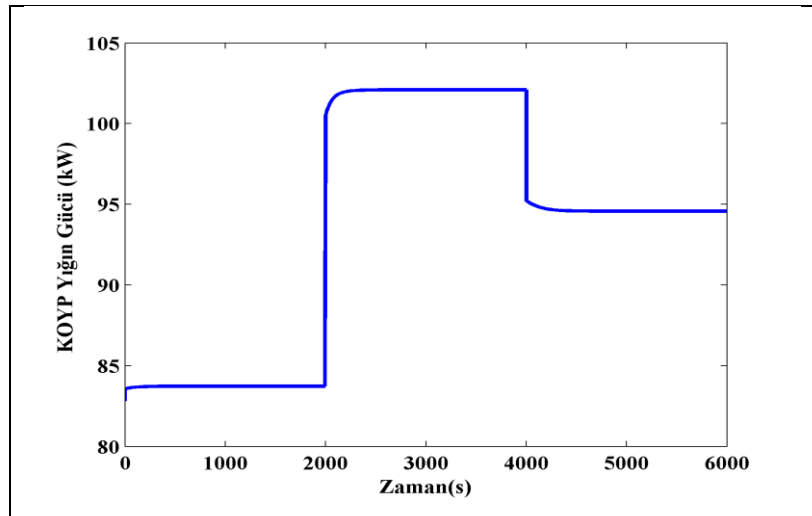
Şekil 7.5: Uygulanan akım yüklemesi.

Voltaj çıkışı akım değerinin artışı ile beraber 0-2000 s arasında 167,5 V iken akımın 500 A'den 700 A' yükselmesi ile 146 V'e düşmektedir. Ancak 2500 s civarında kararlı hale gelmektedir. Akabinde akımın 700 A'den 600 A'e düşmesi ile beraber voltaj değeri 157,6 V değerine yükselir ve 4200 s civarlarında kararlı hale ulaşır. Şekil 7.6'de KOYP voltaj çıkışının değişken akım yüklemesine göre değişimi verilmektedir.



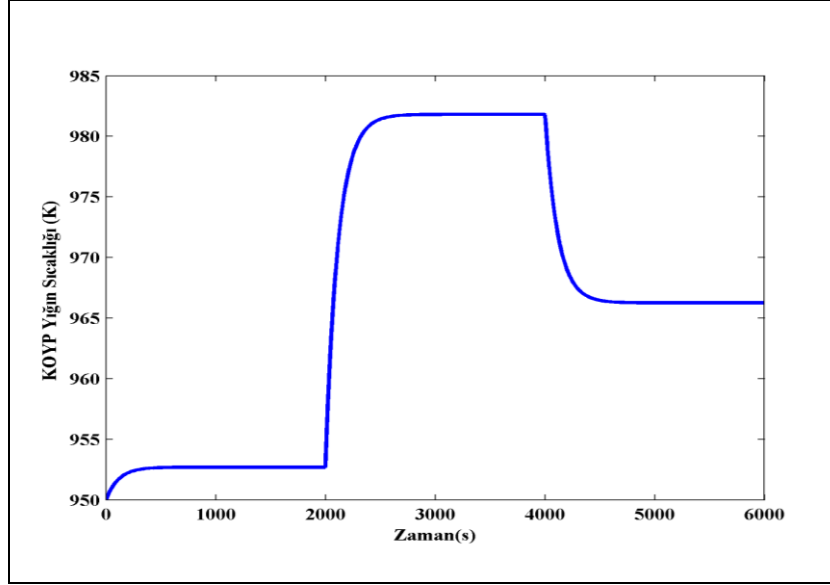
Şekil 7.6: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığın voltajı değişimi.

KOYP yığınının güç çıkışı 0-2000 s arasında 83,7 kW iken sistemden çekilen akımın 700 A'e yükselmesi ile 102,1 kW değerine ulaşır. Akım değerinin 4000-6000 s arasında 600 A'e düşüşü güç çıkışını düşürerek 94,6 kW seviyesine ulaşır. Şekil 7.7'de KOYP yığın güç çıkışının akıma bağlı değişimi verilmektedir.

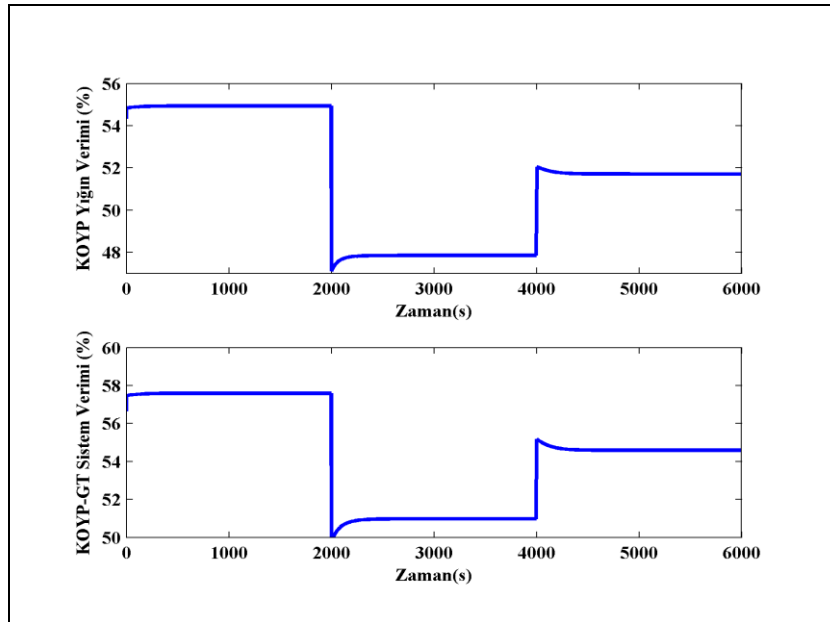


Şekil 7.7: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığın gücü davranışı.

KOYP yığın sıcaklığı akım değerinin 2000-4000 s arasında artışı ile beraber 981 K 'e yükselmekte ve kararlı hale gelmesi 2400 s civarında olmaktadır. Akım değerinin 4000-6000 s'de 600 A'e düşüşü ile 966 K'e düşmektedir. Kararlı hale gelmesi 4400 s civarlarında gerçekleşmektedir. Şekil 7.8'de KOYP yığın sıcaklığının akıma bağlı değişimi verilmektedir. İlave olarak KOYP yığını ve KOYP/GT hibrit sistemin elektriksel verimleri Şekil 7.9'da gösterilmektedir.



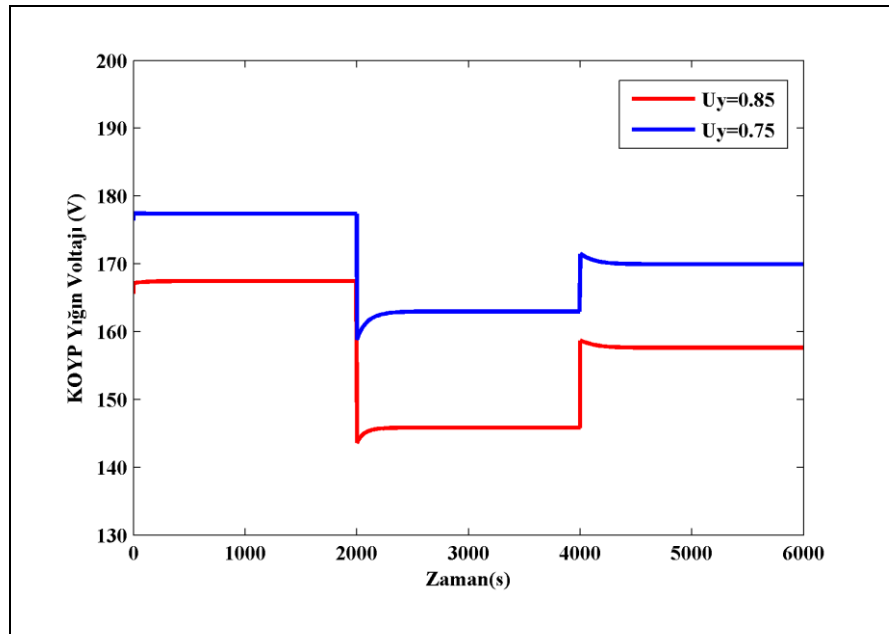
Şekil 7.8: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığını sıcaklık davranışı.



Şekil 7.9: Verilen akım yüklemesine göre KOYP yığını ve hibrit sistemin elektriksel verimleri.

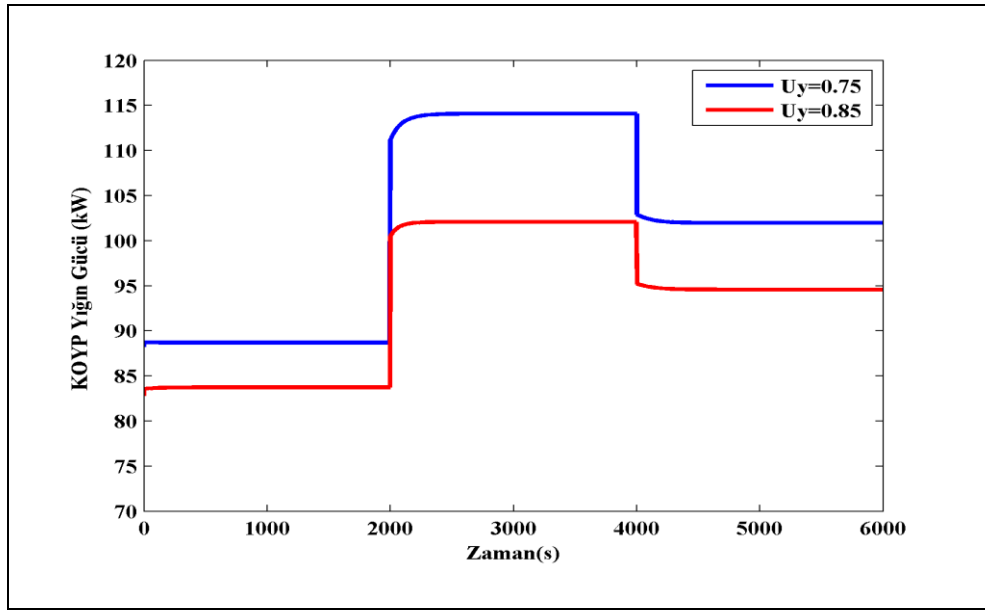
- Yakıt Kullanım Veriminin ( $U_y$ ) Etkisi

Bu kısımda yakıt kullanım verimi  $U_y = 0,75$  ve  $0,85$  değerleri için, KOYP yığını ve KOYP/GT sisteminin çıktıların değişimi incelenmiştir. KOYP çalışma basıncı 1 bar ve hava kullanım verimi  $U_h = 0,25$  olarak sabit tutulmuştur. İlave olarak Şekil 7.5'deki akım yüklemesi esas alınmıştır. Aynı akım koşullarında, 0-2000 s aralığında  $U_y = 0,75$  değerinde KOYP yığın voltajı 177,4 V olarak bulunurken,  $U_y = 0,85$  değerinde voltaj değeri 167,5 V olarak bulunmuştur. Benzer şekilde 2000-4000 s sistemden çekilen akımın artması ile beraber  $U_y = 0,75$  iken voltaj değeri 163 V olarak bulunmuştur.  $U_y = 0,85$  için aynı aralıkta 146 V olarak gözlemlenmiştir. KOYP yığın voltajının verilen akım yüklemesi ve  $U_y$  ile değişimi Şekil 7.10'da verilmektedir.



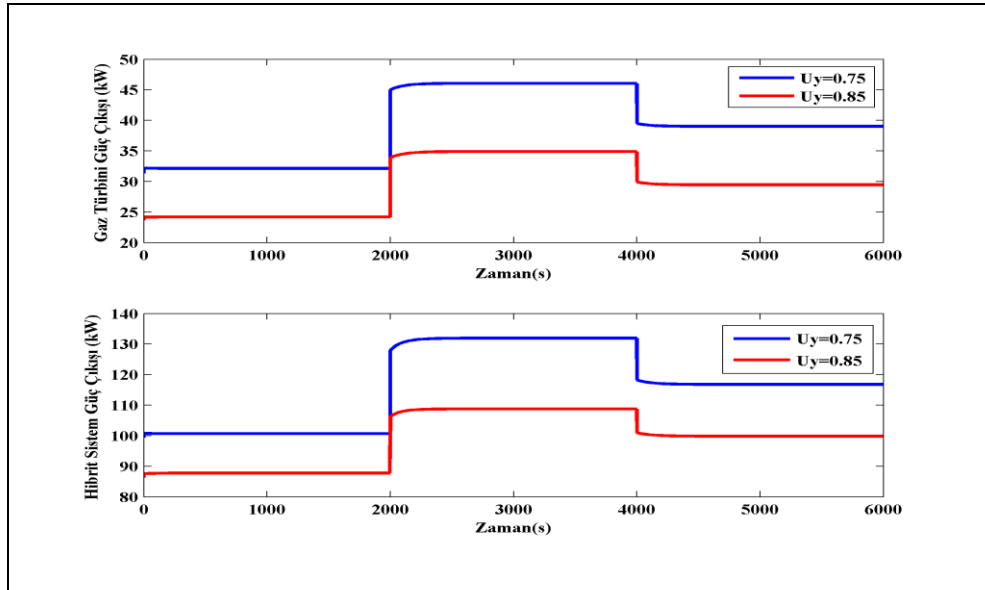
Şekil 7.10: KOYP yığın voltajının verilen akım yüklemesi ve  $U_y$  ile değişimi.

$U_y = 0,75$  değeri için KOYP yığın güç çıktısı 0-2000 s aralığında 88,7 kW iken akımın yükselmesi ile 2000-4000 s aralığında 114,1 kW değerine yükselmiştir. Kararlı duruma geçişi 2300 s civarlarında gerçekleşmiştir. 4000 -6000 s aralığında sistemden talep edilen akımın düşüşü ile 102 kW değerine düşmüş ve kararlı hale gelmesi 4300 s civarlarında olmuştur. Benzer şekilde  $U_y = 0,85$  için KOYP yığın güç çıktısı 2000-4000 s aralığında 83,7 kW'dan 102,1 kW'a yükselmiştir. Akabinde akım talebinin 600 A seviyesine gerilemesi sonucu güç çıktısı 94,6 kW'a gerilemiştir. Bunlara ek olarak yakıt kullanım veriminin KOYP yığın gücüne etkileri Şekil 7.11'de verilmektedir.

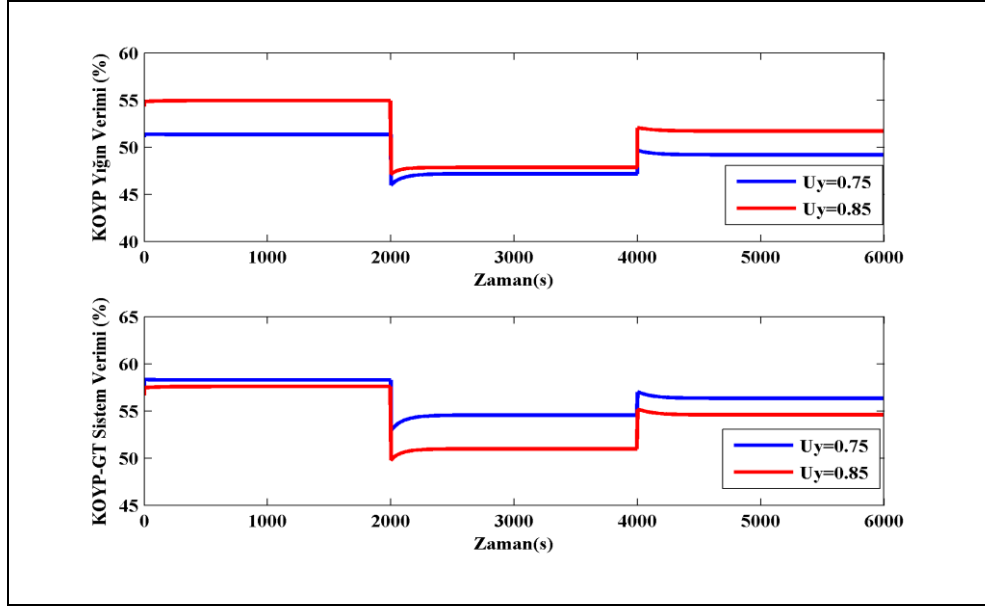


Şekil 7.11: KOYP yığın gücünün verilen akım yüklemesi ve  $U_y$  ile değişimi.

Yakıt kullanım veriminin azalması ile beraber gaz türbinine giren sıcak hava kütlesinin artışı, gaz türbininin elektriksel güç çıktısını artırmaktadır. Ayrıca toplam sistemin elektriksel güç çıktısı da artmaktadır. Hibrit sistemden edilebilecek maksimum güç 2000-4000 s aralığında,  $U_y=0,75$  için 132 kW ,  $U_y =0,85$  için 108,8 kW olarak elde edilmiştir. Şekil 7.12’de yakıt kullanımının iki farklı değeri için hem gaz türbini hem de hibrit sistemin güç çıktısının değerleri verilmektedir.



Şekil 7.12: Gaz türbini ve KOYP/GT hibrit sistemin güç çıktılarının verilen akım yüklemesi ve  $U_y$  ile değişimi.

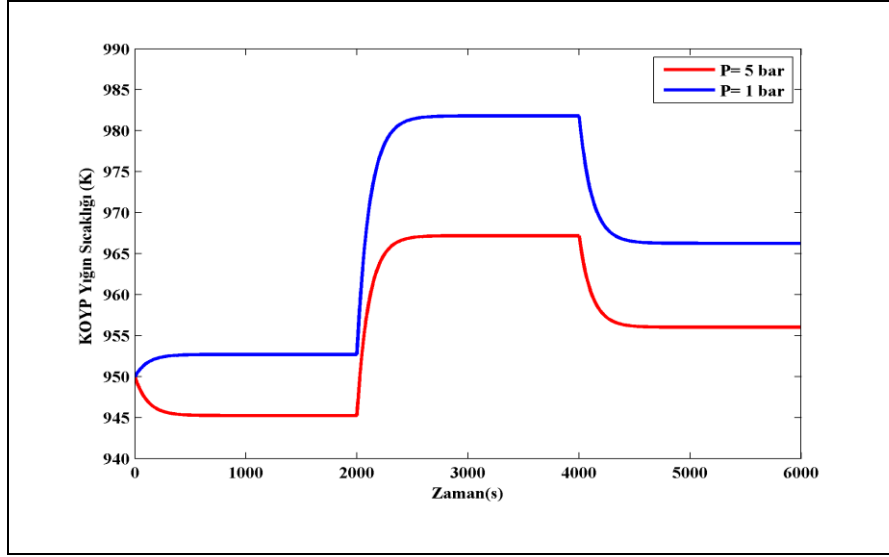


Şekil 7.13: KOYP yığını ve KOYP/GT hibrit sistemin elektriksel verimlerinin verilen akım yüklemesi ve  $U_y$  ile değişimi.

KOYP yığınının ve hibrit sistemden alınabilecek en yüksek verim 0-2000 s 500 A akım değerindedir. KOYP yığın verimi  $U_y = 0,85$  ve  $0,75$  için sırasıyla % 54,94 ve 51,35 olarak bulunmuştur. Diğer yandan hibrit sistemin toplam elektriksel verimi  $U_y=0,85$  ve  $0,75$  için sırasıyla %57,59 ve %58,29 olarak bulunmuştur. KOYP yığını ve KOYP/GT hibrit sistemin elektriksel verimlerinin verilen akım yüklemesi ve  $U_y$  ile değişimi Şekil 7.13’de verilmiştir.

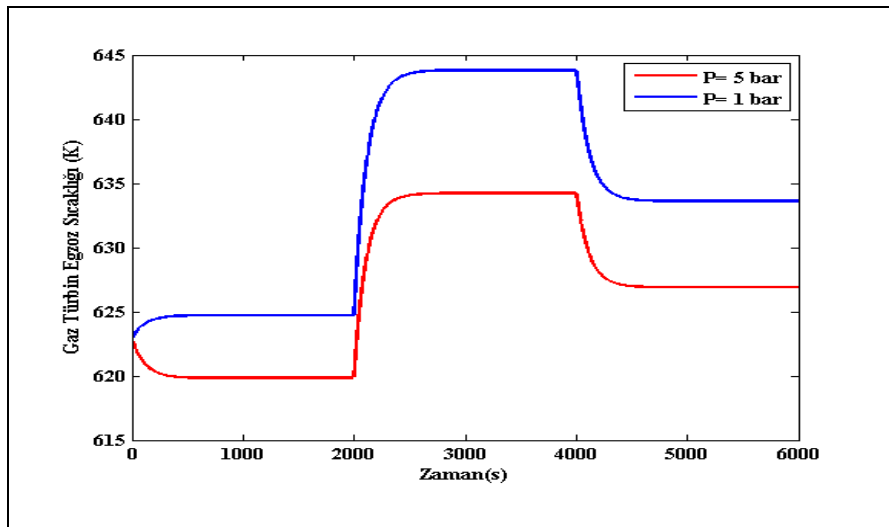
#### • Çalışma Basıncının Etkisi

Bu bölümde, KOYP çalışma basıncının sistem üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. KOYP basıncı 1 bar ve 5 bar için sonuçlar verilecektir. Bu bölümde başlangıçtaki akım yüklemesi, yakıt kullanım verimi  $U_y = 0,85$  ve hava kullanım verimi  $U_h = 0,25$  olarak sabit tutulmuştur. KOYP çalışma basıncının artması ile beraber yığın sıcaklığı düşüş gösterir. 1 bar çalışma basıncı altında KOYP yığın sıcaklığı 2000-4000 s aralığında 953 K’den 981 K’e yükselmiştir. Talep edilen akım 600 A değerinde 966 K’e düşmüştür. Kararlı duruma ulaşması 4500 s civarında gerçekleşmiştir. Benzer şekilde 5 bar çalışma basıncı altında ve akım 700 A’de, yığın sıcaklığı 945 K’den 967 K’e yükselmiştir. Akım değerinin 600 A’e gerilemesi durumunda sıcaklık 956 K’e düşmüştür. Şekil 7.14 ‘de yığın sıcaklığı değişimi verilmiştir.



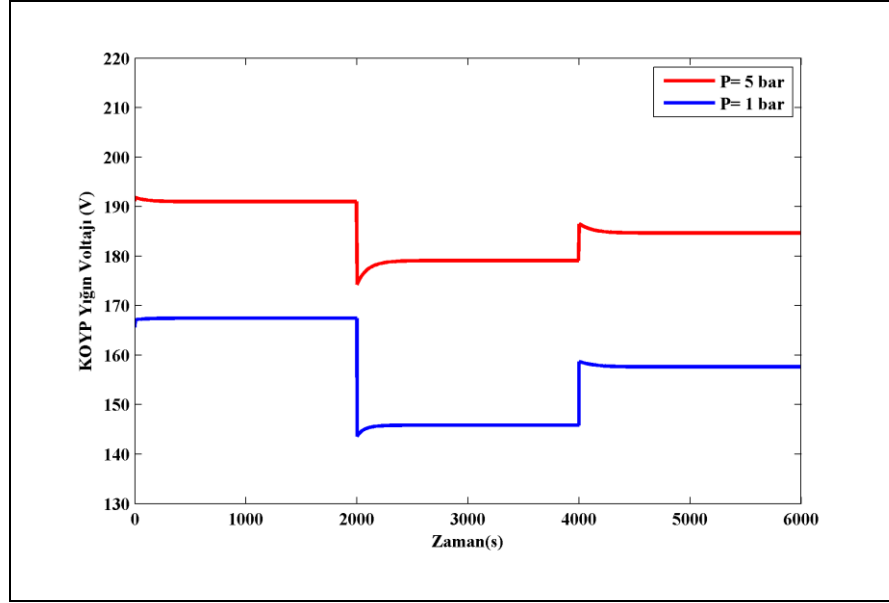
Şekil 7.14: KOYP yığmı sıcaklığının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.

Benzer şekilde KOYP çalışma basıncının artması ile beraber yakıt reformasyonu hızlanmış ve gaz türbin egzoz sıcaklığını düşürücü etkide bulunmuştur. Bu sebeple gaz türbinin güç üretiminde düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca bu düşüş ısı değiştiriciden geri kazanılacak ısı miktarının azalmasına yol açmaktadır. Şekil 7.15’de gaz türbin egzoz sıcaklığı değişimi verilmektedir. En yüksek egzoz gazı sıcaklığı 5 bar çalışma basıncı için 644 K , 1 bar çalışma basıncı için 634 K olarak 2000-4000 s aralığında talep edilen akım 700 A değerinde elde edilmiştir. Basınç değişiminin kararlı duruma geçişi etkilemediği görülmüştür. Belirtilen aralık için 4500 s civarında gerçekleşmiştir.



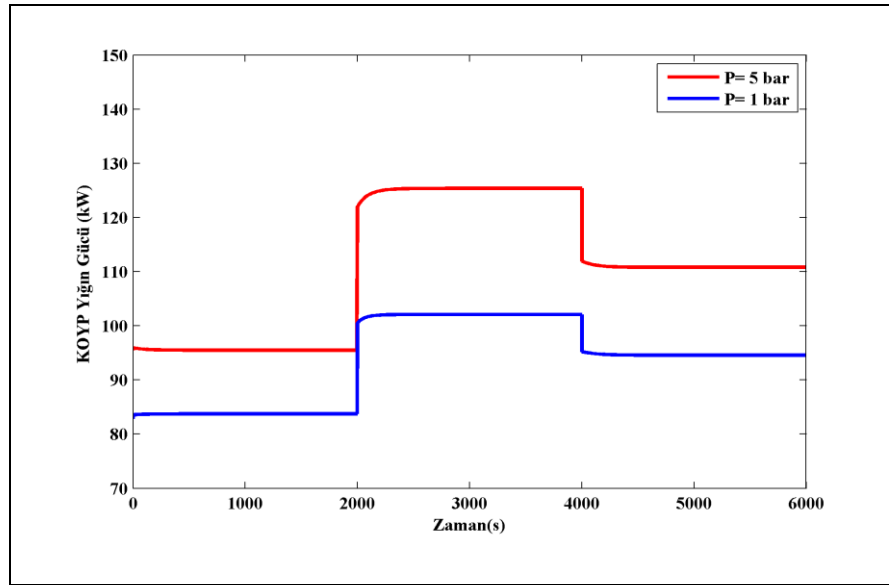
Şekil 7.15: Gaz türbini egzoz sıcaklığının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.

$P=1$  ve  $P=5$  bar için 0-2000 s aralığında sırasıyla KOYP voltajı 167,5 V , 191 V olarak bulunmuştur. Benzer şekilde 2000-4000 s sistemden çekilen akımın artması ile beraber  $P=1$  iken voltaj değeri 146 V olarak bulunmuştur.  $P=5$  için aynı aralıkta 179 V olarak elde edilmiştir. Kararlı duruma ulaşmalarında basıncın herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür. KOYP yığın voltajının verilen akım yüklemesi ve farklı  $P$  değerleri ile değişimi Şekil 7.16’da verilmektedir.

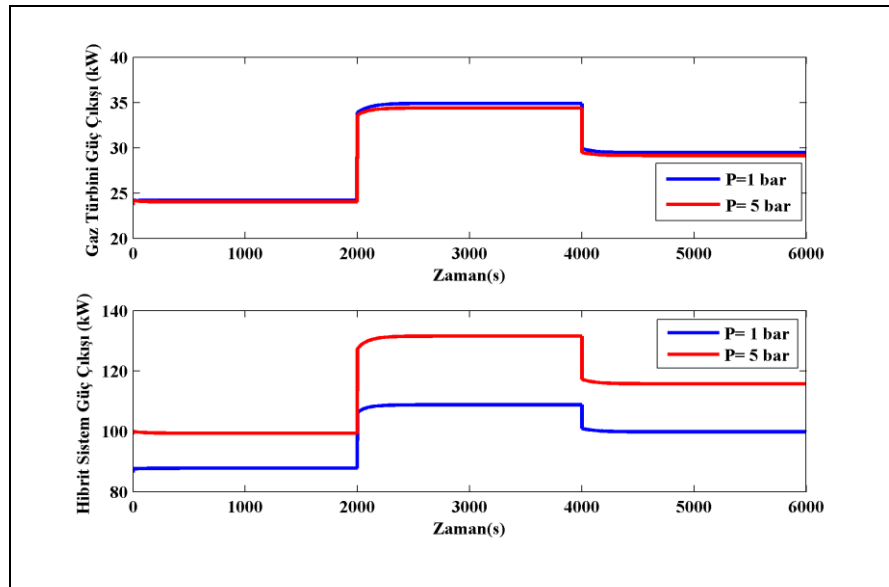


Şekil 7.16: KOYP yığın voltajının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.

$P=1$  değeri için KOYP yığın güç çıktısı 0-2000 s aralığında 83,7 kW iken akımın yükselmesi ile 2000-4000 s aralığında 102,1 kW değerine yükselmiştir. Kararlı duruma geçişi 2300 s civarlarında gerçekleşmiştir. 4000 -6000 s aralığında sistemden talep edilen akımın düşüşü ile 94,6 kW değerine düşmüş ve kararlı hale gelmesi 4300 s civarlarında olmuştur. Benzer şekilde  $P=1$  için KOYP yığın güç çıktısı 2000-4000 s aralığında 95,5 kW’dan 125,4 kW’a yükselmiştir. Akabinde akım talebinin 600 A seviyesine gerilemesi sonucu güç çıktısı 110,8 kW’a gerilemiştir. Bunlara ek olarak yakıt kullanım veriminin KOYP yığın gücüne etkileri Şekil 7.17’de verilmektedir.

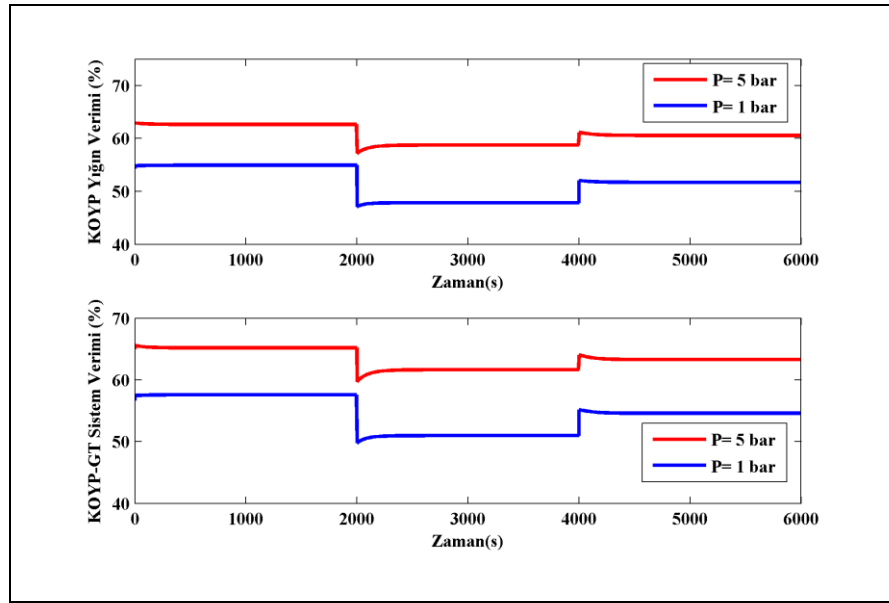


Şekil 7.17: KOYP yığın gücünün verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.



Şekil 7.18: Gaz türbini ve hibrit sistemin güç çıktılarının verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.

Gaz türbin güç çıkışının KOYP çalışma basıncının artması ile beraber düşüş göstermiştir. 2000-4000 s aralığında gaz türbin gücü 1 bar çalışma basıncı altında 35 kW iken 5 bar basınç altında 32 kW olarak elde edilmiştir. Hibrit sistemin güç çıkışının büyük bölümünü KOYP yığını oluşturduğundan, genel anlamda çalışma basıncının artması net güç çıkışını artırmıştır. 5 bar çalışma basıncında ve 700 A'de hibrit sistem net güç çıkışı 138 kW iken 1 bar ve 700 A'de 116 kW olarak elde edilmiştir. Şekil 7.18'de hibrit sistemin net güç çıkışı verilmiştir.



Şekil 7.19: KOYP yığını ve hibrit sistemin elektriksel verimlerinin verilen akım yüklemesi ve çalışma basıncı ile değişimi.

KOYP yığını çalışma basıncının artması ile beraber KOYP yığın voltajının ve güç çıktısının arttığı görülmüştür. Bununla birlikte yığın verimliliği artmıştır. Bunun yanı sıra hibrit sistemin verimi de artış sergilemiştir. Çalışma basıncının 2 durumu için KOYP yığını elektriksel verimi ve KOYP/GT hibrit sistem elektriksel verimi Şekil 7.19’da verilmiştir. KOYP yığınının ve hibrit sistemden alınabilecek en yüksek verim 0-2000 s 500 A akım değerindedir. KOYP yığın verimi  $P=1$  ve  $P=5$  bar için sırasıyla % 54,94 ve %62,66 olarak bulunmuştur. Diğer yandan hibrit sistemin toplam elektriksel verimi  $P=1$  ve  $P=5$  bar için sırasıyla %57,59 ve %65,19 olarak bulunmuştur.

## 8. SONUÇLAR

Sonuç olarak artan enerji talebi ve günümüzde elektrik enerjisinin fosil yakıtlara bağılılığı bizleri daha temiz enerji kaynaklarına itmektedir. Katı oksit yakıt pilleri bu anlamda yüksek enerji dönüşüm verimliliği, amaca uygun olarak entegre edilebilirliği, yakıt esnekliği gibi birçok avantajlara sahip olması ile popüler hale gelmektedir. KOYP’nin yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliği ile termodinamik çevrimlerle desteklenebilirler. Ayrıca CO<sub>2</sub>’nun tutulması için rekabetçi bir teknoloji olarak

görülmektedir. Bu cihazların performans değerlerinin okunabilmesi için uygun kabuller ile modellenmesi gereklidir.

Bu tez çalışmasında KOYP/GT hibrit sistemi önerilmiş ve bu sistem MATLAB/Simulink programı ile dinamik olarak modellenmiştir. Çalışmada 3 temel parametre ile sistem davranışları incelenmiş ve tartışılmıştır. Bu parametreler; yakıt kullanım verimi, KOYP çalışma basıncı ve akım yoğunluğunun değişimidir. Bu çalışmada başlıca şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Akım yüklemesinin değişimi KOYP yığın voltajını doğrudan etkilemektedir. En yüksek voltaj değeri 0- 2000 s aralığında 167,5 V olarak elde edilmiştir. Maksimum yığın gücü ise 2000- 4000 s aralığında 102,1 kW olarak bulunmuştur. Sistemden talep edilen akımın artması ile beraber yığın sıcaklığı artış eğiliminde olmaktadır. En yüksek sıcaklık değeri 700 A' de 981 K olarak elde edilmiştir.
- Yakıt kullanım verimi temel olarak yığın voltajını düşürücü bir etkiye bulunmuştur.  $U_y$ 'nin azalması ile yüksek sıcaklıktaki KOYP gazı debisinin artması gaz türbininden elde edilen gücü artırıcı bir etkiye bulunmuştur. Hibrit sistemin verimini önemli ölçüde artırıcı bir etkiye bulunmamaktadır. Tasarlanan sistemden elde edilebilecek en yüksek güç değeri 2000- 4000 s aralığında  $U_y=0,75$  için 132 kW ,  $U_y=0,85$  için 108,8 kW olarak elde edilmiştir. Yığın verimi  $U_y=0,75$  için %54,94 ,  $U_y=0,85$  için %51,35 olarak elde edilmiştir.
- KOYP çalışma basıncındaki artış yığın voltajını ve gücünü önemli ölçüde artırmıştır. Ancak yığın sıcaklığına etkisi az olduğundan gaz türbininden elde edilen net gücü düşürücü yönde etkilemiştir. Ancak bu düşüş 2-3 kW düzeylerindedir. KOYP basıncının değişmesi ile KOYP ve hibrit sistemden elde edilebilecek maksimum elektriksel verim değerleri  $P=1$  ve  $P=5$  bar için sırasıyla %57,59 ve %65,19 olarak elde edilmiştir.
- Ancak akım ile birlikte gaz türbine gönderilen yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı debisinin artışı ile gaz türbin gücünde de artış görülmektedir. İlave olarak atık ısının geri ısı değiştiricide geri kazanımı ile katota gönderilen havanın şartlandırılmasında enerji kaybı önlemiştir.
- Sistem verimliliğini artırıcı yönde, en büyük etkinin çalışma basıncının artması olarak bulunmuştur. Ancak basıncın artırılması KOYP yığın sıcaklığını

düşürmekte ve ulaşılması gereken çalışma basıncı değerinin artması ile kompresörün elektrik tüketimi artırmaktadır. Tüm çalışmada, hibrit sistem için elde edilebilecek maksimum güç 138 kW iken maksimum elektriksel verim %65,19 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların literatürde yer alan çalışmalar ile karşılaştırılması Tablo 8.1’de verilmiştir.

- Sonuç itibarıyla önerilen sistemde amaç elektriksel verimliliği ve net gücün maksimize edilmesidir. Sistem önerilerinde parametrelerin etkileri iyi irdelenmeli ve komponentler arasındaki güç ve verimlilik dengesinin sağlanması öncelikli olmalıdır.
- İklim değişikliği etkilerini azaltma hususundaki görüş birliği mevcut ve gelecekteki fosil yakıtlı santrallerde karbon tutma ve depolama fikrini esas alır. Gelecekte enerji sektörü için önemli bir bileşen olarak kabul görür. IEA ‘nın 2012 2DS senaryosunda karbon tutma ve depolamanın 2050 yılına kadar karbon emisyonlarının azaltılmasına %14 oranında katkıda bulunabileceği ifade edilmektedir [69]. KTD’ de, temel teknoloji engellerinden biri, ayırma için saf bir CO<sub>2</sub> ürünü üretebilen ayırma teknolojileri geliştirmektir. Çoğu yaklaşım CO<sub>2</sub> ‘i elektrik santralinin bacasından çıkan baca gazından ayırmaya odaklanmaktadır. Bu, CO<sub>2</sub>’i ayırmaya çalıştıkları için enerji yoğun bir yaklaşımdır. CO<sub>2</sub> ayırmak KTD için önemli bir süreçtir. Daha öncede vurgulandığı gibi KOYP’nin yüksek sıcaklıklarda çalışması, diğer çevrimlerle (ST çevrimi, GT çevrimi v.b) entegrasyonu hem toplam verimliliği artırmakta hem de CO<sub>2</sub>’in ayrıştırılmasını, tutulmasına olanak sağlamaktadır. Entegre sistemin özelliklerine göre çeşitli ayırma/tutma yöntem önerileri literatürde mevcuttur. İlave olarak bu tip sistemlerde CO<sub>2</sub> tutma/ayırma araştırılması gereken bir konudur.

Tablo 8.1: Elde edilen sonuçların literatürde yer alan çalışmalar ile karşılaştırılması.

|                             | <b>Mevcut Çalışma</b> | <b>Campanari vd. [66]</b> | <b>Pålsson vd. [67]</b> | <b>Chinda vd. [68]</b> |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>KOYP Model Yaklaşımı</b> | 0-D Boru Tipi         | 0-D Boru Tipi             | 0-D Boru Tipi           | 0-D Düğme Tipi         |
| <b>Tesis Gücü</b>           | 138 kW                | 250 kW                    | ~300 kW                 | 463 kW                 |
| <b>Verimlilik</b>           | %65,19                | %65                       | %61,1                   | %58                    |
| <b>Hibrit Sistem</b>        | KOYP/GT               | KOYP/GT                   | KOYP/GT                 | KOYP/GT                |

## KAYNAKLAR

- [1] Daly H., Walton M., (2007), “Energy Access Outlook from Poverty to Prosperity”, World Energy Outlook Special Report.
- [2] NETL, (2004), “Seventh Edition Fuel Cell Handbook”, Morgantown, WV, USA, EG&G Technical Services Inc.
- [3] Serincan M. F., (2009), “Multiphysics Modeling of Fuel Cells”, PhD Thesis, University of Connecticut.
- [4] Lucia U., (2014), “Overview on Fuel Cells”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 164–169.
- [5] Spiegel C. S., (2007), “Designing and Building Fuel Cells”, 1st Edition, McGraw-Hill.
- [6] Wilberforce T., Alaswad A., Palumbo A., Dassisti M., Olabi A. G., (2016), “Advances in stationary and portable fuel cell applications”, International Journal of Hydrogen Energy, 41 (37), 16509-16522.
- [7] Andújar J. M., Segura F., (2009), “Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (9), 2309–2322.
- [8] Kahlbaum G. W. A., Darbishire F. V., (1889), “The letters of Faraday and Schoenbein 1836-1862. With notes, comments and references to contemporary letters”, 1st Edition, Williams & Norgate.
- [9] Bossel U., (2000), “The Birth of the Fuel Cell 1835-1845”, European Fuel Cell Forum, Switzerland.
- [10] Grimes P., (2000), “Historical pathways for fuel cells. The new electric century”, Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances, 41-45, Long Beach, CA, USA, 11-14 January.
- [11] Chaurasia P. B. L., Ando Y., Tanaka T., “Regenerative fuel cell with chemical reactions”, Energy Conversion and Management, 44 (4), 611–628.
- [12] Appleby A. J., (1990), “From Sir William Grove to today: fuel cells and the future”, Journal of Power Sources, 29 (1-2), 3-11.
- [13] Stone C., Morrison A. E., (2002), “From curiosity to power to change the world”, Solid State Ionics, 152, 1–13.
- [14] Ni M., (2011), “Thermo-electrochemical modeling of ammonia-fueled solid oxide fuel cells considering ammonia thermal decomposition in the anode”, International Journal of Hydrogen Energy, 36 (4), 3153–3166.

- [15] Weber A., (2002), "Entwicklung von Kathodenstrukturen für die Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC", PhD Thesis, Universität Fridericiana Karlsruhe.
- [16] Ito H., (2017), "Economic and environmental assessment of phosphoric acid fuel cell-based combined heat and power system for an apartment complex", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (23), 15449-1546.
- [17] Milewski J., Wejrzanowski T., Szablowski Ł., Baron R., Szczęśniak A., Ćwieka K., (2017), "Development of Molten Carbonate Fuel Cells at Warsaw University of Technology", *Energy Procedia*, 142, 1496-1501.
- [18] Rosen J., Geary T., Hilmi A., Blanco-Gutierrez R., Yuh C. Y., Pereira C. S., Han L., Johnson R. A., Willman C. A., Ghezel-Ayagh H., Barckholtz T. A., (2020), "Molten Carbonate Fuel Cell Performance for CO<sub>2</sub> Capture from Natural Gas Combined Cycle Flue Gas", *Journal of The Electrochemical Society*, 167 (6), 064505.
- [19] Cooper R., Bove D., Audasso E., Ferrari M. C., Bosio B., (2020), "A feasibility assessment of a retrofit Molten Carbonate Fuel Cell coal-fired plant for flue gas CO<sub>2</sub> segregation", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (28), 15024-15031.
- [20] Boldrin P., Brandon N. P., (2019), "Progress and outlook for solid oxide fuel cells for transportation applications", *Nature Catalysis*, 2 (7), 571-577
- [21] Hussain S., Yangping L., (2020), "Review of solid oxide fuel cell materials: cathode, anode, and electrolyte", *Energy Transitions*, 4 (2), 113–126.
- [22] Stöver D., Buchkremer H. P., Uhlenbruck S., (2004), "Processing and properties of the ceramic conductive multilayer device solid oxide fuel cell (SOFC)", *Ceramics International*, 30 (7), 1107–1113.
- [23] Istomin S. Y., Antipov E. V., (2013), "Cathode materials based on perovskite-like transition metal oxides for intermediate temperature solid oxide fuel cells", *Russian Chemical Reviews*, 82 (7), 686–700.
- [24] Irshad M., Siraj K., Raza R., Ali A., Tiwari P., Zhu B., Rafique A., Ali A., Ullah M. K., Usman A., (2016), "A Brief Description of High Temperature Solid Oxide Fuel Cell's Operation, Materials, Design, Fabrication Technologies and Performance", *Applied Sciences*, 6 (3), 75.
- [25] Dziurdzia B., Magonski Z., Jankowski H., (2016), "Commercialisation of Solid Oxide Fuel Cells - opportunities and forecasts", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 104, 12020.
- [26] Ruiz-Morales J. C., Canales-Vázquez J., Savaniu C., Marrero-López D., Zhou W., Irvine J. T. S., (2006), "Disruption of extended defects in solid oxide fuel cell anodes for methane oxidation", *Nature*, 439 (7076), 568–571.

- [27] Muecke U. P., Beckel D., Bernard A., Bieberle-Hütter A., Graf S., Infortuna A., Müller P., Rupp J. L. M., Schneider J., Gauckler L. J., (2008), “Micro Solid Oxide Fuel Cells on Glass Ceramic Substrates”, *Advanced Functional Materials*, 18 (20), 3158–3168.
- [28] Saebea D., Authayanun S., Patcharavorachot Y., Arpornwichanop A., (2016), “Performance analysis of direct steam reforming of methane in SOFC with SDC-based electrolyte”, *Chemical Engineering Transactions*, 52, 223–228.
- [29] Wang X., Lv X., Weng Y., (2020), “Performance analysis of a biogas-fueled SOFC/GT hybrid system integrated with anode-combustor exhaust gas recirculation loops”, *Energy*, 197, 117213.
- [30] Zuo C., Liu M., M. Liu (2012), “Sol-Gel Processing for Conventional and Alternative Energy”, Springer Link.
- [31] Futamura S., Muramoto A., Tachikawa Y., Matsuda J. Lyth S. M., Shiratori Y., Taniguchi S., Sasaki K., (2019), “SOFC anodes impregnated with noble metal catalyst nanoparticles for high fuel utilization”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (16), 8502–8518.
- [32] Chelmehsara M. E., Mahmoudimehr J., (2018), “Techno-economic comparison of anode-supported, cathode-supported, and electrolyte-supported SOFCs”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (32), 15521–15530.
- [33] Wilson J. R., Kobsiriphat W., Mendoza R., Chen H. Y., Hiller J. M., Miller D. J., Thornton K., Voorhees P. W., Adler S. B., Barnett S. A., (2006), “Three-dimensional reconstruction of a solid-oxide fuel-cell anode”, *Nature Materials*, 5 (7), 541–544.
- [34] Laosiripojana N., Wiyaratn W., Kiatkittipong W., Arpornwichanop A., Soottitantawat A., Assabumrungrat S., (2009), “Reviews on solid oxide fuel cell technology,” *Engineering Journal*, 13 (1), 65–83.
- [35] Martin A. W., Ruiz A. M., Bercero M. A. L., Campana R., Larranaga A., Slater P. R., Arriortua M. R., (2019), “SOFC cathodic layers using wet powder spraying technique with self synthesized nanopowders”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (14), 7555- 7563.
- [36] Stambouli A., (2011), “Thin film Si solar cell and solid oxide fuel cell technologies for a low cost, environmentally friendly and sustainable source of energy”, *Revue des Energies Renouvelables*, 14, 267–284.
- [37] Stambouli A. B., Traversa E., (2002), “Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (5), 433–455.
- [38] Timurkutluk B., (2007), “Performance Analysis an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell”, Master Thesis, Middle East Technical University.

- [39] Soydan A. M., (2009), “Katı Oksit Yakıt Hücreleri İçin Düşük ve Orta Sıcaklıklarda Çalışan Yeni Anot Malzemelerinin Geliştirilmesi ve Performans Analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [40] Soydan A. M., (2015), “100 Watt Güç Üreten Mikro Boru Tipi Katı Oksit Yakıt Hücresi Sisteminin Üretimi ve Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [41] Dodds P. E., Staffell I., Hawkes A. D., Li F., Grünewald P., McDowall W., Ekins P., (2015), “Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (5), 2065–2083.
- [42] Cheddie D. F., (2010), “Integration of a solid oxide fuel cell into a 10 MW gas turbine power plant”, *Energies*, 3 (4), 754–769.
- [43] J. Lindorfer, D. C. Rosenfeld, and H. Böhm, (2020), “Fuel Cells: Energy Conversion Technology ”. In: Letcher E., Editors, “Future Energy”, Third Edition, Elsevier Ltd.
- [44] Graetz J., Reilly J. J., (2007), “Kinetically stabilized hydrogen storage materials”, *Scripta Materialia*, 56 (10), 835–839.
- [45] Buonomano A., Calise F., D’Accadia M. D., Palombo A., Vicidomini M., (2015), “Hybrid solid oxide fuel cells-gas turbine systems for combined heat and power: A review”, *Applied Energy*, 156, 32–85.
- [46] Calise F., Dentice M., Vanoli L., Von Spakovsky M. R., (2006), “Single-level optimization of a hybrid SOFC – GT power plant”, *Journal of Power Sources*, 159 (2), 1169–1185.
- [47] Calise F., Dentice M., Vanoli L., Von Spakovsky M. R., (2007), “Full load synthesis / design optimization of a hybrid SOFC – GT power plant”, *Energy*, 32 (4), 446–458.
- [48] Song T. W., Sohn J. L., Kimb J. H., Kim T. S., Ro S. T., Suzuki K., (2005), “Performance analysis of a tubular solid oxide fuel cell / micro gas turbine hybrid power system based on a quasi-two dimensional model”, *Journal of Power Sources*, 142 (1-2), 30–42.
- [49] Arsalis A., von Spakovsky M. R., Calise F., (2008), “Thermoeconomic modeling and parametric study of hybrid SOFC – gas turbine – steam turbine power plants ranging from 1.5 to 10 MWe ”, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 181, 313–326.
- [50] Zabihian F., Fung A. S., (2014), “Thermodynamic sensitivity analysis of hybrid system based on solid oxide fuel cell”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 6, 51–59.

- [51] Chan S. H., Ho H. K., Tian Y., (2003), “Multi-level modeling of SOFC – gas turbine hybrid system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28 (8), 889–900.
- [52] Dicks A. L., Rand D. A. J., (2018), “Fuel Cell Systems Explained”, 1st Edition, John Wiley & Sons Ltd.
- [53] Fujita K., Seyama T., Sobue T., Matsuzaki Y., (2012), “Development of segmented-in-series-type solid oxide fuel cells for residential applications” *Energy Procedia*, 28, 153–161.
- [54] Ozcan H., Dincer I., (2013), “Thermodynamic Analysis of an Integrated SOFC, Solar ORC and Absorption Chiller for Tri-generation Applications”, *Fuel Cells*, 13 (5), 781-793.
- [55] Jia J., Abudula A., Wei L., Shi Y., (2013), “Performance comparison of three solid oxide fuel cell power systems”, *International Journal of Energy Research*, 37 (14), 1821-1830.
- [56] Huang B., Qi Y., Murshed A. K. M. M., (2013), “Dynamic Modeling and Predictive Control in Solid Oxide Fuel Cells: First Principle and Data-based Approaches”, 1st Edition, John Wiley & Sons Ltd.
- [57] Sahli Y., Zitouni B., Ben-Moussa H., (2017), “Solid Oxide Fuel Cell Thermodynamic Study”, *Çankaya University Journal of Science and Engineering*, 14 (2), 134-151.
- [58] Colpan C. O., Dincer I., Hamdullahpur F., (2007), “Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32 (7), 787–795.
- [59] Inac S., Unverdi S. O., Midilli A., (2019), “A parametric study on thermodynamic performance of a SOFC oriented hybrid energy system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (20), 10043- 10058.
- [60] Jung J. H., Ahmed S., (2010), “Dynamic model of PEM fuel cell using real-time simulation techniques”, *Journal of Power Electronics*, 10 (6), 739–748.
- [61] Bossel, U.G., (1992), “Final Report on SOFC Data Facts and Figures”, Berne, CH, Swiss Federal Office of Energy.
- [62] Kakaç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A., (2012), “Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design”, Third Edition, CRC Press.
- [63] Sahin B., Ust Y., Teke I., Erdem H. H., (2010), “Performance analysis and optimization of heat exchangers: a new thermoeconomic approach”, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2), 104–109.

- [64] Nikolaidis P., Poullikkas A., (2017), “A comparative overview of hydrogen production processes”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611.
- [65] Tao G., Armstrong T., Virkar A., (2005), “Intermediate temperature solid oxide fuel cell (IT-SOFC) research and development activities at MSRI”, Nineteenth annual ACERC&ICES conference, Provo, Utah, 17 – 18 February.
- [66] Campanari S., (2000), “Full Load and Part-Load Performance Prediction for Integrated SOFC and Microturbine Systems”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of The Asme*, 122, 239-246.
- [67] Pålsson J., Selimovic A., Sjunnesson L., (2000), “Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation”, *Journal of Power Sources*, 86 (1), 442–448.
- [68] Chinda P., Brault P., (2012), “The hybrid solid oxide fuel cell (SOFC) and gas turbine (GT) systems steady state modeling”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (11), 9237–9248.
- [69] IEA, (2012), “Energy Technology Perspectives 2012”, Electricity Generation and Fuel Transformation, Paris, France.

## ÖZGEÇMİŞ

Miraç Burak KAYA, 2014 yılında başladığı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2018 yılında başarıyla tamamlamıştır. 2019 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. Başlıca çalışma alanları hesaplamalı akışkanlar dinamiği, yüksek hızlı aerodinamik ve yakıt pilleridir.