
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

MODEL BİR YASSI TÜP KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN SAYISAL SİMÜLASYONU

Fethi Mustafa ÇİMEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2020

Fethi Mustafa ÇİMEN tarafından hazırlanan "MODEL BİR YASSI TÜP KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN SAYISAL SİMÜLASYONU " adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ……..……..

Başkan: Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Doç. Dr. Selahattin ÇELİK

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. ..……

Tez Savunma Tarihi: 17/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

……..…….

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

……..
Fethi Mustafa ÇİMEN
17/12/2020

MODEL BİR YASSI TÜP KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN SAYISAL SİMÜLASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Fethi Mustafa ÇİMEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Yakıt hücreleri, yakıtların kimyasal enerjilerini elektrokimyasal reaksiyonlar ile doğrudan elektrik enerjisine ve ısıya dönüştüren cihazlardır. Mevcut yakıt hücreleri arasında katı oksit yakıt hücreleri değişken çalışma şartlarında göstermiş oldukları yüksek performans ile bir adım öne çıkmaktadır. Katı oksit yakıt hücreleri yüksek çalışma sıcaklığı ve yüksek enerji dönüşüm verimine sahip olması nedeniyle son dönemde yapılan çalışmalarda odak noktası olmuştur. Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi tabanında düzlemsel, silindirik ve yassı tüp geometrilerinde katı oksit yakıt hücreleri geliştirilmiş ve farklı geometrilerin performans üzerindeki sayısal etkileri araştırılmıştır. Oluşturulan hücre modelleri COMSOL Multiphysics yazılımı ile farklı basınç ve sıcaklıklarda analiz edilerek sonuçlar güç ve polarizasyon eğrilerini gösteren grafikler ile ifade edilmiştir. Yassı tüp katı oksit yakıt pilinin, 0,75 V hücre giriş voltajında, 800 °C ve 1 atm çalışma şartlarında hücre voltajı ve ortalama hücre güç değeri incelenmiştir. Hücre voltajında sıfırlanma, 2 150 A/m^2'de gerçekleşmiştir. Ayrıca, maksimum güç değeri yassı tüp için 1 170 A/m^2'de 470 W/m^2 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar yassı tüp katı oksit yakıt hücrelerinin birçok açıdan avantajlı olduğunu göstermiştir. Değişen şartlar altındaki yüksek performans değerleri ve sızdırmazlık özellikleri nedeniyle yassı tüp katı oksit yakıt hücresi son dönemde yapılan çalışmaların odak noktası olmuştur.

Bilim Kodu	:	92807
Anahtar Kelimeler	:	Yassı tüp KOYP, düzlemsel ve mikro-silindirik KOYP, performans, sayısal analiz
Sayfa Adedi	:	65
Danışman	:	Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

NUMERICAL SIMULATION OF A MODEL FLAT-TUBULAR SOLID OXIDE FUEL CELL

(M. Sc. Thesis)

Fethi Mustafa ÇİMEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

Fuel cells are devices that convert the chemical energy of fuels directly into electrical energy and heat through electrochemical reactions. Among the existing fuel cells, solid oxide fuel cells stand out with their high performance under variable operating conditions. Solid oxide fuel cells have been the focus of recent studies due to their high operating temperature and high energy conversion efficiency. In this thesis, solid oxide fuel cells were developed in planar, cylindrical and flat tube geometries based on finite element method and the numerical effects of different geometries on performance were investigated. The generated cell models were analyzed with COMSOL Multiphysics software at different pressures and temperatures, and the results were expressed with graphics showing power and polarization curves. The cell voltage and average cell power value of flat tubular solid oxide fuel cell was analyzed at 0,75 V cell input voltage, 800 °C and 1 atm operating conditions. The cell voltage reached minimum value at 2 150 A/m^2 for flat tubular geometry. In addition, the maximum power value was obtained as 470 W/m^2 at 1 170 A/m^2 for flat tubular solid oxide fuel cell. The results showed that flat tube solid oxide fuel cells are advantageous in many aspects. The flat tubular solid oxide fuel cell has been the focal point of the recent studies due to its high performance values and sealing properties under changing conditions.

Science Code	:	92807
Key Words	:	Flat-tubular SOFC, planar and micro-tubular SOFC, performance, numerical analysis
Page Number	:	65
Supervisor	:	Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi sürecinde çalışmalarıma bilgi ve tecrübesiyle yön veren, desteğini esirgemeyen tez danışmanım saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a en samimi teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmamda verdiği desteklerden ötürü Arş. Gör. Berre KÜMÜK'e teşekkürü bir borç bilirim. Eğitim hayatım boyunca karşılaştığım zorluklarda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bana her zaman güvenen biricik aileme destekleri için sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmam boyunca bana yardımcı olan kıymetli arkadaşım Yüksek Mühendis Meltem SALMAN'a şükranlarımı sunarım. Son olarak, tez çalışmamda yapmış olduğum sayısal analiz ve modelleme aşamalarında yazılım ve kaynaklarını benden esirgemeyen 'Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi-Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 3

3. TEORİK BİLGİLER 9

3.1. Yakıt Pili Çalışma Prensibi 9

3.2. Yakıt Pili Çeşitleri 10

3.2.1. Alkali yakıt hücresi 10

3.2.2. Eriyik karbonat yakıt hücresi 11

3.2.3. Fosforik asit yakıt hücresi 12

3.2.4. Polimer elektrolit yakıt hücresi 13

3.2.5. Katı oksit yakıt hücresi 15

3.3. Yakıt Pilinin Temelleri 17

3.3.1. Açık devre potansiyeli 17

3.3.2. Polarizasyonlar 19

3.3.3. Gerçek hücre potansiyeli 21

3.3.4. Yakın pillerinde verim 21

3.4. Katı Oksit Yakıt Hücresi Çeşitleri 22

3.4.1. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi 22

Sayfa

3.4.2. Silindirik katı oksit yakıt hücresi..... 23

3.4.3. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi..... 24

4. SAYISAL MODELLEME..... 27

4.1. Korunum Denklemleri..... 28

4.1.1. Kütlenin korunumu..... 29

4.1.2. Momentumun korunumu..... 29

4.1.3. Enerjinin korunumu..... 30

4.1.4. Türlerin korunumu..... 31

4.1.5. Yüklerin korunumu..... 31

5. MATERYAL VE METOT..... 33

5.1. Katı Oksit Yakıt Hücresi Geometrilerinin Oluşturulması..... 33

5.2. Ağ Yapısının Oluşturulması..... 38

6. BULGULAR VE TARTIŞMA..... 41

6.1. Düzlemsel ve Silindirik Katı Oksit Yakıt Hücrelerinin Analizi..... 41

6.1.1. Düzlemsel ve silindirik yakıt hücrelerinin voltaj analizi..... 41

6.1.2. Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücrelerinin güç analizi..... 45

6.2. Yassı Tüp Katı Oksit Yakıt Hücresinin Analizi..... 49

6.2.1. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin voltaj analizi..... 49

6.2.2. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin güç analizi..... 52

6.3. Tartışma..... 54

7. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 57

KAYNAKLAR..... 61

ÖZGEÇMİŞ..... 65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları..... 24

Çizelge 5.1. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi giriş parametreleri..... 37

Çizelge 5.2. Düzlemsel KOYP doğrulama verileri..... 39

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Yakıt hücresi şeması 9

Şekil 3.2 Alkali yakıt hücresi çalışma prensibi..... 11

Şekil 3.3 Eriyik karbonat yakıt hücresi çalışma prensibi..... 12

Şekil 3.4 Fosforik asit yakıt hücresi çalışma prensibi..... 13

Şekil 3.5. Polimer elektrolit yakıt hücresi çalışma prensibi..... 14

Şekil 3.6. Katı oksit yakıt hücresi çalışma prensibi..... 15

Şekil 3.7. MEG yapısının kesit ve izometrik olarak görüntüsü..... 17

Şekil 3.8. Tek hücre (a) ve stak görünümü (b)..... 17

Şekil 3.9. Bir yakıt pilinde meydana gelen polarizasyon türleri..... 19

Şekil 3.10. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi..... 23

Şekil 3.11. Silindirik katı oksit yakıt hücresi..... 24

Şekil 3.12. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi..... 25

Şekil 5.1. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi üç boyutlu görünüm..... 34

.

Şekil 5.2. Silindirik katı oksit yakıt hücresi üç boyutlu görünüm..... 34

Şekil 5.3. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi modelinin iki boyutlu görünümü..... 35

Şekil 5.4. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin üç boyutlu görünümü..... 36

Şekil 5.5. Oluşturulan modelin katmanları..... 37

Şekil 5.6. Modelde kullanılan ağ yapısının kesit görünümü..... 38

Şekil 5.7. Modelde kullanılan ağ yapısının üç boyutlu görünümü..... 39

Şekil 5.8. Silindirik modelin doğrulanması..... 40

Şekil 6.1. 800 °C ve 1 atm'de düzlemsel ve silindirik KOYP'nin polarizasyon eğrileri..... 42

Şekil 6.2. Düzlemsel KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon eğrileri..... 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.3. Silindirik KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon eğrileri..... 43

Şekil 6.4. Düzlemsel KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de polarizasyon eğrileri..... 44

Şekil 6.5. Silindirik KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de polarizasyon eğrileri..... 45

Şekil 6.6. 800 °C ve 1 atm'de düzlemsel ve silindirik KOYP'nin güç eğrileri..... 46

Şekil 6.7. Düzlemsel KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de güç eğrileri..... 47

Şekil 6.8. Silindirik KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de güç eğrileri..... 47

Şekil 6.9. Düzlemsel KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de güç eğrileri..... 48

Şekil 6.10. Silindirik KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de güç eğrileri..... 49

Şekil 6.11. 800 °C ve 1 atm'de yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi..... 50

Şekil 6.12. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 800, 900 ve 1 000 °C'de polarizasyon eğrileri..... 51

Şekil 6.13. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de polarizasyon eğrileri..... 51

Şekil 6.14. 800 °C ve 1 atm'de yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin güç eğrisi..... 52

Şekil 6.15. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de güç eğrileri..... 53

Şekil 6.16. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 1 atm ,2 atm ve 3 atm'de güç eğrileri.. 53

Şekil 6.17. Düzlemsel KOYP 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon ve güç eğrileri..... 56

Şekil 6.18. Silindirik KOYP 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon ve güç eğrileri..... 56

Şekil 6.19. 800 °C ve 1 atm'de farklı KOYP'lerin polarizasyon ve güç eğrileri..... 57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
μ	Viskozite
$\mu_{yakıt}$	Yakıt kullanım faktörü
A/m^2	Akım yoğunluğu birimi
ΔH	Entalpi değişimi
ΔG	Gibbs serbest enerji değişimi
R	İdeal gaz sabiti
mL/dk	Akış debisi
T	Sıcaklık
V	Potansiyel fark
W/m^2	Güç yoğunluğu birimi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
KOH	Potasyum Hidroksit Çözeltisi
KOYH	Katı Oksit Yakıt Hücresi
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
MEG	Membran Elektrot Grubu
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi

1. GİRİŞ

Günümüzde artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte dünya genelinde enerji talebi büyük bir hızla artmaktadır. Bu talebin karşılanması için kullanılan fosil yakıtlar ise sınırlıdır. Dünya genelindeki fosil yakıtlardan petrol rezervinin neredeyse yarım yüzyıl, doğalgaz rezervinin ise yaklaşık yüzyıl ömrünün kaldığı öngörülmektedir [1]. Bunun yanı sıra fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan gazlardan dolayı meydana gelen sera etkisi ve iklim değişikliği beraberinde küresel ısınma problemini getirmiştir. Bu nedenle insanlar sürdürülebilir enerji konusunda yeni bir arayışa yönelmiştir. Bu noktada karşılaşılan en umut verici cihazlardan biri yakıt hücreleridir. Yakıt pilleri, gelecek vaat eden bir enerji dönüştürme teknolojisi olarak kabul edilir. Hemen hemen tüm güç üretim sistemlerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır ve tanınırlığının artması ile gelecekte daha da önem kazanacağı düşünülmektedir.

Yakıt pilleri ile ilgili yapılan ilk çalışma 1839 yılında Sir William Grove tarafından gerçekleştirilmiştir. Grove, suyun elektrolizi ile ilgili elektrokimyasal tepkimeler üzerinde çalışmalar yapmış ve elektrolizin tersi bir işlemle doğru katalizörleri kullanarak elektrik enerjisi üretilebileceği fikrini ortaya koymuştur [2]. Aynı yıl, Ludwig Mond ve Charles Langer, endüstriyel kömür gazı ve havayı kullanarak bunu başarmak için ilk pratik cihazı yaptılar. Kömürü veya karbonu elektriğe dönüştürebilen yakıt hücreleri geliştirmek için 1900'lerin başlarında daha fazla girişimde bulunulurken, içten yanmalı motorlar bu çağda geçici olarak daha üstün olmuştur. Francis Bacon, 1932'de alkalin elektrolit ve nikel elektrotlar kullanan bir hidrojen-oksijen hücresiyle ilk başarılı yakıt hücresini geliştirdi. 1959'da Bacon ilk olarak pratik bir beş kW'lık yakıt hücresi sistemini oluşturdu. 1960'larda, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından bir alkali yakıt hücresi geliştirildi ve uzay uçuşları sırasında güç ve su sağlamak için kullanıldı [3]. Uzun yıllar süren gelişimi sonrasında günümüzde yakıt hücreleri binalar için sabit güç, yardımcı güç, ulaşım gücü, mikro güç ve dağıtılmış güç üretimi gibi potansiyel olarak çok çeşitli uygulamalar için önemli bir teknoloji olarak görülmekte ve yakıt pili ürünlerinin araştırılması ve ticarileştirilmesi için önemli yatırımlar yapılmaktadır.

Yakıt hücresi, bir yakıtın kimyasal enerjisini bir elektrokimyasal reaksiyon yoluyla doğrudan elektrik işine dönüştüren bir enerji dönüşüm cihazıdır. Yakıt pilleri bir elektrolit

ve bu elektrolit çevresinde bulunan katot ve anot olarak adlandırılan iki elektrottan oluşmaktadır. Katot elektrotu bölümü oksijen elektrotu, anot elektrotu bölümü ise yakıt elektrotu olarak da adlandırılmaktadır. Hidrojen ve oksijenin ayrı ayrı elektrotlardan geçmesi ile birlikte indirgenme-yükseltgenme reaksiyonları sonucu elektrik ve ısı oluşmaktadır. Yakıt hücreleri isimlendirilmesinden de anlaşılacağı gibi bataryalara benzerlik gösterse de bataryalardan önemli farklılıkları vardır. Herhangi bir şekilde enerji depolamazlar ve sürekli bir yakıt akışını sürekli bir elektrik akımına dönüştürürler. Bu nedenle yakıt ve oksitleyici sürekli olarak sağlanmalıdır.

Tezin amacı

Bu çalışmada yakıtlardan elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla enerji üretimi sağlayan katı oksit yakıt pillerinin düzlemsel ve silindirik geometrilerdeki performansının karşılaştırılması ve yassı tüp katı oksit yakıt pili modelinin COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sürecinde oluşturulan üç farklı katı oksit yakıt pili tasarımının sayısal olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca modellenen yassı tüp katı oksit hücresinin değişen sıcaklık ve basınçlardaki akım, güç ve gerilim değerlerinin tartışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile yassı tüp katı oksit yakıt pilinin düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pilleriyle kıyaslaması gerçekleştirilmiş olup yassı tüp katı oksit yakıt pilinin sağlandığı avantajlar vurgulanarak literatüre katkı sağlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yakıt pilleri ile ilgili yapılan çalışmalarda ticarileşme ve maliyet azaltmanın yanı sıra verimliliğin artırılması ve malzeme çeşitliliğinin sağlanması da hedeflenmektedir. Literatürde bu konuda birçok teorik ve deneysel çalışma bulunmaktadır.

Zhang ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, doğrudan metan ile doldurulmuş simetrik çift taraflı katotlara sahip büyük bir yassı tüp katı oksit yakıt pilinin performansını ve kararlılığını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda çift taraflı katodun kalın anot desteği ve iç kanalları, metanın buharla reformasyonu için verimli bir mikro reaktör oluşturduğu ve metan-CO seçiciliğinin yüksek dönüşüm oranıyla gerçekleştiği sonucuna varmışlardır [4].

İlbaş ve Kümük, katot destekli bir katı oksit yakıt pili modelinin hücre özelliklerini etkileyen parametreleri araştırmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir katı oksit yakıt pili modeli türetilerek düşük kalorifik değerli kömür gazları ve diğer gazlar kullanılarak sayısal modelleme yapmışlardır. Çalışma sonucunda düşük kalorifik değerli kömür gazlarının katı oksit yakıt pillerinde yakıt kaynağı olarak kullanılabileceğini doğrulamışlar, ayrıca yakıt pilinin gücünün, basınç, sıcaklık ve hidrojen içeriği arttıkça arttığını göstermişlerdir [5].

Park ve diğerleri, iletken ve yoğun bir ara bağlantı filmine sahip anot destekli yassı borulu bir katı oksit yakıt pili geliştirmiştir. Ara bağlantı, her iki kısımda da düşük direnç ve yüksek stabilite sergilemiştir. Seramik ara bağlantıya sahip anot destekli yassı boru şeklindeki hücre, 850 °C'de 360 mW/cm^2 kadar yüksek bir güç yoğunluğu göstermiştir [6].

Colclasure ve diğerleri, anot destekli, boru şeklindeki katı oksit yakıt hücresinin bir modelini geliştirmişlerdir. Fiziksel temelli korunum, yakıt kanalı akışı, gözenekli ortam taşınımı, ısı transferi denklemlerini kullanarak kimyasal bileşim, sıcaklık, hız ve akım yoğunluğunun hücre performansı üzerindeki zamansal profillerini gözlemlemişlerdir [7].

Razbani ve diğerleri, düzlemsel çapraz akışlı elektrolit destekli katı oksit yakıt hücresinin kapsamlı bir sayısal modelini COMSOL Multiphysics yazılımını kullanarak oluşturmuşlardır. Metan içermeyen biyogazın, hidrojene kıyasla hücre üzerinde daha iyi akım yoğunluğu dağılımı sağladığı sonucuna varmışlardır [8].

Nagel ve diğerleri, düz, standart boru ve üçgen boru hücre geometrileri oluşturmuşlardır. Deneysel verilerle doğrulama yapılarak oluşturulan üç geometri için elektrokimyasal performans karşılaştırması yapmışlardır. Üçgen boru hücrenin performansının, standart boru hücre tasarımının neredeyse iki katı olduğu ve düzlemsel hücrenin, üçgen boru hücreye göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [9].

Akhtar ve diğerleri, nitrojen ile seyreltilmiş hidrojen/oksijen karışımı ile çalışan bir katı oksit yakıt hücresinin hidrodinamik ve elektrokimyasal performansını analiz etmişlerdir. Katalizör tabakalarındaki gözeneklilik artışının, elektrokimyasal reaksiyon için mevcut aktif alanı azaltabildiğini, ince gözeneklerin ise büyük bir basınç düşüşüne neden olabileceğini ve hidrodinamik bir soruna yol açabileceğini gözlemlemişlerdir [10].

Afshari ve Barzi, iki katı oksit yakıt hücresinin giriş havası kütle akış hızı değişimine dinamik tepkisini araştırmışlardır. Düzlemsel ve boru şeklindeki katı oksit yakıt pili tasarımı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği ilkelerine dayalı dinamik bir model geliştirmişlerdir. Giriş hava akışı koşullarının boru şeklindeki katı oksit yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisinin, düzlemsel bir katı oksit yakıt pili üzerindeki etkilerinden daha belirgin olduğu sonucuna varmışlardır [11].

Kemm ve diğerleri, düzlemsel ve boru şeklindeki hücrelerin farklı çalışma şartlarında termal ve elektrokimyasal performansının incelenmesiyle sabit güç üretimi için uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Yakıt pillerinde güç yoğunluğu geçişlerinin yanı sıra hücredeki gevşeme sürelerinin ve geçici sıcaklık gradyanlarının karşılaştırılmasını yapmışlardır [12].

İlbaş ve Kümük, katot destekli ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansını etkileyen parametreleri, iyonik ve elektronik yük transferi ile kütlenin, momentumun, türlerin ve enerjinin korunumunu içeren sonlu elemanlar yöntemi tabanlı bir katı oksit yakıt pili modeli geliştirerek sayısal olarak incelemişlerdir. Elektrolit destekli ile karşılaştırıldığında, katot destekli katı oksit yakıt pilinin destek kalınlığı ve çalışma parametreleri açısından daha yüksek performans sergilediğini göstermişlerdir [13].

Hussain ve diğerleri, yaptıkları çalışmada COMSOL Multiphysics yazılımını kullanarak modelleme ve simülasyonlar yapmışlardır. Düzlemsel orta sıcaklık katı oksit yakıt hücresi için üç boyutlu bir model geliştirilmişlerdir. Yapılan simülasyonlar, katı oksit yakıt

hücresinin gelişmiş performansını ortaya koymuştur. Maksimum güç değerinin sıcaklıktaki önemli artış sonucu 4 ila 3,3 kW/m^2 değerlerinde olup hala yüksek kaldığı görülmektedir. Sonuçlar, akım yoğunluğunun sıcaklık artışıyla 6 700 ila 5 500 A/m^2 değerleri arasında olduğunu göstermiştir [14].

Suzuki ve diğerleri, 0,2 cm kalınlığında, 1,3 cm genişliğinde mikro yassı tüplü katı oksit yakıt hücrelerinin imalat sürecini, uygun maliyetli ekstrüzyon ve daldırma kaplama yöntemi kullanarak geliştirmişlerdir. Hücre 500 ile 700 °C çalışma sıcaklığı arasında incelenmiş ve hidrojen yakıtı ile sırasıyla 0,1 ve 0,55 W/cm^2 güç yoğunluğu göstermiştir. Yakıt akış hızının etkisi de her çalışma sıcaklığında incelenmiş ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarında güçlü etki gösterdiği analiz edilmiştir [15].

Park ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile elektrokimyasal reaksiyonları ve taşınım olayını sayısal bir yaklaşım kullanarak incelemişlerdir. Sayısal sonuçlar, modellerin fiziksel özellikleri, geçerli denklemler ve elektrokimyasal reaksiyon modelleri ile değerlendirilmiştir. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi performansı, aktive edilmiş elektrokimyasal reaksiyon nedeniyle daha yüksek bir çalışma sıcaklığı ile iyileştiği görülmüştür. Daha yüksek mekanik mukavemet elde etmek için hücre desteği kalınlaştırılırsa, kütle aktarım hızının azaldığı ve ohmik polarizasyonun arttığı analiz edilmiştir. Bu olaylar performansı düşürebilmektedir. Hidrojen miktarının arttırılması, daha yüksek bir kütle aktarım hızı sağlamaktadır. Bu nedenle yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin daha yüksek ve daha düzgün bir akım yoğunluğu dağılımı elde ettiği sonucuna varmışlardır [16].

Cui ve diğerleri, çalışmalarında bir yakıt kanalı, bir anot, bir katot ve bir elektrolit tabakası içeren yassı tüplü bir seri halinde bölümlenmiş katı oksit yakıt hücresinin voltaj dağılımını değerlendirmek için iki boyutlu bir model kullanmışlardır. Sonuçlar, diğer hücre boyutları sabitlendiğinde 5 mm'lik anot uzunluğunun, yassı tüp katı oksit yakıt hücresi için en yüksek maksimum güç yoğunluğunu verdiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda yassı tüp katı oksit hücreleri serisinin tek hücresinin anot uzunluğunu değiştirerek, gerilim homojenliği önemli ölçüde iyileştirilebildiği, bu durumun alt akıştaki tek hücrenin düşük voltajını önlediği ve sistemin geliştirilmesi ve sanayileşmesi için etkili tasarım önerileri sağladığı sonuçlarına ulaşmışlardır [17].

Khan ve diğerleri, uygulanan akım yoğunluğunun anot destekli yassı tüp katı oksit yakıt hücrelerinin uzun vadeli performans düşüşü davranışına etkilerini incelemişlerdir. Anot destekli katı oksit yakıt hücreleri üzerindeki dayanıklılık testlerini, 1 000 saat süreyle 800 °C'de, uygulanan akım yoğunlukları 200, 450, 700 ve 1 000 mA/cm^2 olarak gerçekleştirmişlerdir. Uzun vadeli test sırasında, zaman içinde voltaj kaybıyla değerlendirilen performans düşüşü, uygulanan yüksek akım yoğunluğu ile büyük ölçüde arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmada yürütülen sistematik analiz ile, anot destekli yassı tüp şeklindeki katı oksit hücrelerin elektrokimyasal performans düşüşünü değerlendirmişlerdir [18].

Lu ve diğerleri, mekanik olarak güçlü özelliklere ve daha geniş aktif alana sahip çift tarafı hava elektrotlarına dayanan yeni bir yassı tüp katı oksit bir elektroliz hücresi üzerinde çalışma yapmışlar, CO_2 elektrolizini, elektrokimyasal performansını ve uzun vadeli dayanıklılığını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, yeni hücre geometrisinin CO_2 elektrolizini etkili bir şekilde gerçekleştirebildiğini ve stabilitenin literatürde bildirilen geleneksel düzlemsel katı oksit yakıt hücrelerinden daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [19].

Milcarek ve diğerleri, yaptıkları çalışma ile 1,0 ile 5,0 arasındaki eşdeğerlik oranlarında, 10 ile 250 mL/dk akış debilerinde ve 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C maksimum duvar sıcaklıklarında etanın yanmasını araştırmışlardır. Tekrarlayan sönme ve ateşleme ile alev, zayıf alev ve normal alev rejimlerini, her durumda egzoz bileşimi ile karakterize etmişlerdir. Mikro yapıdaki silindirik katı oksit yakıt hücrelerde açık devre voltajı, polarizasyon ve güç yoğunluğunun tekrarlayan sönme ve ateşleme ile alevden etkilendiğini bulmuşlardır. Ayrıca % 64 oranında yüksek yakıt kullanımı sağlamışlar ve uzun süreli testler ile bir karşılaştırma raporu elde etmişlerdir [20].

Osafi ve diğerleri, çalışmalarında elektrolit olarak anodik alümina membran kompozitini kullanan düzlemsel katı asit yakıt hücresi için üç boyutlu, izotermal ve kararlı durum modeli oluşturmuşlardır. Model oluşum sürecinde, yakıt hücresinde akış kanalı, gaz difüzyon katmanı ve katalizör katmanı bölgelerini tanımlamak için kütle, momentum, elektrik yükü taşınımı ve elektrokimyasal denklemleri kullanmışlardır. COMSOL Multiphysics yazılımında sonlu eleman yöntemini kullanarak model denklemleri sayısal olarak çözülmüştür. Son olarak, bu modelin sonuçlarını, modeli doğrulamak için literatürde

bulunan deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonucun rapor edilen deneysel verilerle uyum sağladığı ve tasarımın birçok açıdan avantajlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır [21].

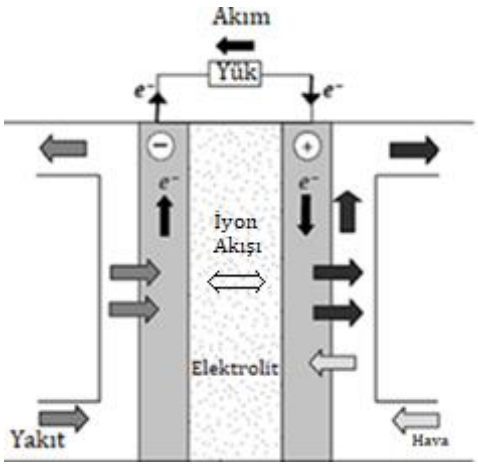
3. TEORİK BİLGİLER

Günümüzde yakıt pilleri, uygun fiyat, sessizlik, verimlilik ve çevre dostu enerji üretimi nedeniyle geniş bir kullanım ve uygulama alanına sahiptir. Yakıt hücresi, yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece elektrik enerjisi üretme özelliğine sahiptir. Yakıt pilleri uzay araçlarında, deniz araçlarında, cep telefonu gibi taşınabilir cihazlarda, dizüstü bilgisayarlarda, evlerde, ofislerde, hastanelerde, otellerde ve sanayi kuruluşlarında kullanılabilir.

Yakıt pilleri, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtlar, rafineri ürünleri, kimyasal ürünler gibi alternatif kaynaklardan alınan yakıtın kimyasal enerjisini ısı ve elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Yakıt pili sistemleri, yakıt hücresi tipine bağlı olarak yaklaşık % 40-60 verime sahiptir, ısıtma sıcaklığı değerlendirildiğinde yakıt hücresi verimi daha da yükselmektedir [22].

3.1. Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Şekil 3.1'de birçok yakıt hücresi tipinde ortak olan bileşenlere sahip genel bir yakıt hücresinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yakıt hücresi şeması [23]

Birbirinden ayrı sıvı veya gaz faz yakıt ile oksitleyici akımları, elektrolit-elektrot grubu ile ayrılan akış kanallarından girer. Reaktantlar, akım oluşturmak için elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği katalizör katmanına difüzyon ve/veya konveksiyon yoluyla taşınır. Bazı yakıt hücrelerinde elektrot ile akım toplayan reaktant akış kanalları arasında

elektrot yüzeyinden elektronları ve türleri taşıma işlevi gören gözenekli bir temas tabakası bulunur.

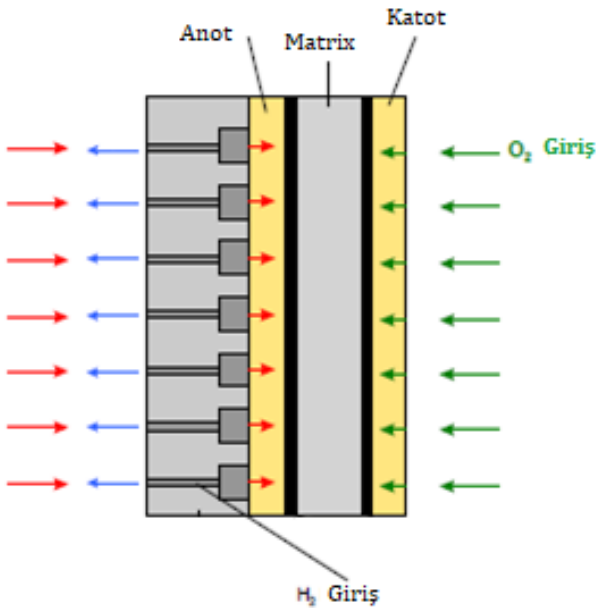
Anot elektrotunda, yakıtın elektrokimyasal oksidasyonu, hücre bağlantısı olarak da adlandırılan bipolar plakadan dış devreye akan elektronları üretirken, üretilen iyonlar devreyi tamamlamak için elektrolit boyunca hareket eder. Dış devredeki elektronlar yükü tahrik eder ve katodik oksitleyici indirgeme reaksiyonunda oksitleyici ile yeniden birleştikleri katot katalizörüne geri döner. Böylece yakıt hücresinin ürünleri üç başlıkta toplanmaktadır: Kimyasal ürünler, atık ısı ve elektrik gücü.

3.2. Yakıt Pili Çeşitleri

3.2.1. Alkali yakıt hücresi

Alkalin yakıt hücresi, 1960 yılından itibaren geliştirilen, modern yakıt hücrelerinin ilk örneklerinden birisidir. O yıllarda Apollo uzay aracına yerleşik elektrik gücü sağlamak için kullanılmıştır [24].

Alkali yakıt hücrelerinde, elektrolit olarak sulu potasyum hidroksit çözeltisi (KOH) kullanır. Elektrolit katı bir matriste tutulur. Nikel, metal oksitler ve soy metal elektrot dahil olmak üzere çok çeşitli elektrokatalizörler kullanılabilir. Çalışma sıcaklıkları, konsantre KOH (% 85) kullanılarak 250 °C'ye kadar yükselirken daha az konsantre KOH (% 35-50) kullanılarak çok daha düşük (120 °C) olabilir [25]. Alkali yakıt hücrelerinde yakıt beslemesi hidrojen ile sınırlıdır. CO_2 zehirlenmesi hususunda aşırı hassas bir yakıt hücresi olması sebebiyle yakıt ya da havada bulunan az miktardaki CO_2 dahi hücre çalışmasını etkilemektedir. Alkali yakıt pili diğer düşük sıcaklık yakıt pilleri ile karşılaştırıldığında yüksek elektriksel verime ve yüksek yük yoğunluğuna sahiptir [26]. Şekil 3.2'de alkali yakıt hücresi çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.2 Alkali yakıt hücresi çalışma prensibi [27]

Alkali yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen reaksiyonlar Eş. 3.1, 3.2 ve 3.3'te gösterilmiştir.

Katot Tepkimesi : $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ (3.1)

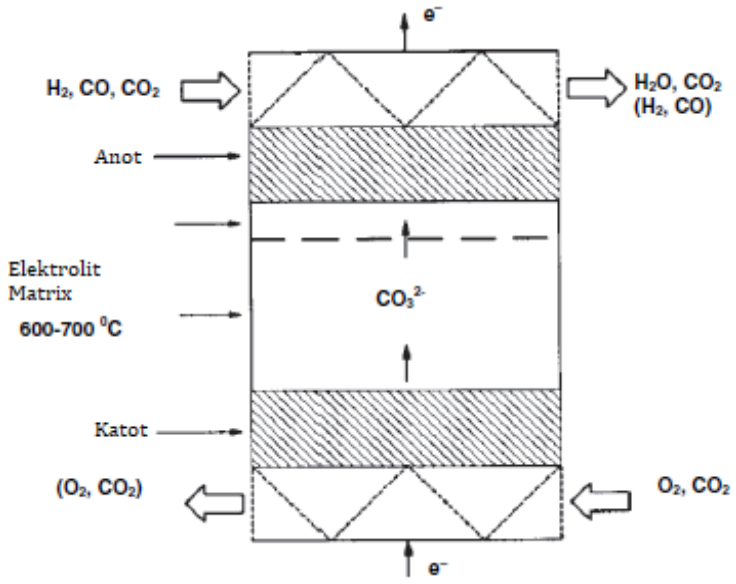
Anot Tepkimesi : $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$ (3.2)

Net Tepkime : $O_2 + 2H_2 \rightarrow 2H_2O$ (3.3)

3.2.2. Eriyik karbonat yakıt hücresi

Eriyik karbonat yakıt hücresinde, elektrolit olarak erimiş karbonat tuzu karışımı kullanır. Elektrolitin bileşimi değişmekle beraber genellikle lityum karbonat ve potasyum karbonattan oluşur. Yaklaşık 650 °C çalışma sıcaklığında, tuz karışımı sıvı haldedir ve iyi bir iyonik iletkendir. Elektrolit ise gözenekli, yalıtkan ve kimyasal olarak inert bir seramik matris içinde süspanse edilir. Eriyik karbonat yakıt hücrelerinde yüksek çalışma sıcaklıklarında, elektrotlar için soy metaller gerekli değildir; krom, nikel veya alüminyum alaşımı anot olarak ve nikel oksit katot olarak kullanılabilir. Hücre performansı, çalışma sıcaklığına duyarlıdır. Hücre sıcaklığındaki değişim, hücre voltajında önemli ölçüde bir fark oluşturur. Meydana gelen yüksek sıcaklık çalışmada malzemelerin ömürlerini etkilemekle dezavantaj oluşturmaktadır [28]. Ayrıca, atık ısının kullanılması eriyik karbonat yakıt

hücresinde enerji tasarrufu olarak avantaj sağlamaktadır [29]. Şekil 3.3'te eriyik karbonat yakıt hücresi çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.3. Eriyik karbonat yakıt hücresi çalışma prensibi [30]

Eriyik karbonat yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen reaksiyonlar Eş. 3.4, 3.5 ve 3.6'da gösterilmiştir.

Katot Tepkimesi $: {}^{1}/_{2}\, O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ (3.4)

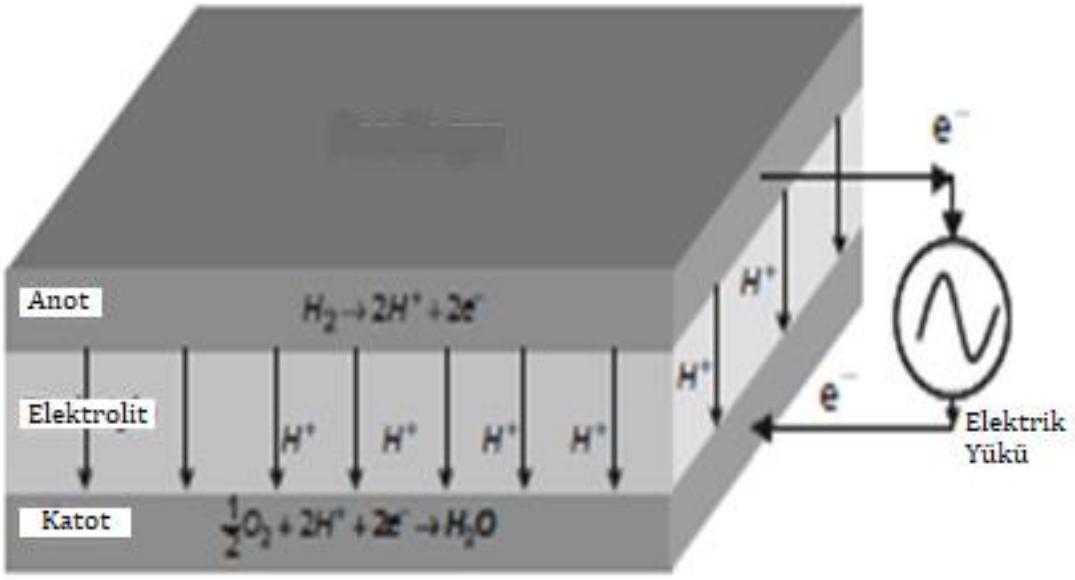
Anot Tepkimesi $: H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ (3.5)

Net Tepkime $: {}^{1}/_{2}\, O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$ (3.6)

3.2.3. Fosforik asit yakıt hücresi

Fosforik asit yakıt hücresi, sivil uygulamalar için ticarileştirilen ilk yakıt hücresi teknolojisidir. Bu sisteme karşı ilgi 1960'ların ortalarında gelişmiştir çünkü fosforik asit, 150-200 °C ara sıcaklıklarda bir yakıt hücresinde konsantre bir biçimde (% 85'in üzerinde) kullanılabilmektedir [30]. O yıllarda organik yakıtları bu yüksek sıcaklıklarda elektro-okside etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, bu sıcaklıklarda dahi, yüksek yüklemede en iyi elektro katalizörün aktivitesinin minimum olduğu tespit edilmiştir. Bu sistemde 200 °C'deki atık ısı, endotermik buhar reforming reaksiyonu ile verimli bir şekilde

kullanılabilmektedir [31]. Fosforik asit yakıt hücresi özellikle güç ve düşük emisyon açısından güç üretim uygulamalarının çoğu için iyi bir performans göstermektedir [32]. Şekil 3.4'te fosforik asit yakıt hücresi çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.4. Fosforik asit yakıt hücresi çalışma prensibi [25]

Fosforik asit yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen reaksiyonlar Eş. 3.7, 3.8 ve 3.9'da gösterilmiştir.

Katot Tepkimesi : $4\,H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ (3.7)

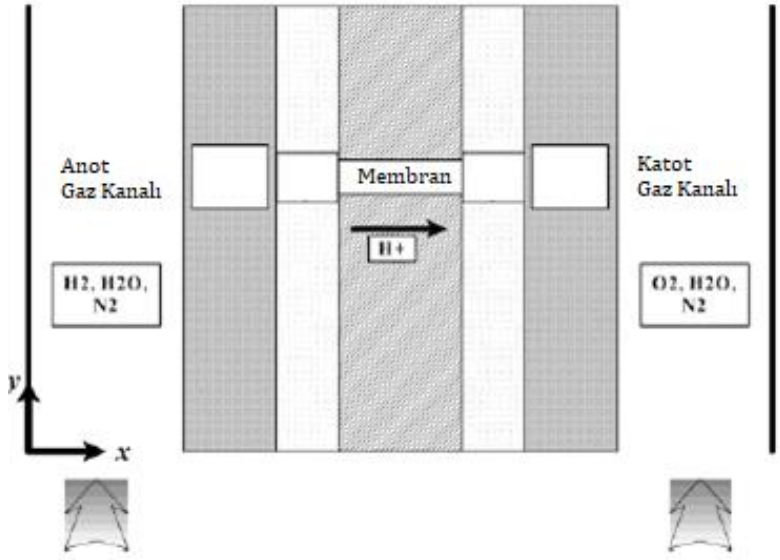
Anot Tepkimesi : $2H_2 \rightarrow 4\,H^+ + 4e^-$ (3.8)

Net Tepkime :$O_2 + 2H_2 \rightarrow 2\,H_2O$ (3.9)

3.2.4. Polimer elektrolit yakıt hücresi

Polimer elektrolit yakıt hücresindeki elektrolit, mükemmel bir proton iletkeni olan bir iyon değişim zarıdır. Bu yakıt hücresindeki tek sıvı sudur, bu nedenle korozyon sorunları minimumdur. Membrandaki su yönetimi verimli performans için oldukça önemlidir; yakıt hücresi, yan ürün suyunun üretildiğinden daha hızlı buharlaşmayacağı koşullar altında çalışmalıdır, çünkü membran hidratlanmalıdır. Polimer elektrolit yakıt hücresi, polimer tarafından uygulanan çalışma sıcaklığındaki sınırlama nedeniyle genellikle 100 °C'nin

altında, daha tipik olarak 60-80 °C civarında çalışmaktadır. Polimer elektrolit yakıt pilleri, özellikle yakıt hücreli araçlar için birincil güç olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te polimer elektrolit yakıt hücresi çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.5. Polimer elektrolit yakıt hücresi çalışma prensibi [33]

Polimer elektrolit yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen reaksiyonlar Eş. 3.10, 3.11 ve 3.12'de gösterilmiştir.

Katot Tepkimesi $: 2\,H^+ + {}^1\!/_2\,O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$ (3.10)

Anot Tepkimesi $: H_2 \rightarrow 2\,H^+ + 2e^-$ (3.11)

Net Tepkime $: {}^1\!/_2\,O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$ (3.12)

Polimer elektrolit yakıt hücresinin başlıca avantajları şunlardır:

- Elektrolit katı olduğu için elektrolit sızıntısı riski bulunmamaktadır.
- Düşük çalışma sıcaklığına sahiptir, böylece hücre çalışmaya başlayacağında ısınması için uzun bir süreye ihtiyaç duymaz.
- Güç yoğunluğu oldukça yüksektir.

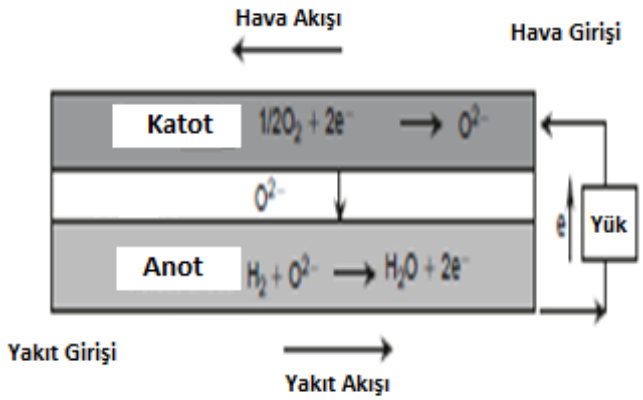
Polimer elektrolit yakıt hücresinin dezavantajları ise şunlardır [34]:

- Membran iyi bir şekilde hidrasyona maruz bırakılmalıdır. Aksi halde, yakıt hücresinin bozulmasına neden olabilecek zar bozulması riski vardır.
- Membran pahalıdır.
- Katalist ile membranın zehirlenmeye yol açabilmesi söz konusudur.

3.2.5. Katı oksit yakıt hücresi

Katı oksit yakıt pilleri, katı, gözeneksiz bir metal oksit, genellikle itriya stabilize zirkonya elektrolite sahiptir. Hücre, oksijen iyonlarının iyonik iletiminin gerçekleştiği 600 - 1 000 °C'de çalışır. Katı oksit yakıt pillerinde korozyonu veya elektrolit yönetimi sorunları olan sıvı elektrolit yoktur. Bununla birlikte katı oksit yakıt pilinin yüksek sıcaklığı, malzemelerine katı gereklilikler getirmektedir. Uygun düşük maliyetli malzemelerin geliştirilmesi ve seramik yapıların düşük maliyetli imalatı şu anda katı oksit yakıt pillerinin karşılaştığı temel teknik zorluklardır.

Yakıt hücresi, bir elektroliti sıkıştıran iki gözenekli elektrottan yapılmıştır. Hava, katot boyunca akar. Bir oksijen molekülü katot-elektrolit ara yüzüyle temas ettiğinde, katottan elektronları alır. Oksijen iyonları elektrolit içinde yayılır ve anotla temas ettikleri hücrenin diğer tarafına geçer. Oksijen iyonları, anot-elektrolit ara yüzünde yakıtla karşılaşır ve katalitik olarak reaksiyona girerek su, ısı ve elektron açığa çıkar. Elektronlar dış devre boyunca taşınır ve elektrik enerjisi sağlanır. Şekil 3.6'da katı oksit yakıt hücresi çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.6. Katı oksit yakıt hücresi çalışma prensibi [25]

Katı oksit yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen reaksiyonlar Eş. 3.13, 3.14 ve 3.15'te gösterilmiştir.

Katot Tepkimesi $: {}^{1}/_{2}\, O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ (3.13)

Anot Tepkimesi $: H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ (3.14)

Net Tepkime $: {}^{1}/_{2}\, O_2 + H_2 \rightarrow H_2O$ (3.15)

Katı oksit yakıt hücreleri, çeşitli hidrokarbon yakıtlar dahil olmak üzere farklı yakıtların kullanılmasına olanak sağlar. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklığı, kojenerasyon uygulamalarında son derece verimli dönüşüm sağlamaktadır. Hem basit döngülü hem de hibrit katı oksit yakıt pili sistemleri, minimum hava kirletici ve düşük sera gazı emisyonları ile birlikte, enerji üretim sistemlerinde yüksek verimlilikleri ile dikkat çekmektedirler. Bu özellikler katı oksit yakıt pilini düşük ve yüksek kapasite sabit güç üretimi için cazip, gelişen bir teknoloji haline getirmiştir. Katı oksit yakıt pillerinin avantajları şunlardır [35],[36]:

- Mekanik olarak karmaşık olmayan cihazlardır.
- Doğrudan doğalgazla beslenebilirler.
- Kataliz için değerli metaller gerekmez.
- Yakıt hücresinde üretilen ısı, diğer işlemler için kullanılabilir. Kojenerasyon sistemleri ile entegre çalıştığında sistem verimi % 80'e kadar çıkabilmektedir.
- Düşük emisyona sahiptir.

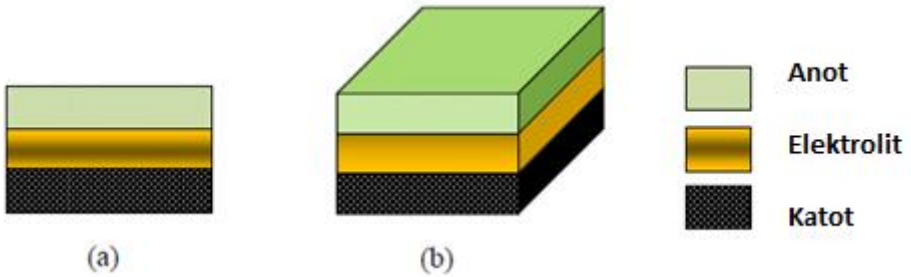
Katı oksit yakıt pillerinin dezavantajları:

- Yüksek çalışma sıcaklığı, seramik gibi malzemeler gerektirir. Kullanılan seramik malzemelerin imalatı pahalıdır ve kırılgandır.
- Üretilen güç başına maliyetleri her geçen gün düşmesine karşın şu an için konvansiyonel sistemlere göre yüksektir.

<u>Katı oksit yakıt hücresinin elemanları</u>

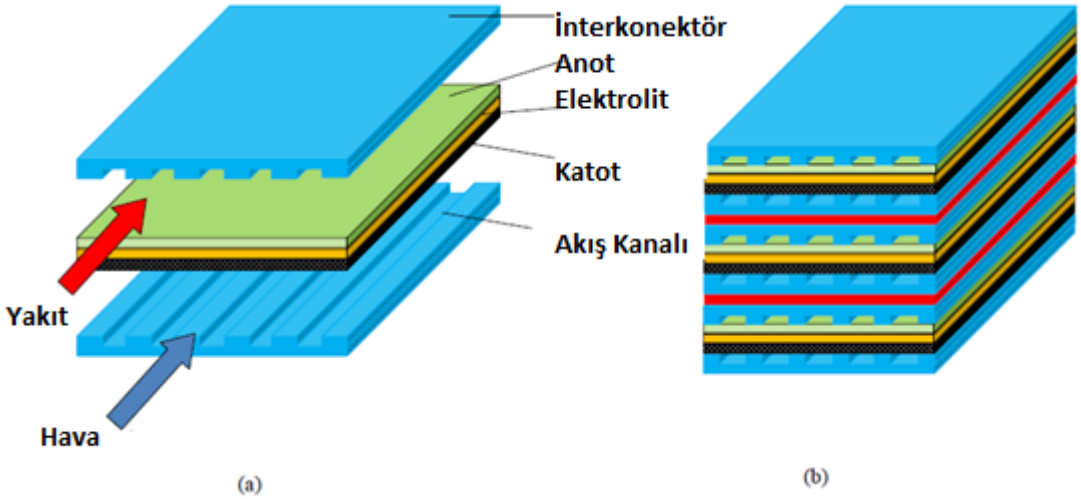
Katı oksit yakıt pilleri genellikle iki ana bölümden oluşmaktadır. Bu kısımlar interkonnektör ve membran elektrot grubu (MEG) olarak isimlendirilmektedir. MEG incelendiğinde oksit iyon iletkenlikte katı seramik yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu kısım yakıt pilinin ana yapısını oluşturmaktadır. İnterkonnektör kısmı ise elektrotlardan akım toplamak için

geliştirilen elemanlardır. Şekil 3.7'de MEG yapısının görüntüsü kesit ve izometrik olarak verilmiştir.



Şekil 3.7. MEG yapısının kesit (a) ve izometrik (b) olarak görüntüsü [37]

Tek bir hücre düşük bir voltaj değeri oluşturduğundan yüksek güç uygulamaları için hücreler seri ve paralel bağlanabilmekte ve katı oksit yakıt pili stakları meydana gelmektedir. Şekil 3.8'de tek hücre ve stak görünümü verilmiştir.



Şekil 3.8. Tek hücre (a) ve stak görünümü (b) [37]

3.3. Yakıt Pilinin Temelleri

3.3.1. Açık devre potansiyeli

Yakıt pillerinde açık devre potansiyeli, devreden akım geçmiyorken ölçülen potansiyel değerini ifade etmektedir. Yakıt pillerinde kimyasal enerji geleneksel sistemlerin aksine bir ara dönüşüm aşaması olmadan doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Başka bir deyişle Gibbs serbest enerjisindeki değişim maksimum teorik işe eşittir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$P = \Delta G = \Delta H - T.\Delta S = I.V \quad (3.16)$$

Eş. 3.16'da, P maksimum elektrik gücünü, T sıcaklığı, ΔH entapli değişimini, ΔS entropideki değişimi, I dış devreden geçen akımı, V voltajı ifade etmektedir.

Elektronların akımıyla birlikte oluşan yük şu şekilde ifade edilebilir:

$$I = -n.F \quad (3.17)$$

Eş. 3.17'de, F Faraday sabitini, n elektron sayısını ifade etmektedir ve katı oksit yakıt pili reaksiyonları için n değeri ikiye eşittir.

Eş. 3.16 ve 3.17 birleştirilirse, tersinir açık devre potansiyeli veya elektromotor kuvveti olarak isimlendirilen maksimum gerilim elde edilmektedir. Başka bir deyişle bu değer, yakıt pilinin ulaşabileceği maksimum potansiyel farkı ifade etmektedir ve şu şekilde hesaplanabilir.

$$V = \frac{-\Delta G}{2F} \quad (3.18)$$

Eş. 3.18'de, V açık devre potansiyelini gösterirken, ΔG Gibbs enerjisi değişimini ifade ediyor olup çalışma sıcaklığı, basınç ve konsantrasyona bağlıdır. Hidrojen yakıtlı bir katı oksit yakıt pili için şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta G = \Delta G^0 - RTln\left(\frac{P_{H_2}\left(P_{O_2}\right)^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \quad (3.19)$$

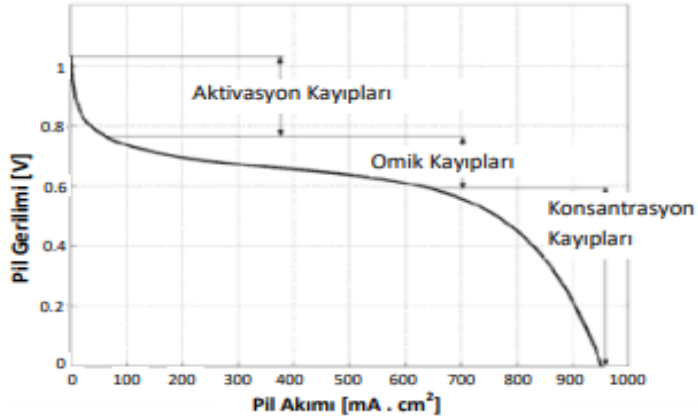
Eş. 3.19'da, ΔG^0 standart şartlar için Gibbs serbest enerjisi değişimini, R ideal gaz sabitini, P ise reaktif maddelerin kısmi basınçlarını ifade etmektedir.

Eş. 3.19, Eş. 3.18'de, ilgili kısma yazılırsa Nernst denklemi ortaya çıkmakta ve Nernst voltajı olarak ifade edilebilen açık devre potansiyeli hesaplanabilmektedir.

$$V = -\frac{\Delta G^0}{2F} + RTln\left(\frac{P_{H_2}\left(P_{O_2}\right)^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \quad (3.20)$$

3.3.2. Polarizasyonlar

Polarizasyonlar, yakıt pilinin mikro yapısı, tasarımı ve malzemesindeki sorunlardan dolayı meydana gelen voltajdaki kayıplardır. Bir yakıt pilinde karşılaşılan üç tür polarizasyon vardır: Aktivasyon polarizasyonu, Konsantrasyon polarizasyonu ve ohmik polarizasyon. Yakıt pilinde meydana gelen polarizasyon türleri ve bölgeleri Şekil 3.9'da gösterilmiştir [38].



Şekil 3.9. Bir yakıt pilinde meydana gelen polarizasyon türleri

Aktivasyon kayıpları bölgesi: Bu bölgede gerilim çok hızlı değişmektedir. Aynı zamanda elektrokimyasal sürecin en düşük hızda gerçekleştiği bölgedir. Bu kısımda akım-gerilim değişimi üstel fonksiyonla tanımlanmaktadır [39].

Ohmik kayıp bölgesi: Bu bölgede gerilimin azalmasının nedeni aktif dirençten kaynaklanmaktadır. Bölgeyi ifade eden eğri, azalan fonksiyon olarak tanımlanmaktadır [40].

Konsantrasyon kayıpları bölgesi: Gerilimin akıma göre çok daha hızlı değişim gösterdiği bölgedir. Bu değişim elektrotlardaki difüzyon hızından kaynaklanmaktadır [41].

<u>Ohmik polarizasyon</u>

Yakıt pili çalışırken iyonların akımına karşı ortaya çıkmaktadır. Ohmik kayıplardan meydana gelen voltaj kaybı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\eta_{ohm} = i \,.\, R_e \tag{3.21}$$

Eş. 3.21'de R_e elektrotlar ve elektrolitteki toplam iyonik direnci, i ise akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

Aktivasyon polarizasyonu

Anot ve katot yüzeylerinde gerçekleşen reaksiyonların hızları ile ilişkili olan kayıplardır. Reaksiyonların başlangıcı için aşılması gereken enerjiden dolayı meydana gelen kayıplardır Bu enerjiye ulaşılması durumunda reaksiyonlar gerçekleşebilmektedir. Butler-Volmer denklemi ile ifade edilebilen aktivasyon polarizasyonu anot ve katot için şu şekilde yazılabilir[42]:

$$i_a = i_{oa}\left[\exp\left(\frac{\beta \eta_e F \eta_{act,a}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)\eta_e F \eta_{act,a}}{RT}\right)\right] \quad (3.22)$$

$$i_c = i_{oc}\left[\exp\left(\frac{\beta \eta_e F \eta_{act,c}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)\eta_e F \eta_{act,c}}{RT}\right)\right] \quad (3.23)$$

Transfer katsayısı $\beta = 0.5$ alınıp denklemler yeniden düzenlenir.

Anot tarafı için;

$$i_{a,ct} = i_{o,a}.x_{h_2}\frac{c_t}{c_{h_2,ref}}\left[\exp\left(\frac{0.5F}{RT}\eta\right) - \exp\left(-\frac{0.5F}{RT}\eta\right)\right] \quad (3.24)$$

Katot tarafı için;

$$i_{c,ct} = i_{o,c}.\left[\exp\left(\frac{0.5F}{RT}\eta\right) - x_{o_2}\frac{c_t}{c_{o_2,ref}}\exp\left(-\frac{0.5F}{RT}\eta\right)\right] \quad (3.25)$$

Konsantrasyon polarizasyonu

Konsantrasyon polarizasyonu, gözenekli yapıdaki elektrotlardan gaz taşınımı ve elektrotların yapısından kaynaklanan durumdur.

Gözenekli ortamdaki her i bileşeni için efektif gaz difüzyon katsayısı, Knudsen difüzyonu ile ifade edilebilmektedir [43].

$$D_{i_{eff}} = \frac{\varepsilon}{\tau}\left(\frac{1}{D_{i_m}} + \frac{1}{D_{i_k}}\right)^{-1} \quad (3.26)$$

Konsantrasyon polarizasyonu şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$\eta_{con} = -\frac{RT}{nF}\left[\frac{1}{2}\ln\left(1 - \frac{i}{i_{lim}^{k}}\right) + \ln\left(1 - \frac{i}{i_{lim}^{a}}\right) - \ln\left(1 + \frac{P_{H_2} i}{P_{H_2O} i_{lim}^{a}}\right)\right] \quad (3.27)$$

3.3.3. Gerçek hücre potansiyeli

Yakıt pili sistemleri için gerçek hücre voltajı şu şekilde hesaplanabilmektedir.

$$E_i = E_{nernst} - \eta_{ohm} - \eta_{act} - \eta_{con} \quad (3.28)$$

Eş. 3.28'de, E_{nernst}, Nernst potansiyelini, η_{ohm} ohmik kayıpları, η_{act} aktivasyon kayıplarını, η_{con} konsantrasyon kayıplarını temsil etmektedir.

3.3.4. Yakın pillerinde verim

Yakıt pillerinde teorik olarak üretilebilecek gerilim değeri şu şekilde ifade edilir.

$$V_{teorik} = \frac{\Delta H}{2F} \quad (3.29)$$

Pil gerilimine göre verim ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\eta_{yakıt\ pili} = \frac{V_{yakıt\ pili}}{V_{teorik}} \quad (3.30)$$

Eş. 3.30'da, $V_{yakıt\ pili}$ gerçek hücre voltajını göstermektedir. Bu denkleme göre yakıt pilinde besleme yakıtının tümünün tüketildiği varsayımı yapılmaktadır. Ancak gerçekte tüm yakıtın tüketilmesi söz konusu değildir. Bu durumda yakıt kullanım faktörü kavramı devreye girmektedir. Yakıt kullanım faktörü ise şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$\mu_{yakıt} = \frac{Yakıt\ pilinde\ tüketilen\ yakıt\ miktarı}{Yakıt\ piline\ beslenen\ yakıt\ miktarı} \quad (3.31)$$

Faraday verimi olarak da bilinen yakıt kullanım verimi göz önüne alındığı zaman katı oksit yakıt pilinde verim ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\eta_{yakıt\ pili} = \mu_{yakıt} \frac{V_{yakıt\ pili}}{V_{teorik}} \tag{3.32}$$

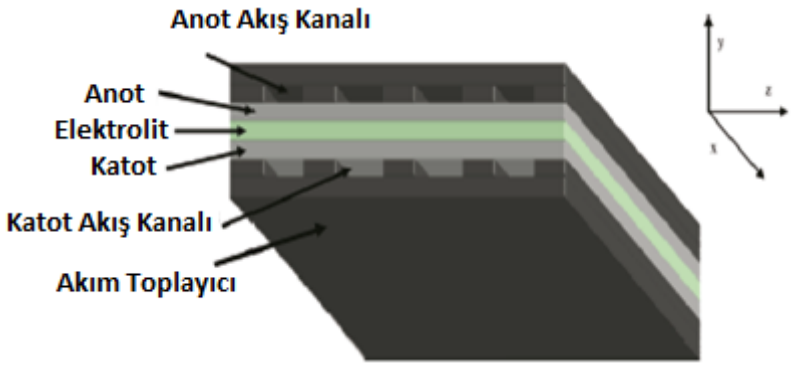
3.4. Katı Oksit Yakıt Hücresi Çeşitleri

Katı oksit yakıt pilinin ilk tasarımından günümüze kadar birçok farklı geometride hücre geliştirilmiştir. Bu çalışmaların çoğu düzlemsel ve silindirik tasarım hücrelerine odaklanmış ve diğer geometriler daha az popüler hale gelmiştir. Bu iki tasarımın her birinin bir dizi ilginç özellikleri vardır: Örneğin, düzlemsel katı oksit yakıt pili, merkezi eksenden yakıtla beslenen dairesel bir disk formunda veya kenarlardan beslenen bir kare plaka formunda olabilmektedir. Silindir şeklindeki katı oksit yakıt pili tasarlanan sisteme bağlı olarak büyük veya çok daha küçük çaplı olabilmektedir. Ayrıca, silindirler düz olabilmekte ve elektrot katmanlarının üretilmesi için kolayca basılabilir yüzeyler sağlamak için birbirine birleştirilebilmektedir.

Normal çalışma koşullarında, tek bir hücre çok küçük bir voltaj değeri üretir. Katı oksit yakıt pillerinden yüksek voltaj ve güç elde etmek için pek çok hücrenin bir arada istiflenmesi gereklidir ve bu, hava-yakıt yönlendirme ve sızdırmazlık gibi diğer işlevleri sağlamak için genellikle karmaşık şekillerde imal edilen ara bağlantı malzemeleri kullanılarak farklı şekillerde yapılabilmektedir.

3.4.1. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi

Düzlemsel bir katı oksit yakıt pilinde hücre bileşenleri, elektriksel seriler halinde bağlanan düz plakalar olarak yapılandırılır. Şekil 3.10'da düzlemsel bir katı oksit yakıt hücresinin tipik bileşenlerinin bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi [44]

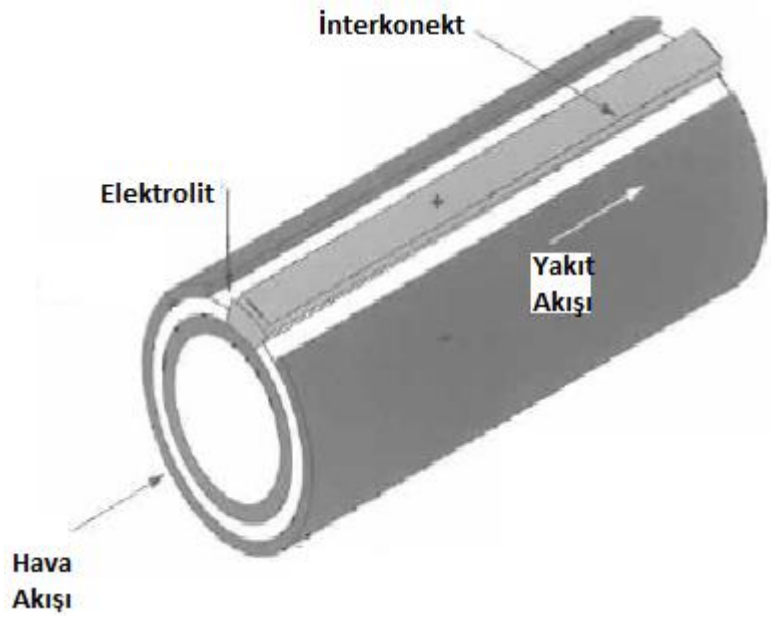
Seramik teknolojisindeki gelişmeler, özellikle ince tozların sentezlenmesi, mikro yapı ilişkilerinin uyarlanması ve karmaşık yapıların üretilip işlenmesi düzlemsel katı oksit yakıt pillerine olan ilginin artmasına katkıda bulunmuştur. Günümüzde düzlemsel katı oksit yakıt pillerin üretimi, performansı ve çalışma koşullarında önemli ilerleme sağlanmıştır.

3.4.2. Silindirik katı oksit yakıt hücresi

Silindirik katı oksit yakıt hücresi alanında ilk çalışma 1970'lerin sonlarında ABD Westinghouse Electric Corporation tarafından yapılmıştır. Tasarlanan hücrede, üzerine silindirik anotların yerleştirildiği 1-2 mm kalınlığında, gözenekli kireçle stabilize edilmiş zirkonya destek tüpü kullanmıştır.

Silindirik katı oksit yakıt pillerinin ilk tasarımından itibaren karşılaşılan sorunlar, düşük güç yoğunluğu ve yüksek imalat maliyetleri olmuştur. Düşük güç yoğunluğu, her bir hücreden geçen uzun elektrik akımı yolunun ve yığın yapısı içindeki büyük boşlukların bir sonucu olarak meydana gelmektedir.

Silindirik katı oksit yakıt pili tasarımının en büyük avantajlarından birisi yüksek sıcaklıkta gaz sızdırmazlığı için kullanılan contaları ortadan kaldırılmasıdır. Şekil 3.11'de silindirik bir katı oksit yakıt hücresinin tipik bileşenlerinin bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Silindirik katı oksit yakıt hücresi [45]

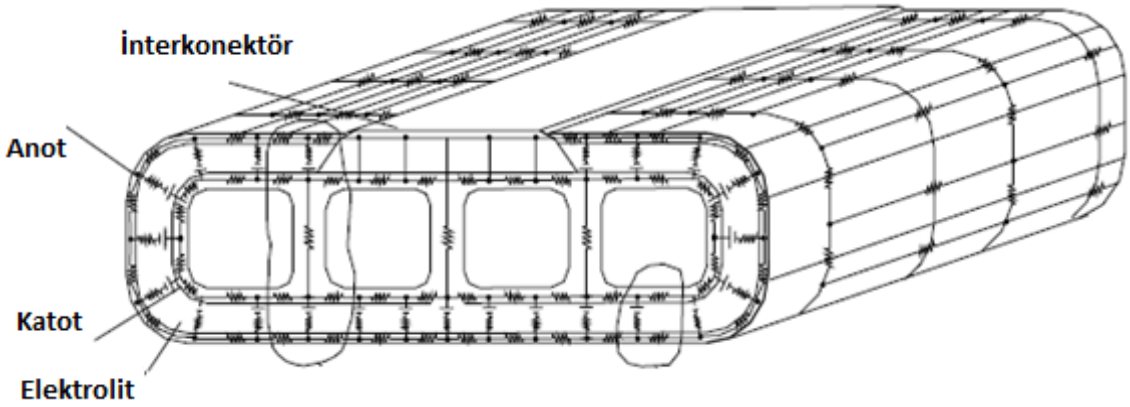
Çizelge 3.1'de düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajlarını içeren tablo verilmiştir.

Çizelge 3.1. Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları [37]

Özellik	Silindirik	Düzlemsel
Güç Yoğunluğu	Düşük	Yüksek
Hacimsel güç yoğunluğu	Düşük	Yüksek
Başlangıç ve durma zamanı	Hızlı	Yavaş
İnterkonnektör üretimi	Zor	Yüksek maliyet
Üretim maliyeti	Yüksek	Düşük

3.4.3. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi

Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi, silindir şeklindeki katı oksit yakıt hücresi ile aynı bileşenlere ve çalışma prensiplerine sahiptir. Bir katot, bir anot, bir elektrolit ve bir yassı tüp yapısında bir ara bağlantıdan oluşur. Şekil 3.12'de yassı tüp bir katı oksit yakıt hücresinin bir örneği gösterilmiştir [46].



Şekil 3.12. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi

Yassı tüp geometrisi rib olarak tanımlanan kaburga bölümü ile odacıklara ayrılmaktadır. Odacık sayısına kaç rib oluşturulacağına göre karar verilir. Ribler elektron iletkendir ve iç elektron devresi için bir kısa yol görevi görmektedir. Böylece elektronlar silindirik bir katı oksit yakıt pilinde olduğu gibi sadece çevresel olarak değil, aynı zamanda bu iletken riblerden de akabilmektedir. Bu özellik hücre direncini azaltmakta ve hücre güç yoğunluğunu artırmaktadır.

Yassı tüp şekli bir katı oksit yakıt pilinde güvenli sızdırmazlık özelliğini de mümkün kılmaktadır. Ayrıca, iç ohmik direnç hücre yığınına ribler eklenerek azaltılabildiğinden, katot tarafındaki konsantrasyon kayıplarını azaltmak için katot daha ince yapılabilmektedir. Diğer geometriler ile karşılaştırıldığında ohmik kayıpları belli bir seviyenin altında tutmak bu ölçüde mümkün olamamıştır. Yassı tüp katı oksit pillerinin diğer bir özelliği, hücre yığınları arasındaki boşluğun hücre geometrisi nedeniyle azalması ve hücre yığınının daha kompakt hale gelmesidir.

4. SAYISAL MODELLEME

Modelleme, yakıt hücresi tasarım ve geliştirme sürecinde önemli bir rol oynar. Bu sebeple, modelleme yakıt hücresi geliştirme sürecinin erken aşamalarında başlar. Belirtilen sürecin başlatılması için bir dizi gereksinimler olmalıdır. Bu gereksinimlerden yola çıkılarak uygun yakıt pili tasarımı yapılır ve bir model oluşturulur. Oluşturulan modelin beklenen performansı vermesi durumunda üretim ve test aşamalarına devam edilip süreç sonlandırılır. Ancak modelde beklenen performans sonuçları alınamadığı durumlarda yeniden tasarım aşamasına dönülerek eksik ya da yanlış yapılan bölümler üzerindeki çalışmalar tespit edilip düzeltilmeli ve süreç devam etmelidir.

Yakıt hücreleri genellikle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi (sonlu hacim, sonlu elemanlar vb.) vasıtasıyla modellenebilmektedir. Hem sonlu elemanlar hem de sonlu hacim yönteminde uzamsal alan, elemanlar veya hacimler olarak sınırlı sayıda alt alana bölünmüştür ve bu alt alanlara odaklanılmıştır. Her iki yöntemde asıl olarak, korunum denklemlerinin integral formu dikkate alınır ve entegrasyon, öngörülen sonlu hacimler üzerinden yapılır. Entegrasyonun yapıldığı sonlu hacmin her zaman ağın bir alt alanıyla çakışmadığı varsayılır. Sonlu hacim ve sonlu elemanlar yönteminin merkezinde, sayısal akıların yerel olarak korunması kavramı bulunmaktadır. Bir korunum denkleminin konvektif teriminin sonlu bir hacim üzerinden entegrasyonu, Gauss teoremini uygulayarak sonlu hacim sınır yüzeyi boyunca genel değişkenin akısına yol açar. Sonlu elemanlar ve sonlu hacim yöntemleri arasındaki temel fark, sonlu elemanlar yönteminde her bir elemanın içindeki her değişkenin değişimi için bir fonksiyon varsayılırken, diğerinde bu fonksiyon her zaman 1'e eşittir. Her iki metodun bir diğer önemli özelliği, yapılandırılmış veya yapılandırılmamış ağlar kullanılarak rastgele geometrilerde kullanılabilmeleridir.

Bir yakıt hücresinde meydana gelen fiziksel olaylar, genel olarak kütle, momentum, enerji, türler ve mevcut taşıma için koruma denklemlerinin çözümü ile temsil edilebilir. Ek olarak, bir yakıt hücresindeki olaylarla spesifik olarak ilgilenen denklemler, aşağıda verilmiştir:

- Fick difüzyon yasası
- Çok bileşenli difüzyon için Stefan-Maxwell denklemi
- Fourier ısı iletimi yasası

- Kanallarda ve gözenekli ortamlarda akış için Darcy denklemi
- Faraday yasası
- Elektrik akımı ve potansiyel arasındaki ilişki için Butler-Volmer denklemi
- Ohm yasası

Oluşturulan modeller bazı varsayımlar üzerine kuruludur. Bu varsayımlar modeli basitleştirmektedir. Modelin sınırlamalarını anlamak ve sonuçlarını doğru bir şekilde yorumlamak için varsayımları anlamak büyük bir önem teşkil etmektedir. Yakıt hücresi modellemesinde kullanılan yaygın varsayımlar şunlardır:

- İdeal gaz özellikleri,
- İdeal gaz karışımları,
- Sıkıştırılamaz akış,
- Laminer akış,
- İzotropik ve homojen membran ve elektrot yapıları,
- Katı bileşenlerde ihmal edilebilir ohmik potansiyel düşüş,
- Gözenekli yapılar yoluyla kütle ve enerji taşınımı, korunum denklemleri kullanılarak modellenebilir.

4.1. Korunum Denklemleri

Akışkanların dinamik yapısını analiz etmek için temel korunum yasaları kullanılmaktadır. Bu yasalar, diferansiyel formda yazılabilmektedir. Korunum ilkeleri, kontrol hacmi olarak adlandırılan akış bölgesinde uygulanmaktadır. Kontrol hacmi, akış analizleri için seçilmiş ve yüzeylerde akışın giriş ve çıkış yaptığı ayrık kısımlardır. Korunum yasalarının integre edilmesi ile kontrol hacmi bütün olarak içerdiği momentum, enerji ve kütle değişimlerini tanımlamaktadır. Aynı şekilde diferansiyel formdaki korunum yasaları ile akış boyunca birbiri ardınca istiflenen sonsuz sayıdaki küçük kontrol hacimleri analiz edilebilmektedir.

Aşağıda korunum ilkeleri belirtilmiştir:

- Kütlenin korunumu
- Momentumun korunumu

- Enerjinin korunumu
- Türlerin korunumu
- Yüklerin korunumu

4.1.1. Kütlenin korunumu

Difüzyon, sıvı akışı, faz değişimi ve elektrokimyasal reaksiyonlar gibi bir yakıt hücresi içindeki tüm işlemler için geçerli olan kütle korunumunun genel denklemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho v) = 0 \tag{4.1}$$

Eş. 4.1'de, ρ yoğunluğu, v hız vektörünü, t ise zamanı ifade etmektedir.

4.1.2. Momentumun korunumu

Momentumun korunumu aşağıdaki denklemle açıklanır:

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla . (\rho v v) = -\nabla p + \nabla . (\mu^{eff} \nabla v) + S_m \tag{4.2}$$

Eş. 4.2'de, p akışkan basıncını, μ^{eff} karışım ortalama viskozitesini, S_m momentum kaynak terimini temsil etmektedir.

Momentum korunum denkleminin sağ tarafındaki ilk iki terim, sırasıyla basınç ve viskoziteye bağlı olarak verilen momentumu ifade eder. Kaynak terimi ise, yakıt hücresinin farklı bölgeleri için farklıdır, örnek olarak gaz kanalları için kaynak terimi sıfıra eşittir. Katalizör tabakalarının destek katmanları ve boşlukları için:

$$S_m = -\frac{\mu}{K} \varepsilon v \tag{4.3}$$

Eş. 4.3'te, K gaz difüzyon katmanının geçirgenliğini, ε gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğini temsil eder.

Momentum korunum denklemi için bu kaynak terim, Darcy'nin akışkan üzerindeki gözenek duvarları tarafından uygulanan sürükleme kuvvetinden kaynaklanan basınç düşüşünü temsil etmektedir.

4.1.3. Enerjinin korunumu

Bir yakıt hücresindeki herhangi bir alan için enerjinin korunumu şu şekilde ifade edilir:

$$(\rho c_p)_{eff}\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\rho c_p\right)_{eff}(v.\nabla T) = \nabla.\left(k_{eff}\nabla T\right) + S_e \quad (4.4)$$

Eş. 4.4'te, c_p karışım-ortalama özgül ısı kapasitesini, T sıcaklığı, k ısıl iletkenliği, S_e enerji kaynak terimini ifade etmektedir. " eff " alt simgesi ise gözenekli ortam için etkili özellikleri temsil eder:

$$(\rho c_p)_{eff} = (1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s} + \varepsilon\rho c_p \quad (4.5)$$

$$k_{eff} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s+k} + \frac{1-\varepsilon}{3k_s}\right]^{-1} \quad (4.6)$$

ρ_s, $c_{p,s}$, k_s sırasıyla katı matrisin yoğunluğunu, özgül ısı kapasitesini ve ısıl iletkenliğini ifade eder.

Enerji korunum denklemindeki kaynak terimi, bir faz değişikliği olması durumunda reaksiyonlardan kaynaklanan ısıyı, Ohmik ısıtma ve/veya buharlaşma veya yoğuşma ısısını içerebilmektedir.

Gaz kanallarındaki olası ısı kaynağı ise faz değişimi, yani bir ısı kaynağı olarak gaz akımlarında bulunan su buharının yoğunlaşması ve kanallarda bulunan sıvı suyun buharlaşmasıdır.

Buharlaşma, yalnızca aşağıdaki koşulların her ikisi de oluştuğunda gerçekleşir:

- Ortamdaki gaz akışında sıvı formda su varsa,

- Basıncın düşmesi veya sıcaklık artması halinde doymuş gazın doymamış hale gelmesi durumunda.

Yoğuşma yalnızca gaz tam olarak doymuşsa ve gazın sıcaklığı düşerse gerçekleşir. Yoğuşma, reaksiyona giren gaz veya bileşenleri (hidrojen veya oksijen) elektrokimyasal reaksiyonda kaybolduğunda da meydana gelebilir, ancak bu kanallarda değil, katalizör tabakasında meydana gelir.

Mol cinsinden maksimum yoğuşma oranı:

$$N_{H2O,yoğuşma} = \frac{P - \frac{P_{doyma}}{y_w}}{P - P_{doyma}} N_{H2O(buhar)giriş} \tag{4.7}$$

Eş. 4.7'de, y_w su buharı mol kesrini ifade eder ve şu şekilde hesaplanır:

$$y_w = \frac{N_{H2O(buhar)giriş}}{N_{H2O(buhar)giriş} + N_{gaz}} \tag{4.8}$$

4.1.4. Türlerin korunumu

Farklı gaz türleri için kütlenin korunmasını temsil eden tür korunum denklemleri şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho x_i)}{\partial t} + \nabla . (\mathrm{v} \varepsilon \rho x_i) = \nabla . \left(\rho D_i^{eff} \nabla x_i\right) + S_{s,i} \tag{4.9}$$

Eş. 4.9'da x_i gaz türlerinin kütle oranını, $S_{s,i}$ ise türler için kaynak terimlerini ifade etmektedir.

4.1.5. Yüklerin korunumu

Elektrik akımı için yüklerin korunumu denklemi şu şekilde tanımlanabilir:

$$\nabla . \left(K_s^{eff} \nabla \varphi_s\right) = S_{\varphi s} \tag{4.10}$$

İyon akımı için ise denklem şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\nabla . \left(K_m^{eff} \nabla \varphi_m \right) = S_{\varphi m} \tag{4.11}$$

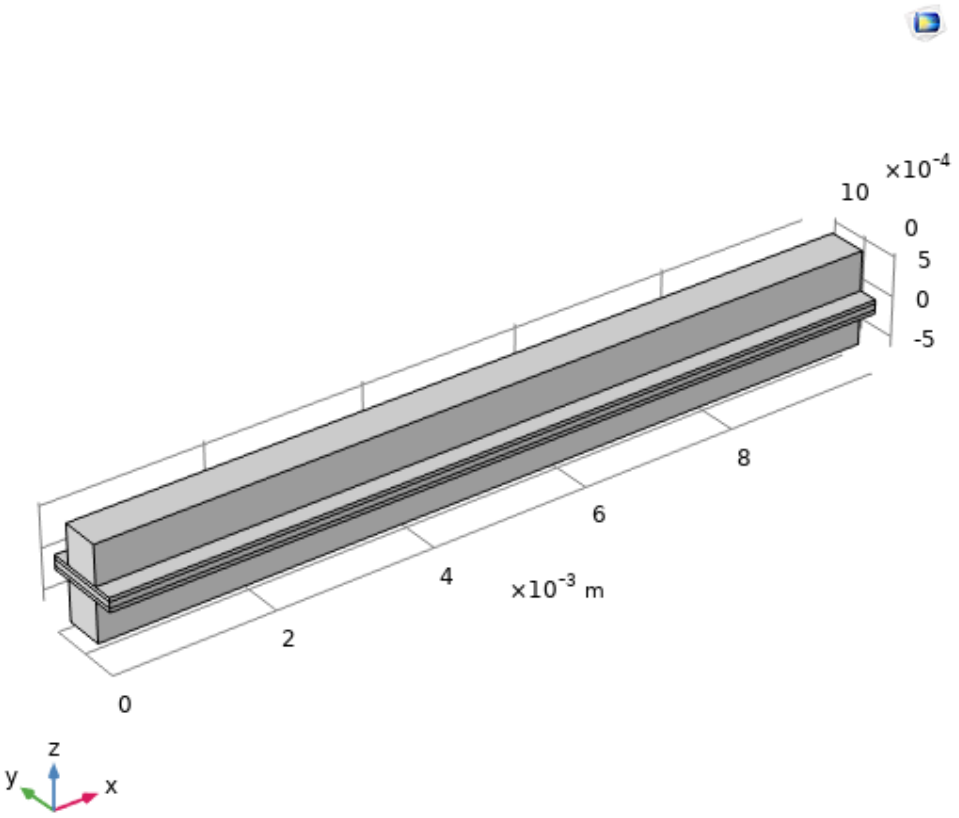
Eş. 4.10 ve Eş. 4.11'de, K_s^{eff} katı fazda elektriksel iletkenliği, K_m^{eff} iyonik iletkenliği, φ_s katı faz potansiyelini, φ_m elektrolit faz potansiyelini, S_φ ise hacimsel transfer akımını temsil eden kaynak terimi ifade etmektedir.

5. MATERYAL VE METOT

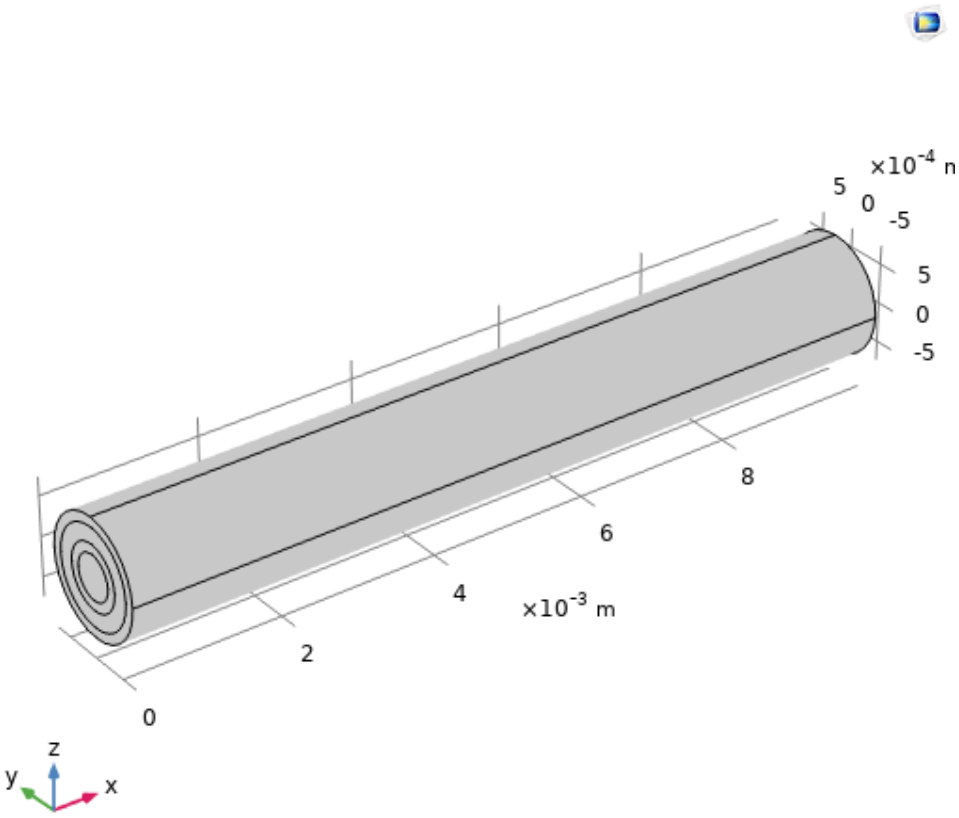
5.1. Katı Oksit Yakıt Hücresi Geometrilerinin Oluşturulması

Bu çalışmada COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak katı oksit yassı tüp yakıt pili modeli oluşturulmuştur. Bu kısımda model oluşum aşamalarının COMSOL programı içeriğinde uygulama yöntemine kısaca değinilecektir. Yassı tüp katı oksit yakıt pili modeli, elektrokimyasal işlemler basamağı gerektirdiğinden öncelikle ilgili işlem program üzerinde tanımlanmıştır. Elektrokimya alanından daha sonraki süreçte çalışılacak olan akım dağılımı ve gözenekli ortamlarda akış reaksiyonu üzerine seçim yapılmıştır. Daha sonra akış olaylarında rol oynayan basınç, kütle ve hız girdilerinin sistemde karşılığı olan semboller atanarak sistemde giriş ve çıkış kütlelerini oluşturan anot ve katot ürünleri (hidrojen, oksijen ve su) için tanımlama yapılmıştır. Evrensel gaz sabiti ve Faraday sabiti parametreleri kontrol edildikten sonra model geometrisi kısmına geçilmiştir.

Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücrelerinin analizleri daha önce yapılmış olan İlbaş ve diğerleri [13] ile İlbaş ve diğerleri [47] çalışmalarında kullanılmış modeller örnek alınarak yapılmıştır. Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücre geometrileri oluşumunda öncelikle iki boyutta belirlenen ölçülerde çizimler yapılarak hücrelerin ön görünüşleri oluşturulmuştur. Bu aşamada düzlemsel yakıt hücresi için gaz akış kanalı ve rib genişlikleri 0,5 mm olarak belirlenmiştir. Silindirik yakıt hücresi için ise eş merkezli dört adet çember çizilmiştir. Daha sonra her iki çizim için 10 mm uzunluk verilerek modeller üç boyuta dönüştürülmüştür. Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücreleri için oluşturulan modeller Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

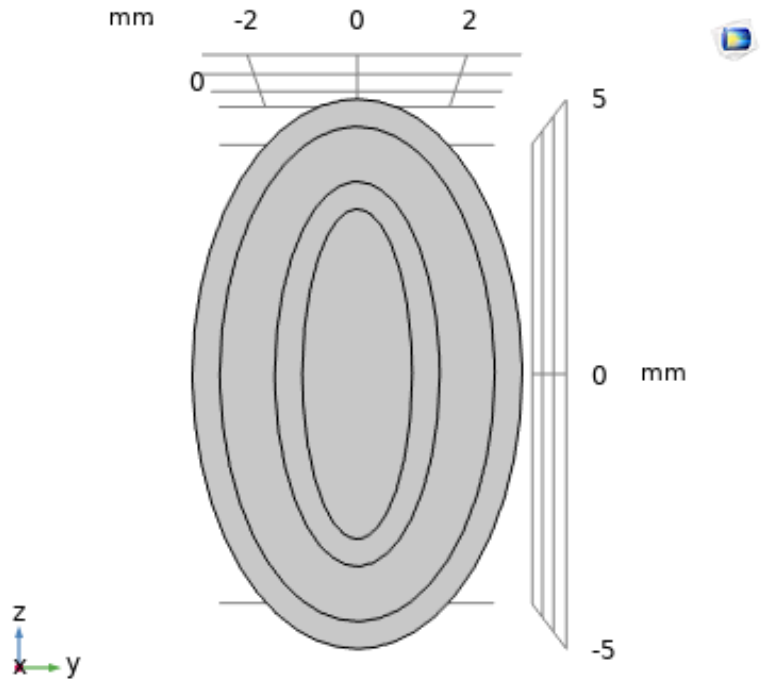


Şekil 5.1. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi üç boyutlu görünüm [13]



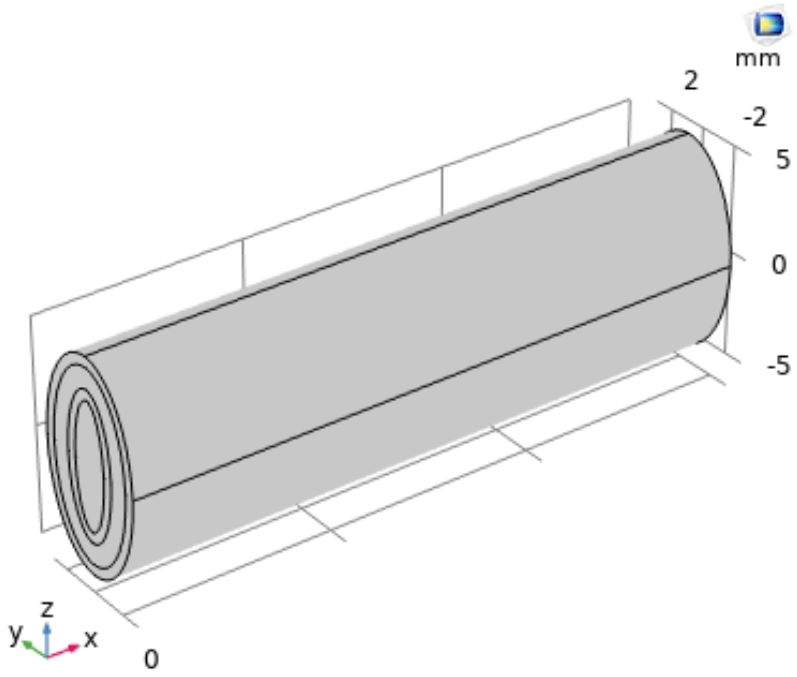
Şekil 5.2. Silindirik katı oksit yakıt hücresi üç boyutlu görünüm [47]

Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi model geometrisi oluşturma aşamalarında öncelikle iki boyutta bir profil oluşturulmuştur. Modelde önceden belirlenen değerlere göre koordinat ekseninde eş merkezli olarak küçük eksen uzunlukları sırasıyla 2 mm, 3 mm, 5 mm ve 6 mm olan dört adet elips oluşturulmuştur. Böylece anot, elektrolit ve katot tabakalarının kalınlıkları belirlenmiştir. Meydana gelen iki boyutlu görüntü Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi modelinin iki boyutlu görünümü

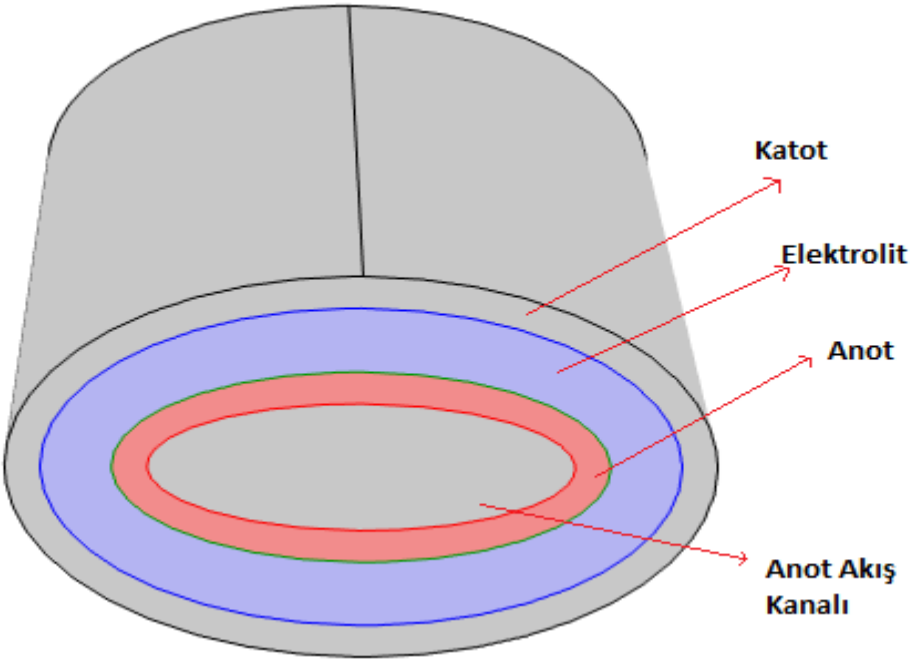
Daha sonraki aşamalarda yapılması planlanan katı oksit yakıt pili modeli üç boyutlu olacağı için mevcut çizime derinlik kazandırılacaktır. Çizime 10 mm derinlik verilmiştir. Böylece elektrot kanallarının uzunluğu belirlenmiştir. Oluşan geometrinin üç boyutlu görüntüsü Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin üç boyutlu görünümü

Modeli oluştururken geometrinin farklı parçalarını seçmeyi kolaylaştırmak için bir dizi seçim yapılmış ve akış alanlarını belirlemek için kısımlar ayrılarak tanımlanmıştır. Anot akış kanalı, anot elektrotu, katot akış kanalı ve katot elektrotu tanımlama yapılarak farklı bölgeler olarak nitelendirilmiştir.

Sonraki aşamada ikincil akım dağılımı oluşturmaya başlanmış ve model üzerinde bulunan iki gözenekli elektrot ve elektrolit tanımlanmıştır. Elektrik ve elektrolit potansiyellerin girdisi lineer yapılarak bağımlı değişkenler olarak belirlenmiştir. Eşdeğer potansiyel ve sıcaklık verileri kullanıcı tanımlı olarak kaydedilmiştir. Mevcut geometriye göre elektrolit ve elektrotların aktif yüzey alanları belirlenmiştir. Kanallarda ve gözenekli ortamlardaki akış olaylarını ifade eden denklemler geometrinin ilgili alanlarına uygulanmıştır. Ayrıca elektrolit iletkenliği belirlenmiştir. Kinetik ifade türü seçimi Butler Volmer olarak yapılmıştır. Anot ve katot için Brinkman denklemleri seçimi yapılmış ve akışkan özellikleri kısmına geçilmiştir. Sistemde tanımlanan akışkanların sıcaklık ve basınç özellikleri kullanıcı tanımlı olarak belirlenerek akış bölgeleri için normal akış türü seçilmiştir. Akışta kanallara giren ve çıkan türlerin tanımlaması yapılmış ve model sınırları belirlenmiştir. Oluşturulan modelin tanımlanmış bölümleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Oluşturulan modelin katmanları

Yakıt pili modeli için kullanılan giriş parametreleri belirlenerek Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresi giriş parametreleri

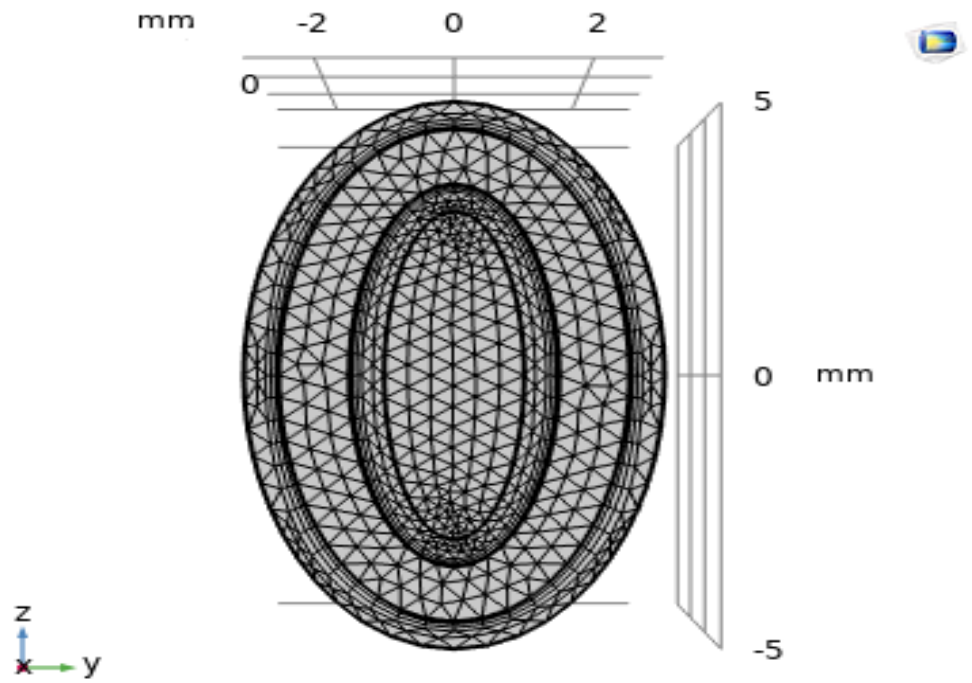
Parametre	Yassı tüp katı oksit yakıt pili için değer
Anot elektrot kalınlığı	0,25 mm
Katot elektrot kalınlığı	0,25 mm
Elektrolit kalınlığı	0,5 mm
Tüp uzunluğu	10 mm
Anot geçirgenliği	1E-10 m^2
Katot geçirgenliği	1E-10 m^2
Gözeneklilik oranı	0.4

Model yapısı; katot, elektrolit ve anot ile beraber katot ve anot akış kanallarını kapsamaktadır. Akış kanalının tek seçilme sebebi ise dağıtımın homojen bir şekilde sağlanması durumunda diğer kanallar için de aynı etkilerin gözlemlenmesidir. Ayrıca bu durum, analiz süresinde de önemli ölçüde azalmaya neden olmaktadır.

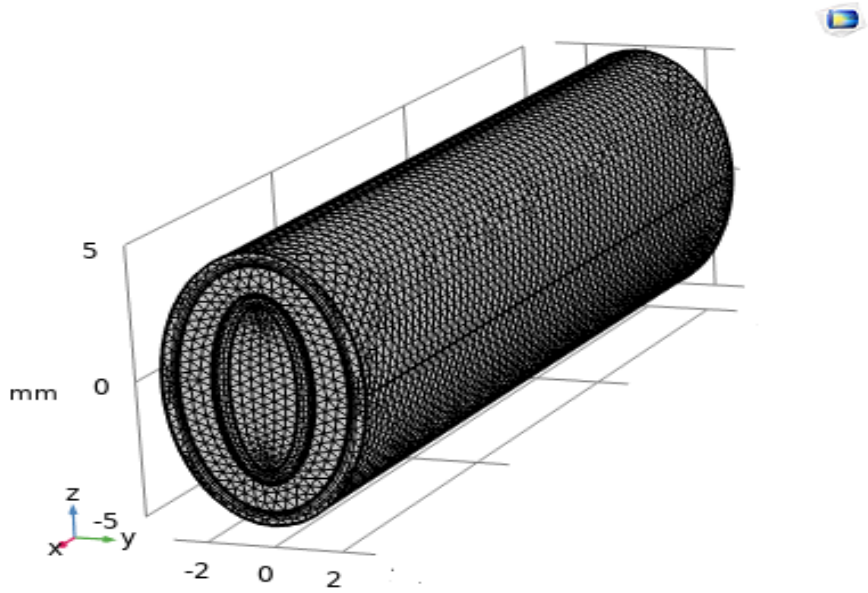
5.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

Alan ayrıştırmasını gerçekleştirmek için, yönetim denklemlerinin uygulandığı alan önceden belirlenmiş bir ağ veya ızgara ile doldurulur. Ağ, bilinmeyen fiziksel büyüklüklerin değerlendirildiği düğümlerden (ızgara noktaları) ve elemanlardan oluşur. Yapılandırılmış ızgaraların temel avantajı, uygulama geliştirme, hesaplama ve görselleştirme açısından basitliktir. Otomatik bağlantı bilgisi, yapılandırılmış ızgaraların belirli bir ağ boyutu için en düşük bellek miktarını gerektirdiğini ve ilgili simülasyonun daha hızlı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, yapılandırılmış ızgaralar, özellikle geometri karmaşık olduğunda ve alanın belirli bölgelerinde yüksek çözünürlüğe ihtiyaç olduğunda, pratik mühendislik amaçları için ciddi bir sınırlamayı temsil edebilmektedir. Doğru ve en kısa sürede hesaplama yapabilen bir simülasyon için yeterli sayıda elemandan oluşan bir ağ yapısının yapılandırılması çok önemlidir [48].

Modele ait ağ örgü yapısı Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Çözümlemenin kolaylaşması ve hızlanması için normal seviyede ağ yapısı atanmıştır.



Şekil 5.6. Modelde kullanılan ağ yapısının kesit görünümü



Şekil 5.7. Modelde kullanılan ağ yapısının üç boyutlu görünümü

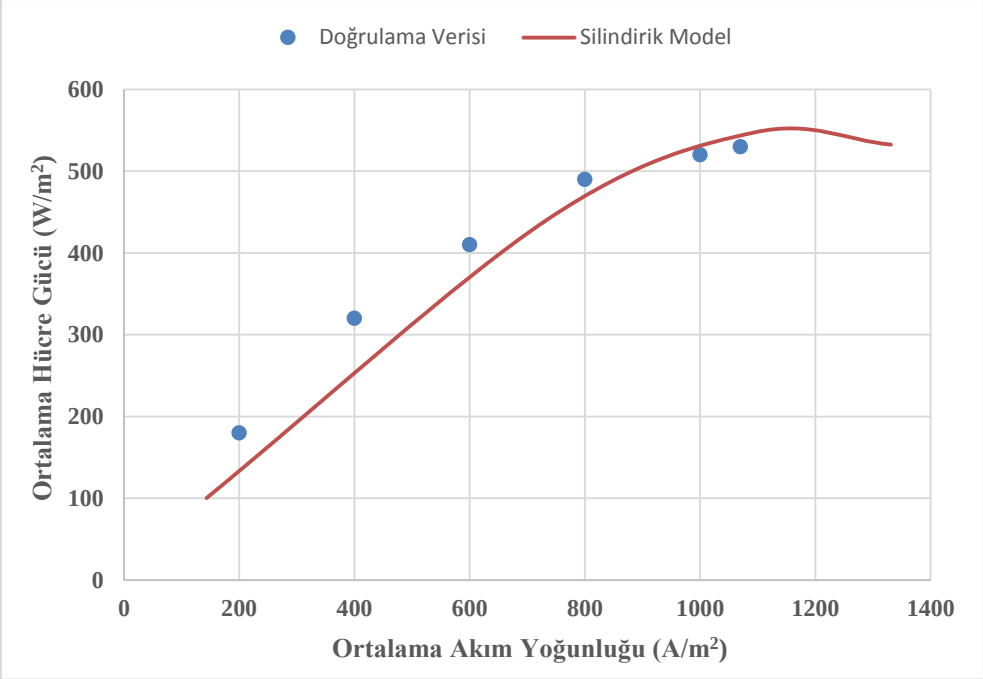
Doğrulama

Çalışmada kullanılan modeller, analizlere başlamadan önce literatürdeki diğer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.2'de İlbaş ve Kümük'ün [13] düzlemsel katı oksit yakıt pili için elde ettikleri veriler ile bu tez çalışmasındaki düzlemsel veriler karşılaştırılmıştır. Her iki veride de görüldüğü üzere, güç artışları paralellik göstermektedir. İlbaş ve Kümük, başlangıç voltaj değeri 1,12 V ve 1,5 E-4 elektrolit kalınlığında çalışmışlardır. Bu çalışmada, 0,95 V başlangıç geriliminde ve 5 E-5 elektrolit kalınlığında analizler yapılmıştır. Sayısal değerlerdeki fark, yapılan analizlerin farklı çalışma şartlarında gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.2. Düzlemsel KOYP doğrulama verileri

Doğrulama Verileri [13]		Tez Çalışmasındaki Veriler	
Akım (A/cm^2)	Ortalama Hücre Gücü (W/cm^2)	Akım (A/cm^2)	Ortalama Hücre Gücü (W/cm^2)
0,1	0,079128	0,04	0,03668
0,2	0,166192	0,06	0,05648
0,25	0,208252	0,1	0,07999
0,37	0,262645	0,15	0,10121
0,41	0,315558	0,2	0,11982
0,55	0,340856	0,26	0,13224
0,6	0,350874	0,34	0,13493
0,71	0,368541	0,42	0,12492
0,8	0,336984	0,5	0,09999

Silindirik geometri için yapılan çalışma Panthi ve Tsutsumi'nin 2014 yılında gerçekleştirdikleri çalışma [50] verileri ile karşılaştırılmıştır. Ortalama hücre gücünün, ortalama akım yoğunluğu ile değişim grafikleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen silindirik geometri verilerinin, doğrulama verisi ile güç eğrilerinin benzer profil sergilediği görülmüştür.



Şekil 5.8. Silindirik modelin doğrulanması

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada oluşturulan yassı tüp katı oksit yakıt pili (KOYP) modelinin güç, akım ve voltaj değerleri incelenmiştir. Bu incelemeler farklı basınç ve sıcaklık değerleri için tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte oluşturulan düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pili modellerinin belirlenen şartlardaki özellikleri incelenmiş ve her üç geometrinin performans değerleri karşılaştırılmıştır. İlk olarak düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pili modelleri incelenmiştir.

Polarizasyon eğrisi, aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar ve kütle taşınımı sırasında meydana gelen kayıpları içeren eğrilerdir. Bu eğrinin başlangıç bölgesi, reaksiyon hızının oldukça hızlı olduğunu gösteren aktivasyon bölgesini tanımlar. Başlangıç bölgesindeki kayıpların düzlemsel yakıt hücresinde silindirik katı oksit yakıt piline kıyasla daha yüksek olduğu görünmektedir. Orta bölge, ohmik kayıpları anlatan neredeyse düz bir çizgidir. Bu kayıplara elektrolit direnci neden olmaktadır. Eğrinin son kısmı ise, yakıt hücrelerindeki konsantrasyon kayıplarını göstermektedir [49].

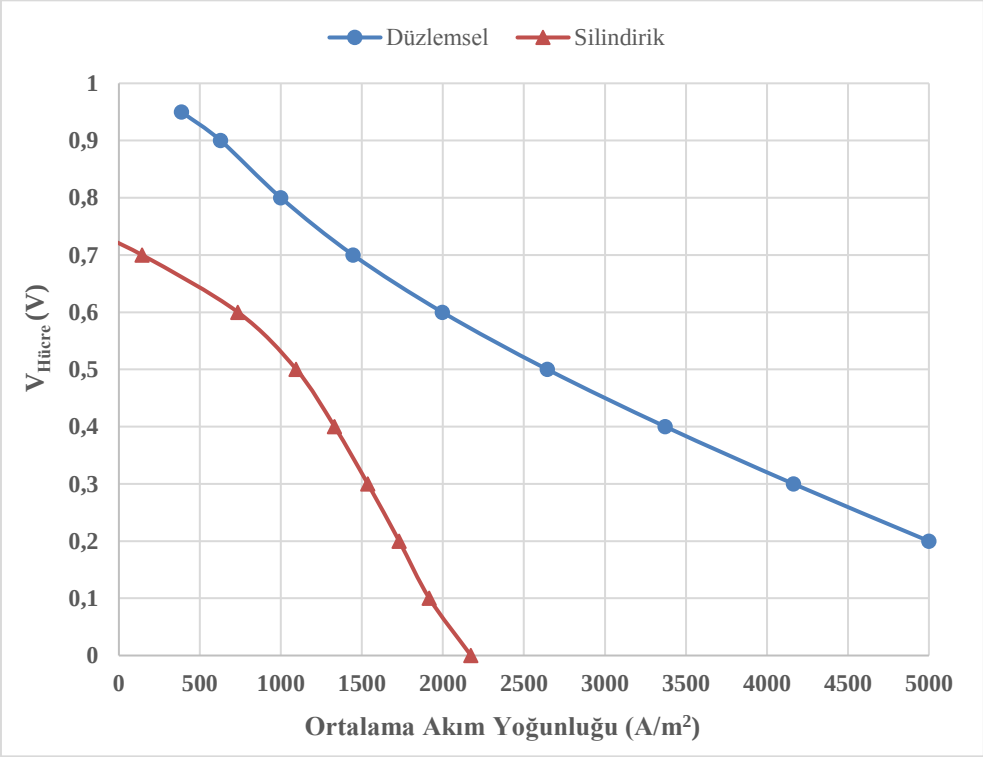
6.1. Düzlemsel ve Silindirik Katı Oksit Yakıt Hücrelerinin Analizi

Bu bölümde düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücrelerinin ortalama hücre gücü/ortalama akım yoğunluğu ve hücre gerilimi/ortalama akım yoğunluğu değişim değerleri öncelikle 800 °C sıcaklıkta ve 1 atm basınçta incelenmiştir. Daha sonra, 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'deki sıcaklıklara bağlı olarak bu performans verilerinin sıcaklık değişiminden nasıl etkilendikleri analiz edilmiştir. Ayrıca, 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınç değerlerinde her iki hücre geometrisi için çalışma özellikleri karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

6.1.1. Düzlemsel ve silindirik yakıt hücrelerinin voltaj analizi

Şekil 6.1'de 800 °C sıcaklık değeri ve 1 atm çalışma basıncı şartlarında düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin değişen ortalama akım yoğunluğuna bağlı olarak hücre çıkış gerilimlerinin değişimini gösteren polarizasyon eğrileri incelenmiştir. Şekil 6.1'de görülebileceği gibi, düzlemsel KOYP için ortalama akım yoğunluğu yaklaşık 390 A/m^2 iken

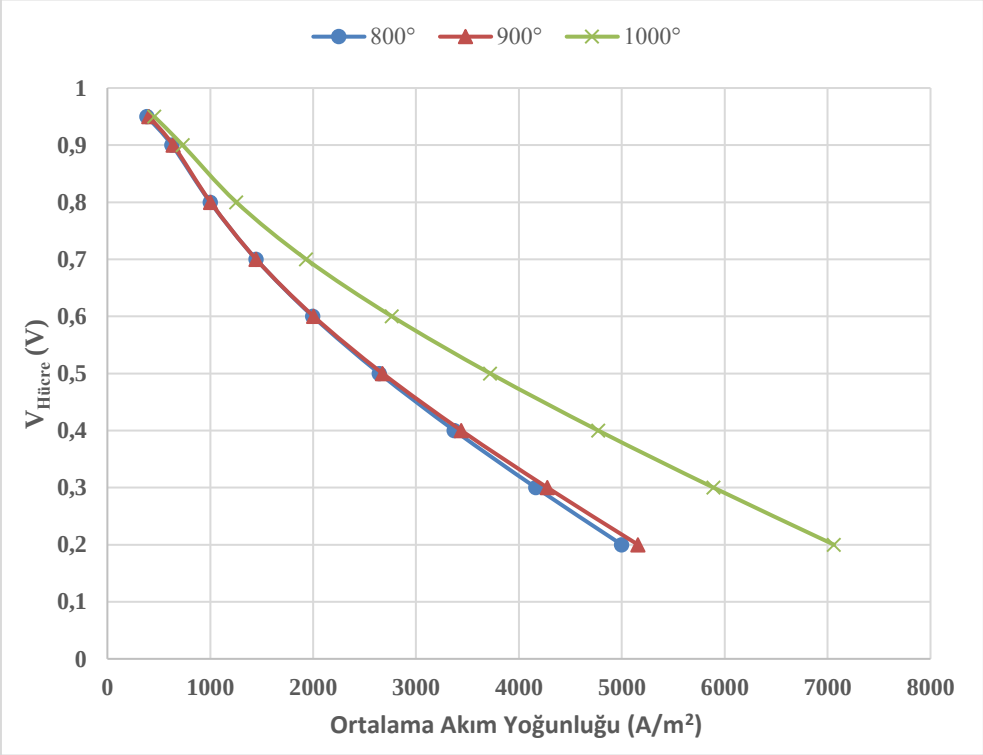
hücre gerilimi 0,95 V'tur ve ortalama akım yoğunluğu arttıkça bu değerde düşüş gerçekleşmiştir. 5 000 A/m^2 akım yoğunluğunda ise hücre voltajının 0,2 V olduğu gözlemlenmiştir. Silindirik KOYP'de, bu değerlerin düzlemsel KOYP'ye kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Yaklaşık 2 170 A/m^2'de hücre voltajı sıfırlanmıştır. Silindirik KOYP'de ohmik kayıpların daha baskın olmasından dolayı bu pildeki akım yoğunluğu artışı daha hızlı gerçekleşmiştir.



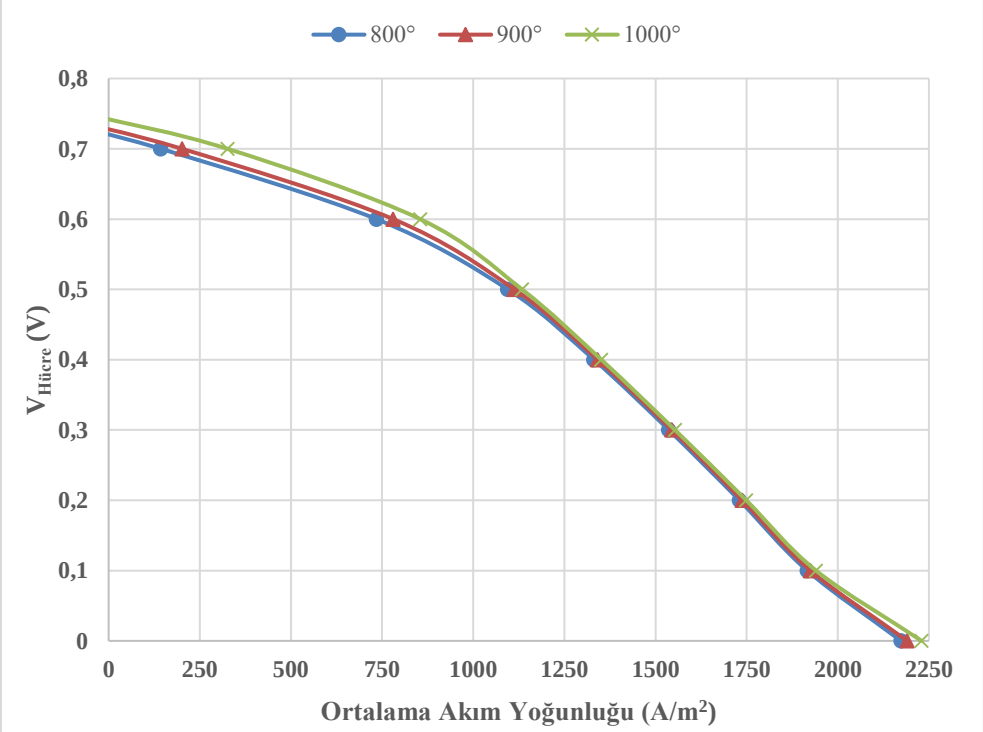
Şekil 6.1. 800 °C ve 1 atm'de düzlemsel ve silindirik KOYP'nin polarizasyon eğrileri

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te 1 atm basınçta sırasıyla düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C sıcaklıklardaki polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü üzere, 800 °C ve 900 °C'de polarizasyon eğrileri benzer profillere sahip olmakla birlikte 900 °C için ortalama akım yoğunluğu az da olsa daha fazladır. 1 000 °C için ortalama akım yoğunluğunun arttığı açıkça görülmektedir. Hücre voltajı 0,2 V'a düştüğünde 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C sıcaklıklar için akım yoğunlukları sırasıyla (yaklaşık olarak) 5 000 A/m^2, 5 160 A/m^2 ve 7 000 A/m^2'dir. Şekil 6.3'te ise silindirik KOYP için sıcaklık arttıkça polarizasyon eğrilerindeki değişimlerin az olduğu görülmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi, ortalama akım yoğunluğu 800 °C için 2 170 A/m^2 civarına ulaştığında hücre voltajı sıfırlanmaktadır. 900 °C ve 1 000 °C için sırasıyla yaklaşık olarak 2 190 A/m^2 ve 2 230 A/m^2'de hücre voltajı sıfır değerindedir. Kısaca, sıcaklık arttıkça her iki yakıt

hücresi için ortalama akım yoğunluğu artmıştır. Bu artış, düzlemsel katı oksit yakıt pilinde daha belirgin, silindirik katı oksit yakıt pilinde ise daha azdır.

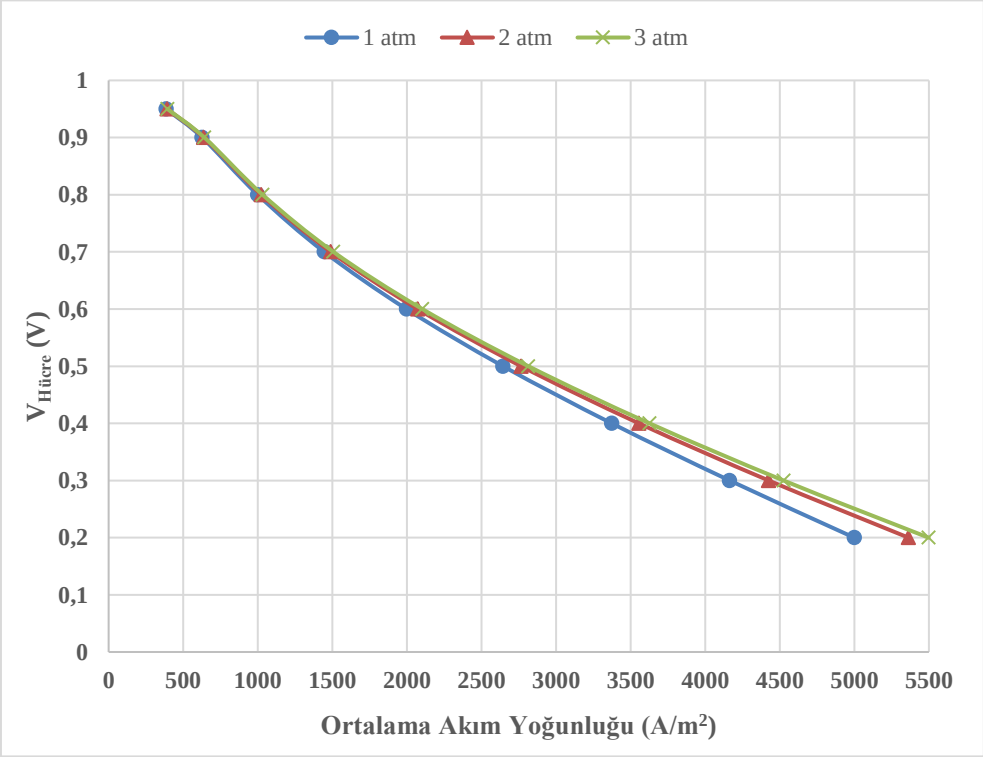


Şekil 6.2. Düzlemsel KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon eğrileri

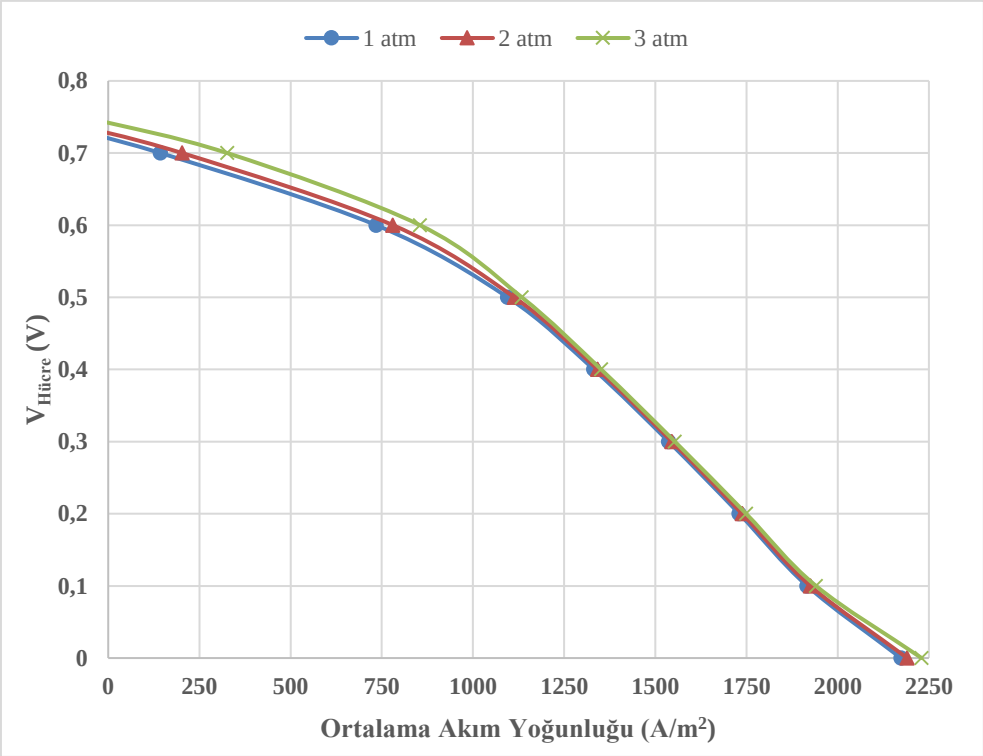


Şekil 6.3. Silindirik KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon eğrileri

Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te 800 °C'de, 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınç değerlerinde sırasıyla düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinde polarizasyon eğrilerini ifade eden grafiklerin değişimi incelenmiştir. Şekil 6.4'te düzlemsel KOYP için 2000 A/m^2'a kadar polarizasyon eğrilerinde ortalama akım yoğunlukları arasındaki farkın yok denecek kadar az olduğu ancak bu değerden sonra ortalama akım yoğunluklarının basınçla birlikte arttığı görülmektedir. Şekil 6.5'te silindirik KOYP'de ise yaklaşık 1 100 A/m^2'den sonra değerlerin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. 2 200 A/m^2 civarında ise, çalışılan basınçlarda hücre voltajı sıfır olmuştur. Her iki yakıt pilinde de basıncın artışı ortalama akım yoğunluğunda bir artış sağlamıştır. Basınç arttıkça yakıt hücresindeki reaktant difüzyonunun azalması nedeniyle konsantrasyon kayıpları azalmaktadır. Bu durum Nernst potansiyeli ve ortalama akım yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır.



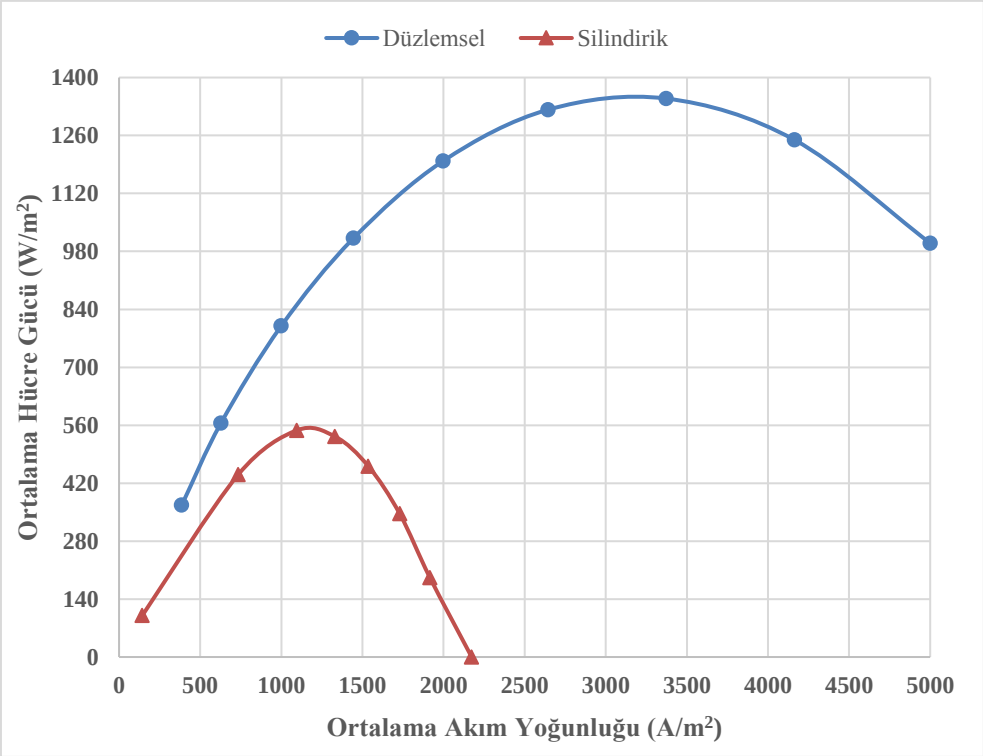
Şekil 6.4. Düzlemsel KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de polarizasyon eğrileri



Şekil 6.5. Silindirik KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de polarizasyon eğrileri

6.1.2. Düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücrelerinin güç analizi

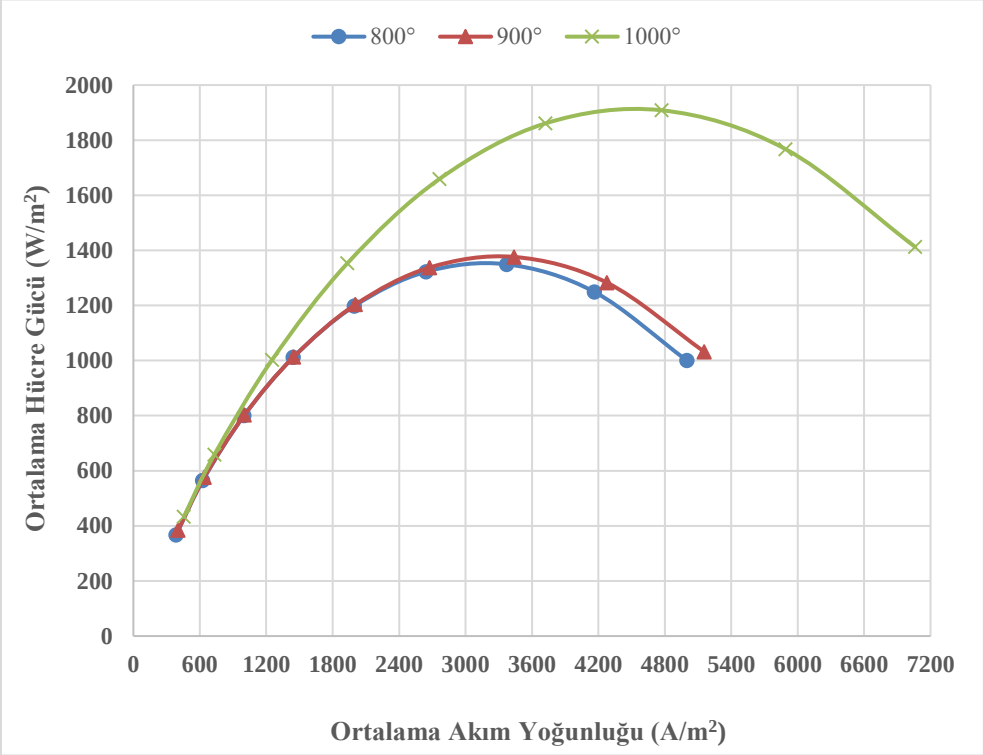
Şekil 6.6, 1 atm basınç ve 800 °C sıcaklıkta şartlarında düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin akım yoğunluğunun artmasıyla metrekare başına güç yoğunluğunun değişimini ifade etmektedir. Her iki yakıt hücresinde de güç yoğunluğu, başlangıçta artan akım yoğunluğu ile artmış ve bir tepe değerine ulaşmıştır. Düzlemsel KOYP için ulaşılan en yüksek değer 3 400 A/m^2'de yaklaşık olarak 1 350 W/m^2 olarak ölçülmüş iken, silindirik KOYP için bu değer 1 095 A/m^2'de 550 W/m^2'dir. Ortalama hücre güçleri en yüksek seviyeye ulaştıktan sonra, akım yoğunluğunun daha fazla artmasıyla hücrelerde meydana gelen kayıplardan dolayı güç yoğunluklarında azalma gözlemlenmiştir. Şekil 6.4'te görüldüğü üzere, ortalama güç yoğunluğu açısından düzlemsel KOYP, silindirik KOYP'den yaklaşık iki kat daha avantajlıdır. Bunun nedeni, düzlemsel katı oksit yakıt pilinin daha kısa bir akım yoluna sahip olmasıdır. Bu durum daha düşük bir ohmik kayba ve daha yüksek güç yoğunluğuna yol açmaktadır.



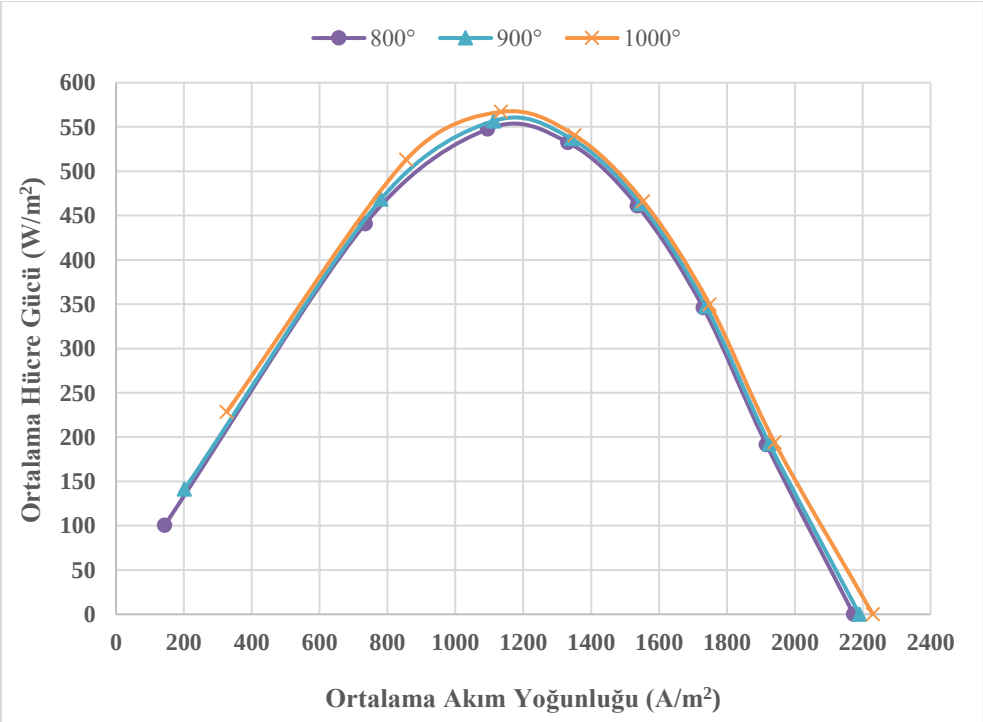
Şekil 6.6. 800 °C ve 1 atm'de düzlemsel ve silindirik KOYP'nin güç eğrileri

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8, 1 atm basınçta sırasıyla düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklardaki güç eğrilerini göstermektedir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, düzlemsel KOYP için 800 °C ve 900 °C için güç eğrileri yaklaşık 2 650 A/m^2'ye kadar çok yakın değerlere sahiptir. Bu değerden sonra ise 900 °C çalışma sıcaklığında gücün daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. 800 °C ve 900 °C çalışma sıcaklıklarına kıyasla, 1 000 °C için ortalama hücre gücündeki artış akım ile daha çok değişmektedir. Hücrelerin ulaştığı en yüksek güç değerleri 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C sıcaklıklar için sırasıyla 1 350 W/m^2, 1 370 W/m^2 ve 1 900 W/m^2'dir. Bu en yüksek güç değerleri 800 °C ve 900 °C için 3400 A/m^2 civarında sağlanırken 1 000 °C için yaklaşık 4 750 A/m^2'de elde edilmiştir. Şekil 6.8'de ise silindirik KOYP için sıcaklık arttıkça ortalama hücre güçlerindeki değişimlerin birbirlerine yakın değerler olmasına rağmen ulaşılan en yüksek güç değerlerinde artış görülmektedir. 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C çalışma sıcaklıkları için ulaşılan en yüksek güç değerleri sırasıyla 550 W/m^2, 557 W/m^2 ve 567 W/m^2'dir. Bu değerler sırayla 1 095 A/m^2, 1 110 A/m^2 ve 1 130 A/m^2'de elde edilmiştir. Bölüm 6.1.1.'de söylendiği gibi, ortalama akım yoğunluğu 800 °C için 2 170 A/m^2 civarına ulaştığında hücre voltajı sıfırlanmaktadır. 900 °C ve 1 000 °C için sırasıyla yaklaşık olarak 2 190 A/m^2 ve 2 230 A/m^2'de hücre voltajı sıfır değerindedir. Bu bilgiye paralel olarak aynı ortalama akım değerlerinde hücre güçlerinin sıfırlandığı görülmektedir. Özetle, her iki yakıt hücresi için,

sıcaklık arttıkça ulaşılan en yüksek güç değerleri artmıştır. Bu artış, düzlemsel KOYP'de daha belirgin, silindirik KOYP'de ise daha azdır.

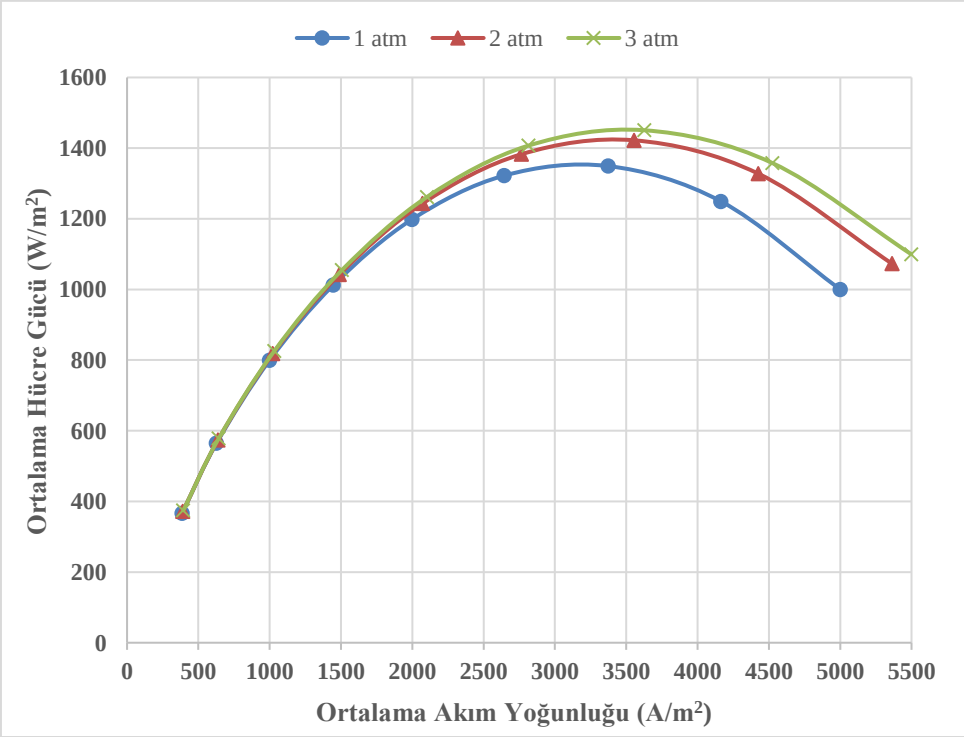


Şekil 6.7. Düzlemsel KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de güç eğrileri

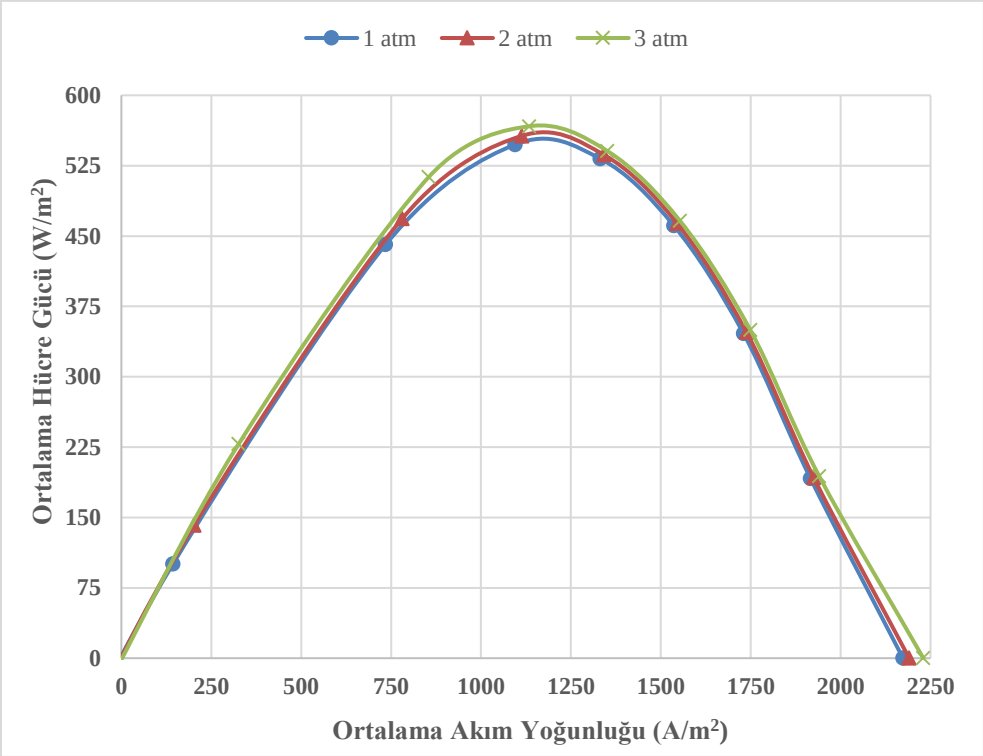


Şekil 6.8. Silindirik KOYP'nin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de güç eğrileri

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 800 °C çalışma sıcaklığında sırasıyla düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pillerinin 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınç değerlerinde güç eğrilerini göstermektedir. Şekil 6.9'da görüldüğü gibi, düzlemsel KOYP için tüm basınç değerlerinde yaklaşık 1 500 A/m^2'ye kadar ortalama güç değerleri birbirine çok yakın olmakla birlikte, bu akım değerinden sonra 1 atm'de elde edilen ortalama gücün diğer iki basınçta elde edilen ortalama güçlere göre daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. 2 atm ve 3 atm basınçlarındaki güçler kıyaslandığında ise aralarındaki farkın az olduğu ancak yine de 3 atm çalışma basıncında daha yüksek değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Hücrelerin ulaştığı en yüksek güç değerleri 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınçlar için sırasıyla 1 350 W/m^2, 1 420 W/m^2 ve 1 450 W/m^2'dir. Bu en yüksek güç değerleri 1 atm için 3 370 A/m^2, 2 atm için 3 560 A/m^2 ve 3 atm için 3 630 A/m^2 civarlarında elde edilmiştir. Şekil 6.10'da ise silindirik KOYP için basınç arttıkça ortalama hücre güçlerindeki değişimlerin birbirlerine yakın değerler olmasına rağmen ulaşılan en yüksek güç değerlerinde artış görülmektedir. En yüksek güç değerleri yaklaşık 1 100 A/m^2'de elde edilmiştir. Bölüm 6.1.1.'de söylendiği gibi, ortalama akım yoğunluğu yaklaşık olarak 2 200 A/m^2 olduğunda hücre voltajı sıfır değerindedir. Bu bilgiye paralel olarak aynı ortalama akım değerlerinde hücre güçlerinin sıfırlandığı görülmektedir. Kısaca, her iki yakıt hücresi için, basınç arttıkça ulaşılan en yüksek güç değerleri artmıştır. Bu artış, düzlemsel KOYP'de daha belirgin, silindirik KOYP'de ise daha azdır.



Şekil 6.9. Düzlemsel KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de güç eğrileri



Şekil 6.10. Silindirik KOYP'nin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de güç eğrileri

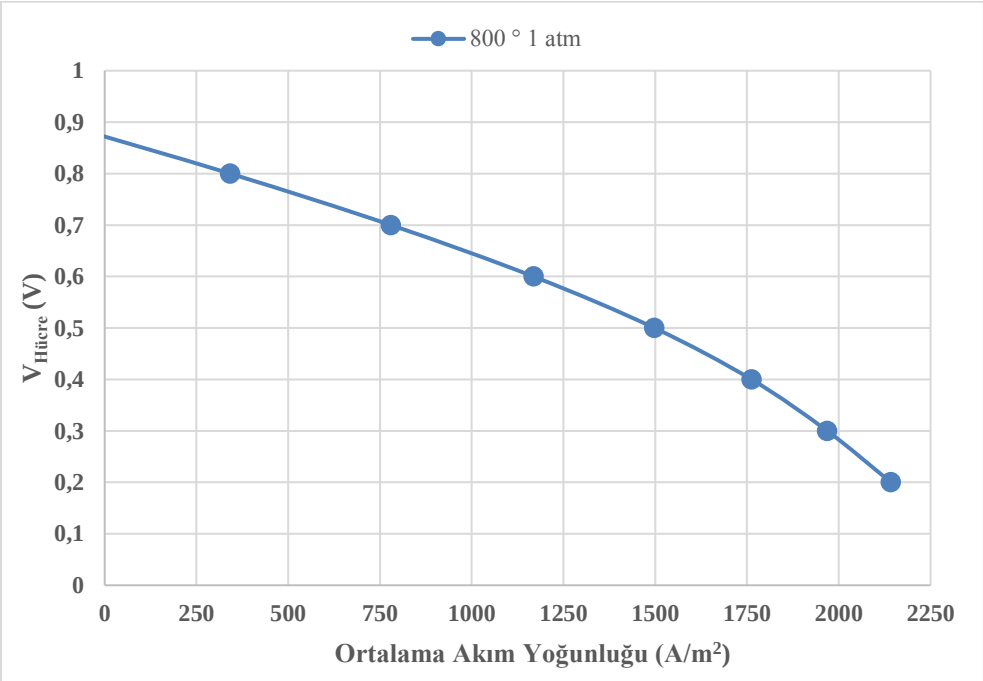
6.2. Yassı Tüp Katı Oksit Yakıt Hücresinin Analizi

Bu bölümde yassı tüp şeklindeki katı oksit yakıt hücresinin başlangıçta 800 °C sıcaklık ve 1 atm basınçtaki hücre gerilimi/ortalama akım yoğunluğu ve ortalama hücre gücü/ortalama akım yoğunluğu değişimini gösteren veriler analiz edilmiştir. Sonraki süreçte, 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C sıcaklık değerlerinin değişimiyle hücre çalışma performansı araştırılmıştır. Son olarak, analizlerde 1 atm, 2 atm ve 3 atm olarak değiştirilen basınç değerlerinin yassı tüp katı oksit yakıt hücresi modeline etkisi incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

6.2.1. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin voltaj analizi

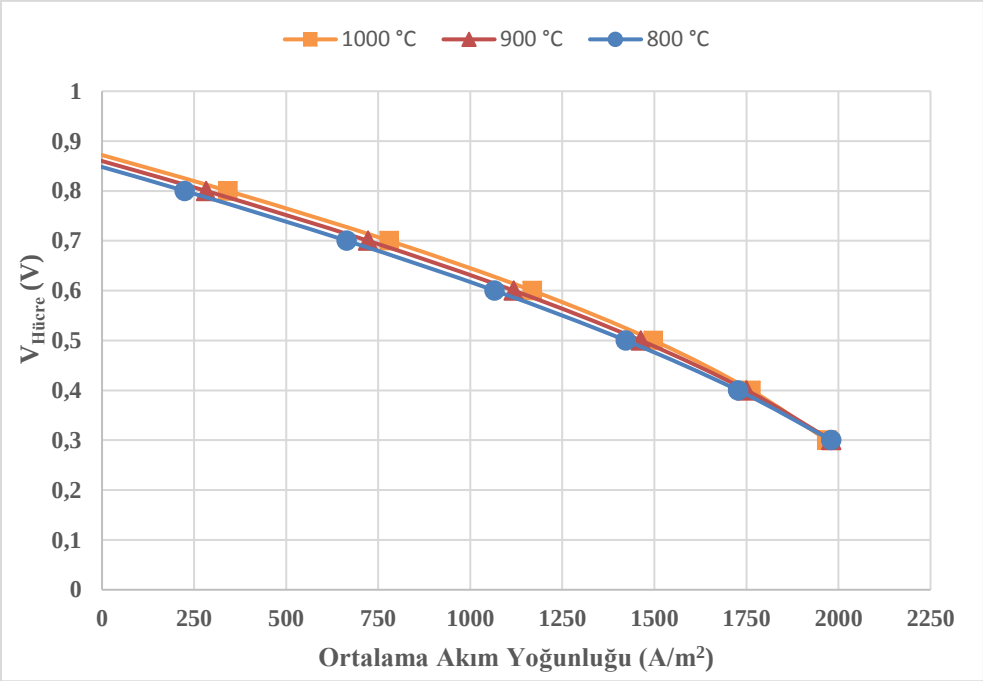
Şekil 6.11'de 1 atm basınç ve 800 °C sıcaklık şartlarında yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin ortalama akım yoğunluğuna bağlı olarak değişen hücre çıkış gerilimini veren polarizasyon eğrisi gösterilmiştir. Ortalama akım yoğunluğu yaklaşık olarak 340 A/m^2 iken hücre voltajı 0,8 V'tur. Ancak ortalama akım yoğunluğu 2 150 A/m^2 civarındayken gerilim değeri 0,6 V düşerek 0,2 V'a ulaşmıştır. Yakıt pilleri çalışırken polarizasyonlar sebebi ile gerilim düşmektedir. Bundan dolayı akımın yüksek olması gerilimde yüksek düşüşe neden olmaktadır. Polarizasyon eğrisinde görüldüğü üzere yassı tüp katı oksit yakıt pilinde artan

sıcaklıkla birlikte ortalama akım yoğunluğu da artma eğilimindedir. Artan sıcaklıkla akımın daha fazla çekilmesi, gaz viskozite değerlerinin yükselmesi ve malzemelerden kaynaklanan sorunlar sonucunda aşağıdaki gibi bir polarizasyon grafiği oluşmaktadır.



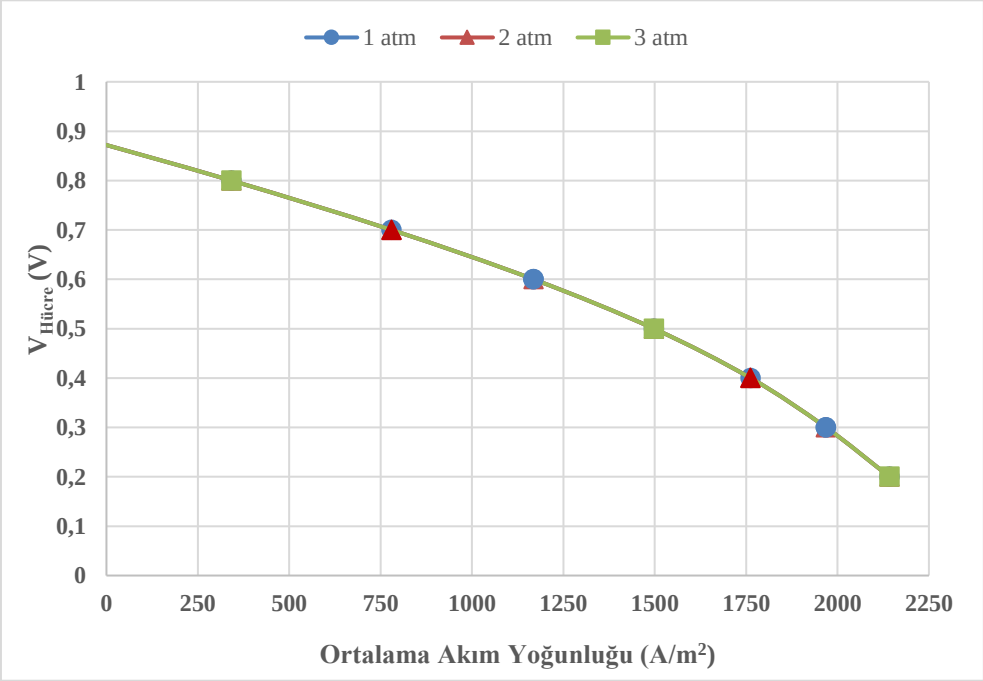
Şekil 6.11. 800 °C ve 1 atm'de yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi

Katı oksit yakıt pillerinde performansı etkileyen en önemli parametrelerden birisi çalışma sıcaklığıdır. Şekil 6.12'de 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C olmak üzere üç farklı çalışma sıcaklığı değerlerinde yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin voltajındaki kayıpların analizi yapılmış ve polarizasyon eğrisi incelenmiştir. Hücrenin voltajı, ortalama akım yoğunluğu arttıkça azalmıştır. 0,8 V'a bakıldığında 1 000 °C için ortalama akım yoğunluğu 340 A/m^2, 900 °C için 280 A/m^2 ve 800 °C için ise 225 A/m^2 olduğu görülmektedir. Ortalama akım yoğunluğu 1 980 A/m^2'ye ulaştığında hücre gerilimi değeri 0,3 V olmuştur ve bu değerde üç çalışma sıcaklığı için de aynı ortalama akım yoğunluğu görülmüştür. Sıcaklık arttıkça aynı hücre gerilimde yüksek sıcaklığa sahip olan eğrinin ortalama akım yoğunluğu değerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 6.12. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 800, 900 ve 1 000 °C'de polarizasyon eğrileri

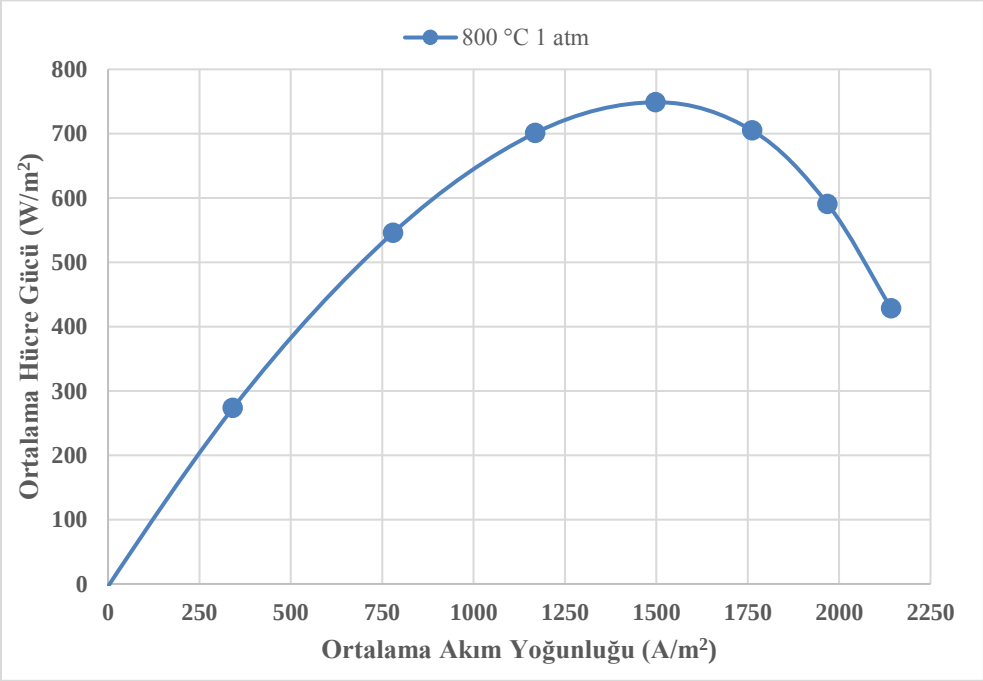
Şekil 6.13'te, 1 atm, 2 atm ve 3 atm olmak üzere üç farklı çalışma basınç değerlerinde yassı tüp katı oksit yakıt hücresinde hücre karakteristiğini ifade eden polarizasyon eğrileri görülmektedir. Farklı basınçlarda gerçekleştirilen bu analizde eğrilerin çakıştığı görülmektedir.



Şekil 6.13. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de polarizasyon eğrileri

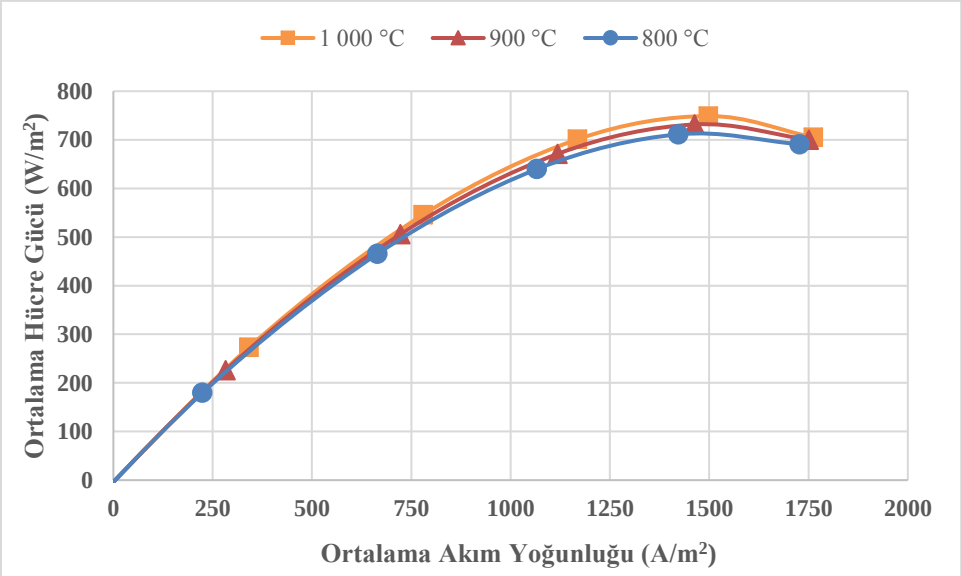
6.2.2. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin güç analizi

Katı oksit yakıt pillerinde uygun işletme sıcaklık ve basıncı çalışma performansını doğrudan etkilemektedir. Şekil 6.14'te 800 °C sıcaklık ve 1 atm çalışma basıncı şartları için yassı tüp katı oksit yakıt hücresinde ortalama akım yoğunluğu/ortalama hücre gücü grafiği gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi ortalama akım yoğunluğu arttıkça hücrenin ortalama gücü önce artmıştır, en yüksek değere ulaştıktan sonra ise azalmaya başlamıştır. Hücre, 1 500 A/m^2 ortalama akım yoğunluğunda maksimum güce, 750 W/m^2, ulaşmıştır. Ancak bu değerden sonra akım yoğunluğunun artışı ile birlikte hücrede meydana gelen kayıplar sebebiyle güç değerinde azalma gözlemlenmiş, 2 150 A/m^2 akım yoğunluğunda hücre gücü 430 W/m^2 olarak hesaplanmıştır.



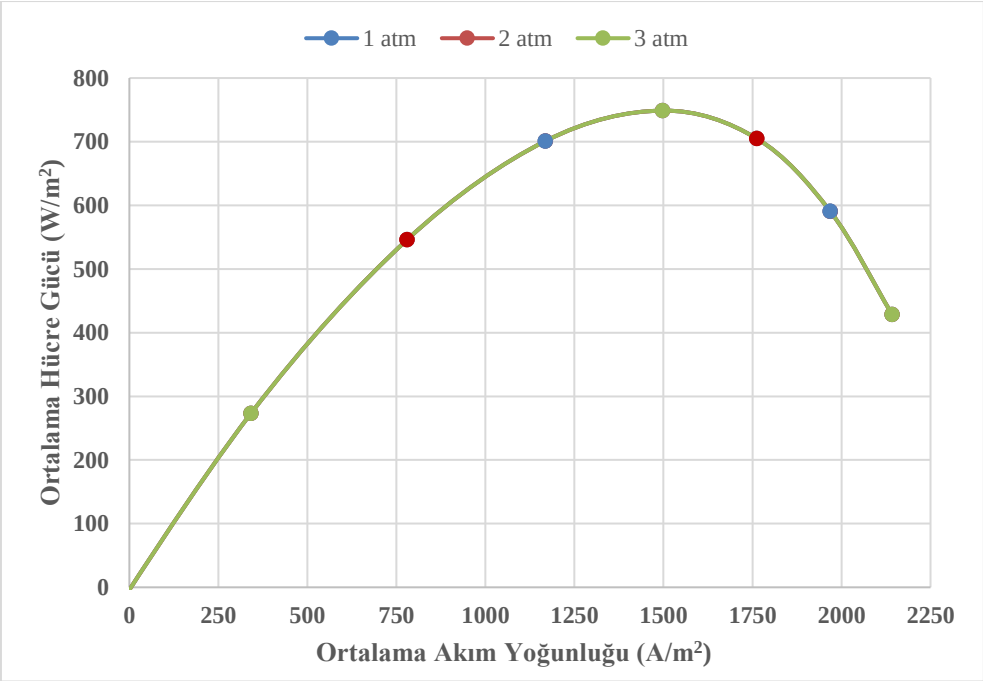
Şekil 6.14. 800 °C ve 1 atm'de yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin güç eğrisi

Şekil 6.15'te 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C olmak üzere üç farklı çalışma sıcaklığı değerlerinde yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin karakteristik değerleri incelenmiş, kayıplar ve akım yoğunluğuna bağlı olarak hücre gücünde oluşan değişimi gösteren grafik verilmiştir. Her üç sıcaklık değeri için güç eğrileri en yüksek değere kadar artan, bu değerden sonra ise azalan bir profil sergilemiştir. 1 000 °C, 900 °C ve 800 °C çalışma sıcaklıkları için en yüksek ortalama güç değeri sırasıyla 1 500 A/m^2'de 750 W/m^2, 1 460 A/m^2'de 730 W/m^2 ve 1420 A/m^2'de 710 W/m^2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.15. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de güç eğrileri

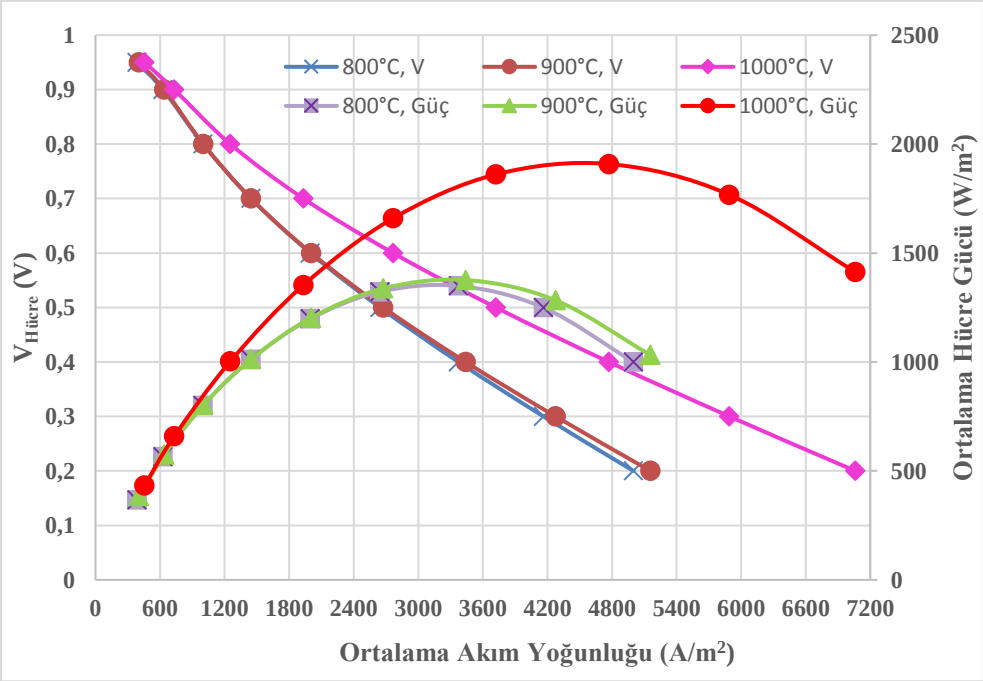
Şekil 6.16'da, 1 atm, 2 atm ve 3 atm olmak üzere üç farklı çalışma basınç değerlerinde yassı tüp katı oksit yakıt hücresinde ortalama hücre gücünün artan ortalama akım yoğunluğuna göre değişimi analiz edilmiştir. Güç eğrilerinde çakışma görülmektedir.



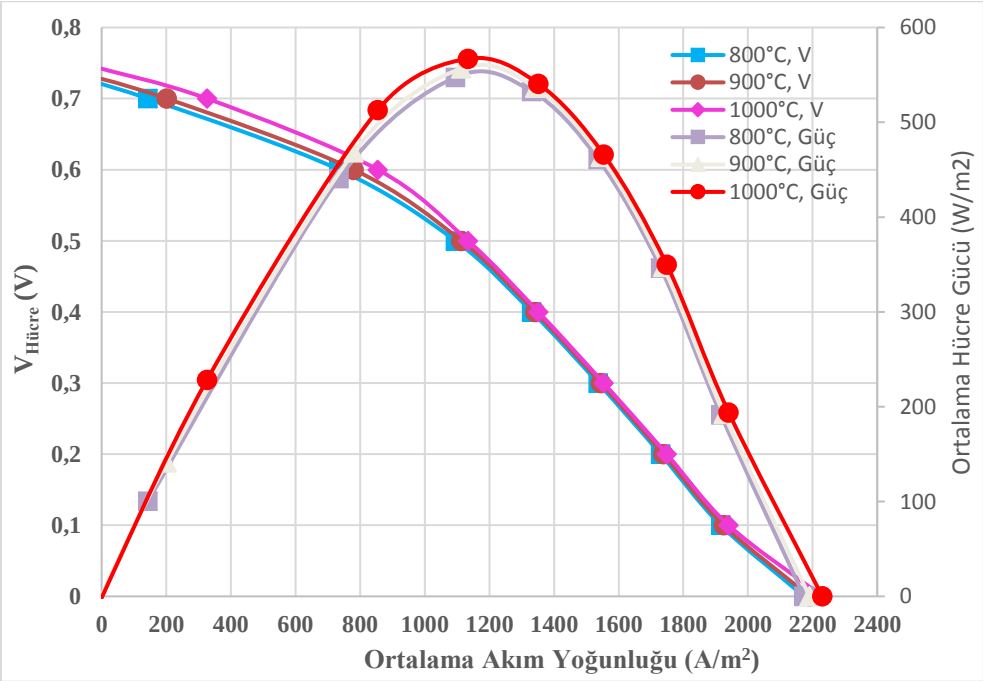
Şekil 6.16. Yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin 1 atm, 2 atm ve 3 atm'de güç eğrileri

6.3. Tartışma

Tez için yapılan analizlerde yassı tüp, düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt hücreleri için polarizasyon eğrileri ve ortalama hücre güçlerinin ortalama akım yoğunluğu ile değişim eğrileri 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C çalışma sıcaklıklarında ve 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınçlarda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de düzlemsel ve silindirik KOYP'nin değerleri karşılaştırılmıştır. Silindirik KOYP'nin, düzlemsel KOYP'ye göre sıcaklık değişikliklerinden daha az etkilendiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ortalama güç yoğunluğu, her iki yakıt hücresi konfigürasyonunda artan sıcaklık ve basınçla birlikte artmaktadır. Bu durum, elektrolit iletkenliğinin artması ve ohmik dirençlerin yüksek sıcaklıkta önemli ölçüde azalmasından kaynaklanmaktadır. Her iki hücre için de 1 000 °C'de elde edilen hücre voltajı ve ortalama hücre gücü değerleri en yüksek sonucu vermiştir. Düzlemsel KOYP için en yüksek ortalama hücre gücü 1 900 W/m^2 iken silindirik KOYP için bu değer 567 W/m^2 olarak elde edilmiştir. Düzlemsel KOYP'nin akım yolunun daha kısa olmasından dolayı ohmik kayıplar daha az görülür. Bu sebepten dolayı güç yoğunluğu daha yüksektir. Ek olarak, düzlemsel KOYP daha sade bir tasarıma sahiptir ve bu durum maliyette azalma sağlamaktadır. Ancak düzlemsel KOYP'de hücre kenarından gazın sızma durumu söz konusudur. Silindirik KOYP'de sızdırmazlık malzemesine gerek duyulmamaktadır. Bu açıdan, düzlemsel hücreye göre daha avantajlıdır. Söz konusu iç direnç olduğunda ise yüksek değere sahip olduğu için düzlemsele kıyasla güç yoğunluğu konusunda avantajlı değildir.



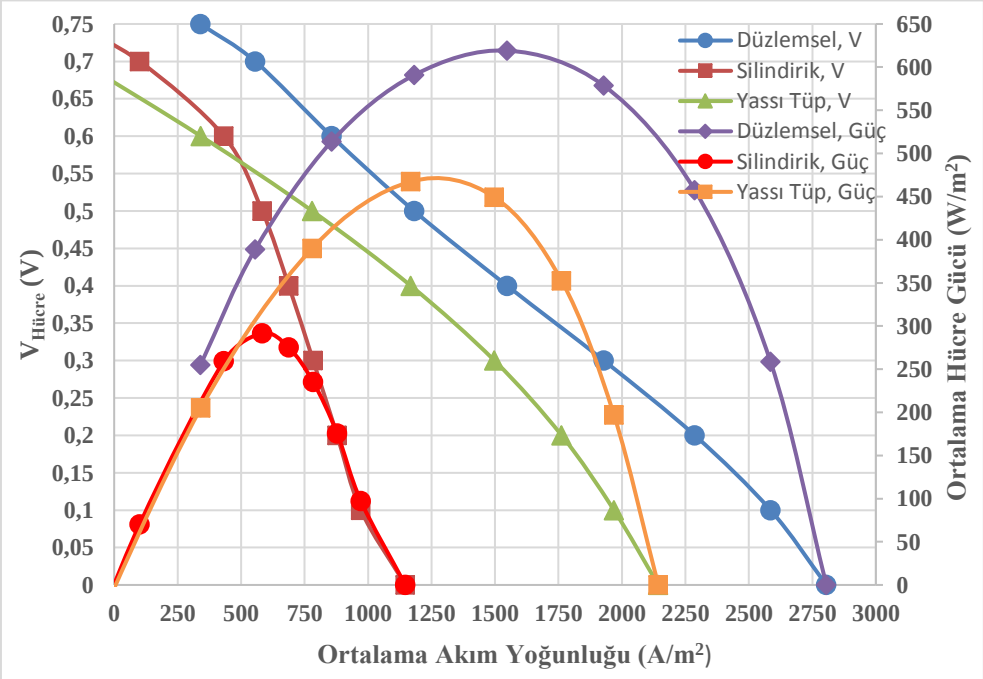
Şekil 6.17. Düzlemsel KOYP 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon ve güç eğrileri



Şekil 6.18. Silindirik KOYP 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C'de polarizasyon ve güç eğrileri

Şekil 6.19'da düzlemsel, silindirik ve yassı tüp KOYP'lerinin 0,75 V başlangıç hücre voltajında 800 °C ve 1 atm hücre voltajları ve ortalama hücre güç eğrileri verilmiştir. Voltaj eğrileri incelendiğinde düzlemsel ve yassı tüp KOYP'lerde düşüşün daha kademeli gerçekleştiği ve profillerinin benzer olduğu görülmektedir. Silindirik KOYP'de ise

voltajdaki düşüş daha hızlı gerçekleşmiştir. Bunun sebebi akım yolunun uzun olmasından dolayı ohmik kayıpların daha fazla olmasıdır. Voltaj değerleri düzlemsel, silindirik ve yassı tüp KOYP'ler için sırasıyla 2 800 A/m^2, 1 150 A/m^2 ve 2 150 A/m^2'de sıfırlanmıştır. Şekil 6.19'da görüldüğü üzere, voltaj değerlerinin sıfırlandığı yerde güç değerleri de sıfıra ulaşmıştır. Güç eğrileri kıyaslandığında, düzlemsel KOYP'nin 1 550 A/m^2 akım yoğunluğunda 620 W/m^2 güç ile en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değer, silindirik ve yassı tüp KOYP için sırasıyla 585 A/m^2'de 290 W/m^2, 1 170 A/m^2'de 470 W/m^2'dir. Yassı tüp KOYP, hidrojenin temas yüzeyini artırdığından dolayı silindirik geometriye göre daha iyi difüzyona uğramaktadır. Bu sebepten dolayı, yassı tüp KOYP'nin hücre gücü silindirik geometriden daha yüksek değere ulaşmıştır. Silindirik ve düzlemsel yakıt pillerinin bir birleşimi olan yassı tüp katı oksit yakıt pilleri sağladığı avantajlar ile birçok açıdan öne çıkmaktadır. Performans değerlerinin yüksek olmasının yanı sıra düşük maliyetleri ile de tasarım kolaylığı sağlamaktadır. Diğer katı oksit yakıt pili türlerinin avantajlarını birleştirerek bünyesinde barındıran yassı tüp katı oksit yakıt pilleri hacimsel anlamda yüksek güç yoğunluğu, sızdırmazlık alanı ve genleşmeler karşısındaki yüksek dirençleri ile daha çok tercih edilmekte ve çalışmaların odak noktası haline gelmektedir.



Şekil 6.19. 800°C ve 1 atm'de farklı KOYP'lerin polarizasyon ve güç eğrileri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yassı tüp katı oksit yakıt hücresi modelinin 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C çalışma sıcaklıklarında ve 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınçlarda polarizasyon eğrileri, ortalama hücre gücü ve ortalama akım yoğunluğu değerleri COMSOL Multiphysics programı kullanılarak sayısal olarak simüle edilmiştir. Ek olarak, düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pili (KOYP) modelleri için de aynı analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda ulaşılan çıktılar aşağıda belirtildiği gibidir.

- Düzlemsel KOYP için 800 °C çalışma sıcaklığında hücre voltajı, ortalama akım yoğunluğu yaklaşık 390 A/m^2'den 5 000 A/m^2'ye kadar artar iken 0,95 V'tan 0,2 V'a kadar düşmüştür. 900 °C ve 1 000 °C'de voltajdaki bu düşüş sırasıyla 400 A/m^2'den 5 160 A/m^2'ye kadar artan ortalama akım yoğunluğunda ve 460 A/m^2'den 7 000 A/m^2'ye kadar artan ortalama akım yoğunluğunda gerçekleşmiştir.
- Silindirik KOYP için ortalama akım yoğunluğu sıfır iken hücre voltaj değeri 800 °C, 900 °C ve 1 000 °C çalışma sıcaklıklarında sırasıyla 0,72 V, 0,73 V ve 0,75 V'tur. Hücre gerilimi sıfır değerine düştüğünde ortalama akım yoğunluklarının 800 °C için 2 170 A/m^2, 900 °C için 2 190 A/m^2 ve 1 000 °C 2 230 A/m^2'dir.
- Düzlemsel ve silindirik KOYP için 1 atm, 2 atm ve 3 atm çalışma basınçlarında yapılan hücre voltajı analizlerinde, her iki pil için de basıncın artmasıyla birlikte ortalama akım değerlerinin arttığı görülmüştür.
- Düzlemsel ve silindirik KOYP için ortalama akım yoğunluğu arttıkça ortalama hücre güçleri önce artan, en yüksek seviyeye ulaştıktan sonra ise azalan bir profil sergilemiştir.
- Düzlemsel KOYP için 800 °C'de yapılan analizde ortalama akım yoğunluğunun 390 A/m^2'den 5 000 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücünün 370 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 1 350 W/m^2'ye yaklaşık 3 400 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 1 000 W/m^2'ye kadar tekrar düştüğü gözlemlenmiştir. 900 °C'deki incelemede ortalama akım yoğunluğunun 400 A/m^2'den 5 160 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücünün 385 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 1 370 W/m^2'ye yaklaşık 3 400 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 1 030 W/m^2'ye kadar tekrar düştüğü gözlemlenmiştir. 1 000 °C'deki verilere bakıldığında ortalama akım yoğunluğunun 450 A/m^2'den 7 050 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücünün 430 W/m^2'den,

önce en yüksek değeri olan 1 900 W/m^2'ye yaklaşık 4 750 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 1 410 W/m^2'ye kadar tekrar düştüğü gözlemlenmiştir.

- Silindirik KOYP için 800 °C'de yapılan analizde ortalama akım yoğunluğunun 145 A/m^2'den 2 170 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücünün 370 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 550 W/m^2'ye yaklaşık 1 095 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 2 170 A/m^2'de güç sıfırlanmıştır. 900 °C'deki incelemede ortalama akım yoğunluğunun 200 A/m^2'den 2 190 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücünün 385 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 557 W/m^2'ye yaklaşık 1 110 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 2 190 A/m^2'de güç sıfırlanmıştır. 1 000 °C'deki verilere bakıldığında ortalama akım yoğunluğunun 330 A/m^2'den 2 230 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücünün 430 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 567 W/m^2'ye yaklaşık 1 130 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 2 230 A/m^2'de güç sıfırlanmıştır.
- Yassı tüp KOYH'de 800 °C çalışma sıcaklığı için ortalama akım yoğunluğu 340 A/m^2 iken hücre voltajı 0,8 V'tur. Ortalama akım yoğunluğu artarak 2 150 A/m^2'ye ulaştığında voltaj 0,2 V'ye düşmüştür.
- Yassı tüp KOYH için 900 °C'de 0,8 V, 280 A/m^2'de elde edilirken 0,2 V, 2 170 A/m^2'de sağlanmıştır.
- Yassı tüp KOYH'de 1 000 °C için voltajdaki bu düşüş 225 A/m^2'den 2 185 A/m^2'ye kadar artan ortalama akım yoğunluğunda gerçekleşmiştir.
- Yassı tüp KOYH'de 800 °C çalışma sıcaklığında yapılan analizde ortalama akım yoğunluğu 0 A/m^2'den 2 150 A/m^2'ye kadar değişmesiyle hücre ortalama hücre gücü 0 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 750 W/m^2'ye yaklaşık 1 500 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 430 W/m^2'ye kadar tekrar düştüğü gözlemlenmiştir.
- Yassı tüp KOYH'de 900 °C çalışma sıcaklığında yapılan analizde ortalama akım yoğunluğu 0 A/m^2'den 2 170 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücü 0 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 730 W/m^2'ye yaklaşık 1 460 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 434 W/m^2'ye kadar tekrar düştüğü gözlemlenmiştir.
- Yassı tüp KOYH'de 1 000 °C çalışma sıcaklığında yapılan analizde ortalama akım yoğunluğu 0 A/m^2'den 2 185 A/m^2'ye kadar değişmesiyle ortalama hücre gücü 0 W/m^2'den, önce en yüksek değeri olan 710 W/m^2'ye yaklaşık 1 420 A/m^2'de ulaştığı daha sonra ise 437 W/m^2'ye kadar tekrar düştüğü gözlemlenmiştir.
- Yapılan analizler sonucunda yassı tüp geometrisinin akım yolunun kısa olmasına bağlı olarak aynı akım yoğunluğunda silindirik geometriden daha yüksek gerilim ve güç değerlerine ulaşmış olduğu gözlemlenmiştir.

- Düzlemsel, silindirik ve yassı tüp KOYP için 0,75 V giriş hücre voltajında, 800 °C ve 1 atm'de gerçekleştirilen analizlerde hücre voltajları sırasıyla 2 800 A/m^2, 1 150 A/m^2 ve 2 150 A/m^2'de sıfırlanmıştır.
- Düzlemsel, silindirik ve yassı tüp KOYP için 0,75 V giriş hücre voltajında, 800 °C ve 1 atm'de gerçekleştirilen analizlerde ortalama hücre güçleri sırasıyla 1 550 A/m^2, 585 A/m^2 ve 1 170 A/m^2 akım yoğunluklarında 620 W/m^2, 290 W/m^2 ve 470 W/m^2 maksimum hücre gücü değerlerine ulaşmıştır.

Bu tez çalışmasında, yassı tüp katı oksit yakıt hücresinin farklı sıcaklık ve basınç değerleri için polarizasyon eğrisi ve ortalama hücre gücünün ortalama akım yoğunluğuna bağlı değişimi analiz edilmiştir. Ek olarak, düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pilleri için de aynı analizler gerçekleştirilmiştir. Gelecekteki çalışmada, çalışılan geometrilerde farklı tip yakıtlarla besleme yapılarak performanslar değerlendirilecektir. Bu bağlamda yassı tüp geometrisinin odacık sayısı, elektrot ve elektrolit kalınlığı parametrelerinin değiştirilmesi ile çalışmalar genişletilip literatüre katkı sağlanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Gökçe, C. (2014). Önemli bir enerji girdisi olan petrolün ekonomik kalkınma sürecindeki rolü. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16(1), 143–154.

2. Yamamoto, O. (2000). Solid oxide fuel cells: Fundamental aspects and prospects. *Electrochimica Acta*, 45(15–16), 2423–2435.

3. Karanfil, G. (2020). Proton değişim membran yakıt hücreleri : termodinamiği , bileşenleri ve uygulama alanları. *Mühendis ve Makina*, 61(698), 57–76.

4. Zhang, H., Liu, W., Wang, Y., Wang, J., Yang, J., and Liang, T. (2019). Performance and long-term durability of direct-methane flat-tube solid oxide fuel cells with symmetric double-sided cathodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(54), 28947–28957.

5. İlbaş, M. and Kümük, B. (2020). Modeling and analysis of a model solid oxide fuel cell running on low calorific value coal gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3577–3583.

6. Park, B. K., Lee, J. W., Lee, S. B., Lim, T. H., Park, S. J., and Song, R. H. (2012). A flat-tubular solid oxide fuel cell with a dense interconnect film coated on the porous anode support. *Journal of Power Sources*, 213, 218–222.

7. Colclasure, A. M., Sanandaji, B. M., Vincent, T. L. and Kee, R. J. (2011). Modeling and control of tubular solid-oxide fuel cell systems. I: Physical models and linear model reduction. *Journal of Power Sources*, 196(1), 196–207.

8. Razbani, O., Assadi, M. and Andersson, M. (2013). Three dimensional CFD modeling and experimental validation of an electrolyte supported solid oxide fuel cell fed with methane-free biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(24), 10068–10080.

9. Nagel, F. P., Schildhauer, T. J., Biollaz, S. M. A., and Wokaun, A. (2008). Performance comparison of planar, tubular and Delta8 solid oxide fuel cells using a generalized finite volume model. *Journal of Power Sources*, 184(1), 143–164.

10. Akhtar, N., Decent, S. P., Loghin, D. and Kendall, K. (2009). A three-dimensional numerical model of a single-chamber solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(20), 8645–8663.

11. Afshari E., Barzi YM. Dynamic response analysis of the planar and tubular solid oxide fuel cells to the inlet air mass flow rate variation. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, (2015), 28(5), 794–801.

12. Kemm, M., Stiller, C., Selimovic, A., Thorud, B., Torisson, T. and Holland, O. (2005). Planar and tubular solid oxide fuel cells: A comparison of transient process behaviors. *Proceedings - Electrochemical Society*, 2005-07(01), 659–669.

13. Ilbas, M. and Kumuk, B. (2019). Numerical modelling of a cathode-supported solid oxide fuel cell (SOFC) in comparison with an electrolyte-supported model. *Journal of the Energy Institute*, 92(3), 682–692.

14. Hussain, J., Ali, R., Akhtar, M. N., Jaffery, M. H., Shakir, I. and Raza R. (2020). Modeling and simulation of planar SOFC to study the electrochemical properties. *Current Applied Physics*, 20(5), 660–672.

15. Suzuki, T., Liang, B., Yamaguchi, T., Hamamoto, K. and Fujishiro, Y. (2011). Development of novel micro flat-tube solid-oxide fuel cells. *Electrochemistry Communications*, 13(7), 719–722.

16. Park, J., Kang, J. and Bae, J. (2013). Computational analysis of operating temperature, hydrogen flow rate and anode thickness in anode-supported flat-tube solid oxide fuel cells. *Renewable Energy*, 54, 63–69.

17. Cui, D., Ji, Y., Chang, C., Wang, Z., Xiao, X. and Li, Y. (2020). Influence of structure size on voltage uniformity of flat tubular segmented-in-series solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 460.

18. Khan, M. Z., Song, R. H., Hussain, A., Lee, S. B., Lim, T. H. and Hong, J. E. (2020). Effect of applied current density on the degradation behavior of anode-supported flat-tubular solid oxide fuel cells. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(4), 1407–1417.

19. Lu, L., Liu, W., Wang, J., Wang, Y., Xia, C. and Zhou, X. D. (2020). Long-term stability of carbon dioxide electrolysis in a large-scale flat-tube solid oxide electrolysis cell based on double-sided air electrodes. *Applied Energy*, 259.

20. Milcarek, R. J., Nakamura, H., Tezuka T., Maruta, K. and Ahn, J. (2020). Investigation of microcombustion reforming of ethane/air and micro-Tubular Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 450.

21. Osafi, M. R., Bakhshi, A. A. and Kalbasi, M. (2019). Numerical modeling of solid acid fuel cell performance with CsH_2PO_4-AAM (anodic alumina membrane) composite electrolyte. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 1086–1094.

22. Mench, M. M. (2008). *Fuel Cell Engines*. (First edition) United States: John Wiley & Sons, Inc., 13.

23. Dell, R. M., Moseley, P. T., Rand D. A. J. (2014). *Towards Sustainable Road Transport* (First edition). U.K.: Academic Press, 274.

24. Lin, B. Y. S., Kirk, D. W. and Thorpe, S. J. (2006). Performance of alkaline fuel cells: A possible future energy system. *Journal of Power Sources*, 161(1), 474–783.

25. Brandon, N. P., Thompsett, D. (2005). *Fuel Cells Compendium* (First edition). Oxford, U.K.: Elsevier Ltd, 63, 157, 216.

26. Sari, Z., Çapoğlu, A. ve Konukman, A. E. Ş. (2002, 19-21 Ekim). *Alkali yakıt pilinde bileşen-başarım ilişkisi*. ELECO-2002: Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumunda sunuldu, Bursa.

27. U.S. Department of Energy EG&G Technical Services (2004). *Fuel Cell Handbook* (2003). United States: U.S. Department of Energy, 4-4.

28. Yılmaz, A., Ünvar, S., Ekmen, M. ve Aydın, S. (2017). Yakıt pili teknolojisi. *Technological Applied Sciences*, 12(4), 185–192.

29. Gemici, S. (2019). *Tek hücreli erimiş karbonat yakıt hücresi (EKYH) için matriks geliştirilmesi ve sistem tasarımı*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8.

30. Srinivasan, S. (2006). *Fuel Cells* (First edition). US: Springer, 505, 514.

31. T-raissi A. (1992). *Current technology of fuel cell systems*. IECEC-97 Proceeding of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Konferansında sunuldu, USA.

32. Sammes, N., Bove, R. and Stahl, K. (2004). Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(5), 372–378.

33. Whittingham, M. S., Savinell, R. F. and Zawodzinski, T. (2004). Introduction: Batteries and fuel cells. *Chemical Reviews*, 104(10), 4243-4244.

34. Karaoğlan M. U. ve Kuralay, N. S. (2014). Pem yakit hücresi modeli. *Mühendis ve Makina*, 55(657), 51–58.

35. Lashtabeg, A. and Skinner, S. J. (2006). Solid oxide fuel cells-a challenge for materials chemists. *Journal of Materials Chemistry*, 16, 3161–3170.

36. McIntosh, S., and Gorte, R. J. (2004). Direct hydrocarbon solid oxide fuel cells. *Chemical Reviews*, 104(10), 4845–4865.

37. Timurkutluk B. (2007). *Performance Analysis an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*, Master's Thesis, Middle East Technical University, 5, 6, 10.

38. Şefkat, G. ve Özel M. A. (2018). PEM yakıt pilinin simulink modeli ve analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(2), 351–366.

39. Sierra, J. M., Pathiyamattom, S. J. and Gamboa, S. (2009). Study of Activation Losses and Ohmic Resistance in a PEM Fuel Cell using Computational Fluid Dynamics. *ECS Transactions*, 20(1), 395–405.

40. Mohan, S. V., Varjani, S. and Pandey, A. (Editors). (2019). *Microbial Electrochemical Technology*. U.K.: Elsevier, 565–583.

41. Chan, S.H., Khor, K. A. and Xia, Z. T. (2001). A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness. *Journal of Power Sources*, 93(1–2), 130–140.

42. Bard, A. J., Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods fundamentals and applications* (Second edition). United States: John Wiley & Sons, Inc., 107.

43. Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena* (Second edition). US: Wiley, 794.

44. Bove, R. and Ubertini, S. (Editors). (2008). *Modeling Solid Oxide Fuel Cells*. Springer, 57.

45. Singhal, S. C. and Kendall, K. (Editors). (2003). *High-temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*. U.K.: Elsevier, 211.

46. Lu, Y. (2005). *Numerical Simulation of a Flat-Tube High Power Density Solid Oxide Fuel Cell*, Doctoral Thesis, University of Pittsburgh, 51.

47. Ilbas, M., Kumuk, B., Alemu, M. A. and Arslan B. (2020). Numerical investigation of a direct ammonia tubular solid oxide fuel cell in comparison with hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35108–35117.

48. Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O. and Ilbas, M. (2018). Combustion characteristics of premixed hydrogen/air flames in a geometrically modified micro combustor. *Fuel*, 217, 536–543.

49. Küpeli, S., Çelik, E. and Karagoz, I. (2020). Serpantin akış kanallı bir pem yakıt pilinin üç boyutlu modellenmesi ve parametrik analizi. *Euroasıa Journal of Mathematıcs-Engıneerıng Natural & Medıcal Scıences*, 8, 94–107.

50. Panthi, D. and Tsutsumi, A. (2014). *Micro-tubular solid oxide fuel cell based on a porous yttria-stabilized zirconia support.* APEnergy2014 Konferansında sunuldu.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı	: ÇİMEN, Fethi Mustafa
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 15.05.1995, Konya
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 (312) 202 89 60
e-mail	: fethimustafacimen@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	2017
Lise	Konya Anadolu Lisesi	2013

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2020-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce, Rusça, Fransızca

Yayınlar

1. İlbaş, M., Çimen, F. M. ve Kümük, B. (Baskıda). Numerical comparison of planar and micro-tubular solid oxide fuel cells. *Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi,* 1-1.

Hobiler

Futbol, yabancı dil öğrenmek, kitap okumak



GAZİ GELECEKTİR..