



**KÖMÜR GAZI YAKITLI KATI OKSİT YAKIT PİLLERİNİN SAYISAL VE
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Berre KÜMÜK

**DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2022

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Berre KÜMÜK

24/03/2022

KÖMÜR GAZI YAKITLI KATI OKSİT YAKIT PİLLERİNİN SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Berre KÜMÜK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2022

ÖZET

Bu çalışmada elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde yakıt olarak kömür gazı kullanımının performans üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Tez kapsamında öncelikle deneysel sonuçlar ile elde edilen sayısal sonuçların doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görüldükten sonra sayısal ve deneysel çalışmalar detaylandırılmıştır. Kömür gazı yakıtlı katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklık, basınç ve yakıt içeriğinin etkisi hem sayısal hem deneysel olarak incelenirken gözeneklilik, yakıt akış hızı ve destek türünün etkisi sadece sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde sayısal ve deneysel çalışmalarda her üç yakıt türü için sıcaklık (700°C -750°C ve 800°C) ve basınç (1 atm- 2 atm ve 5 atm) arttıkça yakıt pili performansının yaklaşık %50 arttığı görüldü. Ayrıca, yakıt içeriğinde hidrojen oranı arttıkça katı oksit yakıt pilinin performansı yaklaşık %50 oranında arttı. Sayısal sonuçlarda ise yakıt akış hızı arttıkça tepkimeye giren hidrojen miktarı arttığından performansın iyileştiği görüldü. Aynı zamanda destek türünün etkisi incelendiğinde elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde kalın elektrolit tabakasının ohmik direnci arttırmasından dolayı performansın en düşük olduğu görüldü. Ayrıca, anot ve katot destekli katı oksit yakıt pillerinin performansının birbiri ile oldukça benzer olduğu görüldü. Hem deneysel hem sayısal çalışmalar incelendiğinde katı oksit yakıt pillerinde alternatif yakıtların kullanılabileceği ve çeşitli değişkenlere bağlı olarak saf hidrojenle yarışabilir düzeyde performans gösterebileceği görülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda ülkemizin yerli ve milli kaynağı olan kömürden elde edilen kömür gazlarının temiz enerji teknolojileri aracılığıyla daha etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91408

Anahtar Kelimeler : Katı oksit yakıt pili, sentez gazı, matematiksel modelleme

Sayfa Adedi : 120

Danışman : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COAL GAS FUELED SOLID OXIDE FUEL CELL

(Ph. D. Thesis)

Berre KUMUK

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2022

ABSTRACT

In this study, the effect of using coal gas as a fuel on the performance of an electrolyte supported solid oxide fuel cell was investigated numerically and experimentally. In this thesis, firstly, the validation of the numerical results obtained with the experimental results was carried out. After that it was seen that the obtained results were quite compatible with each other, numerical and experimental studies were detailed. While the effects of temperature, pressure and fuel content on the performance of a coal gas fueled solid oxide fuel cell were investigated both numerically and experimentally, the effects of porosity, fuel flow rate and support type were investigated numerically only. When the obtained results were examined, it was seen that the fuel cell performance about 50% increased as the temperature (700°C -750°C and 800°C) and pressure (1 atm- 2 atm and 5 atm) increased in numerical and experimental studies for all fuels. In addition, the performance of the solid oxide fuel cell increased as the hydrogen content of the fuel increased about 50%. In the numerical results, it was observed that the performance improved as the amount of hydrogen reacted increased as the fuel flow rate increased. At the same time, when the effect of the support type was examined, it was seen that the performance of the electrolyte supported solid oxide fuel cell was the lowest due to the increase in the ohmic resistance of the thick electrolyte layer. In addition, the performances of anode and cathode supported solid oxide fuel cells were found to be quite similar to each other. When both experimental and numerical studies were examined, it was seen that alternative fuels could be used in solid oxide fuel cells and could compete with pure hydrogen depending on various variables. As a result of this study, it has been seen that coal gases obtained from coal, which is the domestic and national resource of our country, can be used more effectively through clean energy technologies.

Science Code : 91408

Key Words : Solid oxide fuel cell, syngas, mathematical modelling

Page Number : 120

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa ILBAS

TEŞEKKÜR

Tezimin fikir aşamasından sonuçlandırılmasına kadar geçen süreçte bilgi ve deneyimini benden hiç esirgemeyen, ayrıca her konuda desteğini gördüğüm, mesleki ve hayati anlamda görüşleri ile her zaman yoluma ışık tutan, uzun yıllardır birlikte çalışmaktan onur duyduğum ve kendisinden her zaman baba sıcaklığını hissettiğim çok değerli tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a yolumu aydınlattığı için sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezim süresince değerli katkı ve desteklerini benden esirgemeyen Tez İzleme Komitesi üyelerim Prof. Dr. Bora TİMURKUTLUK ve Doç. Dr. Serhat KARYEYEN'e teşekkürü borç bilirim. Aynı zamanda tez kapsamındaki deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin kıymetli çalışanlarına teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca bir mensubu olmaktan gurur duyduğum Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nün kıymetli hocaları ve değerli mesai arkadaşlarıma tüm destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bütün ömrüm boyunca yaşadığım tüm başarılarda yanımda olan, zorlukları kolaylıkla aşmam için maddi ve manevi elinden geleni yapan çok sevgili aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Aynı zamanda sevgili eşim Osman KÜMÜK ve biricik oğlum Mehmet Alp KÜMÜK'e bu zorlu süreçte yanımda oldukları, daima anlayış ve sabırla beni destekledikleri ve en güzel günlerimin sebebi oldukları için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. YAKIT PİLLERİ	29
2.1. Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları	30
2.2. Yakıt Pili Çeşitleri	30
2.2.1. Polimer elektrolit yakıt pili	32
2.2.2. Alkali yakıt pili	33
2.2.3. Fosforik asit yakıt pili	33
2.2.4. Eriyik karbonat yakıt pili	34
2.2.5. Katı oksit yakıt pili	34
2.3. Katı Oksit Yakıt Pilleri	35
2.3.1. Katı oksit yakıt pillerinin avantajları	36
2.3.2. Katı oksit yakıt pillerinin dezavantajları	37
2.4. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Sınıflandırılması	38
2.4.1. Çalışma sıcaklığına göre KOYP sınıflandırması	39
2.4.2. Destek türüne göre KOYP sınıflandırması	39

	Sayfa
2.4.3. Akış türüne göre KOYP sınıflandırması	41
2.4.4. Yakıt dönüşüm türüne göre KOYP sınıflandırması	42
2.4.5. Hücre ve stak yapısına göre KOYP sınıflandırması	43
2.5. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Malzemeleri	47
2.5.1. Anot tabakası	47
2.5.2. Katot tabakası	47
2.5.3. Elektrolit tabakası	48
2.6. Katı Oksit Yakıt Pillerinde Kullanılan Yakıtlar	48
2.6.1. Hidrojen yakıtı	49
2.6.2. Kömür yakıtı	49
2.6.3. Petrol yakıtı	50
2.6.4. Doğal gaz yakıtı	51
2.6.5. Biyokütle yakıtı	51
3. ELEKTROLİT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN	
SAYISAL MODELLENMESİ	53
3.1. Elektrokimyasal Reaksiyonlar	54
3.2. Gibbs Serbest Enerjisi ve Nernst Potansiyeli	55
3.3. Gerçek Hücre Voltajı ve Polarizasyon Eğrisi	56
3.3.1. Aktivasyon kayıpları	56
3.3.2. Ohmik kayıplar	57
3.3.3. Konsantrasyon kayıpları	58
3.3.4. Gerçek hücre voltajı	59
3.3.5. Polarizasyon eğrisi	59
3.4. Genel Denklemler	60

	Sayfa
3.5. Yakıt Pili Verimliliği	63
3.6. Model Geometrisi	64
4. DENEY SİSTEMİ VE EKİPMANLARI	67
5. BULGULAR VE İRDELEME	71
5.1. Model Doğrulaması	71
5.2. Sayısal Analiz Sonuçları	72
5.2.1. Performans üzerinde sıcaklığın etkisi	72
5.2.2. Performans üzerinde basıncın etkisi	77
5.2.3. Performans üzerinde yakıt içeriğinin etkisi	82
5.2.4. Performans üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi	83
5.2.5. Performans üzerinde yakıt akış hızının etkisi	88
5.2.6. Performans üzerinde yakıt pili destek türünün etkisi	93
5.3. Deneysel Analiz Sonuçları	95
5.3.1. Performans üzerinde sıcaklığın etkisi	96
5.3.2. Performans üzerinde basıncın etkisi	99
5.3.3. Performans üzerinde yakıt içeriğinin etkisi	101
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	119

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yakıt pillerinin temel özellikleri ve farklılıkları	31
Çizelge 3.1. Model katı oksit yakıt pilinin hücre özellikleri	64
Çizelge 4.1. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde performans analizi yapılan hidrojen ve kömür gazlarının fiziksel özellikleri	69
Çizelge 5.1. Karşılaştıma yapılan katı oksit yakıt pillerinin fiziksel ölçüleri	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yakıt pilinin çalışma şeması	29
Şekil 2.2. Yakıt pilini oluşturan tabakalar ve yakıt pilinin çalışma prensibi	29
Şekil 2.3. Yakıt pillerinin şematik olarak sınıflandırılması	32
Şekil 2.4. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi	35
Şekil 2.5. Güç üretim sistemlerinin güç çıkışı karşılaştırması	36
Şekil 2.6. Katı oksit yakıt pillerinin sınıflandırılması	39
Şekil 2.7. Anot destekli düzlemsel KOYP	40
Şekil 2.8. Katot destekli düzlemsel KOYP	40
Şekil 2.9. Elektrolit destekli düzlemsel KOYP	41
Şekil 2.10. Gözenekli yapı destekli (a) ve ara bağlantı elemanı destekli (b) düzlemsel KOYP	41
Şekil 2.11. Akış türüne göre paralel akış (a), zıt akış (b) ve çapraz akış (c) KOYP sınıflandırması	42
Şekil 2.12. Yakıt dönüşüm türüne göre dış dönüştürücü (a), dolaylı iç reformasyon (b) ve doğrudan iç reformasyon (c) KOYP sınıflandırması	43
Şekil 2.13. Düzlemsel KOYP için tek hücre (a) ve stak (b) yapısı	44
Şekil 2.14. Silindirik KOYP için tek hücre (a) ve stak (b) yapısı	45
Şekil 2.15. Yassı-tüp KOYP için tek hücre ve stak yapısı	46
Şekil 2.16. Yakıtların kaynaktan katı oksit yakıt pili için uygun yakıta dönüşümü	49
Şekil 3.1. İdeal ve gerçek bir katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrisi	60
Şekil 3.2. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin yapısı	64
Şekil 3.3. Oluşturulan ağ yapısı genel (a) ve önden (b) görünümü	65
Şekil 4.1. Yakıt hücresi test laboratuvarında bulunan deney düzeneğinin şematik görüntüsü	67

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. 800°C sıcaklıkta yakıt olarak su gazı kullanan elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin sayısal analiz sonuçları ile deneysel verilerinin karşılaştırılması	71
Şekil 5.2. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi	72
Şekil 5.3. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi	73
Şekil 5.4. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi	74
Şekil 5.5. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi a) 700°C b) 750 °C c) 800 °C	75
Şekil 5.6. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi a) 700°C b) 750 °C c) 800 °C	76
Şekil 5.7. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi a) 700°C b) 750 °C c) 800 °C	76
Şekil 5.8. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi	77
Şekil 5.10. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi	79
Şekil 5.11. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde basıncın etkisi a) 1 atm b) 2 atm c) 3 atm	80
Şekil 5.12. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde basıncın etkisi a) 1 atm b) 2 atm c) 3 atm	81
Şekil 5.13. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde basıncın etkisi a) 1 atm b) 2 atm c) 3 atm	81
Şekil 5.14. Yakıt olarak farklı oranlarda hidrojen içeriğine sahip yakıt kullanılan katı oksit yakıt pilinin performansı	82
Şekil 5.15. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi	83
Şekil 5.16. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi	84
Şekil 5.17. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi	85

Şekil	Sayfa
Şekil 5.18. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi a) %30 b) %40 c) %50	86
Şekil 5.19. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi a) %30 b) %40 c) %50	87
Şekil 5.20. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi a) %30 b) %40 c) %50	87
Şekil 5.21. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt akış hızının etkisi	88
Şekil 5.22. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt akış hızının etkisi	89
Şekil 5.23. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde yakıt akış hızının etkisi a) 20 SCCM b) 40 SCCM c) 60 SCCM d) 80 SCCM e) 100 SCCM	91
Şekil 5.24. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde yakıt akış hızının etkisi a) 20 SCCM b) 40 SCCM c) 60 SCCM d) 80 SCCM e) 100 SCCM	92
Şekil 5.25. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt pili destek türünün etkisi	94
Şekil 5.26. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde 800°C çalışma sıcaklığında yakıt pili destek türünün hidrojen mol dağılımı üzerine etkisi a) anot destekli KOYP b) katot destekli KOYP c) elektrolit destekli KOYP	95
Şekil 5.27. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi	96
Şekil 5.28. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi	97
Şekil 5.29. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi	98
Şekil 5.30. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin empedans grafiği üzerinde sıcaklığın etkisi	99
Şekil 5.31. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi	100

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.32. Yakıt olarak farklı oranlarda hidrojen içeriğine sahip yakıt kullanılan katı oksit yakıt pilinin performansı	101
--	-----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deney düzeneğinin genel görünümü	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\vec{S}_M$	Dış kaynak
$\vec{J}_i$	Türlerin difüzyon kütle akısı
$\vec{g}$	Yer çekimi ivmesi
$\vec{r}$	Gerilme tensörü
Φ_{el}	Elektronik potansiyel
Φ_{io}	İyonik potansiyel
ΔH	Entalpi değişimi
ΔS	Entropi değişimi
ΔV_a	Aktivasyon kayıpları
ΔV_k	Konsantrasyon kayıpları
ΔV_{ohm}	Ohmik kayıplar
μ	Akışkan viskozitesi
CH_4	Metan
c_i	Türlerin kütle kesri,
cm	Santimetre
cm^2	Santimetre kare
CO	Karbon monoksit
CO_2	Karbondioksit
E	İdeal potansiyel
E_e	İyon transferi için gerekli olan aktivasyon enerjisi
F	Faraday sabiti
H_2	Hidrojen
H_2O	Su
H_2S	Hidrojen sülfür
HCl	Hidroklorür
He	Helyum

Simgeler**Açıklamalar**

h_i	Türlerin taşınımıyla ısı transfer katsayısı
i	Akım yoğunluğu
i_0	Değişim akım yoğunluğu
j_{el}	Elektronik akım yoğunluğu
j_{io}	İyonik akım yoğunluğu
k	Geçirgenlik
k_{eff}	Elektrot tabakasının efektif makroskopik iletkenliği
l	Kalınlık
m^2	Metre kare
mA	Miliamper
mm^2	Milimetre kare
mW	Miliwatt
n	Reaksiyona giren elektron sayısı
N_2	Azot
P_i	i türünün kısmi basıncı
R_{top}	Toplam hücre direnci
$sccm$	Dakika başına akan standart santimetre küp
S_m	Ek kütle kaynakları
T	Sıcaklık
V	Volt
Zr	Zirkonyum
α	Yük aktarım sayısını
ΔG°	Gibbs serbest enerjisindeki değişim
ε	Gözeneklilik
ρ	Akışkan yoğunluğu
ρ_i	Tabaka direnci
ς	Kesme gerilim tensörü,
σ_e	Elektrolit tabakasının iyonik iletkenliği

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AYP	Alkali yakıt pili
------------	-------------------

Kısaltmalar**Açıklamalar****DIR**

Doğrudan iç reformasyon

EKYP

Eriyik karbonat yakıt pili

FAYP

Fosforik asit yakıt pili

KOYP

Katı oksit yakıt pili

Ni/YSZ

Nikel- Yttrium stabilized zirkonyum sermet

PEYP

Polimer elektrolit yakıt pili

SEM

Taramalı elektron mikroskobu

YSZ

Yttrium stabilized zirkonyum

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ile birlikte enerjiye olan ihtiyaçta hızlı bir şekilde artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının karşılanması için geleneksel enerji kaynaklarının yanı sıra teknolojinin gelişmesi ile yeni enerji üretim yöntemleri de sıklıkla kullanılmaktadır. Katı oksit yakıt pili (KOYP) yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren, modüler ve çevreye zararlı salınımı yok denecek kadar az olan sistemlerdir. Çok yüksek sıcaklıklarda çalıştıkları için sentetik gazlarla kullanımı en uygun olan yakıt pili çeşididir. Sadece H_2 ile çalışan ve çok düşük CO seviyelerini tolere edebilen polimer-elektrolit yakıt pillerinin aksine, KOYP sistemleri saf CO ile dahi çalışabilir. Özel hücre mimarileri sayesinde KOYP'leri benzin ve dizel gibi yakıtlar da dâhil olmak üzere doğrudan hidrokarbonlar üzerinde çalışabilir. Ayrıca kömür gazları da sera etkisi ve zararlı salınımına sahip olma gibi olumsuz etkilere sahip olsa da elektrik üretimi için hala en bol ve en ucuz kaynaklardandır. Bu nedenle temiz kömür teknolojileri geliştirip uygulanarak bu bol ve ucuz kaynaktan etkin bir şekilde faydalanılması ve önümüzdeki yüzyıllarda da aktif bir şekilde kullanılması düşünülmektedir. KOYP, farklı yakıtlarla yüksek verimle çalışabildiği için kömür gazlarının yakıt olarak kullanımı için uygun bir teknolojidir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan güncel verilere göre ülkemizde taş kömürü kaynağı 1,52 milyar ton, linyit ve asfaltit kaynağı 19,14 milyar ton olmak üzere toplam kömür kaynağı 20,66 milyar tondur [1]. Bu tez kapsamında, Türkiye'nin yerli ve milli enerji kaynağı olan kömürden, uygun kömür gazlaştırma ve karbonlaştırma tekniklerini kullanarak elde edilmiş olan kömür gazlarının KOYP performansı üzerindeki etkisi farklı parametreler göz önünde bulundurularak sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Tez çalışmasına başlanmadan önce bu konu kapsamında daha önce yapılmış olan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Literatür araştırması

Yakabe, Hishinuma, Uratani, Matsuzaki ve Yasuda (2000), metan reformasyonunun hücre performansına etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları sayısal çalışmada tek hücreden oluşan çift kanallı anot destekli bir KOYP zıt akış için modellenerek anot tabakasında meydana gelen konsantrasyon kayıpları hesaplanmıştır. Modelde, gözenekli anot tabakasındaki gaz akışı Darcy kanunlarına göre tanımlanmıştır. Yüksek yakıt kullanım oranlarında konsantrasyon

kayıplarının hesaplanabilmesi için buharla dönüştürülmüş metan yakıt olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda metan reformasyonlu gaz sistemleri için, konsantrasyon kayıplarının, yüksek yakıt kullanım oranlarında yakıt akış yolu boyunca dikkate değer bir şekilde arttığı görülmüştür. Ayrıca metan dönüşüm reaksiyonunun konsantrasyon kayıplarının azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür [2].

Eguchi, Kojo, Takeguchi, Kikuchi ve Sasaki (2002), KOYP'lerinde iç ve dış buhar reformasyonu ile güç üretimini araştırmış ve karşılaştırmışlardır. Gaz bileşiminin güç üretim üzerindeki etkisi ile H_2 ve CO arasındaki reaktivite farkı incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada metanın iç buhar reformasyonunun Ni-YSZ elektrot katmanları üzerinde gerçekleştirilebilir olduğu ancak tam bir dönüşüm elde etmek için yeterli miktarda katalizör gerektiği görülmüştür. İç ve dış buhar reformasyonuna sahip iki yakıt sisteminde de açık devre voltajı aynı seviyeye ayarlanmış olmasına rağmen, CO-CO₂ yakıt sistemi için elde edilen akım-voltaj değerinin, H_2 -H₂O yakıt sistemi için olan akım-voltaj değerinden konsantrasyon ve/veya aktivasyon kayıpları sebebiyle daima daha düşük olduğu görülmüştür [3].

Koh, Yoo, Park ve Lim (2002), yaptıkları deneysel çalışmada yakıt olarak metan ve hidrojen kullanılan anot destekli düzlemsel bir KOYP'nde meydana gelen karbon oluşumunun performansa etkisini incelemişlerdir. Karbon oluşumu, aktif reaksiyon alanını azalttığından negatif olarak düşünülür. Bu çalışmada ise, yakıt olarak nemlendirilmiş metan kullanıldığında oluşan karbonun, termodinamik olarak karbonsuz durum ile benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Yani tersinir karbon oluşumunun, hücre performansını etkilemediği açıklanmıştır. Yakıt kullanım oranının %53 olduğu durumda sıcaklık 850°C iken KOYP'nin 500 mW/cm² güç ürettiği gözlenmiştir [4].

Weber, Sauer, Müller, Herbstritt ve Tiffée (2002), elektrolit destekli düzlemsel bir KOYP performansına buhar/karbon oranının etkisini CH₄/H₂O ve CO/H₂ gaz karışımlarını yakıt olarak kullanarak incelemişlerdir. Çalışmanın amacı, Ni/YSZ anot tabakası ile tek bir hücreden oluşan KOYP'nin karbon temelli yakıt kullanımının avantaj ve dezavantajlarını incelemektir. Saf H₂, CO ve CH₄ gazları yakıt olarak kullanıldığında KOYP'nden elde edilen güç değerinde çok önemli farklılıklar görülmemiştir. Saf CO ve CH₄'ün oksidasyonu anot tabakasında yeterli oksijen seviyesi olduğu zaman gerçekleşmiştir. Ayrıca, karbon birikimi tüm yakıt karışımlarının kullanım durumunda anot bozunumu ile sonuçlanmıştır. Uygun

çalışma koşulları için yakıt içerisindeki buhar/karbon oranının uygun olması veya anotta oksijen miktarının yeterli olması gerektiği görülmüştür. Ni/YSZ anot tabakası 1000 saat çalıştırılarak test edilmesine karşılık performans üzerinde önemli bir kayıp oluşmadığı görülmüştür [5].

Kendall, Finnerty, Saunders ve Chung (2002), doğrudan metan yakıtlı mikro tüp KOYP'nin çeşitli işletme koşullarında performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda saf metanın, metanın kısmi oksidasyonu ile aynı açık devre voltajı değerini verdiği görülmüştür. Ayrıca yaklaşık 30 dakika saf metan ile çalışma sonucunda 2 mm çapa sahip mikro tüpün karbon ile dolduğu gözlenmiştir. Yakıtın He gazı ile seyreltilme işlemi Nernst denkleminden de beklendiği gibi açık devre voltajı değerini azaltmıştır. Ayrıca yakıtın CO₂ gazı ile seyreltilmesi de açık devre voltajında logaritmik bir azalma meydana getirmiştir. %30 CH₄ -%70 CO₂ yakıt karışımının ise oksidasyon eğrisi ile tamamen uyumlu olduğu görülmüştür [6].

Liu ve Barnett (2003), yakıt olarak doğal gaz ve metan gazı kullanan anot destekli düzlemsel bir KOYP performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, her iki yakıt için, doğrudan beslemeli KOYP stak yapısında yakıt girişinin yakınında beklenen durumları yaklaşık olarak tahmin etmek için düşük yakıt kullanım oranlarında tek hücreli testler yapılmıştır. Çalışma sonucunda sıcaklığa bağlı olarak ölçülen açık devre voltajı değerlerinin anot reaksiyonu olarak katı karbonun kısmi oksidasyonu gerçekleştiğinden, hesaplanan değerler ile uyum gösterdiği görülmüştür. Bu durum metan bozunumu ve elde edilen katı karbonun elektrokimyasal oksidasyonu olmak üzere iki adımlı bir reaksiyon mekanizması olduğunu göstermiştir. Ayrıca KOYP hücrelerinin açık devre voltajındayken 800°C'de oldukça hızlı bozunuma uğradığı gözlemlenmiştir [7].

Aguilar, Zha, Cheng, Winnick ve Liu (2004), yaptıkları deneysel çalışmada anot tabakası olarak La_xSr_{1-x}VO_{3-δ} (LSV) kullanılan bir KOYP performansını içerisinde H₂S içeren yakıt karışımı kullanarak araştırmışlardır. Performans üzerinde sıcaklık, elektrolit kalınlığı, H₂S'in H₂'ye eklenmesi, H₂S'in konsantrasyon farklılığı parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda LSV hücrelerinin H₂ gazı yakıt olarak kullanıldığında elektrokimyasal performansı zayıf olmasına rağmen, saf H₂S ve H₂S içeren yakıtlarla kararlı çalıştığı gösterilmiştir. KOYP performansının H₂ gazı içerisinde %5 H₂S ve N₂ içerisinde %5 H₂S bulunduğunda oldukça yakın olduğu gözlenmiştir (Sıcaklık 1273 K iken, %95 H₂-

%5 H₂S yakıt karışımında güç yoğunluğu 135 mW/cm², %95 N₂-%5 H₂S yakıt karışımında güç yoğunluğu 90 mW/cm² olarak ölçülmüştür). Sıcaklık arttıkça her iki yakıt türü içinde performansın arttığı görülmüştür. Elektrolit kalınlığının artmasının hücre performansını azalttığı görülmüştür [8].

Pacheco, Mann, Hutton, Singh ve Martin (2005), yaptıkları sayısal çalışmada KOYP'nin akım-sıcaklık profilini farklı gazlaştırmacı bileşimleri altında incelemişlerdir. Geliştirilen modelde, hidrojen ve karbon monoksit başlangıç konsantrasyonlarının yüksek olmasının ve buhar-karbon oranının etkisi gösterilmiştir. Çalışma sonucunda yakıt içerisindeki hidrojen miktarı arttıkça KOYP performansının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, başlangıçta yakıt içerisindeki CO miktarının yüksek ve su miktarının düşük olmasının karbon oluşumuna sebep olduğu görülmüştür [9].

Assabumrungrat ve diğerleri (2005), yaptıkları çalışmada, metanol yakıtlı doğrudan iç reformer (DIR) kullanılan bir KOYP'nde karbon oluşumunu sayısal olarak incelemişlerdir. KOYP'nde, oksijen ve hidrojen iletken iki ayrı elektrolit türü düşünülerek performans analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda karbon oluşumunun sıcaklık ve H₂O:MeOH giriş oranının artırılmasıyla engellendiği görülmüştür. Hidrojen ve oksijen iletken elektrolit yapısı karşılaştırıldığında, karbon oluşumunun anotta hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonundan üretilen ekstra buhar nedeniyle oksijen ileten elektrolit yapısında daha az olduğu görülmüştür [10].

Nunes, Gorte ve Vohs (2005), yaptıkları çalışmada, Cu-CeO₂-YSZ anot tabakasına sahip KOYP'nin performansını yakıt olarak H₂, CO ve sentez gazı kullanarak karşılaştırmışlardır. Ayrıca yakıt konsantrasyonunun yakıt pili performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle, Cu, CeO₂ ve YSZ ile anot tabakası sentezi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu tabakada CeO₂ oksitleyici katalizörü olarak görev yaparken, Cu elektronik iletkenliği sağlamaktadır. Yapılan çalışmada, Cu-CeO₂ tabanlı anot tabakasının Ni-YSZ tabanlı anot tabakasından CO oksidasyonu açısından farklı olduğu görülmüştür. Ni-YSZ anot tabakaları H₂ oksidasyonu için yüksek aktiviteye sahipken, CO oksidasyonunu etkin bir şekilde katalize edemedikleri için bu yakıtla çalışırken düşük performans sergilemiştir. Bu yüzden, Ni-YSZ ile sentez gazları çalıştırılırken, yakıtın sadece H₂ bileşeni kullanılır. KOYP performansı üzerinde yakıt konsantrasyonunun etkisi incelendiğinde ise

H₂'nin elektrokatalitik oksidasyon kinetiğinin Cu-CeO₂-YSZ anot tabakasında pozitif değerlerde iken Ni-YSZ anot tabakası için neredeyse sıfır olduğu görülmüştür [11].

Kee, Zhu ve Goodwin (2005), yaptıkları derleme çalışmada KOYP'lerinin hidrokarbon ya da hidrokarbon kökenli yakıtlarla doğrudan kullanılabildiğini göstermişlerdir. Dönüşüm verimliliği ısı makinelerinden daha güçlüdür, ısı makinesi ve kojenerasyon sistemleri ile birlikte kullanıldığında ise verimlilik %70'lere kadar çıkabilmektedir. Yakıt hücrelerinin hem H₂ hem de CO üzerinde çalıştığına dair doğrudan deneysel çalışmalar vardır. Yüksek hidrokarbon oranı içeren yakıtlarda, yakıt pilinin anot kısmına karbon birikimi olabilmektedir. Çalışma sıcaklığı, malzeme seçimi, yakıt kompozisyonuna bağlı olmakla birlikte, homojen ya da heterojen süreçler bu karbon birikimine sebep olmaktadır. Hidrokarbon yakıtlı KOYP, yakıt hücresi içindeki yakıtın %100'ünü oksitlemeyebilir. KOYP'nde, yakıtın elektrokimyasal potansiyelinin çalışan hücre potansiyelinin altına düştüğü zaman elektrik enerjisi üretilmeyecektir. Bu bölümlerde ısının çok az üretilmesi veya hiç oluşmaması, bağlı malzemelerin farklı ısıl genleşmeleriyle ilişkili yapısal güçlükleri şiddetlendiren ısıl gradyanlara katkıda bulunur [12].

Sangtongkitcharoen, Assabumrungrat, Pavarajarn, Laosiripojana ve Prasertthdam (2005), yaptıkları çalışmada KOYP'nde yakıt olarak metan kullanımının üç farklı çalışma koşulunun (dış reformasyon, doğrudan olmayan iç reformasyon ve doğrudan iç reformasyon) karbon oluşumuna etkisini termodinamik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, yüksek sıcaklıkta daha iyi performans için girişte gereken H₂O/CH₄ oranının azalması gerektiğini açıklamışlardır. Ayrıca, H₂O/CH₄ oranının elektrolit türünden bağımsız olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, doğrudan iç reformasyona sahip KOYP'nin oksijen ileten elektrolit yapısı ile kullanımının en uygun seçim olduğuna karar verilmiştir [13].

Suwanwarangkul ve diğerleri (2006), yakıt olarak sentez gazı kullanılan düğme hücre yapılı bir KOYP'ni 800°C-900°C'de iki boyutlu ve izotermal olarak modellemişlerdir. Sayısal modelde elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar ile kütle, iyon ve momentum transferi de göz önüne alınmıştır. Aynı zamanda aynı şartlar altında çalışma deneysel olarak yapılmış ve sayısal ve deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel ve sayısal sonuçlar, KOYP'nde sentez gazı ile çalışırken daha düşük hücre performansı elde etmenin temel nedeninin, anot yüzeyine zarar veren Boudouard reaksiyonu yoluyla karbon oluşumu olduğunu göstermiştir. Bu sorunun çözülmesi durumunda ise CO'nin KOYP için etkili bir

yakıt olduğu düşünülmektedir. CO_2 açık devre voltajını önemli ölçüde azalttığından CO_2 seyreltmesinin hücre performansı üzerinde N_2 'den daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Karbon oluşumunda termodinamik analiz ile işletme basıncı, sıcaklık ve yakıt içerisindeki H_2 ve CO bileşimlerinin önemli faktörler olduğu anlaşılmıştır. KOYP'nin performansında azalma olsa bile sentez gazı yakıtına H_2O veya CO_2 ilave edilerek bu durumun aşılabildiği bulunmuştur [14].

Zhu ve Kee (2006), bu çalışmada KOYP verimliliğini ve yakıt kullanımını, işletme koşulları ve yakıt bileşiminin bir fonksiyonu olarak termodinamik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, maksimum verimliliğin membran-elektrot bileşimi karakterinden ve polarizasyon kayıplarından bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak, güç yoğunluğunun polarizasyon kayıplarına bağlı olmasından dolayı, maksimum verimliliğinde dolaylı olarak büyük bir şekilde hücre geometrisine bağlı olduğu açıklanmıştır [15].

Gemmen ve Tremblay (2006), bu çalışmada, geliştirilen bir anot tabakası üzerinde sentez gazı kullanımının performansa olan etkisini geleneksel anot tabakası ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca KOYP performansı farklı basınçlar altında incelenmiştir. Çalışma sonunda metan buharı dönüştürme reaksiyonu yoluyla hidrojenin üretilmesi için en fazla 8 atm basıncın yeterli olduğu aksi takdirde daha yüksek basınçlarda metan üretimine neden olduğu görülmüştür. Su gazı dönüşüm reaksiyonunun oranının yaklaşık 7 atm civarında arttığı bulunmuş ve daha yüksek basınçlarda çalışmanın CO ve H_2 'in dönüşümünü azalttığı açıklanmıştır. Difüzyondan kaynaklanan kayıpların elektrolit ara yüzeyindeki hidrojen miktarındaki değişikliklerle açıklandığı gibi, basınç yaklaşık 5 atm olduğunda azalma gösterdiği ve ardından tekrar arttığı görülmüştür [16].

Aloui ve Halouani (2007), KOYP performansını saf hidrojen ve biyokütle gazlaştırması sonucu elde edilen sentez gazı (H_2 ve CO karışımı) kullanarak incelemişlerdir. Anot tarafındaki H_2 ve CO gazlarının doğrudan oksitlenme tepkimesine girdiği düşünülmüştür. Konsantrasyon kayıplarını hesaplamak için Dusty-gaz modeli kullanılmıştır. Ayrıca, ohmik kayıplar için Ohm kanunu, aktivasyon kayıpları için de Butler-Volmer denklemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, H_2 ve CO 'in doğrudan oksidasyonu ile elde edilen gücün sadece H_2 'in yakıt olarak kullanılmasından daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle biyokütle kullanımının KOYP'nde kullanımının uygun olduğu açıklanmıştır [17].

Colpan, Dincer ve Hamdullahpur (2007), bu çalışmada anot destekli KOYP’nde sentez gazını doğrudan reformasyon yöntemi ile yakıt olarak kullanmış ve resirkülasyon oranı ile yakıt kullanım oranının performans üzerine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Resirkülasyon oranının KOYP performansı üzerindeki önemi, karbon birikimini önlemek ve kimyasal reaksiyonların başlaması için gerekli olan su miktarını anot çıkış gazlarından karşılamaktır. Yapılan çalışma sonucunda resirkülasyon oranının düşük akım yoğunluklarında çok etkili olmadığı görülmüştür. Yüksek akım yoğunluklarında ise resirkülasyon oranı arttıkça yakıtın akış hızı, hava kullanım oranı, çıkış gücü ve elektriksel verimlilik azalmıştır. Katot kısmından giren havanın akış hızının yükselmesi düşük hava kullanım oranı anlamına gelmektedir. Bu da sistem maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca yakıt kullanım oranı arttıkça, yakıtın akış hızı ve çıkış gücü azalırken hücrenin elektriksel verimliliği artmıştır [18].

He ve Hill (2007), yaptıkları deneysel çalışmada Ni/YSZ (%70 NiO/ %30 YSZ) anot tabakasına sahip KOYP’nin performansını 773 K ve 1073 K arasında nemlendirilmiş metan yakıt ile çalıştırarak incelemişlerdir. Çalışmada ayrıca Ni/YSZ tabakası üzerine Zr katkılı seryum dioksit katalizör tabakasının eklenmesinin etkisi incelenmiştir. Zr katkılı seryum dioksit katalizör yokluğunda, 873 K üzerinde karbon oluşumu görülmüş, 923 K üzerinde ise karbon oluşumu önemli derecede artmıştır. Zr katkılı seryum dioksit katalizörü kullanıldığında, daha az karbon oluştuğu ve oluşan karbonun daha kolay bir şekilde yok edildiği görülmüştür. Ayrıca, karbon oluşumunun sermet yapısında önemli bir değişikliğe neden olmadığı açıklanmıştır. Sentez gazı ile yapılan deneysel çalışmalar seryum dioksit katalizör tabakasının rolünün geleneksel katalizöre göre daha önemli olduğunu göstermiştir [19].

Suwanwarangkul ve diğerleri (2007), yakıt olarak biyokütle kaynaklı sentez gazı kullanan silindirik bir KOYP’ni modellemişlerdir. Sayısal analiz sonuçlarına göre, H₂’nin daha yüksek enerji içeriği nedeniyle hücre içinde daha yüksek ortalama sıcaklıklara ulaşıldığı için yakıt olarak H₂ kullanıldığında KOYP performansının sentez gazları ile elde edilen performanstan daha üstün olduğunu görülmüştür [20].

Tremblay, Gemmen ve Bayless (2007), sentez gazı yakıtlı elektrolit destekli düğme hücre yapısındaki KOYP’nin performansını yakıt içerisinde HCl bulunur ve bulunmazken incelemişlerdir. 0.7 V’ta 800°C ve 900°C’de sentez gazı 20 ppm ve 160 ppm HCl içerirken

deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda 800°C ve 900°C’de yakıt içerisinde HCl olmadığında performansta çok büyük bir değişiklik olmadığı, yakıtta HCl eklendiğinde ise performansta azalma meydana geldiği görülmüştür [21].

Nikooyeh, Jeje ve Hill (2007), geliştirdikleri 3 boyutlu anot destekli düzlemsel KOYP modelinde doğrudan iç reformasyona sahip metan yakıtlı KOYP’nin ısı ve elektrokimyasal davranışını 1073 K’de incelenmiştir. Geliştirilen modelin sonuçlarında, hem hücre uzunluğu boyunca (16 K/cm’e kadar) hem de hücre kesiti içinde (35 K/cm’e kadar), özellikle hücre girişinde önemli sıcaklık değişimlerinin bulunduğunu gösterilmiştir. Büyük sıcaklık değişimlerinin, endotermik metan buhar reformasyon reaksiyonunun ve anot-katot tabakaları yapısındaki farklı konumlardaki ekzotermik elektrokimyasal reaksiyonun nispi oranlarının bir sonucu olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, artan H₂ konsantrasyonunun ekzotermik elektrokimyasal reaksiyonu arttırdığı böylece hücre girişindeki sıcaklık düşüşünü azalacağı ve artan H₂, H₂O ve CO₂ konsantrasyonlarının da karbon birikimi miktarını azaltabileceği görülmüştür [22].

Nikooyeh, Clemmer, Restrepo ve Hill (2008), bu çalışmada, Ni/YSZ kompozit malzemesi ile anot tabakası hazırlayarak 1073 K’de 0-1,5 CH₄/H₂ oranında yakıt kullanarak KOYP’nin performansını incelemişlerdir. Çalışmada karbon oluşumunun tipi ve miktarı üzerine hidrojenin etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda yakıt içerisindeki hidrojen miktarı arttıkça karbon oluşumunun ve zararının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür [23].

Zhi, Chen, Finklea, Celik ve Wu (2008), Ni-YSZ/YSZ/Ni-YSZ anot/elektrolit yarım hücresinde, %30,6 H₂, %30 CO, %11,8 CO₂, %27,6 H₂O ve 20 ppm PH₃ içeren sentez gazı yakıt olarak kullanılarak fosforun yakıt pili performansı üzerine etkisi incelemişlerdir. Kömür gazında 20 ppm PH₃ bulunması, yakıt pilinin çalışan elektrot tabakası üzerinde zehirleyici bir rol oynadığı görülmüştür. Yük transfer ve difüzyon dirençlerinin PH₃ içeren kömür gazına maruz kaldıkça aşırı derecede arttığı görülmüştür. Difüzyon direncinin artma hızının yük transfer direncinin artma hızına göre bir miktar daha hızlı olduğu görülmüştür [24].

Ni, D. Leung ve M. Leung (2008), proton ve elektron iletken elektrolit türüne göre iki farklı KOYP’nin performansını yakıt olarak metan gazı kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Metan ile beslenen proton iletken KOYP’nin elektron iletken KOYP’ne göre daha yüksek

teorik performansa sahip olduğu ancak gerçek performansının bir miktar daha düşük olduğu görülmüştür. Proton iletken KOYP’nde ohmik kayıpların bir miktar daha yüksek olduğu, ayrıca, kütle taşınım karakteristiği de tamamen farklı olduğundan konsantrasyon kayıplarında da fark olduğu açıklanmıştır. Proton iletken KOYP’nde anot konsantrasyon kayıplarının elektron iletken KOYP’nden daha az olmasına rağmen, katot tabakasında su bulunmasından dolayı katot konsantrasyon kayıpları daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sıcaklık artışının ise her iki KOYP türü için toplam kayıpları azalttığından performansı arttırdığı görülmüştür [25].

Wu, Su, Zhang, Ran ve Shao (2009), bu çalışmada, orta sıcaklık bir anot destekli düzlemsel KOYP’nde yakıt olarak katı karbon kullanımının KOYP performansına etkisi deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada ters Boudouard reaksiyonu yoluyla karbonun gaz halindeki karbon monoksit'e dahili katalitik gazlaştırılmasını içeren bir çalışma yöntemi kullanılmıştır. Katalizör olarak Fe_mO_n (alkali metal oksit katalizörü) kullanılarak, katı karbonun CO_2 ile reaksiyona girmesi sağlanmıştır. Çalışma sonucunda $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{--M}_x\text{O}$ ($M = \text{Li, K, Ca}$) katalizör olarak kullanıldığında, karbon gazlaştırma oranının orta derece sıcaklıklarda önemli derecede arttığı görülmüştür. Gaz halindeki CO'nun katı karbona kıyasla çok daha yüksek yayılımı nedeniyle, harici CO_2 beslemesi olmaksızın yaklaşık 300 mW/cm^2 maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu değerin, saf hidrojen yakıt olarak kullanıldığında elde edilen değerden çok az bir miktar düşük olduğu açıklanmıştır [26].

Arpornwichanop, Patcharavorachot ve Assabumrungrat (2010), doğrudan iç reformasyon ile metan yakıtlı proton iletken bir KOYP’nin performansını elektrolit tipine göre incelemişlerdir. Geliştirilen bir boyutlu modelde yakıt ve hava kanallarındaki gaz karışımlarının dağılımı da incelenmiştir. Çalışma sonucunda $0,7 \text{ V}$ ' ta güç yoğunluğu ve yakıt kullanımının iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ancak bu durumda yakıt kanalında yüksek CO içeriği gözlenmiştir [27].

Miao ve diğerleri (2010), CO_2 , H_2O , CO, N_2 ve CH_4 'ün KOYP performansı üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. KOYP’nin açık devre voltajı değeri yakıt içerisinde CO eklenmesi ile değişmezken N_2 , CO_2 ve H_2O eklenmesiyle azalmış, CH_4 eklenmesi ile artmıştır. Kömür gazı içerisine H_2O ve CO_2 eklenmesinin konsantrasyon kayıplarını azaltıp elektrolit tabakasından üçlü faz sınırına oksijen iyonu geçişine izin verdiği için hücre performansının iyileştiği açıklanmıştır. Yakıt içerisindeki CO ve CH_4 'ın, anot üçlü faz

sınırına yük transferini, gaz difüzyonunu ve dönüşümünü yavaşlattığı görülmüştür. Yakıt olarak %40 H₂, %20 CO, %20 H₂O ve %20 CO₂ kullanıldığında, 750°C ve 360 saat test yapıldığında, hücrede karbon oluşumu gözlenmemiştir. Ancak, %50 H₂, %30CO, %10 H₂O, %10 CO₂ kullanıldığında oldukça fazla karbon oluşumu görülmüştür. 750°C’de yakıt olarak saf H₂ kullanıldığında 316 mW/cm² güç yoğunluğu elde edilmiştir [28].

Ye, Wang, Zhou, Zeng ve Wen (2010), Ni-YSZ anot tabakasına sahip anot destekli KOYP üreterek H₂-CO sentez gazı yakıtlı KOYP performansını incelemişlerdir. Performans analizleri farklı H₂-CO bileşenlerinde ve 750°C’de yapılmıştır. Yakıt içerisindeki su ve azotun etkisi de ayrıca incelenmiştir. Sentez gazı içerisine, performans azalmasına neden olsa da bir miktar su ilave edilerek karbon birikiminin önüne geçilebildiği görülmüştür. Anot tabakası üzerine Cu-CeO₂ kaplaması yapılarak anot kararlılığı ve performans artırılmıştır. %65 H₂, %32 CO, %3 H₂O içeren bir sentez gazı 300 mW/cm² bir güç performansı ile yaklaşık olarak 1050 saat kararlılıkta bir sorun olmaksızın çalıştırılmıştır. Saf H₂ için ortalama güç yoğunluğu 400 mW/cm² olarak ölçülürken, %48,5 H₂, %48,5 CO, %3 H₂O içeren sentez gazı yakıtı için ortalama güç yoğunluğu 310 mW/cm² olarak ölçülmüştür [29].

Li, Shi ve Cai (2010), bu çalışmada, tek boyutlu sentez gazı ile yakıtlanan anot destekli KOYP modellemişlerdir. Model, farklı kompozisyonlardaki sentez gazı ile 750°C, 800 °C ve 850 °C’de gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Çalışmada, her bileşen için polarizasyonlar üzerinde işletme voltajı ve sıcaklığın etkisi, her iki elektrot tabakasında elektronik akım yoğunluğu ve anot tabakasında türlerin konsantrasyon dağılımı incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları, düşük sıcaklıkta katot aktivasyon kayıplarının ve omik kayıpların baskın olduğunu, yüksek sıcaklıkta anot kayıplarının daha önemli olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve düşük voltajlarda Boudouard reaksiyonları tarafından Ni yüzey üzerinde biriken karbon oluşumunun daha az olduğu görülmüştür. Ek olarak, sentez gazı içerisindeki H₂O ve CO₂ arttıkça, karbon birikimi azalmıştır. Son olarak, kömür gazlaştırıcısından ve metan termokimyasal reform işlemlerinden elde edilen tipik sentez gazının hücre performans analizi ile yakıttaki etkin bileşimlerin (örneğin H₂ ve CO) artmasıyla hücre performansının ve açık devre voltajının arttığını gösterilmiştir. Havanın oksitleyici olarak kullanılmasıyla ortaya çıkan sentez gazındaki büyük N₂ içeriği, performansın önemli ölçüde bozulmasına yol açmıştır [30].

Restrepo ve Hill (2010), elektrolit destekli düzlemsel bir KOYP'nde yakıt olarak CO ve H₂ karışımının kullanılmasının karbon oluşumu üzerindeki etkisini, 1073 K'de elektrokimyasal ve karbon karakterizasyon teknikleri ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, %75 CO, %25 H₂ yakıt karışımında 6 saatlik performans sonunda KOYP bozunuma uğramıştır. %100 CO yakıtı kullanıldığında ise 10 mA/cm² akım yoğunluğunda 6 saat üzeri performans sonunda karbon oluşumun olmadığı gözlenmiştir. Yakıt içerisinde H₂'nin varlığının karbon oluşum miktarını azaltacağı beklenmesine rağmen, açık devre voltajında CO/H₂ karışımları içeren yakıtta maruz kalan anotlarda saf CO'in yakıt olarak kullanılmasından daha fazla karbon biriktiği görülmüştür [31].

Wang, Yu ve Weng (2011), yakıt olarak sentez gazı kullanan düzlemsel bir KOYP performansını farklı elektrik yükleri altında sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda akım yoğunluğunun artması ile sıcaklık artışı olduğu görülmüştür. Ayrıca KOYP'nde oluşan en yüksek ve en düşük sıcaklık arasındaki farkın arttığı gözlenmiştir. Fakat ohmik kayıpların değişim üzerinde bu parametrelerin etkisi net olarak açıklanamamıştır [32].

Paradis, Andersson, Yuan ve Sundén (2011), bu çalışmada, KOYP'nde kullanılan metan tabanlı alternatif yakıtları incelemiş ve performans ve karbon oluşumu gibi açılardan karşılaştırma yapmışlardır. Çalışma sonunda metanol ve etanol gazlarının kolay depolama ve taşıma özelliklerine sahip olduğu ve metana göre daha yüksek ısı verimlilik gösterdiği görülmüştür. Biyogaz ise içeriğindeki CO₂ bileşeninden oldukça fazla etkilenmekle birlikte metan içeriğine bağlı olarak elektrik gücü üretebilmiştir. Metanol, etanol ve dimetil eter gazları, dış dönüştürücü ile birlikte çalıştırıldığında hibrid sistemlerde oldukça verimli çalışmıştır. Yakıtta daha fazla buhar eklenmesi ile anot katalitik aktif alanında karbon oluşumu riski azaltılmıştır. Yakıttan H₂'e dönüştürülen her mol için gereken ısıyı değerlendirmek için bir karşılaştırma yapılmış ve metanol ve dimetil eterin kullandığından iki kat daha fazla ısı kullandığı için metanın daha verimli olduğu görülmüştür [33].

Chen, Wang, Miao, Li ve Xu (2011), Ni-YSZ anot tabakası malzemeli, anot destekli düzlemsel KOYP üzerinde farklı sıcaklıklarda ve yakıt olarak çeşitli sentez gazlarının kullanılmasıyla oluşan karbon birikimi deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda işletme sıcaklığının, karbon oluşumu ve hücre performansı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Sabit akımda KOYP kararlılığı artmış fakat karbon oluşumundan sonra hücre

hızlı bir şekilde bozunuma uğramıştır. 750°C sıcaklıkta anot yüzeyine yakın gerçekleşen mikro yapı hasarı, hücre bozulması ve başarısızlığında önemli bir faktör olan iletkenlik azalmasına neden olmuştur. Bu sıcaklıkta biriken karbondan kaynaklanan Ni korozyonu gözlemlenmiştir ve bu durumun anodun doğrudan yapısal hasarına yol açabileceği düşünülmüştür. Bununla birlikte, 650°C sıcaklıktaki bozunma davranışının anot tabakası tarafındaki yakıt difüzyonunu ve elektrokimyasal reaksiyonları engelleyen katı karbon birikintilerinden kaynaklandığı görülmüştür [34].

Iwai, Yamamoto, Saito ve Yoshida (2011), ortalama hacim yöntemiyle doğrudan iç reformasyonlu anot destekli düzlemsel KOYP performansı sayısal olarak incelemişlerdir. Çözümlemede ortalama hacim yönteminin kullanılma amacı bilgisayarda çözüm süresini azaltmak olarak açıklanmıştır. Çalışma sonucunda, doğrudan iç reformasyonda meydana gelen reaksiyonun endotermik olmasından dolayı, anot tabakasının giriş kısmında sıcaklık yükselirken yerel sıcaklıklarda düşüş olduğu görülmüştür [35].

Faro, V. Antonucci, P. Antonucci ve Aricò (2012), bu çalışmada, KOYP performansı üzerinde farklı organik yakıtların doğrudan oksidasyon etkilerini geliştirilen yeni nesil bir anot katalizör tabakası kullanılarak araştırmışlardır. Anot katalizör tabakası elektronik-iyonik iletkenliğe sahiptir. Bu çalışma ile KOYP'nde yakıt işleme veya dahili reformasyon yardımı olmadan farklı yakıt kullanımının mümkün olduğu gösterilmiştir. Geliştirilen anotun en önemli avantajı, enerji yoğunluğunu en üst düzeye çıkaran ve önemli miktarda su/ısı yönetimi gerektirmeyerek sistemi basitleştiren yakıtların doğrudan kullanılabilmesi olarak açıklanmıştır. Ayrıca, anot tarafından sergilenen elektrokatalitik aktivitenin çok yakıtlı çalışmaya uygun olduğu görülmüştür [36].

Yu, Wang ve Weng (2012) Ni/YSZ anot tabakasına sahip sentez gazı kullanılan anot destekli düzlemsel bir KOYP'nin performansı ve karbon oluşumu, kimyasal/elektrokimyasal tepkimeler, ısı/kütle transferi ve kayıplar ile yakıt bileşenlerinin etkisi göz önüne alınarak sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, karbon oluşumunun artmasının, karbon oluşumu bölgesini daraltabileceği ancak özellikle yakıt girişinin yakınında karbon oluşumu aktivitesinin artacağı bulunmuştur. Hidrojen molar kesri, akım yoğunluğuna bağlı olarak karbon oluşumunu azaltabildiği görülmüştür. Karbon oluşumuna yakıt içerisindeki CO₂ etkisinin net olmadığı ve yakıt girişi yakınlarında karbon oluşumuna sebep olması mümkün

görülmemiştir. Yakıt içerisinde su buharı eklenmesinin ise karbon oluşumunu engellediği görülmüştür [37].

Lorente, Millan ve Brandon (2012), Ni/YSZ ve NiO/CGO anot malzemeleri kullanılarak üretilmiş KOYP’nde yakıt gazlaştırması sonucu meydana gelen katranın performansa etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Bu anot malzemelerinin gerçek katranlara maruz bırakılmasının etkisi, karbon birikimi miktarı açısından deneysel olarak değerlendirilmiş ve model katran olarak toluenin kullanımı ile karşılaştırılmıştır. Model katran olarak toluenin kullanımı ile karşılaştırıldığında, gerçek gazlaştırılmış katrana sahip nemlendirilmiş hidrojen içeren yakıt ile çalıştırıldığında karbon oluşumu açısından anot katalizörlerinin daha az etkilendiği görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, gazdaki buhar içeriğinin artmasıyla katalizör üzerinde biriken karbon miktarının azaldığı görülmüştür [38].

O’Brien ve Giorgi (2012), biyometalik anot malzemesi kullanılarak üretilen KOYP performansına yakıt olarak sentez gazı kullanılmasının etkisini incelemişlerdir. Ni-YSZ anot tabakası, CO’nun doğrudan oksidasyonunda etkili olmadığından ve koklaştırma bu yakıtle düşük performansa yol açtığından, bu çalışmada, $\text{Ni}_{0,7}\text{Co}_{0,3}$ -YSZ sermet anot üretmek için Ni katalizörüne Co’nun eklenmesi araştırılmıştır. Çalışma sonunda $\text{Ni}_{0,7}\text{Co}_{0,3}$ -YSZ anot tabakası kullanıldığında, %20/%80 ve %30/%70 CO/H₂ yakıt oranlarında, saf H₂ kullanımı ile karşılaştırıldığında daha yüksek değişken akım yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. %60/%40 ve %80/%20 CO/H₂ oranlarında saf H₂ yakıtı ile karşılaştırıldığında daha düşük performans gözlenmiştir. Son olarak, %25/%75 CO/H₂ yakıt oranına sahip bir hücre saf H₂ ile 7 gün boyunca sürekli çalıştırıldığında, başlangıç akım değerinin 1.-4. günlerde önemli ölçüde arttığı, ancak sonraki günlerde bu değerin düştüğü görülmüştür [39].

Ni (2013) yaptığı çalışmada metan yakıtlı anot destekli düzlemsel bir KOYP’nin farklı elektrolit türlerindeki performansını geliştirilen 2 boyutlu modelde sayısal olarak araştırmıştır. Sayısal modelde oksijen iyonu iletken KOYP’nde, CO’in elektrokimyasal reaksiyonu göz önüne alınmıştır. Oksijen iyonu iletken KOYP’ndeki CO’in elektrokimyasal oksidasyonu ile güç üretimine katkıda bulunduğundan, proton iletken KOYP’nin performansı, 0,6 V ve 973 K’de oksijen iyonu iletken KOYP’nin performansından daha düşüktür. Ek olarak, elektrolitin daha yüksek iyonik iletkenliği nedeniyle proton iletken KOYP’nin bir ara sıcaklıkta (873 K) oksijen iyonu iletken KOYP’nden daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur [40].

Shiratori ve diğeri (2013), katalizör desteği görevi gören YSZ elyafı içeren inorganik elyaf ağını oluşturarak metanın kuru reformasyonu için iyi bir katalitik aktiviteye sahip yeni Ni yüklü kağıt yapıları katalizörler (PSC'ler) tasarlamış ve geliştirmişlerdir. PSC'ler, katalizör ağırlığının onda birinden daha az olan geleneksel toz halindeki katalizörlere kıyasla yüksek yakıt dönüşümü sergilemiştir. PSC dizisi KOYP anoduna bağlanarak biyogazla beslenen doğrudan iç reformasyonlu KOYP test edilmiş ve %1,7/1000 saat bozulma oranı ile 200 mA/cm² akım yoğunluğu altında kararlı bir elektrokimyasal performans elde edilmiştir [41].

Razbani, Wærnhus ve Assadi (2013), çapraz akışlı ve 6 hücreden oluşan bir KOYP stağında yakıt olarak CO₂/H₂ yakıt karışımı kullanıldığında oluşan sıcaklık dağılımı incelemiştir. Çalışma sonucunda akım yoğunluğu arttıkça sıcaklık farklarının arttığı görülmüştür. Ayrıca test fırın sıcaklığının yükselmesi ile KOYP'nde sıcaklık daha uniform olmuştur [42].

Lanzini ve diğeri (2013), Ni tabanlı anot destekli KOYP'nin doğrudan iç reformasyona sahip CH₄-CO₂ yakıt karışımı kullanılmasının performans ve bozunum üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Ni-YSZ anot tabakası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve aynı anot tabakasından oluşan tam hücrelerin elektrokimyasal karakterizasyonu, CO₂ ilavesinin potansiyel olarak karbon birikimini azalttığını göstermiştir. Bu nedenle, metan beslemesi içinde uygun miktarda bir oksijen taşıyıcısının (bu çalışmada CO₂) bulunmasının sağlanması, doğrudan reform işlemi sırasında karbon oluşumunu önlemek için çok önemlidir [43].

Wang, Yu ve Cao (2014), anot destekli düzlemsel bir KOYP'nde farklı yakıt akış hızlarının sıcaklık farkı, çıkış voltajı, çıkış gücü, yakıt kullanım oranı üzerindeki etkisi incelemiştir. Çalışma sonucunda akım yoğunluğu, elektrolit boyunca sabit olduğunda, reaksiyonlardan açığa çıkan ısı da sabit olduğu görülmüştür. Anotta yakıt tarafından açığa çıkartılan ısı, yakıt akış hızı arttıkça artmıştır, böylece KOYP sıcaklığı azalmıştır. Anot tabakasındaki CO mol dağılımı, yakıt akış hızı arttıkça artmış ancak bu artış zamanla daha yavaş hale gelmiştir. Ayrıca yakıt akış hızı arttıkça çıkış gücü artmış, yakıt kullanım oranı düşmüştür [44].

Ni, Shao ve Chan (2014), proton iletken anot destekli düzlemsel bir KOYP'nde yakıt olarak sentez gazının kullanımını 2 boyutlu bir model üzerinde sayısal olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, sentez gazı içerisindeki CO, H₂ konsantrasyonunu böldüğü için KOYP performansını azaltmıştır. KOYP'nin elektrik çıkış gücünün, sıcaklık arttıkça Nerst

potansiyeli azalmasına rağmen arttığı görülmüştür. Ayrıca, sentez gazı içerisine H_2O eklenmesi H_2 üretimini sağlamasına rağmen KOYP'nin performansını azaltmıştır [45].

Fardadi, McLarty, Brouwer ve Jabbari (2014) zıt akışlı KOYP üzerinde nominal çalışma koşullarını termal değişimleri en az seviyede tutarak bulmak üzere sayısal bir model üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonucunda yakıtın bir kısmının doğrudan metan olarak anoda enjekte edildiği kısmi iç reformasyonun kullanılabileceği gösterilmiştir. Farklı yapılarda, sıcaklık dağılımını koruyabilmek için farklı kontrolör ve yakıt akışı sürdürmek gerektiği görülmüştür [46].

Baldinelli, Barelli ve Bidini (2015), bu çalışmada değişken yakıt bileşenleri için KOYP'nin performans tahmin haritasını çıkartarak farklı herhangi bir uygulamada bu tahminden faydalanmayı amaçlamışlardır. Öncelikle, farklı yakıt bileşenlerinde (H_2 , CO, CH_4 oranları sırasıyla %8-50, %0-42, %1-8) KOYP performansı test edilmiştir. İkinci olarak, yakıt bileşenlerinden KOYP karakteristik eğrisini elde etmek için deneysel veriler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, geliştirilen model basitliği sayesinde birçok hesaplama kodunda uygulamaya izin vermiş ve uygulanabilirlik aralığı, regresyon katsayılarını alırken yeni deneysel veri setleri ekleyerek kolayca genişletilebilir olarak ayarlanmıştır [47].

Bao, Jiang ve Zhang (2015), bu çalışmada sentez gazı yakıtlı KOYP'nde elektrokimya ve anot taşınımı için iki farklı yenilik, H_2/CO elektrokimyasal birlikte oksidasyonu ve yüzey difüzyonu, dikkate alınarak üçlü faz sınırında gaz türü konsantrasyonunun düzeltilmesi ile kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, hidrojen akım dağılımı ve geliştirme faktörü göz önüne alınarak sayısal analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda çıkış akımının yüzde kaçının H_2 ya da CO tarafından etkilendiği açıklanmıştır. Ayrıca, H_2 ve CO yakıt kinetiği arasında ilk kez lineer olmayan süperpozisyon yapılmıştır [48].

Drewery, Kennedy, Alenazey, Dlugogorski ve Stockenhuber (2015), yakıt içerisindeki H_2/CO oranını, yüksek oranda karbon monoksit içeren bir karışıma göre değiştirmenin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada ayrıca yakıt akış hızının etkileri de incelenmiştir. Çalışma sonucunda esas olarak hidrojen ve karbon monoksitten oluşan bir yakıtın akım üretmek için tam reaksiyonun sağlanmasının daha büyük önem taşıdığı gösterilmiştir. Düşük akış hızları incelendiğinde, düşük H_2/CO oranlarının (1'den az) anot deaktivasyonu nedeniyle daha düşük hücre gücü ürettiği bulunmuştur, bu durumun yüksek

oranda karbon monoksit içeren yakıtlar kullanıldığında karbon birikiminin önlenmesi anlamına geldiği açıklanmıştır [49].

Lorenzo ve Fragiaco (2015) yaptıkları çalışmada elektrolit destekli düzlemsel bir KOYP'nin sentez gazı ile kullanımının performansa etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Ayrıca anot tabakasında meydana gelen karbon oluşumu da göz önüne alınmıştır. Resirkülasyon oranının artması ile yakıt pili voltajının düşerek elektrik gücünde de bir miktar azalma meydana geldiği görülmüştür. Yakıt hücresi akım yoğunluğu arttığından sistemin elektrik gücü ve verimliliği artmıştır. Ayrıca, ısı eşanjörü egzoz gazı sıcaklığı düştüğü için sistemin ısı gücü, ısı ve birinci yasa verimleri azalmıştır [50].

Lebreton ve diğerleri (2015), biyokütle gazlaştırması sonrası elde edilen CO-CO₂ karışımı sentez gazı yakıtının Ni-YSZ tabanlı anot destekli düğme model bir KOYP'nde kullanımının performansa etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, yakıt içerisinde CH₄ olmasının etkisi araştırılmıştır. H₂-CO-CO₂-N₂ karışımlı yakıtta, CO ve CO₂'nin olması hücreye zarar vermemiştir. Gazlaştırıcı içerisindeki odun miktarına bağlı olarak CO gazının aslında H₂ gazı kadar iyi bir elektrokimyasal reaktant olduğu görülmüştür. Yakıt içerisinde CH₄ varlığında ise reformasyon gerçekleştiği için KOYP performansı üzerinde olumsuz bir etkisinin olduğu görülmemiştir [51].

Spallina, Mastropasqua, Iora, Romano ve Campanari (2015), sayısal analiz gerçekleştirdikleri bu çalışmada, yakıt içerisindeki CO ve H₂'nin elektrokimyasal oksidasyonunun etkisinin KOYP'nin performansı üzerindeki etkisini değerlendirmiş ve karbon birikimini araştırmışlardır. Yalnızca H₂ oksidasyonunu ve hem H₂ hem de CO oksidasyonunu dikkate alan modellerde, hem yalnızca H₂ beslemesi hem de H₂/CO karışım beslemesi göz önüne alındığında voltaj farkı yaklaşık %30 olarak bulunmuştur. Modelde yalnızca CO'nin elektrokimyasal oksidasyon etkisi göz önüne alındığında ise voltajın %3-7 oranında düştüğü görülmüştür [52].

Chen ve diğerleri (2016), bu çalışmada, metan yakıtlı atık gaz reformasyonunun performans üzerindeki etkisini, atık gaz içerisindeki iki ana bileşeni (hidrojen ve karbondioksit) göz önüne alarak incelemişlerdir. Ni/YSZ anot tabakasına H₂-CO-CH₄ yakıtları 800°C'de gönderilmiştir. Akım yoğunluğu ile güç yoğunluğu/voltaj ilişkisini araştırmak için yapılan deneylerde, iki farklı hücre çeşidi ile farklı yakıt kullanım oranları kullanılmıştır. Çalışma

sonucunda düşük yakıt kullanım oranına sahip kuru reformasyonlu KOYP'nin güç yoğunluğu ve açık devre voltajı değeri yakıt olarak H_2 kullanıldığında daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak yakıt olarak H_2 kullanıldığında, yüksek yakıt kullanım oranlarında güç yoğunluğunda sınırlı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kütle transferi, yük transferi, ve değişken akım yoğunluğu CO_2 metan reformasyonunda hidrojen konsantrasyonu ve yakıt kullanım oranı arttıkça artmıştır. H_2 - CO_2 yakıtında CO_2 miktarı arttıkça hücre performansı azalmıştır. Yakıt olarak saf H_2 kullanıldığında 120 mW/cm^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir [53].

Kim ve diğerleri (2016), karbon yakıtlı KOYP'nde (SO-CFC) kuru gazlaştırıcı entegrasyonu ile çalışmış ve SO-CFC performansı üzerinde ters Bouduard gazlaştırıcı katalizörün etkisi incelenerek uzun süreli çalıştırma karakteristiği incelemişlerdir. Bouduard gazlaştırma reaksiyonu için karbon yakıtların reaktivitesi farklı işletme koşullarında incelenmiştir. Bu çalışmada karbon yakıtına potasyum karbonat ilavesinin karbon gazlaştırma oranını arttırdığı ve performansı yükselttiği görülmüştür. 850°C 'de karbon yakıtlı KOYP'nden 271 mW/cm^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir [54].

Ong, Lee, Hanna ve Ghoniem (2016), geliştirdikleri tek boyutlu bir KOYP modelinde, sentez gazı karışımlarının, özellikle yüksek CO içerikli sentez gazı için yüksek akım yoğunluklarında CO elektro-oksidasyonunu da göz önüne alarak performans analizleri yapmışlardır. Anot gazındaki tür profilleri incelendiğinde, 800°C 'de su gazı değişim reaksiyonunun kimyasal denge sınırının bir sonucu olarak, yakıt olarak kullanılan CO'nin yalnızca bir kısmının üçlü faz sınırına ulaşmadan önce H_2 'i oluşturduğu görülmüştür. Bu sonuç, sentez gazı KOYP'ne gönderildiğinde CO_2 'nin hücre akımına katkıda bulunmasının baskın yolunun su gazı değişim reaksiyonu olduğu şeklindeki geleneksel varsayıma ters düşmüştür [55].

Donazzi ve diğerleri (2016), orta sıcaklık KOYP'nde $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{1.9}$ SDC elektrolit yapısı kullanıldığında sentez gazı ile kullanımının performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sentez gazı kullanıldığında, H_2 ve CO'nin elektrokimyasal oksidasyonunun eş zamanlı olarak meydana geldiği görülmüştür [56].

Miyake, Matsumoto, Iwami, Nishimoto ve Kameshima (2016), orta sıcaklık KOYP'nde $Ni_{1-x}Cu_x$ /SDC anot yapısının sentez gazı (%3 H_2O - $H_2/CO:3/2$) ile kullanımının performans

üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda Cu oranı arttıkça biriken karbon oranının azaldığı görülmüştür, fakat sinterlenebilirlik arttığı için KOYP'nin performansının azaldığı görülmüştür. Yapılan uzun süreli çalıştırma şartlarında, $\text{Ni}_{0.8}\text{Cu}_{0.2}/\text{SDC}$ yapısının KOYP'nde uygun bir yapı olduğu görülmüştür [57].

Aslannejad, Barelli, Babaie ve Bozorgmehri (2016), NiO-YSZ anot tabakasına sahip KOYP'nde yakıt olarak metan kullanımı, kısa süreli çalışmalarda bile (24 saat) karbon birikimine neden olduğundan metan içerisine hava eklenmesi ile bu sorunun önlenilebileceği öngörülmüş ve bu konuda deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda Gibbs diyagramına göre, 500 sccm metan içerisine 350 sccm hava ilavesinin KOYP'nin karbon bozunumundan koruduğu görülmüştür. 100 saat çalışma sonucunda ise, optimal hava yakıt oranının 1:5 (100 sccm hava, 500 sccm metan) olduğu görülmüştür [58].

Choudhary ve Sanjay (2016), iç reformasyona sahip anot destekli düzlemsel bir KOYP 'ni üç boyutlu olarak modellemiş ve sentez gazı yakıt olarak kullanılarak, sıcaklık, akım yoğunluğu, yakıt türlerinin konsantrasyonu, elektrokimyasal tepkimeler ve voltaj zıt akış ve paralel akış için ayrı ayrı incelemişlerdir. Her iki akış konfigürasyonu için sıcaklık arttıkça KOYP performansının %12-13 oranında arttığı görülmüştür. Sentez gazı ile yakıtın tamamının dönüştüğü düşünülerek 1073 K'de, maksimum güç yoğunluğu $8609,1 \text{ W/m}^2$, akım yoğunluğu 22 mA/mm^2 , hücre voltajı 0,39 V elde edilmiştir. Ayrıca, 1023 K'de karşı akış konfigürasyonu ve 0,75 yakıt kullanım oranı altında KOYP'nin çalışması için, düzensiz akım yoğunluğu dağılımıyla birlikte ani bir sıcaklık değişiminin gözlemlendiği ve dolayısıyla bu parametrelerden çalışma sırasında kaçınılabileceği de bulunmuştur. Hücre potansiyeli açısından paralel akışın, akım ve güç yoğunluğu açısından zıt akışın en iyi performansı gösterdiği görülmüştür [59].

Lin, Shi ve Cai (2017), bu çalışmada, KOYP stakında, sayısal bir model oluşturmuş ve sentez gazının yakıt olarak kullanılması durumunda performans analizi yapmışlardır. Çalışma sonucunda kütle akış hızı dağılımının, genel hücre voltaj dağılımını kontrol ettiği, termal etkinin stak yapısında üst ve alt kısmına yakın hücrenin hücre voltaj dağılımını kontrol ettiği görülmüştür. Ayrıca, daha fazla hücreye sahip düzlemsel KOYP stak yapısında yakıt olarak hidrojen yerine sentez gazı kullanılmasının daha düzgün hücre voltaj dağılımı sağladığı açıklanmıştır [60].

Reeping, Bohn ve Walker (2017), Ni temelli anot yapısına sahip KOYP'nde klor karbon bozunumunu engelleyebildiği, bununla birlikte, yakıta küçük bir yüzdede fazla hidrojen eklenmesinin, Ni ve karbon yakıtı parçalama reaksiyon reaksiyonlarının katalitik aktivitesindeki bozulmayı arttırdığı bilindiğinden bu çalışmada, hidrojene klor eklenmiş, karbon içeren yakıtlarla çalışan KOYP performansı üzerindeki hafifletici etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda CH_4 ve biyogaz gibi karbon içeren yakıtlar kullanıldığında, klorun CH bağ aktivasyon mekanizmasını daha fazla etkilemesinin performans kaybına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca H_2 'nin yokluğunda, klorun, büyük karbon içeren yakıtların adsorplanmasını engelleyecek kadar çalıştığı, ancak H_2 'nin adsorbe edilmesini ve yüzeyde serbestçe hareket etmesini engellemediği açıklanmıştır [61].

Ideris, Croiset ve Pritzker (2017), CO-CO₂ yakıtlı Ni-SDC anot destekli tabakalı silindirik bir KOYP performans analizini deneysel olarak yapmışlardır. Çalışmada, CO yakıtı kullanıldığında 700°C altındaki sıcaklıklarda karbon oluşumunu termodinamik açıdan incelemek amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda elektrolit-anot ara yüzeyinde ve anot ortasında karbon oluşmadığı, sadece anotta yakıt giriş kısmının yanında oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, SDC varlığının karbonun Ni-SDC anot tabakasından karbonun uzaklaşmasına yardımcı olduğu açıklanmıştır. 700°C sıcaklıkla %40 CO- %60 H_2 içeren yakıt kullanıldığında KOYP'nin maksimum güç yoğunluğu 270 mW/cm² olarak ölçülmüştür [62].

Jin ve diğerleri (2018), bu çalışmada, anot destekli KOYP stağının elektrokimyasal performansı üzerinde akış ve basınç değişkenlerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, akış modellerinin ve çalışma basıncının sıcaklık alanıyla olan ilişkisinin sentez gazı yakıtlı KOYP'nde elektrokimyasal performansı ve kimyasal reaksiyonları nasıl etkilediğini göstermek amaçlanmıştır. Ayrıca CO:H₂ oranı 1:1 olarak kullanılmıştır ve giriş sıcaklığı 750°C'dir. Çalışmada tek stak üzerinde zıt ve paralel akış etkileri de incelenmiştir. Model simülasyonları, basınçlandırmanın faydalı etkisinin doğrusal olarak artmadığını ortaya koymuştur. Orta basınçlandırma durumlarında performans ve maliyetin uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca basınçlandırmanın CO'in doğrudan elektro-oksidasyon kinetiğini arttırdığı görülmüştür. Zıt akışın paralel akışa göre yüksek toplam akım yoğunluğu ve daha az sıcaklık değişimi olduğundan oldukça avantajlı olduğu ortaya koyulmuştur [63].

Stoeckl, Subotić, Preininger, Schroettner ve Hochenauer (2018), bu çalışmada, düzlemsel bir anot destekli KOYP'nde CO, CO₂, H_2 , H_2O ve N_2 karışımlarından oluşan sentez bir

yakıtın performans üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle CO/CO₂/N₂ içeren gaz karışımları ile performans değerlendirilmiş, bu sırada hücrenin performansını karşılaştırmak için ayrıca H₂/H₂O/N₂ karışımlarının performans ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca CO yakıtının bozunuma etkisi incelenmiş, karbon oluşumunu incelemek için 800°C'de CO/H₂/CO₂/N₂ gaz karışımı kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda, CO ile H₂ kadar yüksek performans elde edilmemiş olsa da, CO'nin KOYP için uygun bir yakıt olduğu görülmüştür. 800°C ve 750°C'deki testler, hücre performansın da herhangi bir bozulma tespit edilmediğinden kararlı davranış göstermiştir. KOYP 700°C'de CO/CO₂/N₂=%20/10/70 yakıt karışımı kullanılarak 100 saat çalıştırıldığında 50 mA/cm² akım yoğunluğunda %17.2 voltaj düşüşü, %27 performans düşüşü olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda karbon oluşumunun negatif etkisi olsa da yakıt pilinde CO'nin yakıt olarak kullanımının uygun olduğu görülmüştür [64].

Miyake, Iwami, Takeuchi, Nishimoto ve Kameshima (2018), Ni_{0.8}Cu_{0.2}/Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9} (GDC) anot yapısına sahip orta sıcaklıkta çalışan bir KOYP'nde yakıt olarak sentez gazı (%3 H₂O- H₂/CO:3/2) kullanarak performans analizi yapmışlardır. Tek katmanlı anotlu test hücreleri için, 7M/3E anotlu test hücresi, incelenen anotlu test hücrelerinin en yüksek güç yoğunluğunu göstermiştir. Her iki anotta da tane büyümesi ve karbon birikimi pek gözlenmemiştir. Çalışma sonucunda çok katmanlı anot tabakalarının tek katmanlılardan çok daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [65].

Tikiz, Taymaz ve Pehlivan (2019), bu çalışmada, üç boyutlu model ve deneysel olarak KOYP performansını incelemişlerdir. Çapraz akışlı düzlemsel KOYP'nde, reaktant akış hızı, hücre sıcaklığı ve basınca bağlı performans analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda KOYP performansının, işletme basıncının artması ile kütle taşıma direncinin azalmasına neden olan reaktif gazların kısmi basıncı ve difüzyonundan dolayı arttığı görülmüştür. İşletme sıcaklığının artırılması hücre performansını arttırmıştır. Oksijen ve azot akış hızının değişiminin hücre performansı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür [66].

Rakesh ve Dasappa (2019), bu çalışmada, sentez gazı kullanılan KOYP'nin anot tabakasında meydana gelen karbon birikimini termodinamik hesaplamalarla ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, buhar/karbon reaksiyonlarının oluşumunda işletme sıcaklığının önemli olduğu, bu reaksiyonların ise karbon oluşumu üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür [67].

Su, Zhang, Yin, Tu ve Cheng (2020), propanın farklı ön ısıtma teknikleri için farklı yakıt bileşenleri ve hücre verimliliği incelemişlerdir. Buhar reformasyonu, CO₂ reformasyonu ve anot off-gaz reformasyonunda gerçek yakıt kullanımı ve hücre verimliliğinin azalan hızı eşdeğer yakıt kullanım oranından farklı olduğu görülmüştür. Yüksek eşdeğer yakıt kullanımında, gerçek yakıt kullanımı ve hücre verimliliği O/C oranının artması ile yavaş bir şekilde azaldığı, ancak düşük eşdeğer yakıt kullanımında, gerçek yakıt kullanımı ve hücre verimliliğinin O/C oranının artması ile hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür [68].

Lin ve Wei (2020), Ni/YSZ anot tabakasına sahip KOYP'nin hidrokarbon yakıtlarla çalıştırıldığında çok ciddi karbon bozunumu ile karşı karşıya kaldığı bilindiğinden bu çalışmada metan yakıtlı bir KOYP'nin anot malzemesi üzerinde karbon oluşumunun etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda %20 CH₄-N₂ yakıtı kullanım durumunda karbon oluşumunun 530°C üzerinde gerçekleştiği görülmüştür. Çalışılan üç farklı Cu-Ni-8YSZ yapısının analiz sonuçlarına dayanarak, metan bozunumundan H₂ üretimi sırasında geçirgenlik uygun olduğu için hidrokarbon yakıtları kullanan KOYP'nin anot malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu görülmüştür [69].

Yu ve diğerleri (2020), bu çalışmada doğrudan karbon KOYP performansını Sr tabanlı katalizör kullanılarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda %5 Sr katkısı ile en yüksek performansın 850°C'de 316 mW/cm² olduğu görülmüştür. Bu çıkış gücünün saf ve %5 Fe içeren KOYP performansından daha yüksek olduğu ölçülmüştür. SEM görüntülerine göre Sr tabanlı katalizör kullanımında yakıt pili yüksek sıcaklık çalışma şartlarında iyi bir kararlılık göstermiştir. Böylece bu katalizör yapısının doğrudan karbon KOYP için uygun olduğu görülmüştür [70].

Chaudhary, Mehmood, Saleem, Abbasi ve Chen (2020), bu çalışmada, doğrudan metan-buhar reformasyonuna sahip KOYP'ndeki termal etkileri sayısal olarak incelemişlerdir. Bir takım ısı kaynaklarından meydana gelen termal etkilerin mekanizmasının anlaşılabilmesi ve sıcaklık dağılımının tahmini için modelleme yapmışlardır. Çalışma sonucunda, elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonların sıcaklığa bağlı olduğu görülmüştür. Maksimum termal gerilim anotta üretilirken, elektrolitte de yüksek mekanik özelliklerinden dolayı maksimum termal gerilim gözlemlenmiştir. Doğrudan metan buharı reformasyonlu KOYP'nin, saf hidrojenle beslenen KOYP'nden daha düşük termal etkilere sahip olduğu görülmüştür [71].

Sarruf, Hong, Wilckens ve Miranda (2020), bu çalışmada, nikel içermeyen anot tabakasının ön reformasyon olmaksızın kuru metan yakıtı ile çalıştırılma durumundaki performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda anot/elektrolit tabakasının birbiri ile olan yakınlığı arttırıldıkça, hücrenin güç yoğunluğunun 2-5 kat arası arttığı görülmüştür. Ek olarak, çalıştırılan yakıt hücresi yüzeyi üzerinde karbon kalıntısı yokken, katalizör üzerinde karbon birikiminin daha fazla olduğu görülmektedir. CeO_2 -ScCeSZ ara katmanının eklenmesi ile anot katman partikülleri sabitlenerek elektrolit ile olan yapışkanlığı arttırılmıştır. Ayrıca, ara tabakanın elektrolit/anot arayüzü yakınında oksijen iyonu transferini arttırması da çalışmanın sonuçlarındandır [72].

Corigliano ve Fragiaco (2020), farklı kompozisyonlardan oluşan sentez gazı ile doğrudan beslenen bir KOYP'nin performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Yakıt kompozisyonu, giriş sıcaklığı ve KOYP basıncının etkileri üzerinde çalışılarak, voltaj, güç yoğunluğu, elektrik verimliliği ve akım yoğunluğu incelenmiştir. Çalışma sonucunda sıcaklık artışının reformasyona dayalı hidrojen üretimini arttırdığı görülmüştür. Sıcaklık artışları, CO dönüşüm işlemine tabi tutulan sentez gazlarına kıyasla daha büyük bir hidrojen ürettiği için reformasyona tabi tutulan metan içeren sentez gazlarını daha fazla etkilemiştir. Basıncıdaki artışlar, reaksiyona giren gazların daha yüksek kısmi basınçlarından, çözünürlüğünden ve kütle taşınım hızından dolayı verimde bir artışa neden olmuştur [73].

Sugihara ve Iwai (2020), doğrudan iç reformasyonlu KOYP'nin sıcaklık dağılımını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca gaz akış konfigürasyonu, ekzotermik güç üretim reaksiyonu, endotermik buhar-metan reformasyonu incelenmiştir. Hava ve yakıt akışı zıt ve paralel olarak ayarlanmıştır. Elektrokimyasal reaksiyonla ilişkili ısı üretimi ve çeşitli kayıplar nedeniyle, akım elde edilmeye başlandığında hücre sıcaklığının arttığı görülmüştür. Anot tabakasında meydana gelen endotermik reaksiyonlar sebebiyle yakıt olarak metan kullanıldığında hücre sıcaklığı azalmıştır. Paralel akışta, hücre sıcaklığı en yüksek olarak yakıt ve hava giriş bölgesinde bulunurken, zıt akışta ise yakıt girişinde en yüksek sıcaklık noktası bulunmamıştır. Ayrıca metan reformasyonu arttıkça, güç üretimi azalmıştır [74].

Arifin, Troskialina, Shamsuddin ve Wilckens (2020), bu çalışmada, Sn katkısının kuru biyogaz ile yakıtlanan KOYP'nin üretim, elektrokimyasal performans ve karbon birikimi açısından etkilerini incelemişlerdir. Sn katkısı metan bozunum reaksiyonunun katalitik aktivitesini geliştirdiği için yakıt pilinin performansı da artmıştır. Karbon miktarının yüksek

olması, Sn-Ni/ScSZ üzerindeki metan bozunma reaksiyonuna kıyasla daha yavaş karbon oksidasyonundan kaynaklanmıştır. Metan bozunma reaksiyonundan etkilenen karbon miktarından, karbon oksidasyonunun Ni/ScSZ üzerindeki olumlu etkisine dair kesin bir sonuca ise ulaşılamamıştır [75].

Farnak, Esfahani ve Bozorgmehri (2020), kısmi oksidasyon reformasyona sahip KOYP'nde optimum metan-oksijen oranını bulmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Varyans analizi, hem metan hem de oksijen akış hızlarının, metan miktarını artırarak veya oksijen akış hızlarını azaltarak artan maksimum güç yoğunluğundaki değişiklikler üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Metan akış hızının artmasının oksijen akış hızının artmasından daha etkili olduğu görülmüştür. Uygun metan/oksijen oranı ise yaklaşık 100/20 olarak bulunmuştur [76].

Cao ve diğerleri (2021) iki farklı elektrolit tipi için KOYP performansını ve azot oranının değişiminin elektrik üretimine etkisini incelemişlerdir. Aynı zamanda azot oranı ile akım yoğunluğu ve yakıt kullanım oranının değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada termodinamik, ekonomik ve çevre açısından değerlendirme yapılmıştır. Çalışma sonucunda azot giriş oranı arttıkça, her bir hücrenin çıkış voltajı, enerji ve ekserji verimlilikleri, uygulamaların elektrik üretim oranı ve eksergoekonomik faktörü azalırken elektrik üretim maliyeti ve karbondioksit emisyonu arttığı bulunmuştur [77].

Kong, Han, Lu ve Ni (2021), bu çalışmada anot tabakasında karbon oluşan kısma ısı bar olarak adlandırılan bir katman ile doğrudan karbon yakıtlı katı oksit yakıt pilinin performansının iyileştirilmesi amaçlamışlardır. Bu çalışma iki boyutlu sayısal model olarak gerçekleştirilmiştir. Validasyon yapıldıktan sonra KOYP performansı ısı barı olan ve olmayan koşullarda incelenerek karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda ısı bar eklenmesi durumunda minimum sıcaklık ve CO kütle dağılımı artmıştır çünkü ısı bar boyunca hücrenin tabanından tavanına ısı kolayca iletilmiştir. Isı bar kullanımı ile daha uniform bir sıcaklık ve CO dağılımı gözlenmiştir, bu durum doğrudan karbon yakıtlı KOYP'nin kararlılığı için önemlidir. 0,6 V'da ısı bar sayesinde Boudard reaksiyon oranı %14 arttırılmış ve hücre performansı da %4,1 artmıştır. Isı bar doğrudan karbon KOYP'nde özellikle yüksek ısı iletkenliğe sahip ısı bar kullanımında ve düşük işletme voltajlarında önemli avantajlar sağladığı görülmüştür [78].

Yao, Asghar, Zhao, Li ve Lund (2021), bu çalışmada, yakıt olarak sentez gazı kullanımının geliştirilen bir anot tabakasında karbon oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Mevcut çalışmada, düşük oranda Ni içeren $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{FeO}_3$ (LSF) kompoziti, Ni agregasyonunu hafifletmek, anot koklaşma direncini ve yakıtın genel stabilitesini geliştirmek için sentez gazı yakıtlı KOYP anot tabakası olarak kullanılmıştır. Ni bazlı perovskit kompozitlerin yapısal değişiklikleri ve metal ile perovskitler arasındaki etkileşim incelenmiştir. Ni içeriği arttıkça, anot tabakasının elektriksel iletkenlik ve katalitik aktivitesi arttığı, böylece hücre performansının da arttığı görülmüştür. Ni-Fe alaşımının nano boyutu ve Ni-Fe alaşımının perovskit yapısı ile etkileşimi, yüksek grafitleşme derecesine sahip karbon oluşumunu engellemiştir. Ayrıca, oksijeni barındırabilme özelliğine sahip SrLaFeO_4 fazı, biriken karbonun uzaklaştırılmasını kolaylaştırmıştır [79].

Guo, Xiao, Wang ve Lin (2021), bu çalışmada, H_2 ve CH_4 'ü yakıt olarak kullanan KOYP stakının performans analizini sayısal olarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda CH_4 yakıtı kullanımının, düşük maksimum sıcaklık ve sıcaklık dağılımı açısından avantajlı olduğu görülmüştür. Hidrojen yakıtının, daha fazla elektrik üretmesi ve yetersiz yakıt beslemesi açısından avantajlı olduğu görülmüştür. Yetersiz hava beslenmesi yüksek sıcaklık gradyanına sebep olmuştur [80].

Panagi, Laycock, Reed ve Guwy (2021), bu çalışmada, anot destekli bir KOYP'nin performansı üzerinde yakıt üretim sürecinin ve çeşitliliğinin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yakıt olarak biyohitan karışımları üzerinde çalışırken yakıt değişkenliğinin KOYP performansı üzerindeki etkilerine ilişkin daha önce herhangi bir çalışma yapılmadığından bu çalışmanın özgün yanı ortaya çıkmaktadır. Çalışma sonucunda saf CH_4 'e hacimce %25/75 H_2/CO_2 eklenmesi, ilave H_2 ve CO_2 reformunun teşvik edilmesi, her biri karbon birikimini hafifleten ve birincil olarak elektrokimyasal H_2 oksidasyonunu destekleyen ters Boudouard reaksiyonları nedeniyle KOYP'nin elektriksel performansını arttırdığı görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca CH_4 'e H_2/CO_2 karışımlarının eklenmesi ve ardından KOYP'nde yakıt olarak kullanılmasının gaz şebekelerini karbondan arındırmanın etkili bir yolu olduğu görülmüştür. Özellikle, hacimce %50 CH_4 'e H_2/CO_2 eklenmesi, toplam enerji dönüşüm verimliliğini artırarak CH_4 tüketimini %76 azaltmıştır. Bununla birlikte, CH_4 'e herhangi bir miktarda H_2/CO_2 eklenmesiyle genel verimin arttığı ve CH_4 tüketiminin azaldığı görülmüştür [81].

Lin ve diğerkleri (2021), metan yakıtlı katalizör destekli silindirik bir KOYP performansını incelemişlerdir. Ayrıca NiMo parçacıklarının YSZ tabakasına ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, öncelikle yakıt pili üretilmiş ve daha sonra CH₄/Hava yakıt karışımı içerisine çeşitli oranlarda O₂/C eklenmesinin etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda NiMo içeriğinin %2'den %8'e arttırılması ile CH₄/Hava oranının katalitik kısmı oksidasyonunun arttığı görülmüştür. Ancak oranın %10'u geçmesi metan reformasyonuna bir katkı sağlamamıştır. Optimum NiMo oranının %6-8 arasında olduğu görülmüştür. O₂/hava oranı azaldıkça yakıt pilinin maksimum güç yoğunluğu artmıştır. Çalışma sonucunda katalizör destekli KOYP'nde doğrudan CH₄/Hava karışımının yakıt olarak kullanılabildiği görülmüştür [82].

Fan, Mokhov, Saadabadi, Brandon ve Aravind (2021), işletme sıcaklığı, giriş gazı kompozisyonu, akım yoğunluğu ve anot kalınlığının metan buhar reformasyonu gerçekleştiren bir anot tabakası ile KOYP üzerindeki performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar incelenirken Power-Law ve Langmuir-Hinshelwood kinetik modelleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda buhar/karbon oranı ve hidrojen/karbon oranının her ikisi de, esas olarak metan kısmi basıncına seyreltme etkisinin ve katalitik bölgelerde buhar/hidrojen ve metan molekülleri arasındaki adsorpsiyon rekabetinin kombinasyonundan kaynaklanan, reform reaksiyon hızı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Metan ve buhar molekülleri arasındaki adsorpsiyon rekabeti, metan dönüşüm reaksiyonunu engellemiştir, bu durum reaksiyon hızının neden daha yüksek bir akım yoğunluğu ile daha fazla artmadığını açıklamaktadır. Üçlü faz sınırında biriken yüksek konsantrasyonlarda buhar molekülleri ve O²⁻ iyonları, daha yüksek bir aktivasyon enerjisi değeri olarak yansıtılabilen Ni oksidasyonuna neden olmuştur. Ayrıca, akım yoğunluğunun metan ve buharın reaksiyon sıraları üzerindeki etkisinin her iki modelde benzer olduğu ve yüksek bir akım çekildiğinde her iki anotta da metan reaksiyon sırasının sabit bir değerde kaldığı görülmüştür [83].

Xu, Xia, He, Guo ve Ni (2021), sayısal olarak geliştirdikleri 2 boyutlu bir model üzerinde metanol yakıtlı KOYP'nin performansını ve ısı davranışlarını karbon oluşumunu dikkate almaksızın incelemişlerdir. Ayrıca, işletme voltajı, karbon-buhar oranı, hava akış hızı, giriş sıcaklığı parametrelerinin etkisi de incelenmiştir. Çalışma sonucunda yüksek buhar/karbon oranında metanol yakıtının seyrelerek sentez gazı üretme davranışına girdiği görülmüştür. Bu durum toplam ısı üretimini ve elektrik gücünü azaltmıştır. Yakıt ya da hava akış hızının

artmasının KOYP performansını arttırdığı görülmüştür, ayrıca bu durum hücrenin sıcaklığını azaltmak için kullanılabilir. Bununla birlikte, daha yüksek yakıt ve hava akış hızlarının yan etkileri, yakıt dönüşümü ve tüm sistemin verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Giriş sıcaklığının 898 K'den 1173 K'e artırılması ile elektrokimyasal reaksiyon kinetiği, elektrolit boyunca iyon hareketi, ve sentez gazı üretim hızı arttığı için KOYP performansı artmıştır. Ayrıca, iyon iletimi ve elektrokimyasal reaksiyon kinetiğinin artması ısı üretiminin azalmasına sebep olarak daha uniform bir ısı dağılımına neden olur [84].

Maza, Steinhurst, McIntyre, Walker ve Owrutsky (2021) yakıt olarak sentez gazı kullanılan ve 800°C'de çalışan bir KOYP performansını kızılötesi emisyon spektroskopisi, yakın kızılötesi termal görüntüleme ve titreşimsel Raman saçılması dahil olmak üzere operando spektroeletrokimyasal ölçümler ile birlikte deneysel olarak ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda CO'ı yakıt olarak kullanırken (H_2 'nin yokluğunda) elde edilen sonuçlar, CO'in mevcut CO miktarından bağımsız olan doğrudan bir oksidasyon yolu ile kullanıldığını göstermektedir. Anot yüzey sıcaklığının artışı yakıt olarak sadece H_2 gazı kullanıldığında CO ya da CO ve H_2 gazı karışımında olduğu kadar olmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebinin reaksiyonlar sırasında su oluşması olduğu gözlenmektedir [85].

Aburto ve diğerleri (2021), $CMCuO$ parçacıkları kullanılarak üretilen anot tabakasına sahip bir KOYP'nin performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, Mo,Cu katkılı CeO_2 bazlı anot tabakasının, hidrojenin oksidasyonu için daha elektroaktif bir faz (nikel gibi) ile karıştırılarak modifikasyonu önerilmiştir, böylece Cu_2O ikincil fazının indirgenmesi sağlanarak malzemenin toplam elektriksel iletkenliği ve yük transfer aktivitelerinin olumsuz etkilenmesinin önüne geçilmiş olur [86].

Xu ve diğerleri (2021), $LaSr(Fe,Mo)O_4$ anot tabakası ile üretilmiş olan elektrolit destekli KOYP'nin sentez gazı kullanımı ile performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, saf H_2 ve sentez gazı kullanımında bu anot malzemesinin uygun olduğu görülmüştür. Uzun vadeli çalışma sonuçlarında da çeşitli sentez gazları ile uyumlu çalışabilmiştir [87].

Qiu ve diğerleri (2021), Ni-GDC malzemesine sahip anot tabakası destekli KOYP, $Sr_2Co_{0.4}Fe_{1.2}Mo_{0.4}O_{6-\delta}$ (SCFM) tabakası varken ve yokken ayrı ayrı üretmiş ve yakıt olarak

H₂ ya da CH₄-CO₂ kullanımının performansa etkisi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda SCFM'in Ni-GDC anot destekli KOYP'nde katalizör olarak kullanımının uygun olduğu görülmüştür. H₂ yakıt olarak kullanıldığında, SCFM tabakası, sahip olduğu yüksek iletkenlik değeri nedeniyle elektrokimyasal performans üzerinde ihmal edilebilir bir etki göstermiştir. Yakıt olarak CH₄-CO₂ karışımı kullanıldığında ise elektrokimyasal performansın ve kararlılığın arttığı görülmüştür [88].

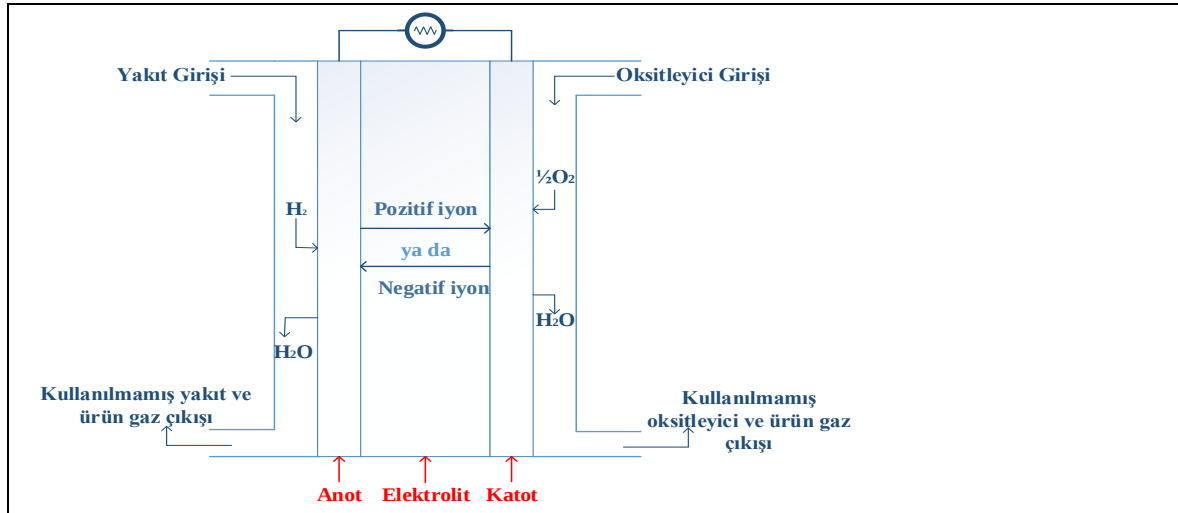
2. YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri, yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisi ve ısıya dönüştüren elektromekanik dönüşüm cihazlarıdır. Geleneksel güç üretim yöntemlerinin aksine elektrik enerjisi üretimi için ara adımlara ihtiyacı yoktur. Yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece, yakıt pilleri kesintisiz olarak güç üretimi yapabilmektedirler. Bir yakıt pili ile bataryayı birbirinden ayıran en önemli özellik yakıt pillerinin sahip olduğu sürekli güç üretim mekanizmasıdır. Şekil 2.1’de yakıt pilinin temel çalışma şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Yakıt pilinin çalışma şeması

Basit bir yakıt pili, elektrolit tabakasının her iki tarafında bulunan anot ve katot tabakalarından oluşur. Şekil 2.2.’de basit bir yakıt pilini oluşturan tabakalar ve yakıt pilinin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.2. Yakıt pilini oluşturan tabakalar ve yakıt pilinin çalışma prensibi [89]

Yakıt pilinde, yakıtın beslendiği kısım anot tabakası (negatif elektrot), oksitleyicinin beslendiği kısım ise katot tabakası (pozitif elektrot) olarak adlandırılır. Elektrolit üzerinden bir elektrik akımı üretmek için elektrot tabakalarında üçlü faz bölgeleri olarak adlandırılan alanlarda elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bu yüzden yakıt pillerinin performansı için üçlü faz bölgelerinin sayısı önemli bir sınırlayıcıdır.

2.1. Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt pillerinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek verimlilik (özellikle kojenerasyon sistemleri ile birlikte kullanıldığında yakıt pili verimi %80'in üzerine çıkabilmektedir.)
- İstikrarlı çalışma (Üretilen güç değerinde zamana bağlı olarak azalma-kayıp meydana gelmez.)
- Sessiz çalışma (Güç üretimi sırasında hareketli aksamı olmadığından geleneksel sistemlere göre daha sessiz bir alternatiftir.)
- Çevre dostu (CO₂ gibi zararlı kirletici emisyonları azaltır.)
- Ölçeklendirilebilir (Kullanım alanına göre boyut ölçeklendirmesi yapılabilir.)

Yakıt pillerinin dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Maliyeti yüksek (Platinyum katalizör gibi pahalı parçalar içerdiğinden ilk yatırım maliyeti yüksektir.)
- Hidrojen gazı depolanma ve taşınma sorunu (Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan sistemlerde gerekli depolanma ve taşınma açısından altyapı eksikliği bulunmaktadır.)
- Sistem gelişimi yavaş (Mevcut yakıt pili uygulamalarının pek çoğu prototip aşamasında olup geliştirilme süreci devam etmektedir.)
- Hidrojen gazı maliyeti (Yakıt olarak hidrojen gazının kullanıldığı sistemler için hidrojenin elde edilme maliyeti fazladır ve hidrojen üretimi yaygın değildir.)

2.2. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri genellikle elektrolit tipi ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılırlar. Çalışma sıcaklıklarına göre yakıt pili sınıflandırması aşağıda verilmiştir.

- Düşük sıcaklık (25°C-100 °C)
- Orta sıcaklık (100 °C-500 °C)
- Yüksek sıcaklık (500 °C-1000 °C)
- Çok yüksek sıcaklık (1000 °C ve üzeri)

Elektrolit türüne göre ise yakıt pilleri aşağıdaki gibidir.

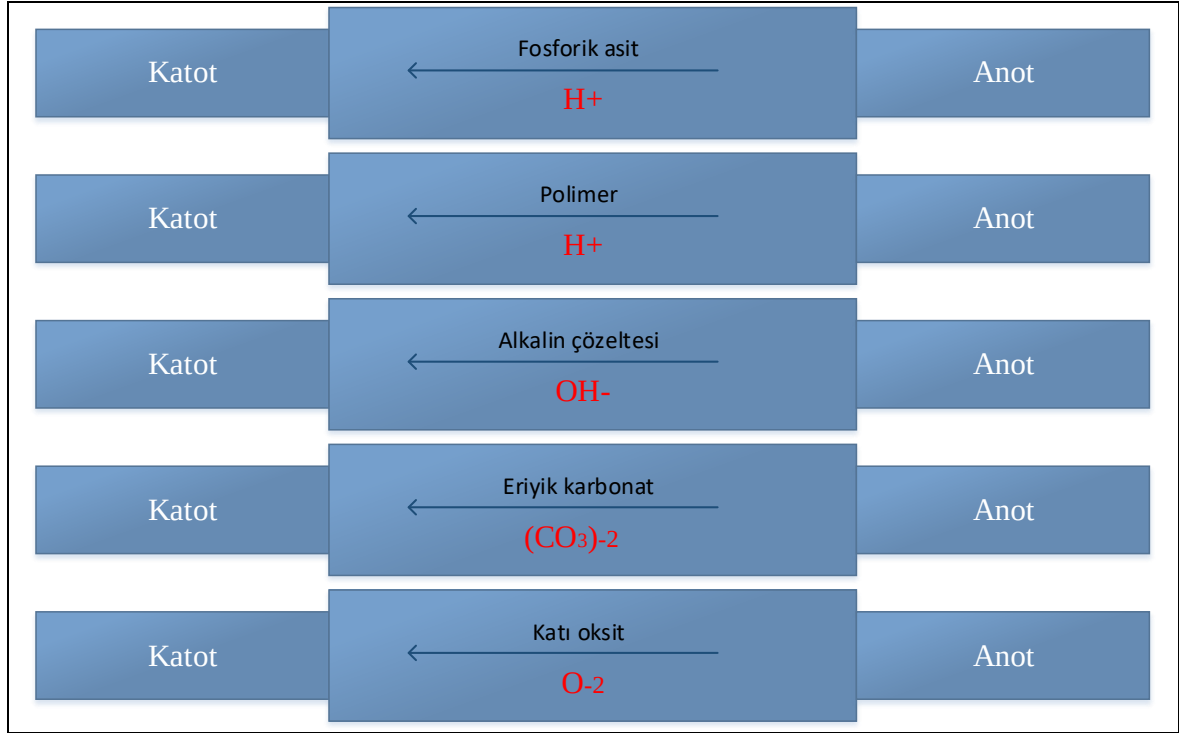
- Alkali yakıt pili (AYP)
- Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
- Katı oksit yakıt pili (KOYP)
- Eriyik karbonat yakıt pili (EKYP)
- Polimer elektrolit yakıt pili (PEYP)

Yakıt pillerinin temel özellikleri ve birbirlerinden farklılıkları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Yakıt pillerinin temel özellikleri ve farklılıkları

	AYP	FAYP	KOYP	EKYP	PEYP
Elektrolit tabakası	Sulu potasyum hidroksit çözeltisi	Fosforik asit	Zirkonyum tabanlı yittra	Eriyik alkali metal	Hidratlı Polimerik İyon
Elektrot tabakaları	Geçiş metalleri	Karbon	Perovskit ve perovskit-metal alaşımları	Nikel ve Nikel oksit	Karbon
Katalizör	Platinyum	Platinyum	Elektrot malzemesi	Elektrot malzemesi	Platinyum
Ara bağlantı elemanı	Metal	Grafit	Nikel, seramik ya da çelik	Paslanmaz çelik ya da nikel	Karbon ya da metal
Çalışma sıcaklığı	65°C-220°C	205°C	600°C-1000°C	650°C	40°C-80°C
Enerji taşıyıcı	OH ⁻	H ⁺	O ⁻²	CO ₃ ⁻²	H ⁺

Şekil 2.3’te yakıt pili sınıflandırması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Yakıt pillerinin şematik olarak sınıflandırılması [90]

2.2.1. Polimer elektrolit yakıt pili

Polimer elektrolit yakıt pilinde iyi bir proton iletkeni olan membran yapısı elektrolit tabakası görevi yapmaktadır. Bu yakıt pilinde tek sıvı su olduğundan korozyon problemi en az düzeydedir. Genel olarak platinyum katalizör ile birlikte karbon elektrot tabakaları anot ve katot elektrot olarak kullanılırken karbon ya da metal ara bağlantı elemanları kullanılmaktadır.

Polimer elektrolit yakıt pilleri katı elektrolit tabakasına sahip olduğu için gaz kaçaqları en az düzeyde gerçekleşmekte ve düşük çalışma sıcaklığında çalıştığı için güç üretimine hızlı bir şekilde başlayabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Ancak düşük ve yakın çalışma sıcaklığına sahip olması ısı yönetimi zorlaştırmaktadır. Ayrıca bu yakıt pilinde su yönetimi yakıt pilinin tasarımı konusunda mühendislerin en çok zorlandığı konulardan birisidir. Yakıt olarak karbon içeren yakıtların kullanımında da oldukça az toleransa sahiptir.

2.2.2. Alkali yakıt pili

Alkali yakıt pilinde 250°C üzerindeki çalışma sıcaklıklarında elektrolit olarak ağırlıkça %85 konsantrasyona sahip potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanılırken 120°C altındaki çalışmalarda %35-50 konsantrasyona sahip KOH çözeltisi elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu yakıt pilinde yakıt olarak hidrojen gazı hariç reaktif olmayan bileşenlere sahip yakıtlar kullanılmalıdır. Ayrıca alkali yakıt pilleri, 1960 yılından beri üzerinde çalışılmakta ve geliştirilmekte olan bir yakıt pili çeşidi olup genellikle uzay uygulamalarında tercih edilmiştir.

Alkali yakıt pilleri diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında hidrojen ve oksijen gazı için oldukça iyi bir performans göstermektedir. Ayrıca yine diğer yakıt pilleri ile karşılaştırıldığında en fazla katalizör çeşidi kullanılabilen yakıt pilidir. Ancak elektrolit tabakasının CO₂'ye olan hassasiyeti sebebi ile farklı yakıt kullanımı konusunda sınırlıdır.

2.2.3. Fosforik asit yakıt pili

Yaklaşık olarak 150°C-220°C sıcaklıklarda çalışan fosforik asit yakıt pilinde elektrolit olarak fosforik asit kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda fosforik asit zayıf bir iyonik iletkenidir, bu nedenle yakıt olarak karbon içeren yakıtlar kullanıldığında anot tabakasında CO zehirlenmesi oldukça yüksek düzeyde gerçekleşmektedir. Ayrıca, elektrolit tabakasında %100 konsantrasyonda asit kullanımı sayesinde buhar basıncı en az düzeyde olduğundan fosforik asit yakıt pillerinde su yönetimi zor değildir.

Fosforik asit yakıt pilleri alkali yakıt pili ve polimer elektrolit yakıt piline göre CO varlığına daha az duyarlıdır. Çalışma sıcaklığının orta düzeyde olması sayesinde ısıl yönetim kolay olduğundan tasarım açısından bir zorluğu yoktur. Ayrıca fosforik asit yakıt pilleri yaklaşık %37-42 sistem verimliliğine sahip olduklarından genellikle polimer elektrolit yakıt pillerine göre daha verimli sistemlerdir. Ancak, fosforik asit yakıt pillerinde katot tarafında meydana gelen oksijen indirgenmesi alkali yakıt pillerinden daha yavaş gerçekleşir ve platinyum katalizöre ihtiyaç duyar. Ayrıca yakıt süreçleri diğer yakıt pillerinden daha karmaşıktır. Diğer yakıt pilleri ile karşılaştırıldığında en önemli dezavantajı ise fosforik asitin oldukça korozyif bir malzeme olmasından dolayı pahalı malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır.

2.2.4. Eriyik karbonat yakıt pili

Eriyik karbonat yakıt pillerinde kullanılan elektrolit tabakası, genellikle alkali karbonatların bileşimleri ile kullanılmaktadır. Eriyik karbonat yakıt pili genellikle alkali karbonatların iyonik iletim sağlayan karbonat iyonları ile oldukça iletken bir erimiş tuz oluşturduğu 600°C-700°C'de çalışır. Eriyik karbonatlı yakıt pilleri, genellikle büyük boyutlarının ve ağırlıklarının sorun olmadığı denizcilik uygulamalarında kullanılırlar.

Eriyik karbonat yakıt pili yüksek sıcaklıklarda çalıştığı için diğer yakıt pillerine göre bazı avantajlara sahiptir. Maliyeti uygun olan elektro-katalizörlerin kullanılabilir olması, CO ve hidrokarbon yakıtlarla uyumlu bir şekilde çalışabilmesi, ayrıca yüksek sıcaklıktaki atık ısısı sayesinde kojenerasyon sistemleri ile uyumlu olması bu avantajların başında gelmektedir. Ancak bu yakıt pili türünde korozyon ve sıvı elektrolitten kaynaklı olarak nikel ve paslanmaz çelik kullanımı gerekliliği tasarım açısından sorun yaratmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık stak ömrü ve mekanik kararlılığı üzerinde malzeme problemlerine sebep olmaktadır.

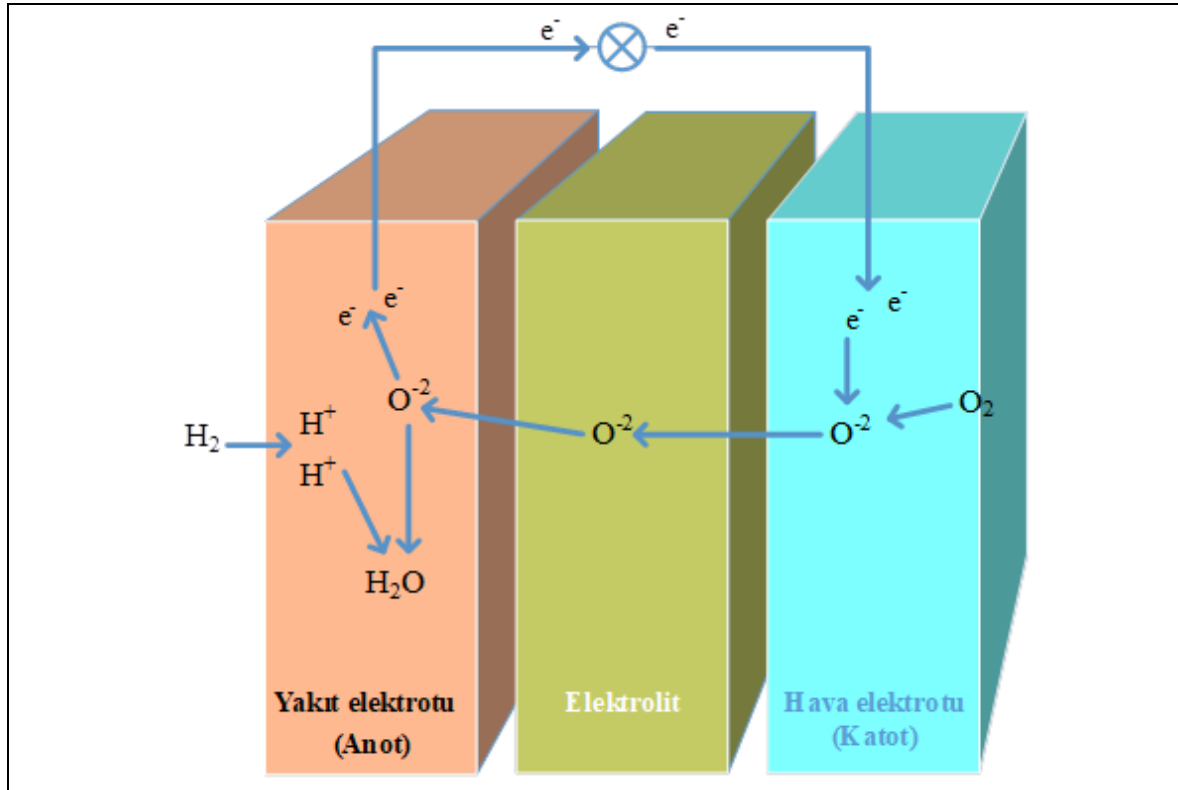
2.2.5. Katı oksit yakıt pili

Katı oksit yakıt pilinde kullanılan elektrolit yapısı genellikle katı gözeneksiz metal oksit yapılarıdır. Oksijen iyonlarının iyonik iletkenliğinin sağlandığı 600°C -1000°C sıcaklık aralığında çalışırlar. Katı oksit yakıt pili, ilk geliştirilme aşamalarında güç üretebilmek için katı elektrolitlerin sınırlı iletkenliği sebebiyle yaklaşık 1000°C sıcaklık gerektiriyordu. Ancak daha yakın zamanlarda, geliştirilmiş katotlara sahip ince elektrolit hücrelere sahip olduğundan 650°C – 850 °C sıcaklıkları arasında da güç üretimi yapabilmektedir .

Katı oksit yakıt pilleri katı bir elektrolite sahip olduğundan geometrik olarak farklı şekillerde üretilebilir. Ayrıca, yakıt pilinin sağlam seramik yapısına sahip olması korozyon problemine karşı önlem oluşturmaktadır. Katı seramik ayrıca üçlü faz sınırının oluşumu konusunda avantaja sahiptir. Yakıt pilinin kinetiği fazla olduğundan CO dahi katı oksit yakıt pilinde doğrudan yakıt olarak kullanılabilir. Ancak katı oksit yakıt pilinde kullanılan malzemelerin maliyeti yüksektir. Malzemeler arasında ısıl genleşme uyumsuzlukları vardır ve düzlemsel katı oksit yakıt pilinde hücreler arasında sızdırmazlık sağlamak zordur. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklığı, malzeme seçimine ciddi kısıtlamalar getirir ve üretim sürecini zorlaştırır.

2.2. Katı Oksit Yakıt Pilleri

Katı oksit yakıt pillerinde yakıt, yakıt kanalından gönderilerek elektrokimyasal reaksiyonların meydana geldiği anot elektrotu ulaşır, reaksiyonlar sonucu meydana gelen elektronlar ise dış bir devre aracılığı ile katot tarafına aktarılır. Bu sırada hava kanallarına hava (ya da oksijen) gönderilir ve hava akımındaki oksijen molekülleri, oksit iyonlarını oluşturmak üzere dış devreden gelen elektronlarla reaksiyona girmek üzere katoda yayılır. Bu oksit iyonları daha sonra elektrolit boyunca ilerler ve anot/elektrolit ara yüzeyinde oksitlenmiş yakıtla reaksiyona girer. Böylece, doğru akım elektrik, anottan katoda harici devre yoluyla elektron akışından üretilmiş olur. Şekil 2.4'te katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



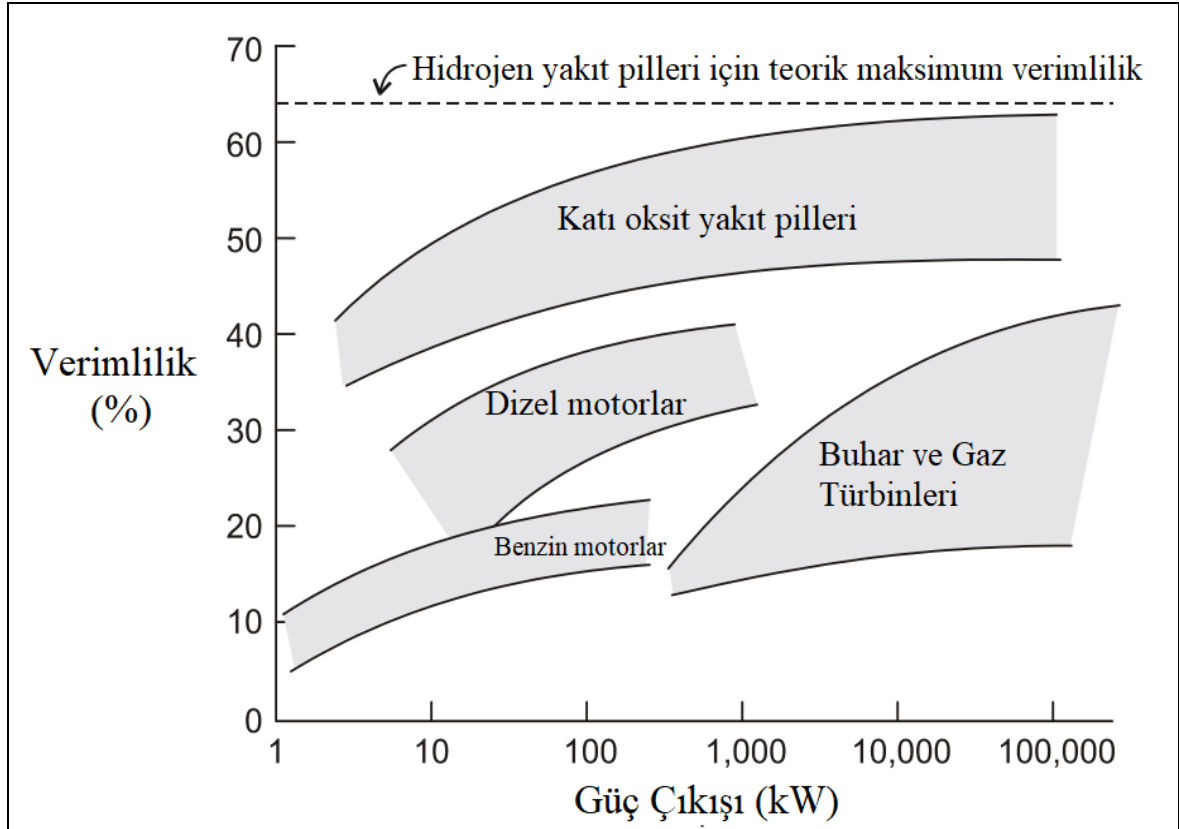
Şekil 2.4. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi [91]

2.3.1. Katı oksit yakıt pillerinin avantajları

Katı oksit yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı aralığı $500^{\circ}C$ - $1000^{\circ}C$ olup tüm bileşenleri katıdır. Yüksek sıcaklıkta çalışmaları, katı bileşen içerdiklerinden daha kararlı yapıda

olmaları ve reaksiyonları sonucunda kirleticilerin ortaya çıkmaması gibi özelliklerinden dolayı, katı oksit yakıt pilleri diğer yakıt pillerine göre önemli avantajlara sahiptir.

Katı oksit yakıt pilleri Carnot verimi sınırlamasına bağlı olmadığından yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine yüksek oranda (yaklaşık olarak %50 verimle) çevirmektedirler. Ayrıca, katı oksit yakıt pilinden üretilen ısı gaz türbini uygulamalarında kullanıldığında veya içten yanmalı bir motorda sentez gazı yakıldığında verimlilik %70'e kadar daha da artabilir. Şekil 2.5'te katı oksit yakıt pillerinin geleneksel güç üretim sistemleri ile güç çıkışı karşılaştırması görülmektedir.



Şekil 2.5. Güç üretim sistemlerinin güç çıkışı karşılaştırması [92]

Katı oksit yakıt pillerinde kullanılan temel yakıtlar anot tabakasında doğrudan elektrokimyasal olarak tepkimeye girebildiklerinden hidrojen ve karbon monoksittir. Ancak katı oksit yakıt pilleri yüksek çalışma sıcaklığına sahip olduklarından (750°C-1000°C) hidrokarbon temelli benzin, metan, etanol gibi yakıtlar da yakıt olarak kullanılabilir. Hidrokarbon temelli yakıtlar doğrudan ya da dolaylı iç reformasyon ile hidrojen ve karbon

monoksit'e dönüşerek kullanılırlar. Bu nedenle katı oksit yakıt pillerinde maliyeti arttıran pahalı ek yakıt dönüştürücülerine ihtiyaç duyulmamaktadır [93,94].

Katı oksit yakıt pilleri SO_2 ve NO_x emisyonları açısından oldukça temiz güç üretim sistemleridir. Özellikle yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığında atmosfere sadece su buharı çıkışı gerçekleşir. Ayrıca hidrokarbon temelli yakıtlar yakıt olarak kullanıldığında katı oksit yakıt pilleri yüksek çalışma sıcaklıklarında çıkan gazlardaki karbon monoksiti karbondioksit'e çevirerek gazların zararlı etkilerini azaltabilmektedir.

Katı oksit yakıt pilleri tek bir hücre ya da hücrelerin seri ya da paralel bir araya getirildikleri stak yapısında istenilen seviyede güç üretebilmektedir. Böylece, istenilen uygulama için küçük ya da büyük ölçek olması farketmeksizin uygun boyutta katı oksit yakıt pili üretimi yapılabilmektedir.

Katı oksit yakıt pilleri katalizör olarak yüksek enerji hacimli farklı malzemeler kullanabilmektedir. Bu nedenle maliyeti arttıracak pahalı katalizörlere (Platinyum, gümüş vb.) ihtiyaç duymazlar. Ayrıca, elektrolit tabakasının yönetimi için özel bir malzeme yönetimi gerektirmemektedir. Sıvı bir tabaka içermediğinden korozyon ve elektrolit kaybı gibi sorunlar yaşamazlar.

2.3.2. Katı oksit yakıt pillerinin dezavantajları

Katı oksit yakıt pillerinde yüksek çalışma sıcaklığı performansı güçlendirse de sürekli ve uzun süreli çalıştırma durumlarında katalizör bozunumu, ısı ve kimyasal kararsızlık, ısı ya da mekanik gerilim, gaz sızdırma contası sorunları ve ara bağlantı elemanları, elektrolit ve elektrot malzemelerinin tasarım sorunları gibi problemlere sebep olabilmektedir [95,96]. Ayrıca katı oksit yakıt pillerinin yüksek çalışma sıcaklığına erişmesi ve güç üretimi sonunda soğuması için oldukça fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum malzeme karakteristiğini etkilediğinden katı oksit yakıt pilinin sistem arızalarına sebep olabileceğinden katı oksit yakıt pilinin kullanımını sınırlandıran bir durumdur [97]. Bu nedenle son zamanlarda yapılan çalışmalarda katı oksit yakıt pilinin çalışma sıcaklığını $500^{\circ}C$ - $750^{\circ}C$ aralığı olacak şekilde ayarlanarak malzeme seçimi çeşitliliği, maliyet azalması, kısa sürede çalışma-soğuma ve uzun pil ömrü sağlanması amaçlanmaktadır.

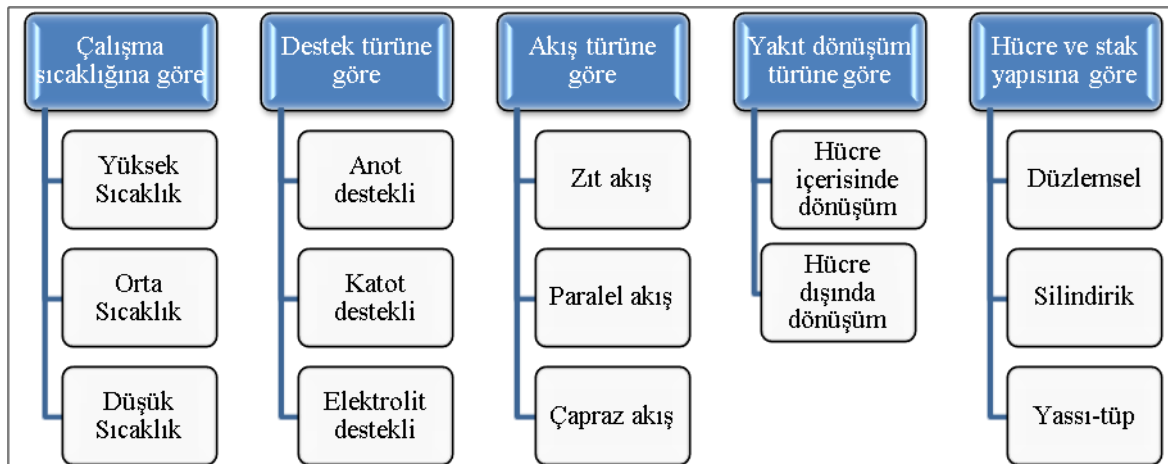
Katı oksit yakıt pillerinin malzemelerinden de kaynaklanan dezavantajları bulunmaktadır. Aktivasyon, konsantrasyon ve temel olarak ohmik kayıpların fazla olduğu elektrolit tabakası dolayısıyla kayıpların fazla olması, sinterlenme sorunları, redoks kararsızlığı, bileşenler arasındaki kimyasal kararsızlık, malzeme yapısındaki kimyasal değişimler, yüksek üretim maliyetleri ve süresi bu dezavantajların başında gelmektedir [98].

Katı oksit yakıt pillerinin birden çok bileşenden oluşması, birden çok arayüze sahip olmasına ve dolayısıyla pek çok fizyo-kimyasal durumun oluşmasına neden olmaktadır. Performans ve verimlilik hesaplamalarının sorunsuz olarak yapılabilmesi için reaksiyon mekanizmalarının ve anot, katot, elektrolit, elektrot/elektrolit arayüzünün kinetiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [99].

Katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak hidrokarbon kullanıldığında karbon bozunumu sülfür zehirlenmesi ciddi konulardır. Katalizör yüzeylerde karbon bozunumu performans azalmasına ve yakıt pilinin kırımına sebep olabilmektedir. Aynı şekilde sülfür zehirlenmesi de katı oksit yakıt pili performansını azaltan etkenlerdendir.

2.4. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Sınıflandırılması

Katı oksit yakıt pilleri, hücre ve stak dizaynı, çalışma sıcaklıkları, yakıt dönüşüm türü, akış konfigürasyonu ve destek türüne göre sınıflandırılmaktadırlar. Şekil 2.6'da katı oksit yakıt pili sınıflandırması görülmektedir.



Şekil 2.6. Katı oksit yakıt pillerinin sınıflandırılması

2.4.1. Çalışma sıcaklığına göre KOYP sınıflandırması

Katı oksit yakıt pillerinin performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisi çalışma sıcaklığıdır. Sıcaklığın artması ile elektrot tabakalarının kinetiği artarken hücre direnci azalır. Böylece performans artar. Ancak sıcaklığın yüksek olması malzeme ile ilgili sorunlar ortaya çıkabilmektedir.

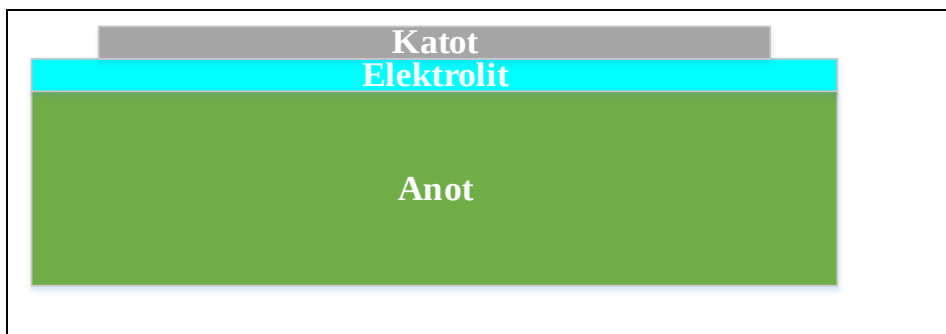
Katı oksit yakıt pilleri çalışma sıcaklığına göre aşağıdaki gibi 3 sınıfa ayrılmaktadır;

- Düşük sıcaklık KOYP (400°C-650°C)
- Orta sıcaklık KOYP (650°C-800 C)
- Yüksek sıcaklık KOYP (800°C -1000°C)

2.4.2. Destek türüne göre KOYP sınıflandırması

Katı oksit yakıt pilleri, malzeme dayanımlarının arttırılması amacıyla 3 farklı sınıfta tasarlanabilmektedirler [100].

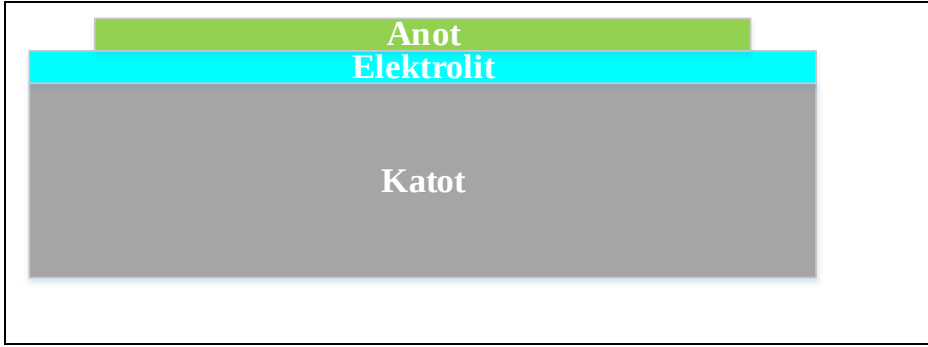
Anot destekli KOYP: Anot elektrot tabakasının kalınlığının, katot elektrot ve elektrolit tabakasının kalınlığına göre daha kalın olduğu tasarımlardır. Bu tasarımda anot tabakasının yüksek iletkenliğe sahip olması ve elektrolit tabakası ince olduğu için daha düşük çalışma sıcaklığında çalışılabilmesi önemli avantajlardır. Ancak anot tabakası kalın olduğu için kütle transferi sınırlıdır. Şekil 2.7’de anot destekli bir KOYP gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Anot destekli düzlemsel KOYP

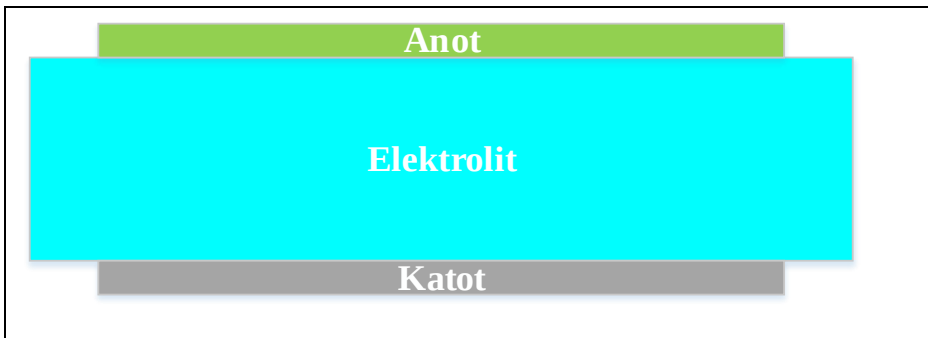
Katot destekli KOYP: Anot elektrot tabakasının kalınlığının, katot elektrot ve elektrolit tabakasının kalınlığına göre daha kalın olduğu tasarımlardır. Anot destekli tasarımda olduğu

gibi kalın bir elektrot tabakasına sahip olduğundan düşük çalışma sıcaklığında çalışabilmektedir. Ayrıca yine anot destekli tasarımdaki gibi katot tabakası kalın olduğundan katot tabakasında kütle transferi sınırlıdır. Şekil 2.8’de katot destekli KOYP görülmektedir.



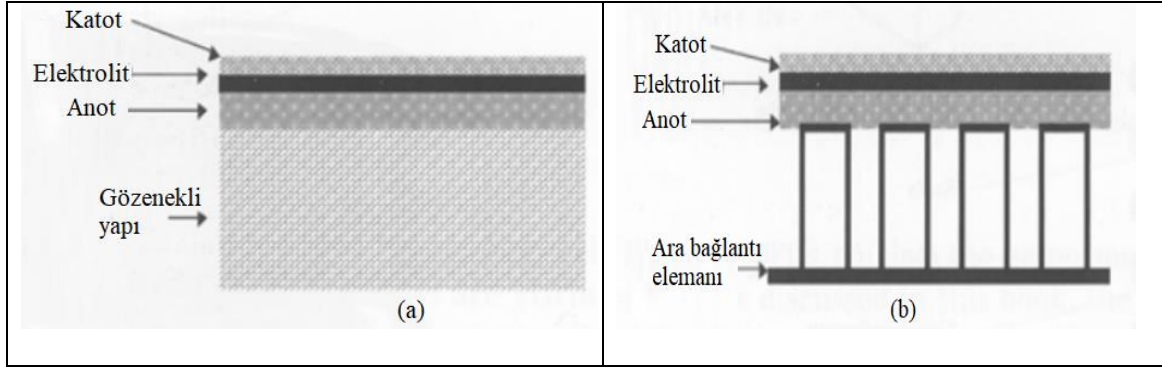
Şekil 2.8. Katot destekli düzlemsel KOYP

Elektrolit destekli KOYP: Elektrolit tabakasının kalınlığının, katot ve anot elektrot tabakasının kalınlığına göre daha kalın olduğu tasarımlardır. Elektrolit tabakasının kalın olması katı oksit yakıt pilini mekanik olarak daha sağlam yapmaktadır. Ancak düşük elektrolit iletkenliği nedeniyle yüksek dirence sahiptir ve bu nedenle elektrolit ohmik kayıplarını azaltmak için daha yüksek çalışma sıcaklığı gerektirmektedir. Şekil 2.9’da elektrolit destekli düzlemsel bir KOYP gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Elektrolit destekli düzlemsel KOYP

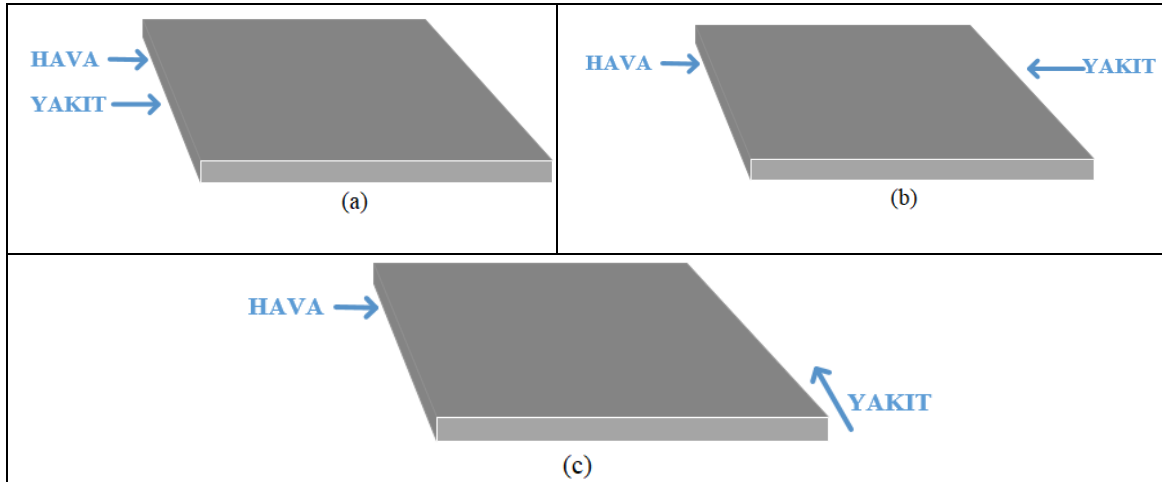
Elektrot ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pillerinin yanı sıra son zamanlarda gözenekli yapı destekli ve ara bağlantı elemanı destekli katı oksit yakıt pili tasarımları da kullanılmaktadır. Şekil 2.10’da gözenekli yapı destekli (a) ve ara bağlantı elemanı destekli (b) KOYP gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Gözenekli yapı destekli (a) ve ara bağlantı elemanı destekli (b) düzlemsel KOYP [101]

2.4.3. Akış türüne göre KOYP sınıflandırması

Akış türü katı oksit yakıt pilinin sıcaklık dağılımını doğrudan ilgilendirdiği için önemli bir konudur. Zıt ve paralel akışta katı oksit yakıt pilinin performansının çapraz akıştan daha iyi olduğu bilinmektedir. Ayrıca, paralel akış katı oksit yakıt pili tasarımında sıcaklık diğer akış türlerine göre daha yüksektir, bu yüzden en yüksek sıcaklık farkı paralel akış türünde görülmektedir. Şekil 2.11’de akış türüne göre paralel akış (a), zıt akış (b) ve çapraz akış (c) KOYP sınıflandırması görülmektedir.

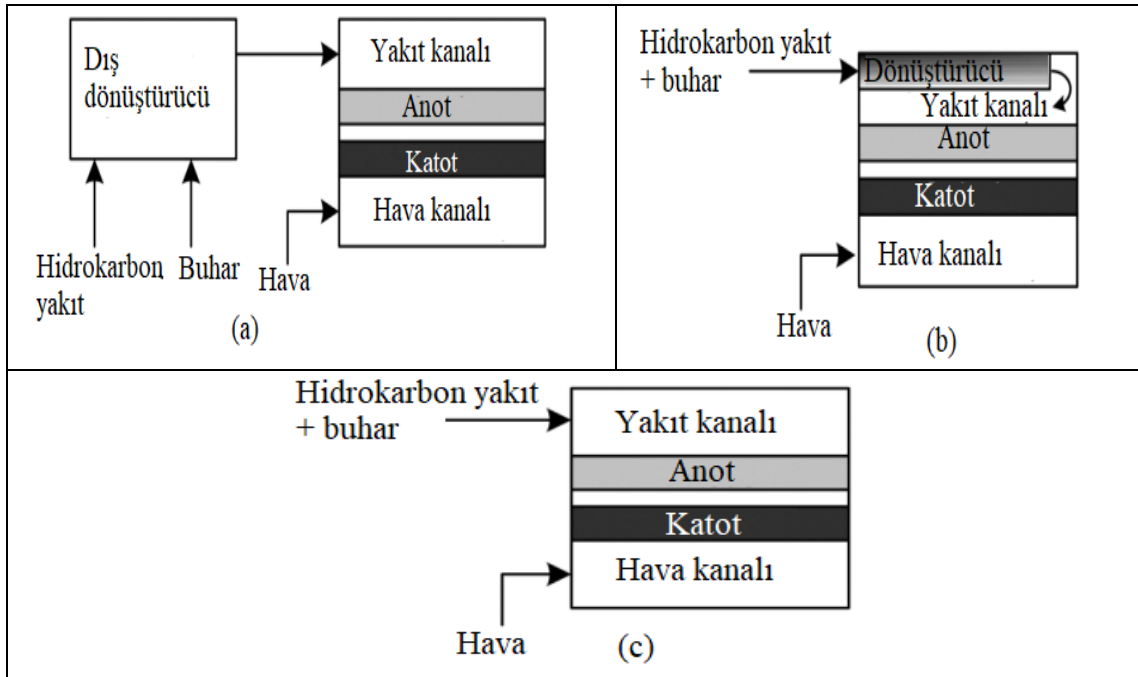


Şekil 2.11. Akış türüne göre paralel akış (a), zıt akış (b) ve çapraz akış (c) KOYP sınıflandırması

2.4.4. Yakıt dönüşüm türüne göre KOYP sınıflandırması

Katı oksit yakıt pilinde hidrokarbon temelli yakıtların kullanılabilmesi için yakıtların karbon monoksit ve/veya hidrojene dönüştürülmesi gerekmektedir. Yakıt dönüşüm türüne göre KOYP hücre içerisinde dönüşüm ve hücre dışında dönüşüm olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Hücre içerisinde yakıt dönüşümü ise doğrudan iç reformasyon ve dolaylı iç reformasyon olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Doğrudan iç reformasyonlu katı oksit yakıt pillerinde yakıt dönüşümü anot katalizör tabakası üzerinde gerçekleşirken dolaylı iç reformasyonda dönüştürücünün yakıt pilinin diğer bileşenlerden ayrıldığı yerde yakıt dönüşümü gerçekleştirilir. Yakıt dönüşümü endotermik reaksiyonlar içerdiğinden dış reformasyona sahip katı oksit yakıt pilinin sıcaklık dağılımının daha iyi olduğu bilinmektedir. Şekil 2.12’de yakıt dönüşüm türüne göre dış dönüştürücü (a), dolaylı iç reformasyon (b) ve doğrudan iç reformasyon (c) KOYP sınıflandırması görülmektedir.

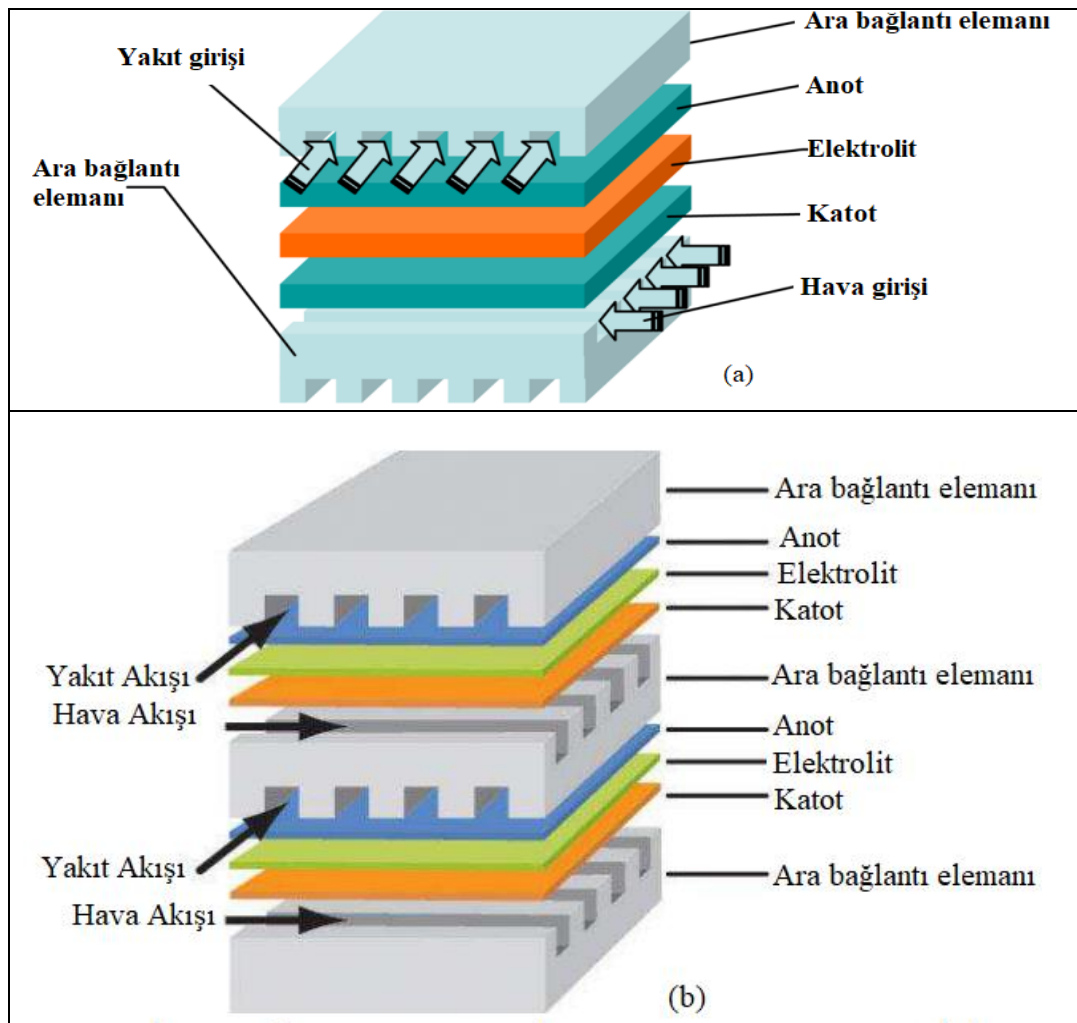


Şekil 2.12. Yakıt dönüşüm türüne göre dış dönüştürücü (a), dolaylı iç reformasyon (b) ve doğrudan iç reformasyon (c) KOYP sınıflandırması [102]

2.4.5. Hücre ve stak yapısına göre KOYP sınıflandırması

Katı oksit yakıt pilleri hücre ve stak yapısına göre üç farklı şekilde tasarlanmaktadır.

Düzlemsel KOYP: Bu katı oksit yakıt pili tasarımında katı oksit yakıt pilinin anot, katot ve elektrolit tabakaları düz bir tabaka halinde sıralanırlar. Bu tasarımda ara bağlantı elemanları da anot ve katot tabakalarını birbirinden ayırırken elektriksel iletkenliği sağlamaktadır. Şekil 2.13'te düzlemsel katı oksit yakıt pili tek hücre (a) ve stak (b) yapısında gösterilmektedir.

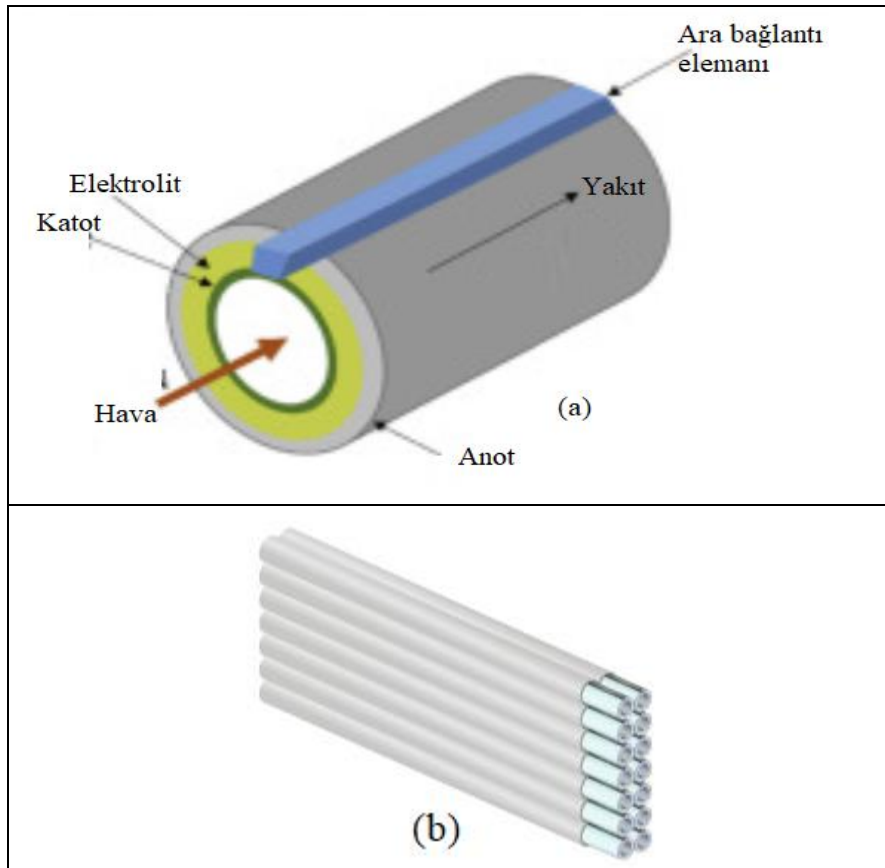


Şekil 2.13. Düzlemsel KOYP için tek hücre (a) ve stak (b) yapısı [103,104]

Düzlemsel katı oksit yakıt pilleri silindirik katı oksit yakıt pillerine göre düz yapıları sebebiyle daha düşük ohmik dirence sahiptir. Bu nedenle teorik performansları silindirik katı oksit yakıt pillerine göre daha yüksektir. Silindirik katı oksit yakıt pillerinden daha az boşluğa sahip olduğundan daha yüksek hacimsel güç yoğunluğuna sahiptir. Üretimi daha

kolay olduğu için üretim maliyeti silindirik katı oksit yakıt piline göre daha düşüktür. Ancak, yakıt ve havanın tabakalarda yayılabilmesi için daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum ısıl kararsızlığa sebep olmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık gerektiği için başlama süresi ve soğuma süresi daha uzundur. Sıcaklık malzeme yapısında olumsuzluklara neden olduğundan kırılğan yapıdadır. Düzlemsel katı oksit yakıt pillerinde ara bağlantı elemanları kalın ve kararsız yapıdayken silindirik katı oksit yakıt pillerinde daha ince ve kararlı ara bağlantı elemanları bulunmaktadır. Ara bağlantı elemanlarının kalın olması nedeniyle daha fazla hücre ağırlığına ve daha fazla mekanik gerilime sahiptir. Bu nedenle özellikle ara bağlantı elemanlarının seçimi ve üretimi diğer hücre ve stak yapılarına göre daha zordur.

Silindirik KOYP: Silindirik katı oksit yakıt pili tasarımında içi boş tüplerden oluşan hücreler bir araya gelerek stak yapısını oluştururlar. Tüplerin dış yüzeyinden yakıt gönderilirken, içerisinden hava geçişi sağlanır. Şekil 2.14'te silindirik katı oksit yakıt pili tek hücre (a) ve stak (b) yapısında gösterilmektedir.

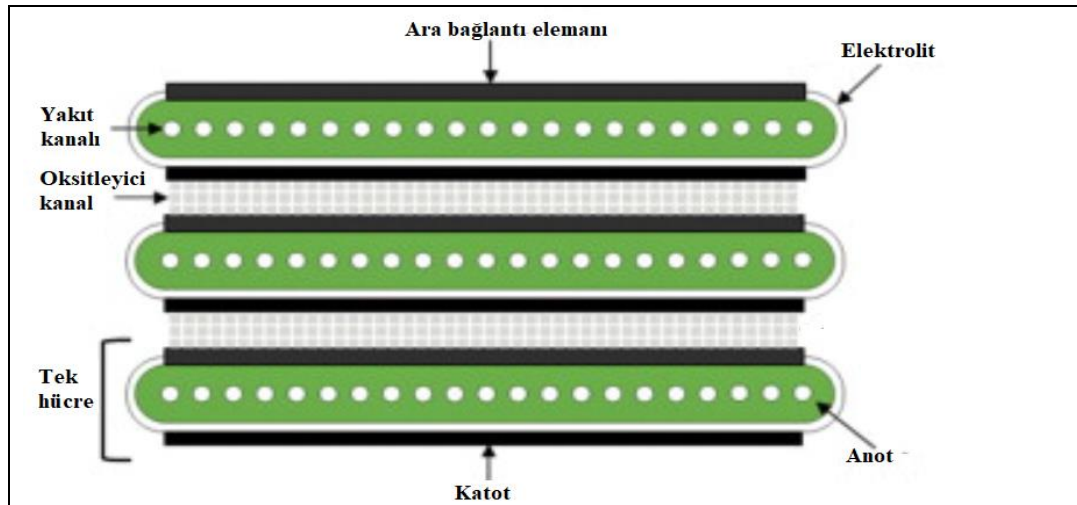


Şekil 2.14. Silindirik KOYP için tek hücre (a) ve stak (b) yapısı [105,106]

Silindirik katı oksit yakıt pilleri de çaplarına göre, 5mm'den küçük çaplı (mikro-tüp) ve 15 mm'den büyük çaplı olmak üzere iki farklı gruba ayrılırlar. Mikro-tüp katı oksit yakıt pilleri daha yüksek hacimsel güç çıkış yoğunluğu, termal şoka karşın daha yüksek direnç, termal şok direnci nedeniyle daha hızlı başlatma yeteneği ve düzlemsel ve silindirik şeklindeki katı oksit yakıt pillerine kıyasla küçük ölçekli taşınabilir uygulamalarda kullanılabilme yeteneği sunar.

Silindirik katı oksit yakıt pili düzlemsel katı oksit yakıt pili ile karşılaştırıldığında pek çok avantaja sahiptir. Öncelikle, düzlemsel katı oksit yakıt pilinde önemli bir sorun olan sızdırmazlık, daha az alan olduğundan silindirik katı oksit yakıt pilinde önemli bir sorun değildir. Silindirik yapıdan dolayı çalışma sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklanan ısıl gerilimlere daha dayanıklı olmakla birlikte, başlama ve soğuma sıcaklığına ulaşması da düzlemsel katı oksit yakıt piline göre daha hızlıdır. Ancak, üretim yöntemleri düzlemsel katı oksit yakıt pillerine göre daha karmaşıktır. Ayrıca, hava ve yakıtın kanallar içerisinde düzgün dağılımının sağlanabilmesi tasarımı etkileyen önemli konulardandır. Bu nedenle üretim maliyeti düzlemsel katı oksit yakıt pilinin üretim maliyetine göre daha fazladır.

Yassı-tüp KOYP: Yassı-tüp katı oksit yakıt pili düzlemsel ve silindirik katı oksit yakıt pilinin geometrik birleşimidir. Aynı zamanda her iki geometri yapısının avantajlarına da sahiptir. Yassı-tüp katı oksit yakıt pili silindirik katı oksit yakıt pili ile aynı bileşenlere sahiptir. Şekil 2.15'te yassı tüp katı oksit yakıt pilinin tek hücre ve stak yapısı görülmektedir.



Şekil 2.15. Yassı-tüp KOYP için tek hücre ve stak yapısı [107]

Yassı-tüp katı oksit yakıt piline, silindirik katı oksit yakıt pili ile benzer yöntemlerle hava ve yakıt beslemesi yapılmaktadır. Ancak farklı olarak, anot tarafında birden çok silindirik yapı vardır ve yakıt bu yapıdan beslenir. Rib adı verilen bu yapılar iyi bir iletken ve elektron iletken devresi için kısa yollar sağlayarak ohmik kayıpları azaltır, böylece sonuç olarak yassı-tüp katı oksit yakıt pilinin performansını güçlendirir.

2.5. Katı Oksit Yakıt Pillerinin Malzemeleri

Katı oksit yakıt pilleri anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin birbiriyle ve sistemle uyumlu çalışabilmesi için gerekli özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bileşenlerin kimyasal değişime uğramaması (kimyasal kararlılık) ve hücredeki taşınımı sağlayıp mekanik zararı önleyebilecek ölçülerde olması (mekanik kararlılık), geniş çalışma sıcaklığı aralığında indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarını gerçekleştirmesi beklenmektedir. Üretim ve çalışma sürecinde tabakaların birbirinden ayrılmasını ve bozunumunu engellemek amacıyla düşük ohmik kayıplara sahip olması için yüksek iletkenliğe sahip olmalıdırlar. Uzun çalışma sürecinde yüksek sıcaklığa sahip olmaları gerekmektedir. Ayrıca, bunlara ek olarak, yüksek mukavemet ve dayanım, kolay imalat ve düşük maliyet, bu bileşenler için istenen diğer gereksinimlerdir. Bu ortak özelliklerin yanında tüm tabakalar için ayrı ayrı gerekli olan farklı özellikler de bulunmaktadır.

2.5.1. Anot tabakası

Yukarıda bahsedilen genel özelliklere ek olarak, katı oksit yakıt pillerinin anot tabakası yakıtın elektrokimyasal yükseltgenmesine ve hidrokarbon temelli yakıtların kimyasal dönüşümüne yönelik uygun özelliklere sahip olmalıdır. Üçlü faz sınırına gaz difüzyonunun sağlanabilmesi için gözenekliliğin yeterli miktarda olması gerekmektedir. Ayrıca elektronik ve iyonik iletkenliğin yüksek olması gerekmektedir. Hidrokarbon temelli yakıtlar kullanıldığında oluşacak karbona karşı, farklı yakıtlar kullanıldığında ise oluşacak katran, sülfür gibi maddelere karşı yüksek direnç göstermesi gerekmektedir. Anot tabakasının güç üretimine başlama ve bitirme sürecinde yüksek redoks kararlılığına sahip olması da önemli bir özelliktir.

2.5.2. Katot tabakası

Katı oksit yakıt pilinde kullanılan katot tabakasına bağlı olarak, oksijen indirgeme reaksiyonu ya elektrolit/elektrot/gaz ara yüzü çevresinde veya gaz/elektrot ara yüzey alanlarında meydana gelebilir. Kısmen veya tamamen indirgenmiş oksit iyonları daha sonra yüzey yolları boyunca veya toplu olarak elektrot/elektrolit/gaz ara yüzüne ve ardından difüzyon yoluyla yoğun elektrolit yoluyla anoda aktarılır.

Katot tabakası, ara bağlantı elemanlarından reaksiyon alanına elektronları yüksek bir iletkenlikle sağlamalı ve oksijen indirgenmesi açısından elektro-katalitik özellikleri iyi olmalıdır. Ayrıca katot tabakası oksijen gazının difüzyonu ve oksijen iyonlarının iletkenliği açısından da yeterli özelliklere sahip olmalıdır.

2.5.3. Elektrolit tabakası

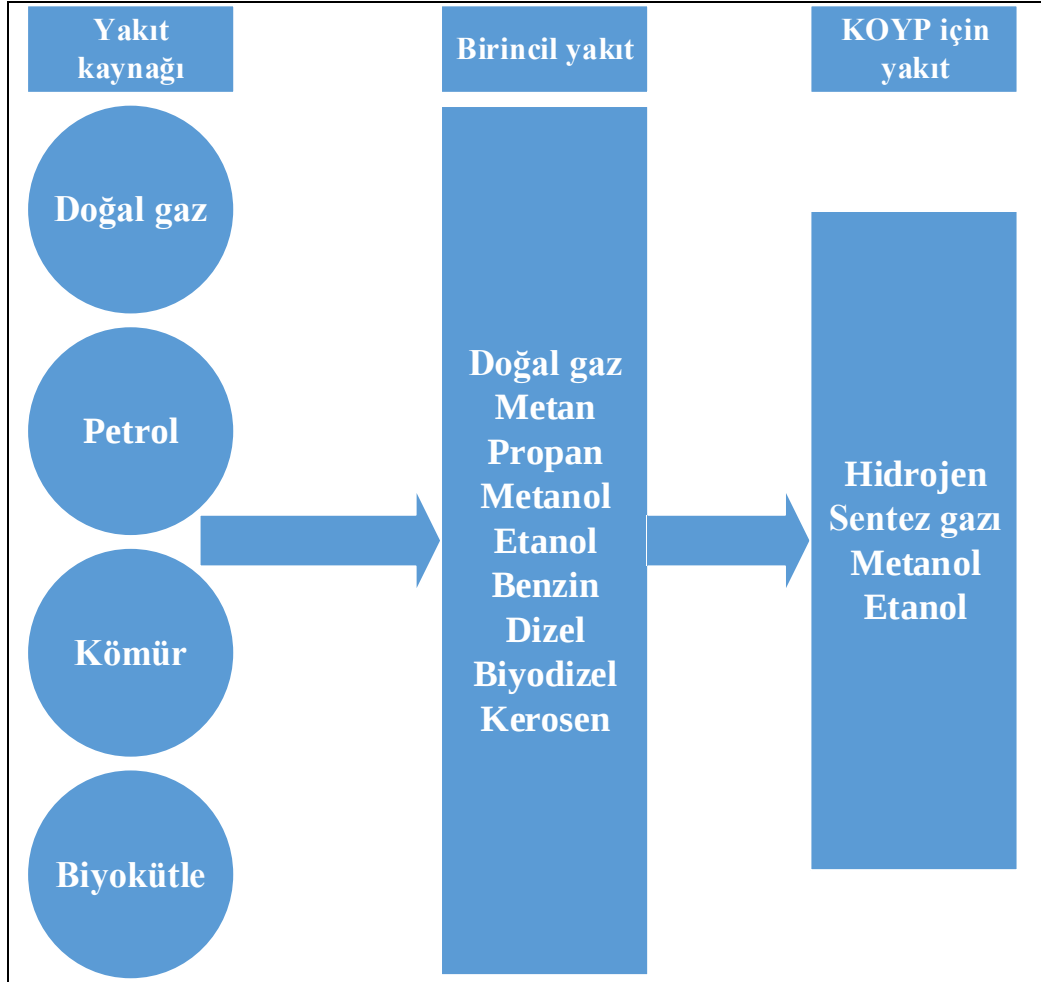
Katı oksit yakıt pilinin en önemli bileşenlerinden biri olan elektrolit tabakasının yüksek çalışma sıcaklığında elektronik iletkenliği en az ancak iyonik iletkenliği en yüksek seviyede olmalıdır. Çünkü elektronik iletkenlik, anotta serbest bırakılan elektronların, dış devreye ulaşmadan doğrudan katoda doğru akmasına izin verir. Ayrıca yakıt ve oksitleyici gazların karışmasını önlemek için gözenekli olmayan yoğun bir yapıya sahip olması gerekmektedir [108]. Elektrolit malzemesinin aktivasyon enerjisi (yaklaşık 0.1 eV) oldukça düşük olmalıdır.

Katı oksit yakıt pili teknolojisinin gelişmesi ile son zamanlarda düşük sıcaklıklarda da yüksek performans gösterebilecek elektrolit malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle 600°C altında iyonik iletkenliği 0.1 S/cm olan malzemeler üretme çalışmaları yapılmaktadır. Ara yüzey yüksek iyonik iletkenliği elde etmek için nano ve kompozit olarak adlandırılan nanokompozit malzeme kullanımı tercih edilmektedir.

2.6. Katı Oksit Yakıt Pillerinde Kullanılan Yakıtlar

Katı oksit yakıt pillerinde hidrojen yaygın olarak kullanılan bir yakıttır. Hidrojen gazına ek olarak yakıt dönüşüm sistemleri ile birincil yakıtın hidrojen veya hidrojen zengin gazlara dönüştürülerek yakıt olarak kullanımı mümkündür. Bu sistem ayrıca katı oksit yakıt pilinin çalışması üzerinde tehlikeli etkileri olabilecek kükürt ve karbon monoksit gibi bileşenlerin

uzaklaştırma konusunda da avantaj sağlamaktadır. Hidrojen gazının depolanması ve taşınması konusunda teknolojinin gelişmeye ihtiyaç duyması katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak farklı yakıt türlerine yönelimi arttırmıştır. Şekil 2.16'da yakıtların kaynaktan katı oksit yakıt pili için uygun yakıt dönüşüm süreci gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Yakıtların kaynaktan katı oksit yakıt pili için uygun yakıt dönüşümü [109]

2.6.1. Hidrojen yakıtı

Hidrojen yakıtı birincil bir enerji kaynağı olmamasına rağmen, pahalı olmayan basit teknolojiler sayesinde farklı yakıt kaynaklarının hidrojene dönüştürülmesi ile katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Hidrojen 2 g/mol moleküler ağırlığına sahip en hafif gazdır. Hidrojen gazı renksiz, kokusuz, zehirsiz ve oldukça hafif bir gazdır. Doğada en çok bulunan elementtir. Hidrojenin sahip olduğu enerji yüksektir, ayrıca saf hidrojen yakan bir motor neredeyse hiç zararlı gaz üretmez [110]. Hidrojen, nakliye, depolama ve kullanım açısından diğer yakıtlar kadar güvenli bir konumdadır [111].

2.6.2. Kömür yakıtı

Bir fosil yakıt olarak kömür, çok düşük bir hidrojen/karbon atom oranına sahiptir ve çoğu durumda, örneğin enerji santrallerinde enerji üretmek için yakılır. Kömürün gazlaştırılması ile elektrik üretmek için gaz türbinlerinde yakılan hidrojen içeren bir sentez gazı meydana gelir. Meydana gelen sentez gazı sülfürsüzleştirme ve karbon uzaklaştırma işlemlerinden sonra katı oksit yakıt pillerinde güvenle kullanılabilir. Kullanılan kömürün kalitesine bağlı olmak üzere, kömür içeriğindeki sülfür oranı azaldıkça sistem maliyeti artmaktadır. Bu nedenle kaliteli içeriğe sahip kömür kaynağına ulaşılmadıkça kömürün yakıt olarak katı oksit yakıt pillerinde kullanımı uygun değildir [112,113].

2.6.3. Petrol yakıtı

Ham petrolden elde edilen yakıtların bileşimi, büyük ölçüde petrol kaynağına ve rafineride işlenmesine bağlıdır. Bileşim, özellikle kok sorunlarıyla ilgili olarak yakıtın kullanılacağı sistemler üzerinde ciddi etkilere sahip olabilir. Günümüz yakıtları, içten yanmalı motorlar için özel olarak tasarlandığından, yakıt üretiminin, yakıtın daha etkili bir dönüşüm ve hidrojen üretimi ile sonuçlanacak herhangi bir kimyasal özelliğinden bağımsız olarak, bunları ticari olarak da uygun ürünler olması gerekmektedir.

Hem ham petrol hem de doğal gazdan türetilen yakıtlarda, kükürt içeriği, özellikle kullanılan katalizörlerin etkinliği için oldukça önem taşımaktadır. Yakıttaki kükürt içeriği rafinerilerde kükürt giderim işlemine bağlıdır ve yakıtta kalan kükürt miktarı yasal düzenlemelerle belirlenmektedir.

Benzin: Benzin, farklı hidrokarbon ve polimer bileşiği ile harmanlanmış ham petrolün damıtılması ile meydana gelmektedir. Benzin, önceleri ham petrolden kerozin elde edilmesi sırasında açığa çıkan atık bir bileşik olarak bilinmekteydi. Ancak, sahip olduğu yüksek yanma enerjisi öğrenildikten sonra daha çok otomobillerde kullanılan bir yakıt olarak kullanılmaya başlandı. Günümüzde benzin, modern içten yanmalı motorlar için gerekli olan fiziksel özelliklere sahip olan farklı rafineri oranların karışımı olarak karışımıza çıkmaktadır. Benzin içerisinde bulunmayan ve performans özelliklerini arttıran organik bileşikler benzin içerisinde katkı maddesi olarak kullanılabilmektedir. Ancak yakıt olarak benzin kullanılan

sistemlerde kükürt toleransı ve kok oluşumunun önlenmesi için uygun katalizör kullanımı bu katı oksit yakıt pillerinde önemli bir yer taşımaktadır.

Sıvılaştırılmış petrol gazı: Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), oda sıcaklığında ve orta basınçta sıvı fazda bulunan farklı hidrokarbon gazlarının bir karışımıdır. Sı için en yaygın ticarileştirilmiş ürünler, fosil yakıtlar arasında en yüksek özgül hidrojen içeriği sergileyen ve hidrojen depolama tankının ağırlığı dikkate alındığında, sıvılaştırılmış hidrojenin depolama ağırlığını bile geçebilen propan ve bütan karışımlarıdır.

Dizel: Dizel yakıtlar, ham petrolün damıtılması ile meydana gelen oktan sayısı düşük yakıtlardır. Dizel yakıtı, benzin ile karşılaştırıldığında daha az uçucu madde içermektedir. Bu nedenle dizel yakıt püskürtülmeli ve ön tutuşma riski olmadan havada buharlaştırılmaz. Dizel yakıt çok çeşitli özelliklere sahip olduğundan, farklı ülkelerde çeşitli tanımlar ve çeşitli sınıflandırmalar kullanılmaktadır.

Kerosen: Yukarıda bahsedilen yakıtlar gibi kerosen de ham petrolün damıtılması ile elde edilir. Kaynama sıcaklığı 150°C-350 °C sıcaklığı arasında olup uçuculuğu benzin ve dizel yakıtlarına göre daha azdır. Kerosen genellikle jet motor yakıtı olarak kullanılır. Kerosen yakıtı aromatik ve doymamış hidrokarbonlar ile kükürt bileşikleri içermediğinden benzin ve dizel yakıtından bileşim açısından farklıdır.

2.6.4. Doğal gaz yakıtı

Doğal gazdaki metan içeriği %70 ile %96 arasında değişirken başta etan, propan ve bütan olmak üzere diğer hidrokarbonlar katı oksit yakıt pili performansı üzerinde daha az etkiye sahiptir. Hem ham petrol hem de doğal gazdan türetilen yakıtlarda, kükürt içeriği, özellikle kullanılan katalizörlerin etkinliği açısından katı oksit yakıt piline oldukça önemlidir. Katı oksit yakıt pilinde yakıt olarak doğal gaz kullanılması için genellikle doğal gazın bir yakıt dönüştürücüsünde sentez gazına dönüştürülmesi ve katı oksit yakıt pili için hidrojen açısından zengin bir yakıt gazı sağlanması gerekmektedir.

2.6.5. Biyokütle yakıtı

Biyodizel: Biyodizelin içten yanmalı bir motorda yakıt olarak kullanımına ilişkin özellikleri, onu petrolden yapılan dizel yakıta eşdeğer bir yakıt haline getirir. Biyodizel, bitkisel yağların metanol veya etanol ile esterleştirilmesi yoluyla biyolojik kaynaklardan elde edilen bir yakıttır. Biyodizelin ana kimyasal bileşenleri bir yağ asidi çeşidi olan alkil esterleridir. Bu yakıt temiz yanma özelliklerine sahip olup neredeyse hiç sülfür içeriği bulunmamaktadır.

Etanol: Biyoetanol olarak da adlandırılan biyokütleden elde edilen etanol, şeker bazlı (şeker kamışı, şeker pancarı), nişasta bazlı (mısır, tahıl) ve selüloz bazlı (saman) gibi karbon bazlı ham maddelerin dönüştürülmesinden üretilir.

Metanol: Metanol gazı, sentez gazının bakır bazlı katalizörlerin varlığında yaklaşık 250°C sıcaklıkta dönüşümü ile elde edilir. Sentez gazı, doğal gazdan veya biyokütle gazlaştırmasından üretilmektedir. Kaynağa bağlı olarak, yüksek kaliteli ve temiz içerikli metanol üretmek için üretim sürecinde ek temizleme adımları uygulanmalıdır.

3. ELEKTROLİT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN SAYISAL MODELLENMESİ

Bu bölümde katı oksit yakıt pilinde meydana gelen kimyasal ve termodinamik olaylar, sayısal modellemede kullanılan denklemler üzerinden açıklanmıştır. Katı oksit yakıt pilinin modellenmesinde ilk ve en önemli adımlardan birisi ideal performansın tanımlanmasıdır. İdeal performans hesaplanmasının ardından, katı oksit yakıt pilinde meydana gelen kayıplar ve ideal olmayan davranışlar hesaplanarak, yakıt pilinin gerçek performansı hesaplanabilmektedir.

Model bir katı oksit yakıt pilinde kullanılan denklemler oldukça karmaşık ve lineer olmayan yapıda olduğundan sayısal olarak kesin sonuçlara ulaşmak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, denklemler ayrıklaştırılarak sayısal olarak çözülebilir cebirsel denklemlere dönüştürülmelidir. Kısmi diferansiyel denklem sistemini çözmek için uygun çözüm algoritması, denklem içerisindeki her bir terime ve bu terimlerin birbirleriyle ilişkilerine oldukça bağlıdır. Kısmi diferansiyel denklem sistemlerini ayrıklaştırmak için en yaygın kullanılan üç hesaplama tekniği aşağıdaki gibidir.

- Sonlu Fark Yöntemi
- Sonlu Hacim Yöntemi
- Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu fark yönteminin temel fikri, kısmi diferansiyel denklemlerindeki her bir terimi, ayrı bir nokta kümesinde sonlu fark yapısıyla değiştirmektir. Sonlu hacim ve sonlu elemanlar yönteminde ise ana geometri sonlu sayıda alt alana (elemanlar veya hacimler) bölünür ve çözümlemeler bu alt alanlara odaklanarak gerçekleştirilir. Sonlu hacim ve sonlu elemanlar yöntemlerinin temel farkı ise sonlu elemanlar yönteminde, her bir elemanın içindeki her değişkenin değişimi için ayrı bir fonksiyon tanımlanırken sonlu hacim yönteminde bu fonksiyonların her zaman 1 olarak alınmaktadır.

Sayısal modelleme genellikle boyutsallık veya modelleme düzeyine göre sınıflandırılmaktadır. 0-boyutlu çözümlemelerde performansı etkileyen temel denklemler göz önüne alınırken 1-boyutlu çözümlemelerde genellikle bağımsız değişken hücrenin yüzeyine normal (hücre kalınlığı boyunca) veya bazen eksenel koordinat olarak kabul edilir.

2-boyutlu çözümlerde bağımlı değişkenler hücre yüzeyine dik ve eksenel yönde olmak üzere iki yönde çözülür. Bağımlı değişkenler, boyutsallığa göre en eksiksiz olan 3-boyutlu çözümlemelerde üç koordinatta çözülür.

Tezde sayısal modelin oluşturulması ve sayısal analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan COMSOL Multiphysics yazılımı, her türlü bilimsel ve mühendislik problemini modellemek ve çözmek için kullanılan güçlü bir simülasyon ortamıdır [114]. Bu program aracılığıyla tek bir fizik türü için geleneksel modeller ile birleşik fizik olayları çözümlenebilmektedir. Modelleri çözerken, COMSOL Multiphysics yazılımı, bir dizi gelişmiş sayısal analiz aracı kullanarak problemi bir araya getirir ve çözer. Yazılım, analizi uyarlanabilir ağ iyileştirme (seçildiyse) ve çeşitli sayısal çözümler kullanarak hata kontrolü ile birlikte yürütmektedir.

3.1. Elektrokimyasal Reaksiyonlar

Katı oksit yakıt pillerinde saf H₂ gazı kullanımı geleneksel bir yöntemdir, ancak saf H₂ gazının pahalı olması katı oksit yakıt pilinin de maliyetini arttıracak ve kullanım alanını sınırlandıracaktır. Kömürden sentez gazlarının elde edilmesi ile hem kömürün doğada bol miktarda bulunması hem de gazlaştırma teknolojisinin gelişmişliği göz önüne alındığında ekonomik bir seçenek olmaktadır. Kömür gazları genel olarak yüksek miktarda H₂, CO ve su buharı ile daha düşük miktarlarda CO₂ ve başka bileşenler bulunmaktadır [115].

Reaksiyonlar sırasında genellikle sadece H₂ oksidasyonunun elektrokimyasal enerji üretimine katkıda bulunduğu, CH₄'ün karbon monoksit'e dönüştürüldüğü ve daha sonra su-gaz dönüşüm reaksiyonu yoluyla CO₂ ve H₂'ye dönüştürüldüğü varsayılır. Anot tabakasında meydana gelen reaksiyonlar Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 verildiği gibi özetlenebilir:



Katot tabakasında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon Eş. 3.3'te verilmektedir:



Yakıt pilinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon ise Eş. 3.4'te verilmektedir:



3.2. Gibbs Serbest Enerjisi ve Nernst Potansiyeli

Sabit sıcaklık ve basınçta çalışan bir katı oksit yakıt pilinden elde edilebilecek en fazla elektrik işi, Eş.3.5'de verildiği gibi elektrokimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki (ΔG) değişimi ile verilmektedir:

$$W_{\text{el}} = \Delta G = -nFE \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemde n reaksiyona giren elektron sayısını, F Faraday sabitini (96,487 coulomb/gr-mol elektron) ve E katı oksit yakıt pilinin ideal potansiyelini ifade etmektedir.

Gibbs serbest enerjisi ayrıca Eş. 3.6'da verildiği gibi de ifade edilebilmektedir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemde ΔH entalpi değişimini gösterirken ΔS ise entropi değişimini göstermektedir. Katı oksit yakıt pilinde mevcut bulunan toplam ısı enerjisi ΔH değerine eşittir. Kullanılabilir serbest enerji, sistem içindeki entalpi değişiminden kaynaklanan enerjiyi temsil eden değerinden entropi değişiminden kaynaklanan ve kullanılamayan enerji miktarını ifade eden $T\Delta S$ değerinin farkına eşittir.

Katı oksit yakıt pillerinin genel hücre reaksiyonu Eş. 3.7'de verilmiştir.



Reaksiyon sırasında meydana gelen Gibbs serbest enerjisi değişimi Eş. 3.8'de verildiği gibidir.

$$\Delta G^0 = cG_C^0 + \delta G_D^0 - \alpha G_A^0 - \beta G_B^0 \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemde G_i^o i türü için T sıcaklığındaki kısmi molar Gibbs serbest enerjisi olarak ifade edilmektedir.

Reaksiyonun Gibbs serbest enerjisi değişimi Eş. 3.9'daki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta G = \Delta G^o - RT \ln \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemde ΔG^o , standart basınçta (1 atm) ve T sıcaklığında reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişimi ve P_i , i türünün kısmi basıncını ifade etmektedir.

Gibbs serbest enerjisinden yola çıkarak Nernst potansiyeli denklemi de Eş. 3.10'da verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$V_{nernst} = -\frac{\Delta G^o}{2F} + \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \quad (3.10)$$

T sıcaklığındaki bir katı oksit yakıt pilinin tersinir potansiyeli olan E^o değeri, aynı sıcaklıktaki reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim (ΔG^o) kullanılarak hesaplanır.

3.3. Gerçek Hücre Voltajı ve Polarizasyon Eğrisi

Katı oksit yakıt pillerinde reaksiyonlar meydana geldiği sürece tersinmez kayıplar meydana gelerek katı oksit yakıt pilinin voltajını ideal hücre voltajından daha düşük hale getirmektedir. Aktivasyon kayıpları (ΔV_a), ohmik kayıplar (ΔV_{ohm}) ve konsantrasyon kayıpları (ΔV_k) olmak üzere üç temel kayıp bulunmaktadır.

3.3.1. Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon kayıpları yük transferi sırasında meydana gelen kayıplardır. Üçlü faz sınırında gerçekleşen elektrokimyasal yük transfer reaksiyonuna karşı oluşan bir direnç olarak yorumlanabilir. Yük transfer reaksiyonuna karşı gösterilen direnç arttıkça aktivasyon kayıpları da artmaktadır. Butler-Volmer denklemi, aktivasyon kaybı denklemini, dolaylı olarak akım yoğunluğu ile uygun bir şekilde ilişkilendiren bir denklemdir.

Genel olarak, anottan yük transferi sırasında elektronlar anot-elektrolit arayüzünde serbest bırakılır ve dış devre yoluyla katoda doğru hareket ederken, elektrik akımı bu harekete ters yönde hareket eder. Elektronlar ise her zaman katot olan pozitif kutba doğru hareket eder. Elektronların daha düşük potansiyele sahip bölgeye hareketini sağlamak için enerji sağlanması gerekir. Bu nedenle, elektrolitten anoda elektronları hareket ettirebilmek için enerji harcanması gerekmektedir. Elektronları hareket ettirmek için gereken enerji miktarı, anot ve elektrolit tabakaları arasındaki bağıl potansiyel farka bağlıdır.

Aktivasyon kayıpları Eş. 3.11’de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta V_a = \frac{RT}{n\alpha F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemde n reaksiyon sırasında transfer edilen elektron sayısını, α yük aktarım sayısını, i akım yoğunluğunu, i_0 ise değişim akım yoğunluğunu ifade etmektedir. i_0 ve α değeri anot ve katot tabakaları için farklı değerlere sahiptir. Bu nedenle toplam aktivasyon kaybı, Eş. 3.12’de gösterildiği gibi anot ve katot tabakaları ayrı ayrı hesaplanarak elde edilir.

$$\Delta V_a = \Delta V_{a,a} + \Delta V_{a,k} = \frac{RT}{n\alpha_a F} \ln \frac{i}{i_0^a} + \frac{RT}{n\alpha_k F} \ln \frac{i}{i_0^k} \quad (3.12)$$

3.3.2. Ohmik kayıplar

Ohmik kayıpların en önemli sebebi elektrolit tabakasının malzemesinin iyonik direncidir. Elektrot tabakaları da ayrıca sahip oldukları iç direnç nedeniyle ohmik kayıplara sebep olmaktadır. Katı oksit yakıt pilini oluşturan tabakaların elektronik özellikleri malzeme bileşimleri ve mikro-yapısına bağlıdır. Katı oksit yakıt pili için akım yoğunluğuna bağlı olarak ohmik kayıplar Eş. 3.13’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_{ohm} = iR_{top} \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklemde R_{top} toplam hücre direncini ifade etmektedir. Toplam hücre direnci Eş. 3.14’te verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{top} = \rho_e l_e + \rho_a l_a + \rho_c l_c + R_{temas} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemde ρ_e , ρ_a , ρ_k ifadeleri sırasıyla elektrolit, anot ve katot tabakalarının dirençleri, l_e , l_a , l_k ifadeleri sırasıyla elektrolit, anot ve katot tabakalarının kalınlıklarını ve R_{temas} ifadesi de sistemde bulunan temas noktaları sebebiyle oluşmuş dirençleri ifade etmektedir. Elektrolit tabakasında meydana gelen ohmik diren. Eş. 3.15’de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\rho_e = \frac{1}{\sigma_e} \quad (3.15)$$

Yukarıdaki denklemde σ_e elektrolit tabakasının iyonik iletkenliğini gösterir ve Eş. 3.16’da görüldüğü gibi sıcaklığın bir fonksiyonudur.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_0}{\left(\frac{T}{T_0}\right)} \exp\left(-\frac{E_e}{RT}\right) \quad (3.16)$$

Yukarıdaki denklemde E_e iyon transferi için gerekli olan aktivasyon enerjisini ifade etmektedir.

3.3.3. Konsantrasyon kayıpları

Konsantrasyon kayıpları, gözenekli elektrot yapıları içerisindeki kütle taşınım sınırlamalarından kaynaklanır. Katı oksit yakıt pilinin çalışması sırasında elde edilebilecek maksimum potansiyel, elektrokimyasal olarak aktif reaktan türlerinin kısmi basıncına ve Nernst denklemi ile açıklandığı gibi reaksiyon bölgesindeki elektrokimyasal yük transfer reaksiyonunun ürününe bağlıdır. Bununla birlikte, kütle taşınım sınırlamaları nedeniyle, reaksiyon bölgesindeki kimyasal türlerin konsantrasyonu, yakıt ve oksitleyici kanallarındakinden farklıdır. Konsantrasyon kayıpları, elektrot tabakalarının mikro yapısına bağlıdır. Katı oksit yakıt pilinin fazla kırımlı ve düşük gözenekli olması konsantrasyon kayıplarını arttırmaktadır. Katı oksit yakıt pilinde meydana gelen konsantrasyon kayıpları Eş. 3.17’de gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$\Delta V_k = -\frac{RT}{nF} \left[\frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{i}{i_k} \right) + \ln \left(1 - \frac{i}{i_a} \right) - \ln \left(1 + \frac{P_{H_2} i}{P_{H_2O} i_a} \right) \right] \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde i_k ve i_a sırasıyla katot ve anottaki reaktantların tamamen tükendiği andaki akım yoğunluklarını ifade etmektedir.

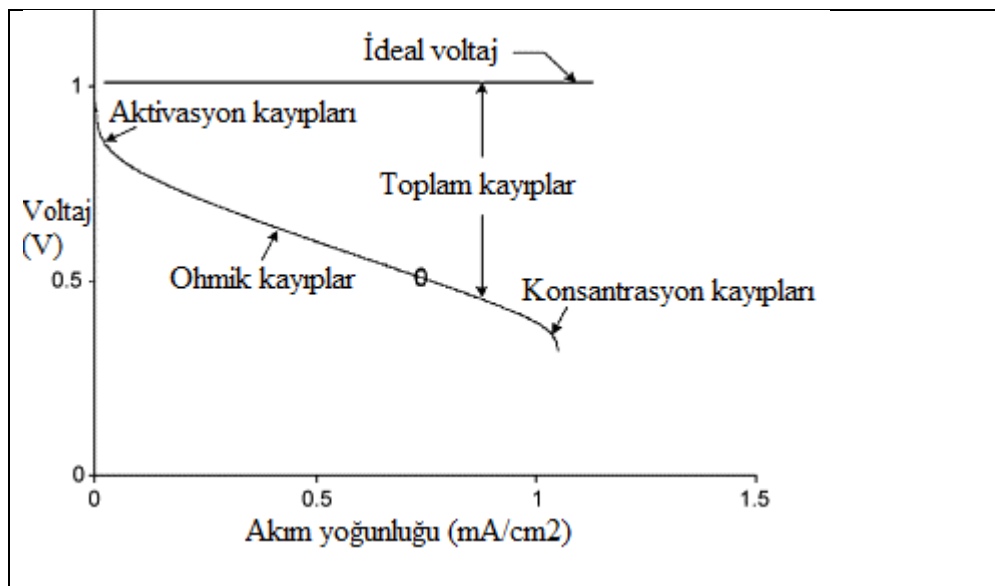
3.3.4. Gerçek hücre voltajı

Katı oksit yakıt pilinin gerçek hücre voltajı, Eş. 3.18’de gösterildiği gibi, Nernst potansiyeli ile elde edilen maksimum hücre voltajından kayıpların çıkarılması ile elde edilir.

$$V_{\text{yakıt pili}} = V_{\text{nernst}} - \Delta V_{\text{ohm}} - \Delta V_a - \Delta V_k \quad (3.18)$$

3.3.5. Polarizasyon eğrisi

Polarizasyon eğrisi katı oksit yakıt pilinde kayıplar sebebiyle ideal hücre voltajından ne kadar fark oluştuğunu gösteren eğridir. Polarizasyon eğrisi üzerinde reaksiyon hızından kaynaklanan kayıpların baskın olduğu bölge aktivasyon kayıplarını, direnç kayıplarının baskın olduğu bölgede ohmik kayıplar ve gaz taşınım kayıplarının baskın olduğu bölgede ise konsantrasyon kayıplarının etkisi açıkça görülmektedir. Polarizasyon eğrisinde hücre voltajına karşılık gelen anlık akım yoğunluğu değerleri incelenebilmektedir. Şekil 3.1’de ideal ve gerçek bir katı oksit yakıt pilinin karakteristiğinin karşılaştırıldığı polarizasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.1. İdeal ve gerçek bir katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrisi [116]

3.4. Genel Denklemler

Katı oksit yakıt pillerinin çalışmalarında korunum denklemleri önemli bir yer tutmaktadır. Korunum denklemleri genel olarak akış kanalları, elektrotlar, elektrolit ve ara bağlantılar için ayrı ayrı yazılır. Ayrıca katı oksit yakıt pilinin ve ara bağlantı elemanlarının geometrisine göre bu denklemler düzenlenebilir. Korunum denklemleri ele alınırken bazı kabuller yapılmalıdır. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Akışkan özellikleri sabit olmalıdır.
- Hava sıkıştırılmaz gaz kabul edilmelidir.
- Yakıt ve hava kanallarında kimyasal reaksiyonlar meydana gelmemelidir.

Katı oksit yakıt pilinin akış kanalları için kütle korunumu denklemi Eş. 3.19'da verildiği gibidir.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V) = S_m \quad (3.19)$$

Elektrot tabakaları için kütle korunumu denklemi ise Eş. 3.20'de verilmiştir.

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon V) = 0 \quad (3.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde ρ akışkan yoğunluğu, t zaman, V hız vektörü, S_m ek kütle kaynakları ve ϵ gözeneklilik olarak ifade edilmektedir.

Katı oksit yakıt pilinin akış kanalları için momentum korunumu Eş. 3.21'de ifade edildiği gibidir.

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \rho \vec{g} \cdot \vec{r} + \vec{S}_M \quad (3.21)$$

Elektrot tabakaları için momentum korunumu ifadesi ise Eş. 3.22'de verilmektedir.

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho \epsilon V) + \nabla \cdot (\rho \epsilon V V) = -\epsilon \nabla p + \nabla \cdot (\epsilon \zeta) + \frac{\epsilon^2 \mu V}{k} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemlerde ρ akışkan basıncı, $\vec{g}$ yer çekimi ivmesi, $\vec{\tau}$ gerilme tensörü, $\vec{S}_M$ dış kaynak, ζ kesme gerilim tensörü, μ akışkan viskozitesi ve k geçirgenlik olarak ifade edilmektedir.

Türlerin korunumu elektrolit ve elektrot tabakaları için sırasıyla Eş. 3.23 ve Eş. 3.24’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho c_i) + \nabla \cdot (\rho V c_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_{s,i} \quad (3.23)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \varepsilon c_i) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon V c_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_{s,i} \quad (3.24)$$

Yukarıdaki denklemlerde c_i türlerin kütle kesri, $\vec{J}_i$ türlerin difüzyon kütle akısı ve $S_{s,i}$ ek türlerin kaynağı olarak ifade edilmektedir.

Enerji korunumu denklemleri katı oksit yakıt pilinde akış kanalları ve elektrotlar için Eş. 3.25 ve Eş. 3.26’da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \varepsilon) - \frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho V \varepsilon) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_e + S_{rad} \quad (3.25)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho \varepsilon e) - \varepsilon \frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon V e) = \nabla \cdot (\varepsilon (k_{eff} \nabla T - \sum_i h_i \vec{J}_i)) + S_e + S_{rad} \quad (3.26)$$

Yukarıdaki denklemlerde e gazın iç enerjisi, k_{eff} elektrot tabakasının efektif makroskopik iletkenliği, T reaksiyon sıcaklığı, S_e kaynak teriminden kaynaklanan enerji, S_{rad} radyasyon kaynağından kaynaklanan enerji, h_i türlerin taşınımıyla ısı transfer katsayısı olarak ifade etmektedir.

Katı oksit yakıt pilinde Ohm kanununu da içeren yüklerin korunumu denklemi elektrolit tabakası için Eş. 3.27 ve Eş. 3.28’de görüldüğü gibi, ara bağlantı elemanları için ise Eş. 3.29 ve Eş. 3.30’da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$j_{io} = -\sigma_{io}^{eff} \nabla \varphi_{io} \quad (3.27)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{io}^{eff} \nabla \varphi_{io}) = S_{io} \quad (3.28)$$

$$j_{el} = -\sigma_{el}^{eff} \nabla \varphi_{el} \quad (3.29)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{el}^{eff} \nabla \varphi_{el}) = S_{el} \quad (3.30)$$

Yukarıdaki denklemlerde j_{io} iyonik akım yoğunluğu, σ_{io}^{eff} yalnızca iyonik iletkenliğe sahip malzemenin iletkenliği, φ_{io} iyonik potansiyel, j_{el} elektronik akım yoğunluğu, σ_{el}^{eff} yalnızca elektronik iletkenliğe sahip malzemenin iletkenliği, φ_{el} elektronik potansiyel, S_{io} ve S_{el} reaksiyonlardan meydana gelen kaynak terimi olarak ifade edilmektedir.

Ara bağlantı elemanlarının yük dengesi ise Eş. 3.31’de görüldüğü gibi hesaplanabilmektedir.

$$\nabla \cdot j_{io} = \nabla \cdot j_{el} \quad (3.31)$$

3.5. Yakıt Pili Verimliliği

Yakıt dönüşümü gerçekleştiren cihazlarda ısı verimliliği, Eş. 3.32’de görüldüğü gibi faydalı enerjinin ürün ve besleme akışları arasında oluşan entalpi farkına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{\text{Faydalı enerji}}{\Delta H} \quad (3.32)$$

Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yakıt pilleri gibi bir elektrokimyasal dönüştürücünün ideal çalışma durumunda, reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim, faydalı elektrik enerjisi olarak bilinmektedir. Bu durumda oluşan matematiksel ifade Eş. 3.33’da gösterildiği gibidir.

$$\eta_{ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.33)$$

Yakıt olarak hidrojen kullanan bir yakıt pili düşünüldüğünde standart koşullarda (298 K sıcaklık ve 1 atm basınç) ΔH değeri 285.8 kJ/mol iken ΔG değeri 237.1 kJ/mol olarak

bulunmaktadır. Bu durumda ideal durumdaki bir yakıt pilinin verimi Eş. 3.34'te verildiği gibi ifade edilir.

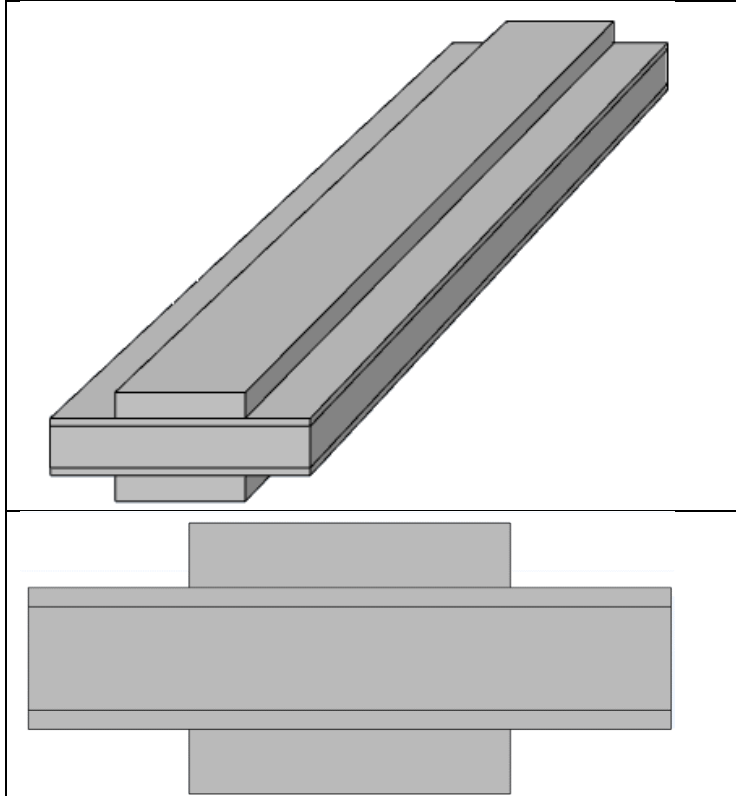
$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{237.1}{285.8} = 0.83 \quad (3.34)$$

Katı oksit yakıt pillerinde gerçek yakıt pili verimliliğinin bulunabilmesi açısından kolaylık sağlamak için, gerçek bir yakıt pilinin verimliliği, genellikle çalışma hücresi voltajının ideal hücre voltajına oranı cinsinden ifade edilir. Bir yakıt pilinin gerçek verimliliği Eş. 3.35'de gösterildiği gibi bulunmaktadır.

$$\eta = \frac{\text{Faydalı enerji}}{\Delta H} = \frac{\text{Faydalı güç}}{\Delta G/0.83} = \frac{V_{\text{gerçek}} \times \text{Akım}}{V_{\text{ideal}} \times \text{Akım} / 0.83} = \frac{(0.83)(V_{\text{gerçek}})}{E_{\text{ideal}}} \quad (3.35)$$

3.6. Model Geometrisi

Sayısal analizlerde kullanılan elektrolit destekli katı oksit yakıt pili yapısı COMSOL Multiphysics yazılımı aracılığıyla Şekil 3.2'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



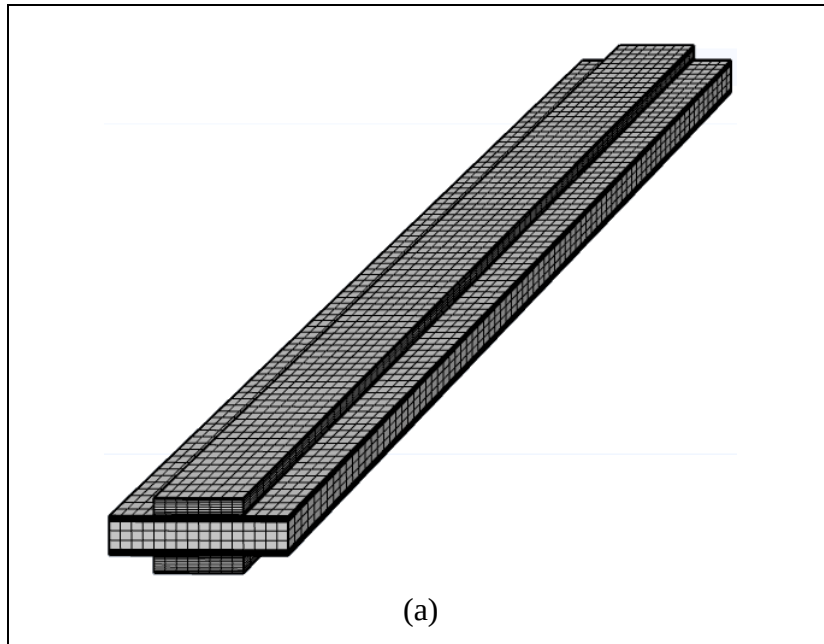
Şekil 3.2. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin yapısı

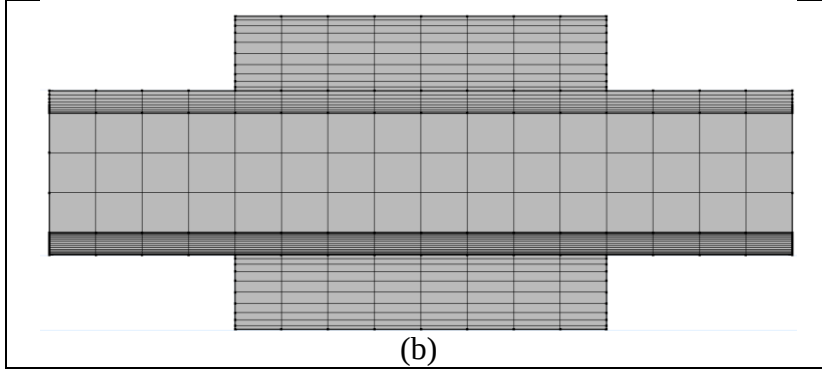
Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin yapısı yukarıdan aşağıya doğru katot akış kanalı, katot elektrot tabakası, elektrolit tabakası, anot elektrot tabakası ve anot akış kanalı olmak üzere beş temel tabakadan oluşmaktadır. Model katı oksit yakıt pilinin hücre özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Model katı oksit yakıt pilinin hücre özellikleri

Parametre	Değer
Anot tabakası kalınlığı	30×10^{-6} [m]
Elektrolit tabakası kalınlığı	160×10^{-6} [m]
Katot tabakası kalınlığı	30×10^{-6} [m]
Yakıt pili uzunluğu	0,04 [m]
Gaz akış kanalı yüksekliği	10×10^{-5} [m]
Gözeneklilik	0,4

Oluşturulan matematiksel model üzerinde çözümlemelerin yapılabilmesi için ağ yapısı tanımlanmıştır. Ağ yapısı yaklaşık 55 000 adet element ile kullanıcı tanımlı olarak oluşturulmuştur. Şekil 3.3’te oluşturulan ağ yapısı genel (a) ve önden (b) görünümü gösterilmektedir.



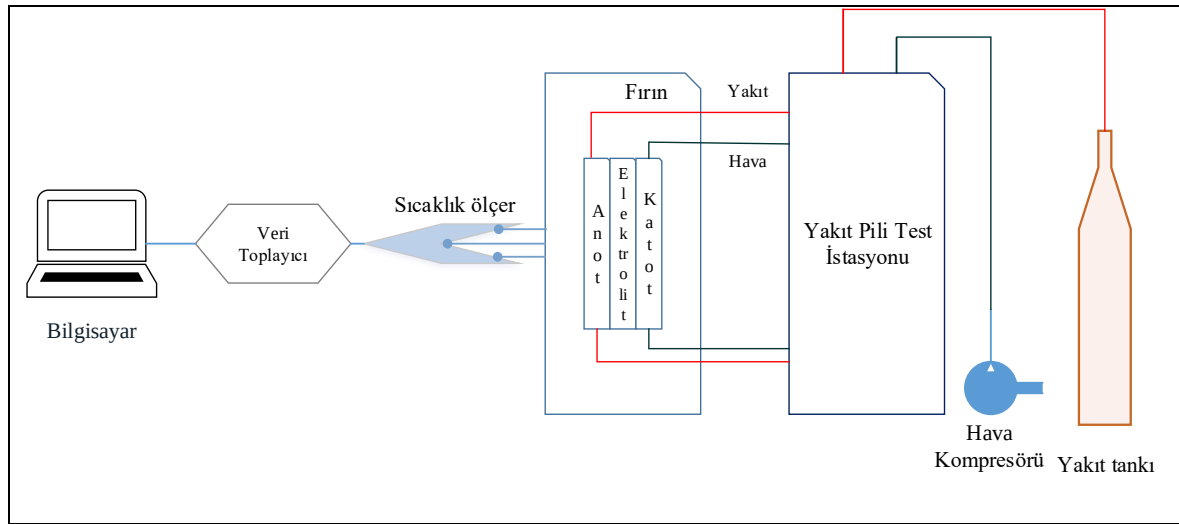


Şekil 3.3. Oluşturulan ağ yapısı genel (a) ve önden (b) görünümü

4. DENEY SİSTEMİ VE EKİPMANLARI

Tez kapsamında yapılan deneylerde Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi bünyesinde bulunan Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde üretimi gerçekleştirilen elektrolit destekli katı oksit yakıt pilleri kullanılmıştır [117–119]. Kullanılan katı oksit yakıt pilinin geometrik özellikleri ile sayısal modelleme de kullanılan yakıt pilinin geometrik özellikleri aynıdır. Üretimi yapılmış olan katı oksit yakıt pili, 'Yakıt Hücresi Test Laboratuvarı' ekipmanları kullanılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yakıt hücresi test laboratuvarında bulunan deney düzeneği Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Yakıt hücresi test laboratuvarında bulunan deney düzeneğinin şematik görüntüsü[120]

Test laboratuvarı, Arbin Instruments, FCTS, Teksas, Amerika marka ve menşei yakıt pili test istasyonu, sıcaklık denetleme aygıtı, yakıt pili katmanlarının farklı noktalarından sıcaklık ölçümü yapan sıcaklık ölçerler, yakıt pili test sonuçlarının alınmasını sağlayan veri toplayıcı ve elde edilen verilerin depolandığı bir bilgisayardan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin genel görünümü Resim 4.1'de görülmektedir.



Resim 4.1. Deney düzeneğinin genel görünümü

Yakıt pilleri yakıt olarak genellikle hidrojen gazı kullansalar da kömür ve biyokütle türevi yakıtlar gibi yerel ve/veya yenilenebilir enerji kaynaklarını da yakıt olarak kullanabilmektedirler. Dünyada en fazla rezerv bolluğuna sahip fosil yakıt olan ve çıkartılması ve kullanılması belirli bir bölge ile sınırlı olmayan kömür dünya üzerinde en çok kullanılan enerji kaynağıdır ve önümüzdeki yıllarda da stratejik olarak kullanılıp değerlendirileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte, kömürlerin doğrudan kullanımı, hava kirliliği ve sera gazı emisyonları gibi sağlığı olumsuz etkileyen bazı olumsuzluklara da sahiptir. Bu nedenle bu kaynağın alternatif yakıt olarak kullanıldığı uygulamalar önem arz etmektedir. Sentez gazları, kömürün koklaştırılması veya kömür ve biyokütlenin gazlaştırılmasıyla elde edilen ürünler olarak tanımlanır. Düşük alt ısı değere sahip olan sentez gazlarının yanma performansları, ısı değelerinden dolayı hava ile yakıldıkları takdirde pek çok fırın, yakıcı vb. uygulamalarda yeterli olmamaktadır [121]. Ancak katı oksit yakıt pillerinde kullanımlarının, yakıt olarak hidrojen gazı kullanan sistemler ile karşılaştırılabilir düzeyde olduğu yapılan literatür taraması ile öngörülmektedir.

Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde performans analizi yapılan hidrojen ve kömür gazlarının fiziksel özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

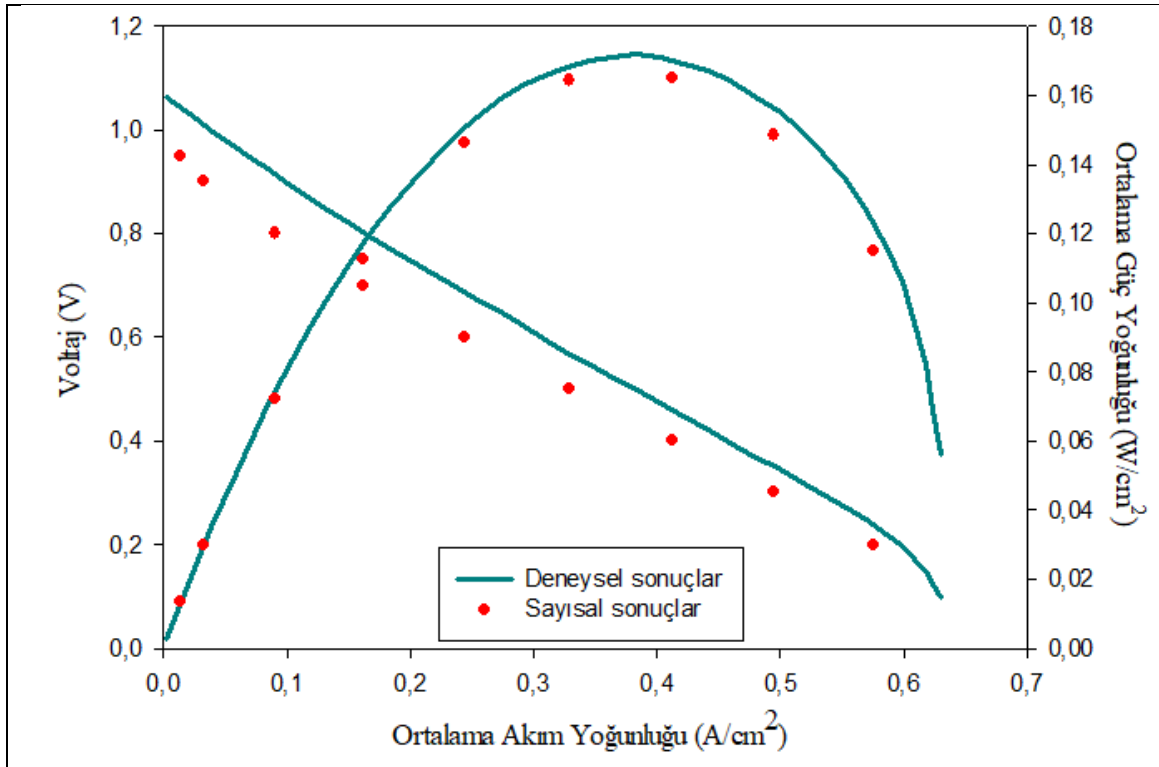
Çizelge 4.1. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde performans analizi yapılan hidrojen ve kömür gazlarının fiziksel özellikleri [122]

Yakıt	Bileşen	Hacimsel Oran [%]	Yoğunluk [kg/m ³]
Su gazı	H ₂	50	0,66
	CH ₄	0,5	
	CO	40	
	CO ₂	5	
	N ₂	4,5	
Jeneratör gazı	H ₂	12	1,07
	CH ₄	0,5	
	CO	28	
	CO ₂	5	
	N ₂	54,5	
Hidrojen gazı	H ₂	100	0,08

5. BULGULAR VE İRDELEME

5.1. Model Doğrulaması

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile yapılan sayısal analizlerden elde edilen ortalama güç yoğunluğu- ortalama akım yoğunluğu ve hücre voltajı için elde edilen değerler karşılaştırılarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Model doğrulaması için 800°C’de su gazının performans ve polarizasyon verileri kullanılmıştır. 800°C sıcaklıkta yakıt olarak su gazı kullanan elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin sayısal analiz sonuçları ile deneysel verilerinin karşılaştırılması Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. 800°C sıcaklıkta yakıt olarak su gazı kullanan elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin sayısal analiz sonuçları ile deneysel verilerinin karşılaştırılması

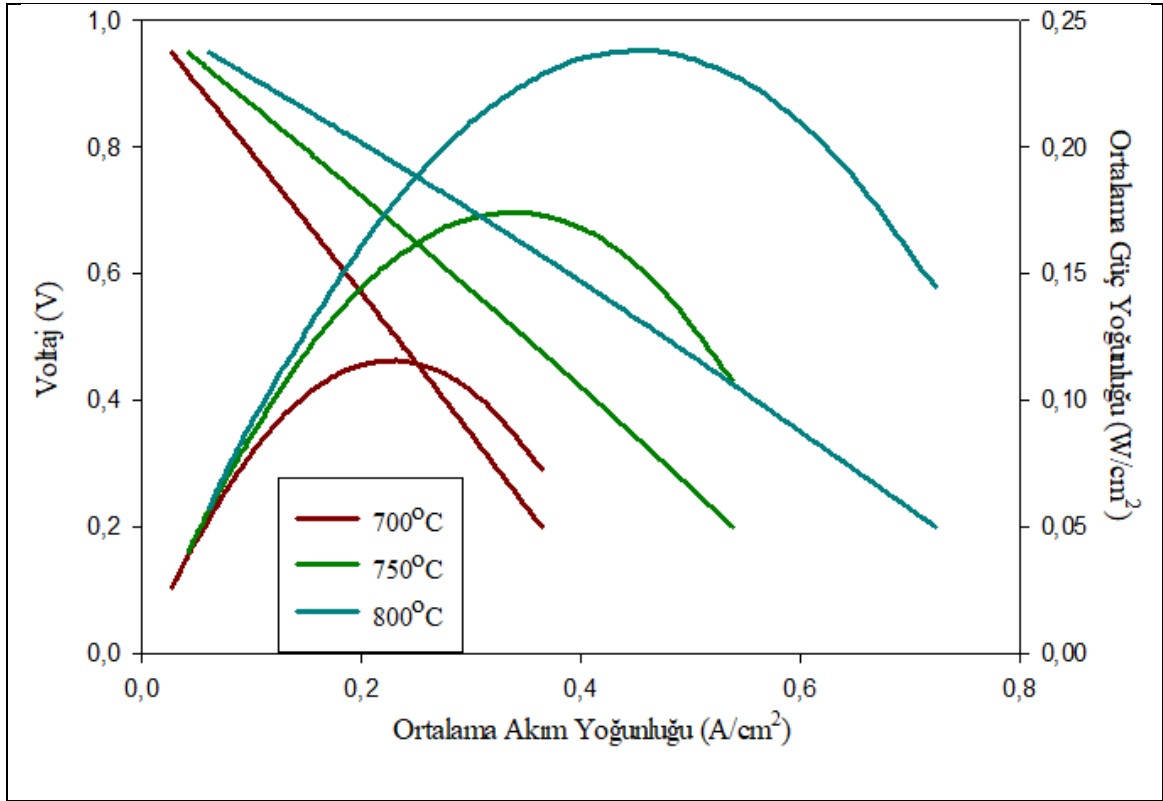
Yapılan karşılaştırma sonucunda deneysel veriler ile sayısal modellemenin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal analiz sonuçlarında maksimum güç yoğunluğu yaklaşık 0,16 W/cm² olarak bulunurken deneysel sonuçlarda bu değer yaklaşık olarak 0,18 W/cm² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre deney sistemiz ile sayısal modelimizin sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

5.2. Sayısal Analiz Sonuçları

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada değerlendirilen her bir parametre sayısal analizde de ayrıca değerlendirilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalardan elde edilemeyen yakıt hızının, gözenekliliğin, yakıt pili destek türünün performans üzerindeki etkileri de sayısal olarak incelenmiştir.

5.2.1. Performans üzerinde sıcaklığın etkisi

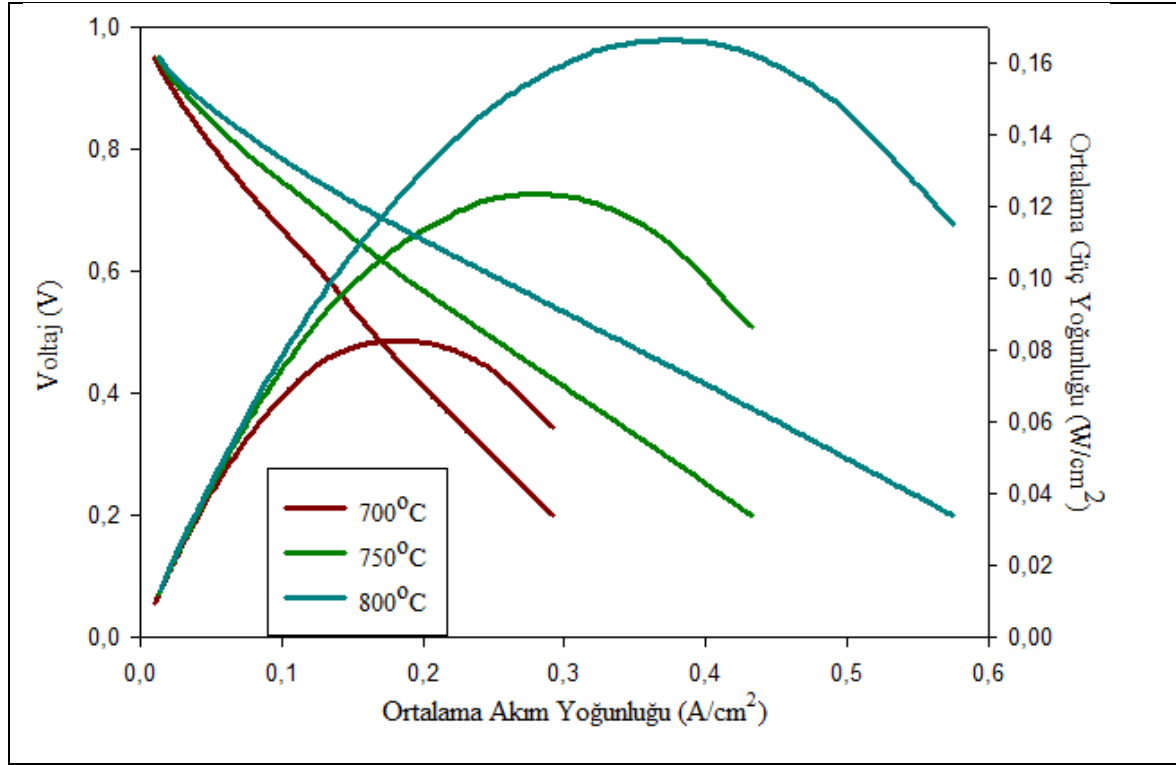
Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 700°C, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,37; 0,54 ve 0,72 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,12; 0,18 ve 0,24 W/cm²’dir.

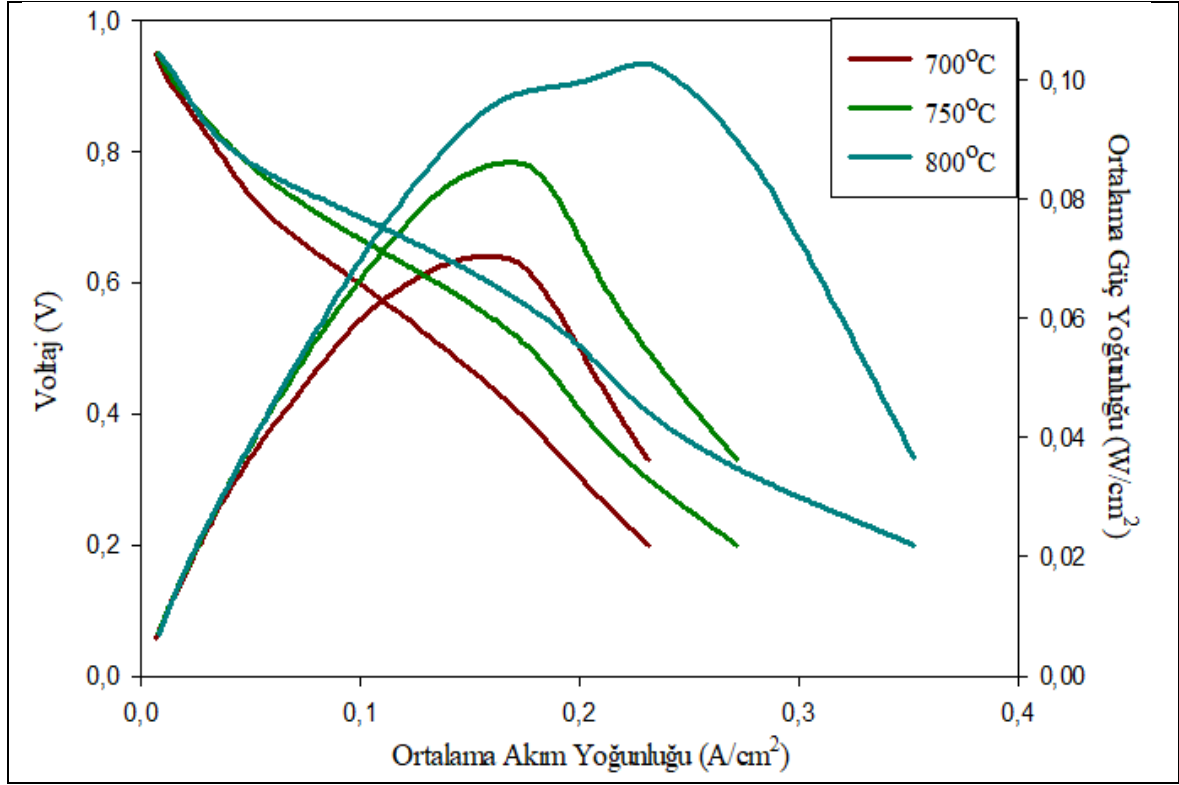
Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 700°C, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,30; 0,44 ve 0,57 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,08; 0,12 ve 0,17 W/cm²’dir.

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.4’te gösterilmektedir.



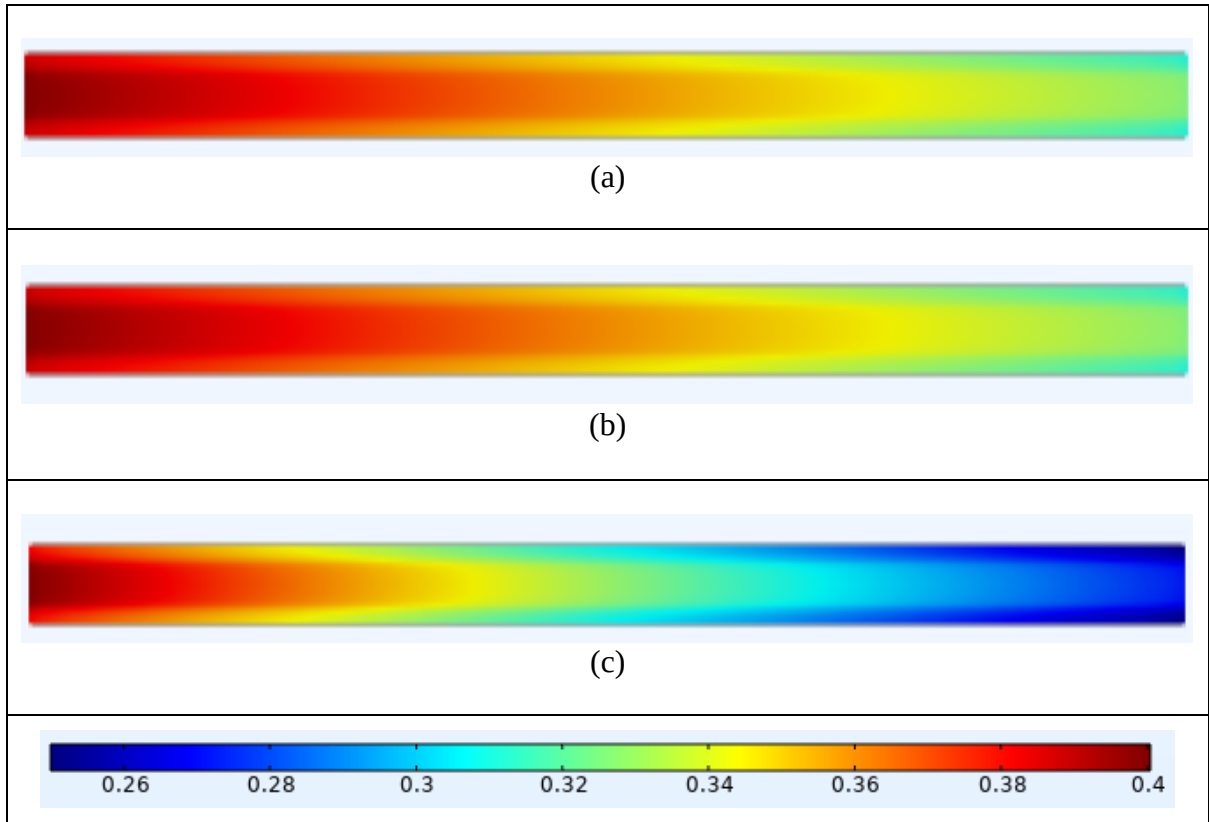
Şekil 5.4. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 700°C, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,23; 0,28 ve 0,35 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,07; 0,09 ve 0,11 W/cm²'dir.

Her üç yakıt türü için polarizasyon ve güç eğrileri incelendiğinde sıcaklık artışının akım yoğunluğu arttıkça daha önemli olduğu görülmektedir. Daha yüksek çalışma sıcaklığı, daha düşük tersinir kayıplara yol açarken elektrot reaktivitesini, iyonik iletkenliği ve difüzyon katsayılarını arttırır. Tersinir kayıpların sıcaklık artışına duyarlılığı, genel kayıplara göre daha az olduğundan çalışma sıcaklığı arttıkça katı oksit yakıt pilinin performansı artar. Bununla birlikte, gerçek bir uygulamada katı oksit yakıt pilinin hem gerekli termal kararlılığa sahip bir yığının hem de çalıştırılabilen tüm sistemin imalatında yer alan yatırım maliyeti ve bozulma sorunu seçilecek sıcaklıkta aynı anda dikkate alınmalıdır [123]. Özellikle 800 °C üzerindeki sıcaklıklarda sıcaklık artışına bağlı olarak katı oksit yakıt pilinin tabakalarında mikro boyutta bozunumlar meydana gelmektedir [124].

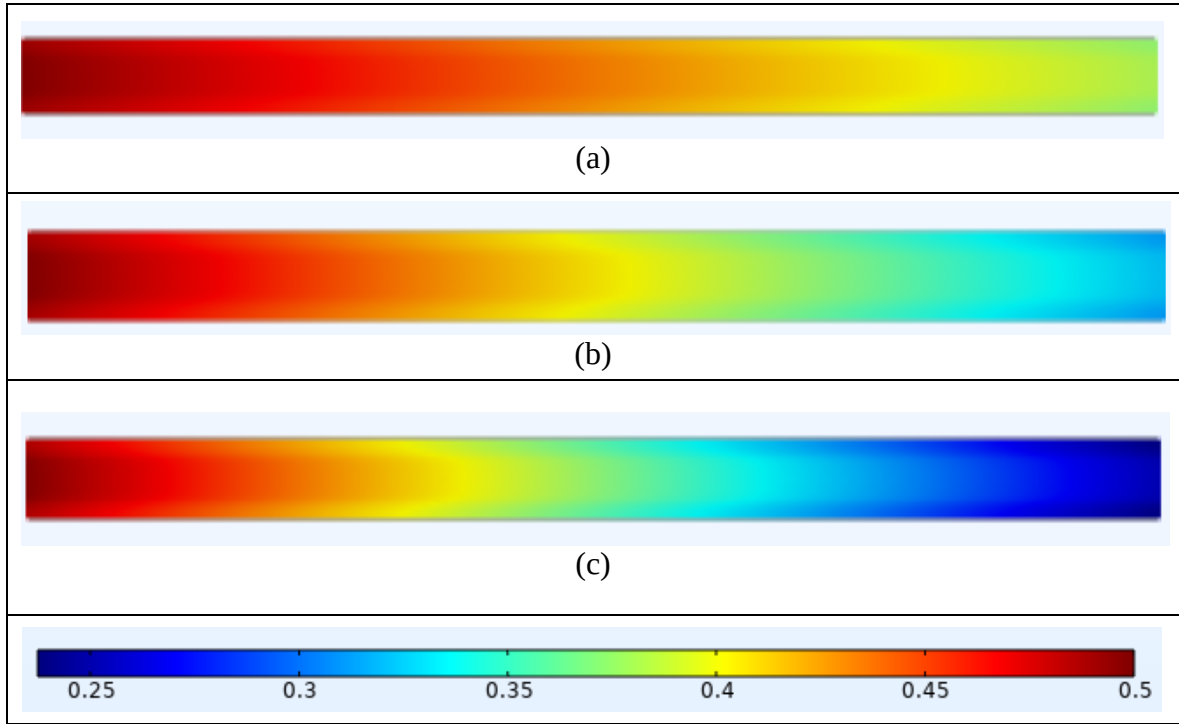
Elektrolit tabakasında oksijen iyonu iletkenliği üzerinde sıcaklık çok önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın artması ile elektrot tabakaları daha reaktif hale geldiği için ohmik kayıplar ve aktivasyon kayıpları önemli derecede azalmaktadır. Ancak sıcaklık arttıkça konsantrasyon kayıplarının arttığđı bilinmektedir.

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.5'te gösterilmektedir.



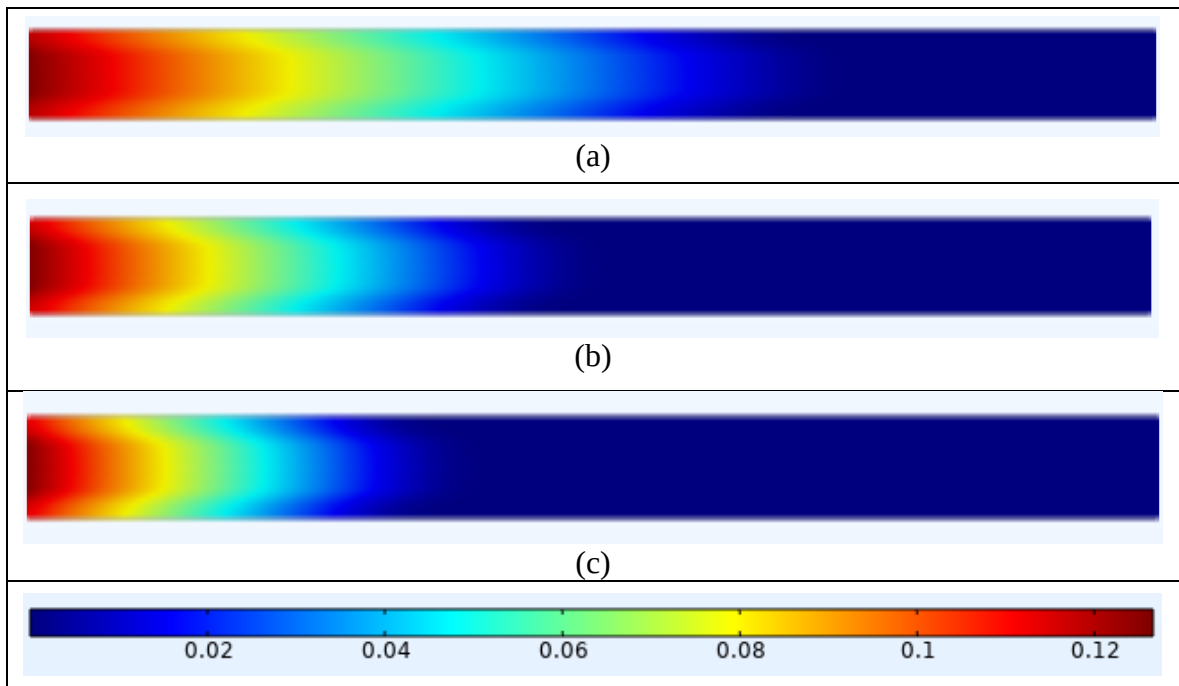
Şekil 5.5. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi a) 700°C b) 750 °C c) 800 °C

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi a) 700°C b) 750 °C c) 800 °C

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.7’de gösterilmektedir.

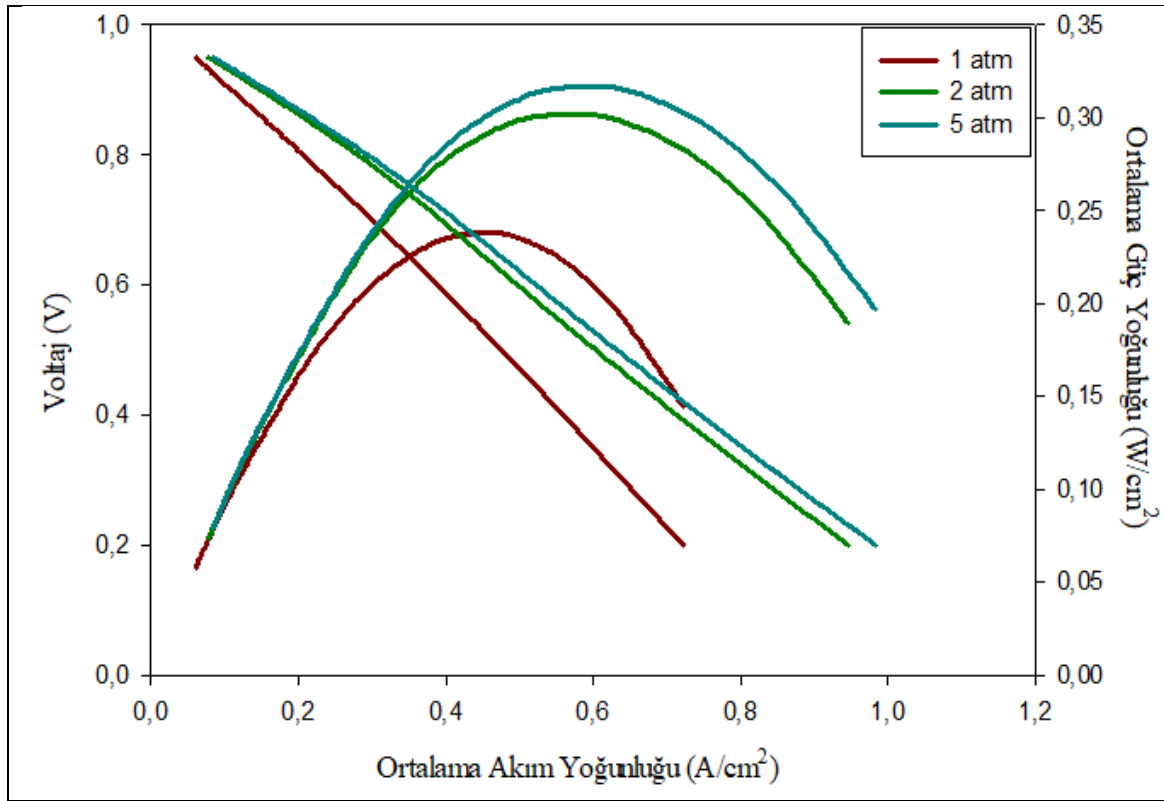


Şekil 5.7. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi a) 700°C b) 750 °C c) 800 °C

Yukarıdaki hidrojen gazı mol dağılımları incelendiğinde her bir yakıt ve sıcaklık için hidrojen gazının elektrokimyasal tepkimeler sebebiyle anot akış kanalı boyunca azalarak tükendiği görülmektedir. Hidrojen tüketimi sıcaklığın önemli bir fonksiyonudur. Yüksek çalışma sıcaklıklarında hidrojen gazının elektro-oksidasyon kinetiği ve elektrolite beslenen gazın difüzyon katsayısı arttığından sıcaklık arttıkça hidrojen tüketiminin de arttığı gözlemlenmektedir [125].

5.2.2. Performans üzerinde basıncın etkisi

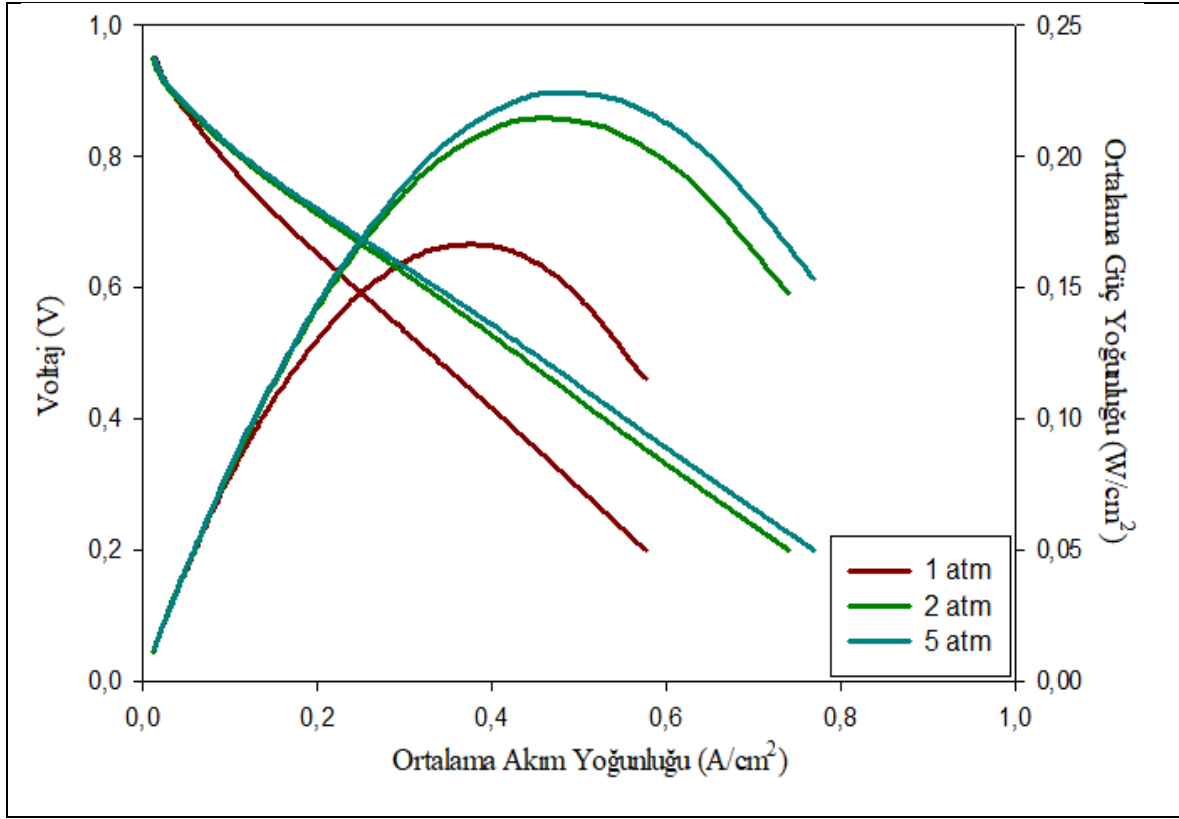
Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi Şekil 5.8’de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 1 atm, 2 atm ve 5 atm basınçlarda sırasıyla 0,73; 0,95 ve 0,98 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu basınç değerleri için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,24; 0,29 ve 0,31 W/cm²’dir.

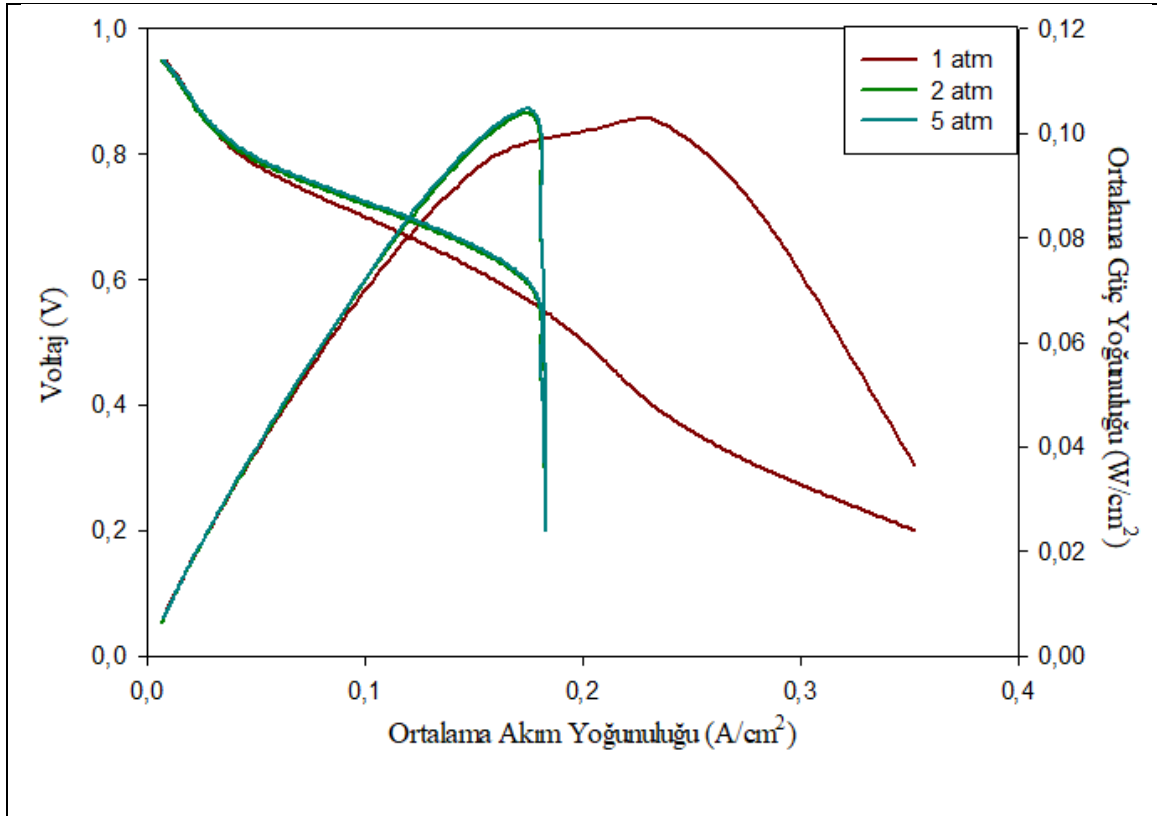
Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 1 atm, 2 atm ve 5 atm basınçlarda sırasıyla 0,57; 0,74 ve 0,77 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu basınç değerleri için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,17; 0,22 ve 0,23 W/cm²'dir.

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi

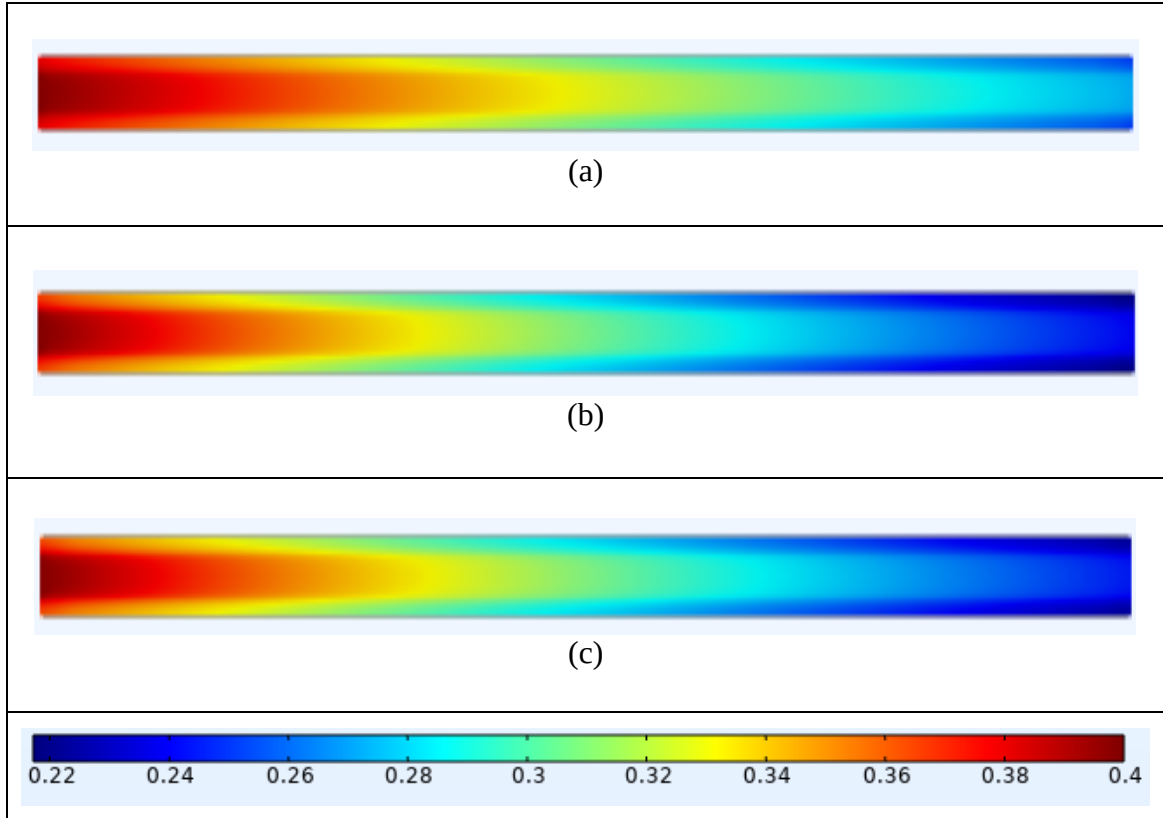
Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 1 atm basınçta $0,35 \text{ A/cm}^2$, 2 atm ve 5 atm basınçlarda ise $0,18 \text{ A/cm}^2$ olarak bulunmuştur. Ayrıca bu basınç değerleri için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,11; 0,103 ve 0,104 W/cm^2 'dir. Jeneratör gazı kullanıldığında hidrojen ve su gazı kullanılan analizlerin aksine basınç arttıkça hücrenin ortalama güç yoğunluğu artmasına rağmen çekilen akım değerinin artmadığı ve dolayısıyla güç yoğunluğunun da hızla düştüğü görülmektedir.

Sayısal analiz sonuçlarına göre işletme basıncının artması ile birlikte yakıt pilinin açık devre voltajının da arttığı görülmektedir. Bu durum termodinamik denklemlerden kaynaklanmaktadır. 3. Bölümde anlatıldığı gibi yakıt pilinde açık devre voltajı ile doğrudan ilgili olan Nernst denkleminde (Eş. 3.10) gazların kısmi basıncı önemli bir parametredir. İşletme basıncının artmasıyla gazların kısmi basıncı da artacağından açık devre voltajının artması beklenen bir durumdur. Yakıt pilinde basıncın artması ile birlikte hücre kinetiği ve iletimi de arttığından katı oksit yakıt pilinin performansı da artmaktadır [126].

Aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları işletme basıncı arttıkça azalırken denge potansiyeli artmaktadır. Kayıpların azalması, denge potansiyelinin artmasından daha az miktarda

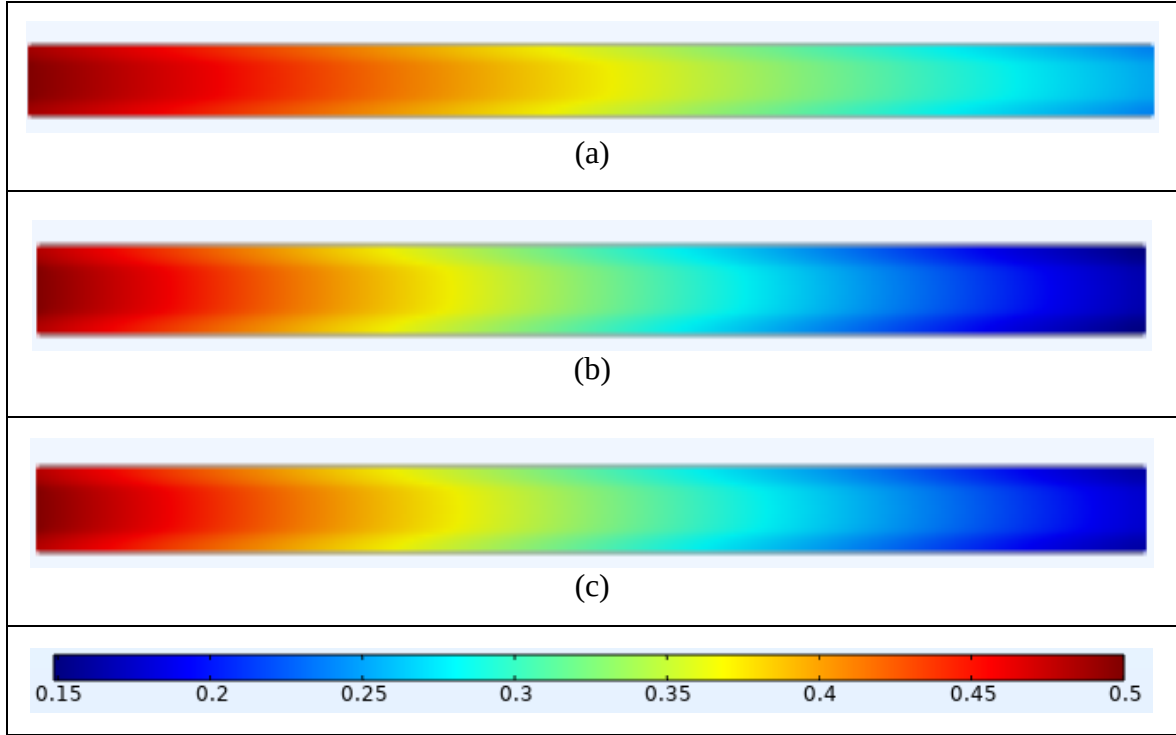
meydana gelmektedir. Bu durum, basınç arttıkça katı oksit yakıt pilinin performansının artmasının sebeplerinden birisidir [123].

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.11’de gösterilmektedir.



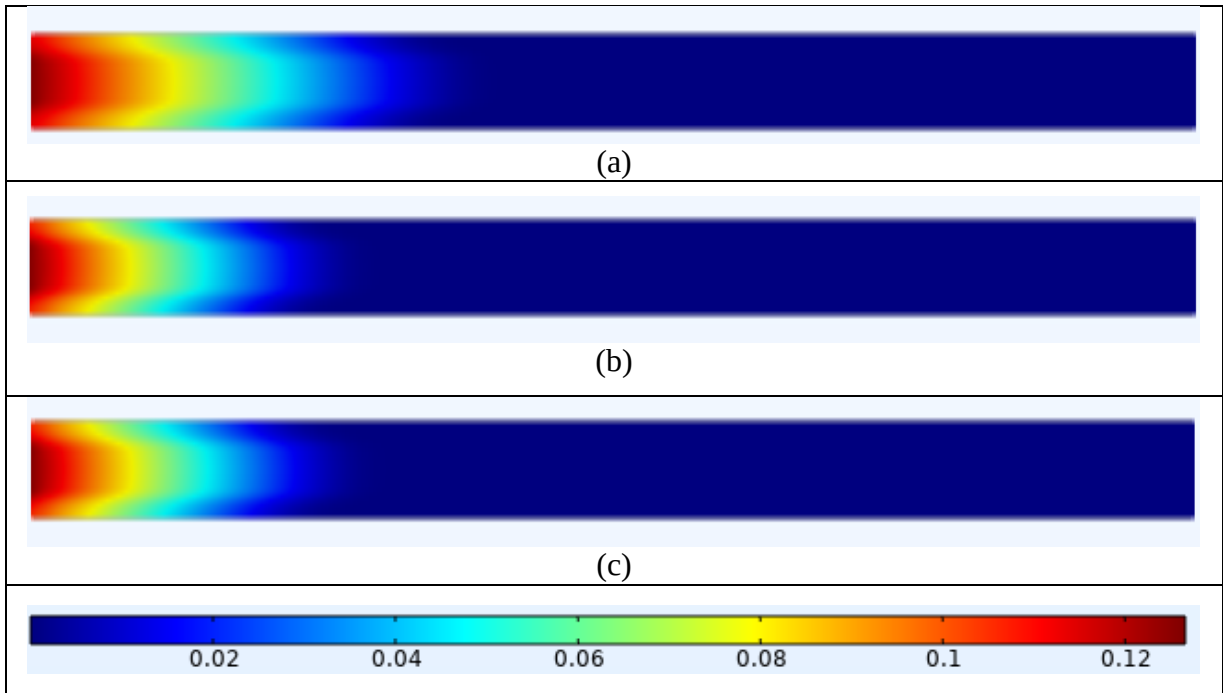
Şekil 5.11. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde basıncın etkisi a) 1 atm b) 2 atm c) 5 atm

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.12’de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde basıncın etkisi a) 1 atm b) 2 atm c) 5 atm

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.13’de gösterilmektedir.

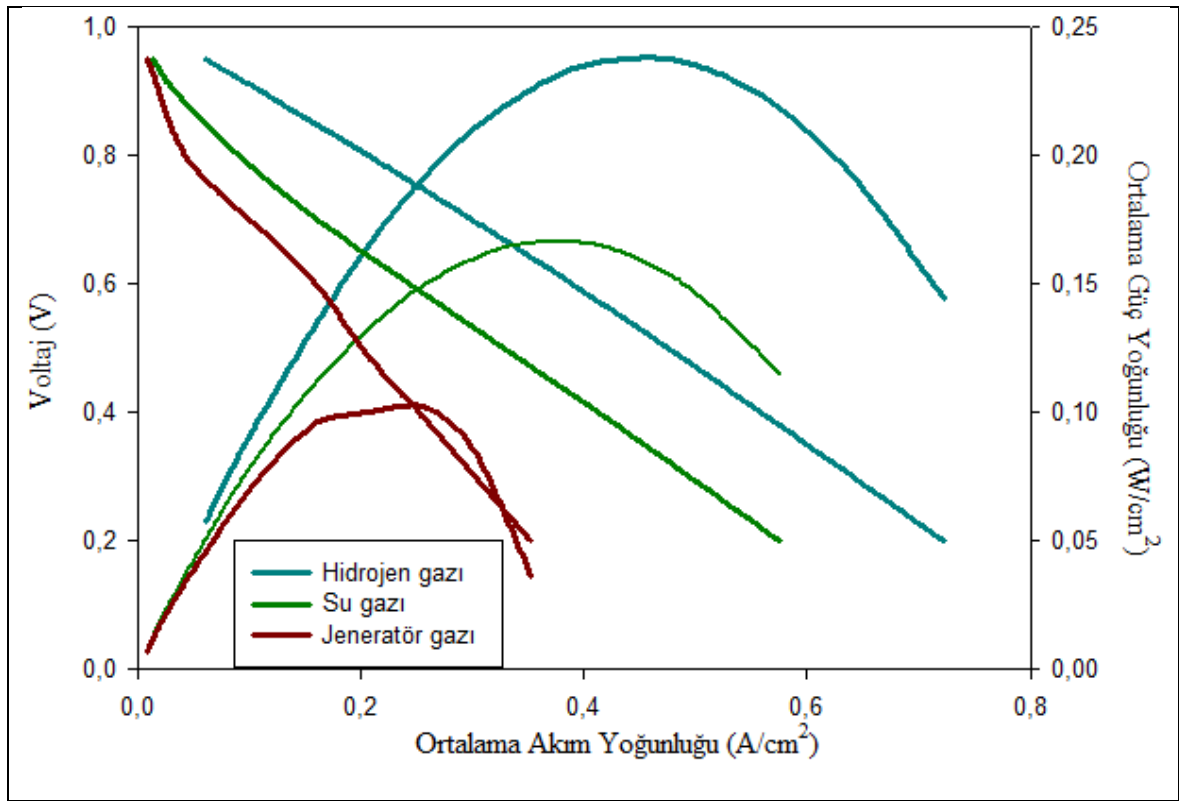


Şekil 5.13. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde basıncın etkisi a) 1 atm b) 2 atm c) 5 atm

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde her üç yakıt türü için basıncın 1 atm'den 5 atm'ye artırılması sonucunda hidrojen mol dağılımı değerinde küçük ama hızlı bir artış olduğu ve difüzyon kayıplarının hızla azalarak hidrojen tüketim hızının azaldığı görülmektedir [16,125].

5.2.3. Performans üzerinde yakıt içeriğinin etkisi

Yakıt olarak farklı oranlarda hidrojen içeriğine sahip yakıt kullanılan katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıkta ortalama akım yoğunluğu ve ortalama güç yoğunluğu grafiği Şekil 5.14'te gösterilmektedir.



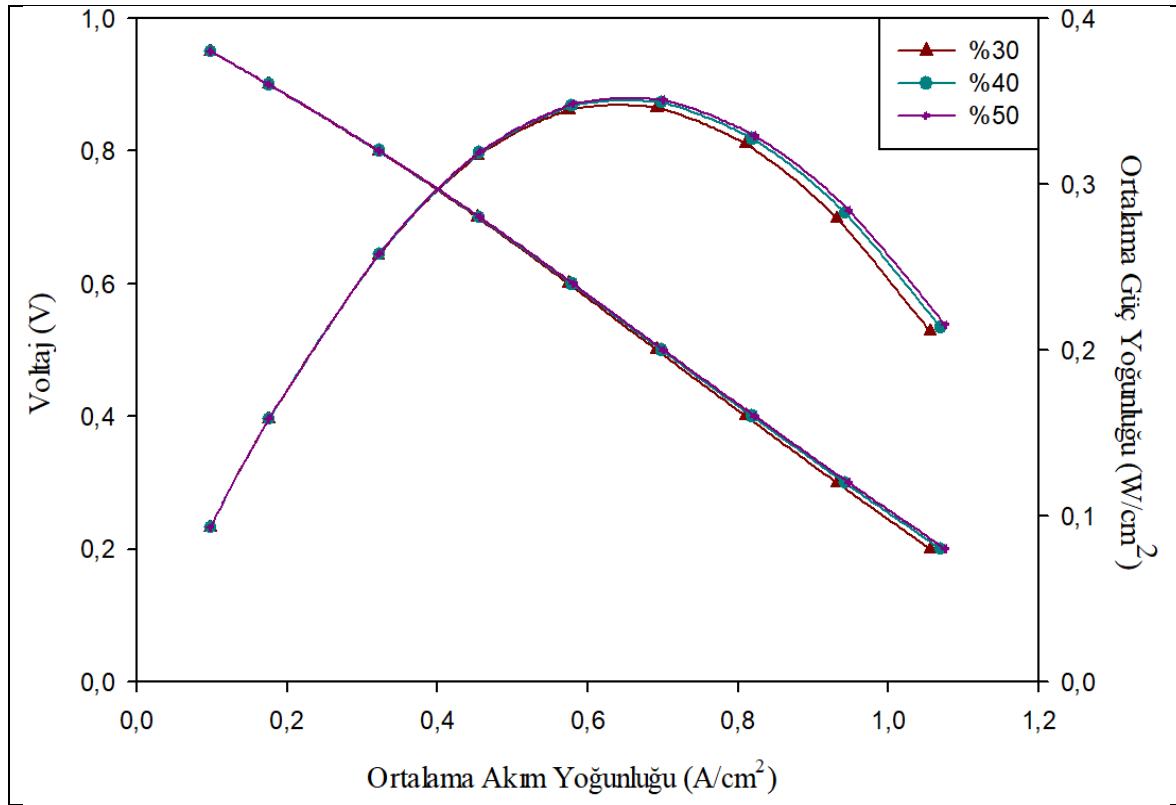
Şekil 5.14. Yakıt olarak farklı oranlarda hidrojen içeriğine sahip yakıt kullanılan katı oksit yakıt pilinin performansı

Bir yakıt pilinde yakıt olarak saf hirojen kullanıldığında en yüksek akım yoğunluğu 0,72 A/cm² ve en yüksek güç yoğunluğu 0,24 W/cm², %50 hidrojen içeriğine sahip su gazı kullanıldığında en yüksek akım yoğunluğu 0,57 A/cm² ve en yüksek güç yoğunluğu 0,17 W/cm², % 12 hidrojen içeriğine sahip jeneratör gazı kullanıldığında ise en yüksek akım yoğunluğu 0,35 A/cm² ve en yüksek güç yoğunluğu 0,11 W/cm² olarak bulunmuştur.

Aktivasyon kayıpları yakıt içerisindeki hidrojen miktarına bağlı değildir. Ancak konsantrasyon kayıplarının hidrojen içeriği miktarına özellikle yüksek akım yoğunluklarında oldukça bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca yakıt içeriğindeki hidrojen oranı arttıkça yük transferi, yüzey difüzyonu ve gaz difüzyon işlemlerinin verimleri artmaktadır [81]. Bu nedenle yakıt içeriğindeki hidrojen miktarı arttıkça katı oksit yakıt pilinin performansı artmaktadır.

5.2.4. Performans üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi

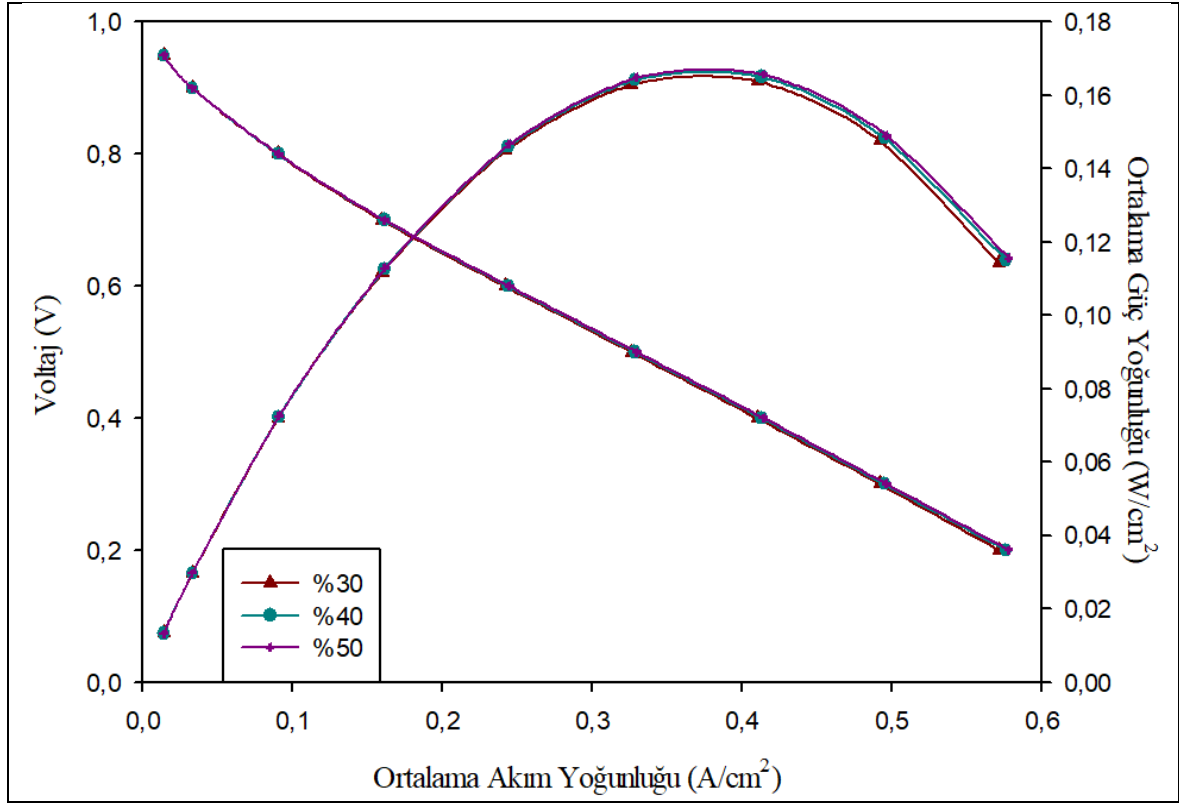
Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıktaki performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu %30, %40 ve %50 anot ve katot tabakası gözenekliliklerinde sırasıyla 1,05; 1,06 ve 1,07 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu gözeneklilik değerlerinde maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,34; 0,35 ve 0,36 W/cm²'dir.

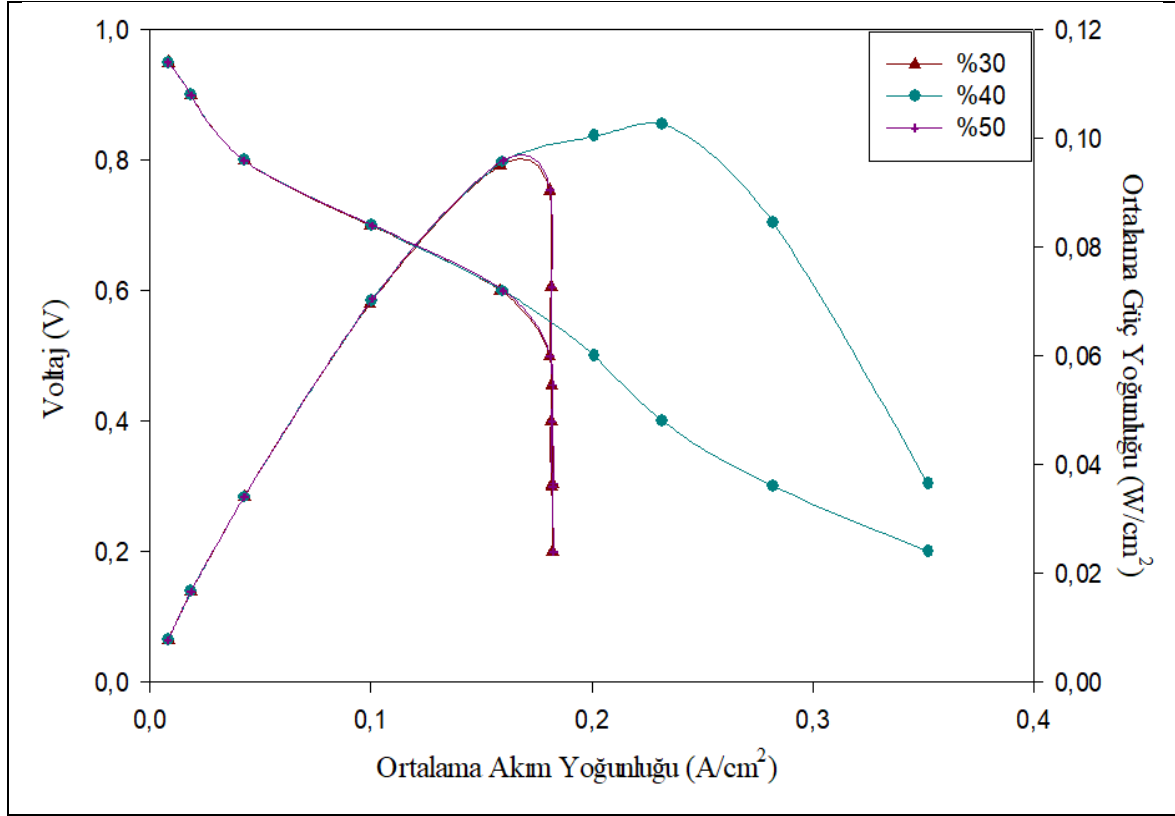
Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıktaki performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi Şekil 5.16'da gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu %30, %40 ve %50 anot ve katot tabakası gözenekliliklerinde yaklaşık olarak 0,57 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu gözeneklilik değerlerinde maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,17; 0,16 ve 0,15 W/cm²'dir.

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıktaki performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi Şekil 5.17'de gösterilmektedir.



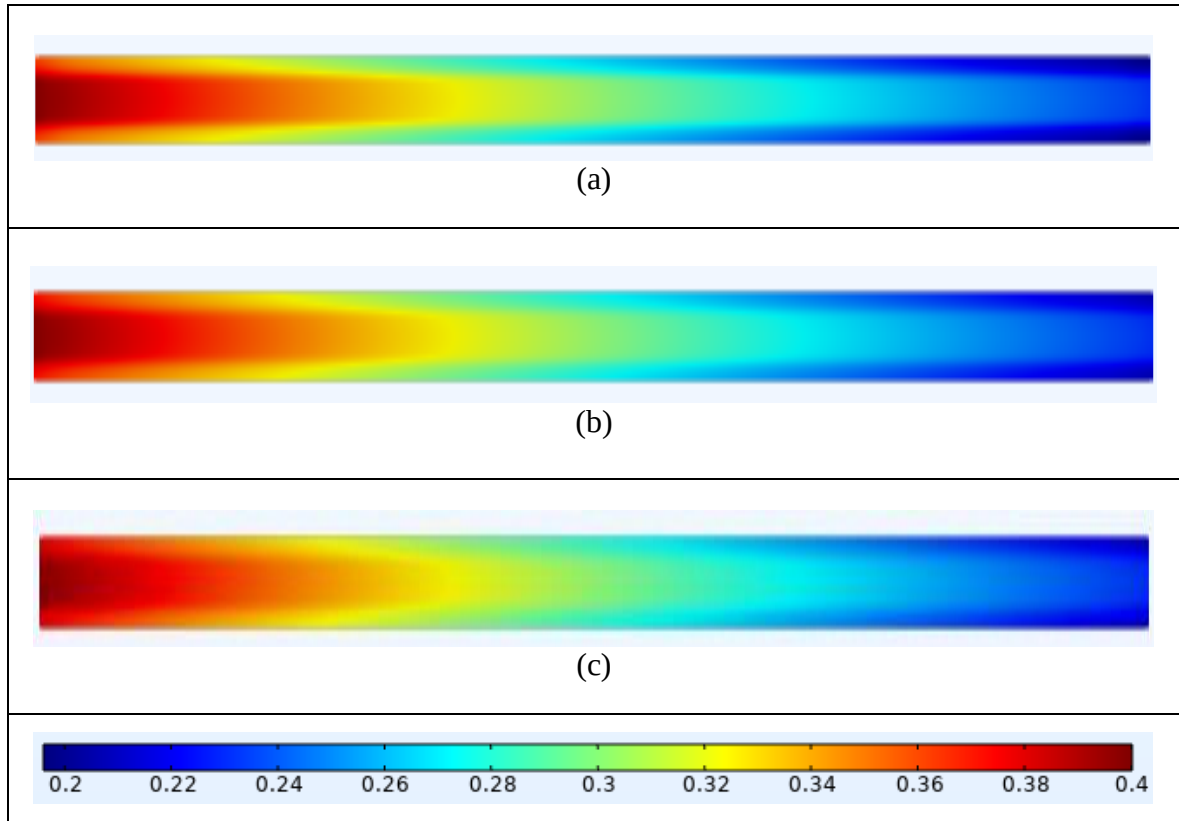
Şekil 5.17. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu %30, %40 ve %50 anot ve katot tabakası gözenekliliklerinde sırasıyla 0,18; 0,35 ve 0,18 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu gözeneklilik değerlerinde maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,1; 0,11 ve 0,1 W/cm²'dir.

Katı oksit yakıt pilinin anot tabakası gözeneklere ihtiyaç duyar. Gözenek yapısı sayesinde üçlü faz sınırı bölgesinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlardan elektrik enerjisi üretilir. Yüksek gözeneklilik üçlü faz sınırı bölgesinin uzunluğunu azaltarak sayısını artırır. Böylece, gaz taşınımı güçlenerek etkin difüzyonun oranı artar. Eğer elektrot tabakaları yeterli gözenek boşluklarına sahipse gaz hücre içerisine girerken ve çıkarken zorlanmaz. Analiz sonuçlarına göre, gözeneklilik arttıkça katı oksit yakıt pili performansının da arttığı görülmüştür. Katı oksit yakıt pilinin performansı yüksek elektrot gözenekliliğinde artan etkili difüzyon katsayıları nedeniyle daha az bir artış göstermektedir. Gözenekli elektrot yapısında elektrot gözenekliliğinin artması ile hidrojen konsantrasyon gradyanı azalmaktadır [127].

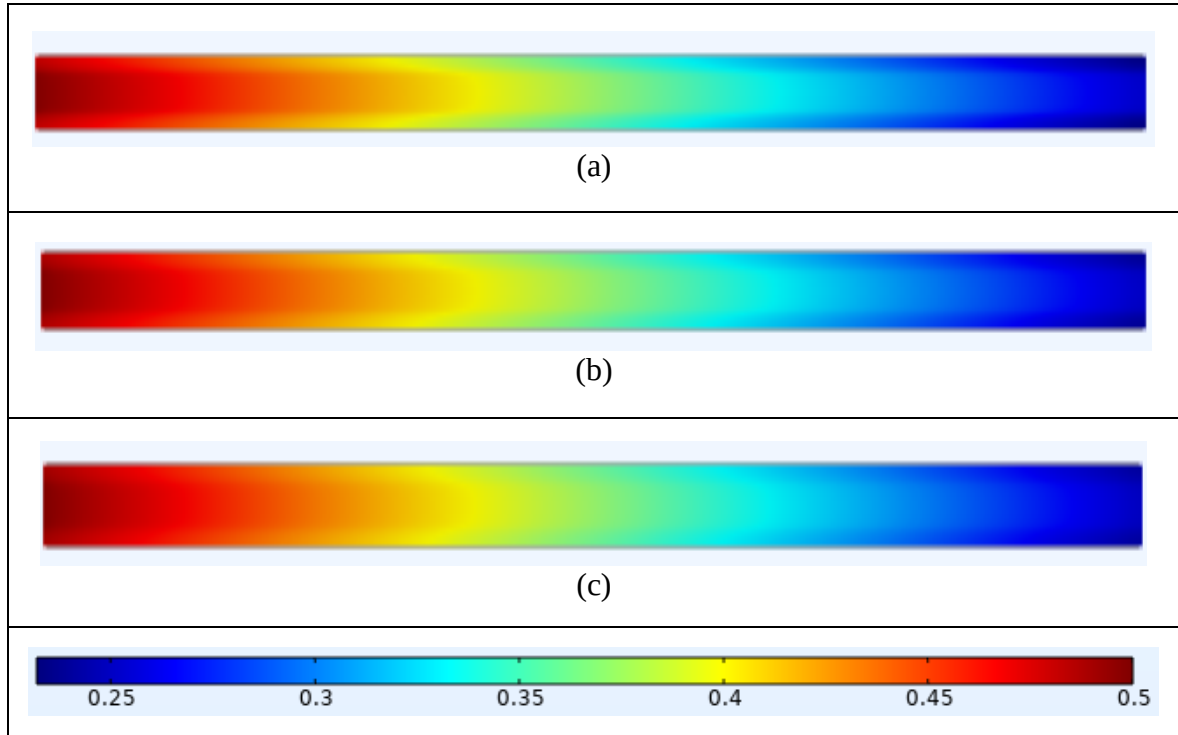
Elektrot gözenekliliği arttıkça gözenekli elektrot tabakalarında meydana gelen gaz difüzyonu iyileştiğinden konsantrasyon kayıplarının azaldığı bilinmektedir. Ayrıca gözenekliliğin artması ile üçlü faz sınırında azalma meydana gelir. Bu durum ise etkin yayılma gücünü artırır. Böylece gözenekliliğin artması ile aktivasyon kayıpları da artar. Aksine yayılma gücü arttığından dolayı konsantrasyon kayıpları azalır. Bu iki etki sonucunda katı oksit yakıt pilinin performansı, gözeneklilik %20-%50 arasında iken gözenekliliğin artması ile artar. Ancak bu oran %60'ın üzerine çıktığında yakıt pili performansı hızlı bir şekilde düşmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalar için katı oksit yakıt pili malzemelerinde elektrot gözeneklilik oranlarının %40'tan fazla olması uygun görülmemektedir [128].

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



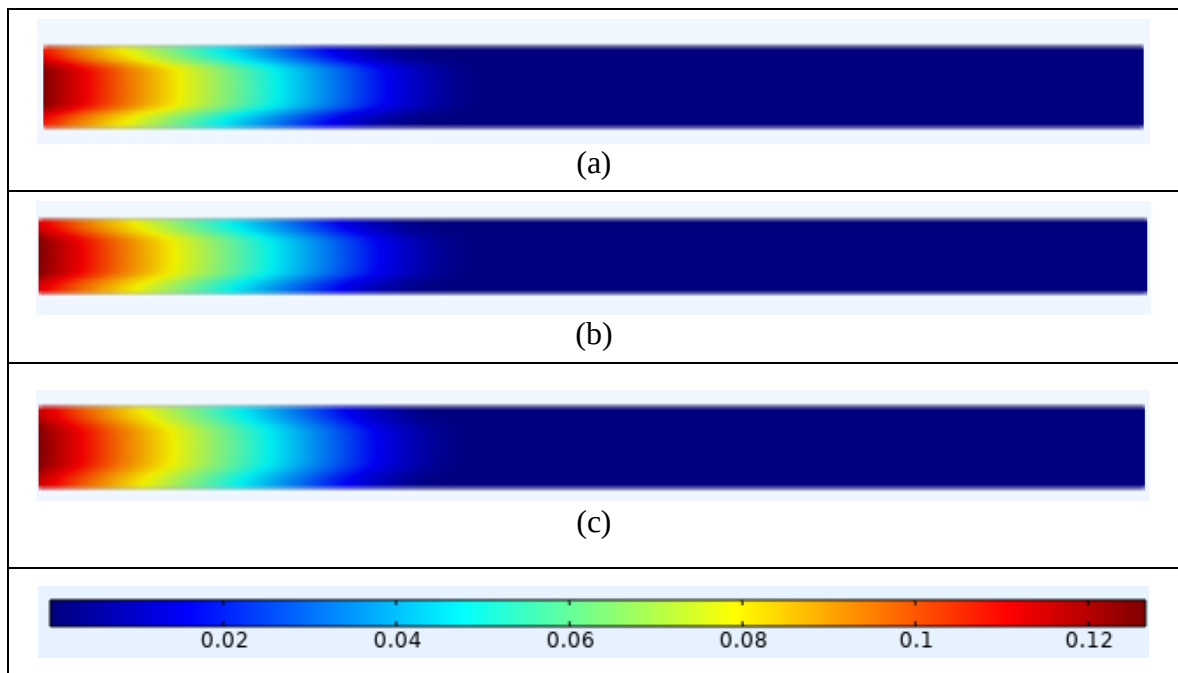
Şekil 5.18. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi a) %30 b) %40 c) %50

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğin etkisi a) %30 b) %40 c) %50

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi Şekil 5.20’de gösterilmektedir.

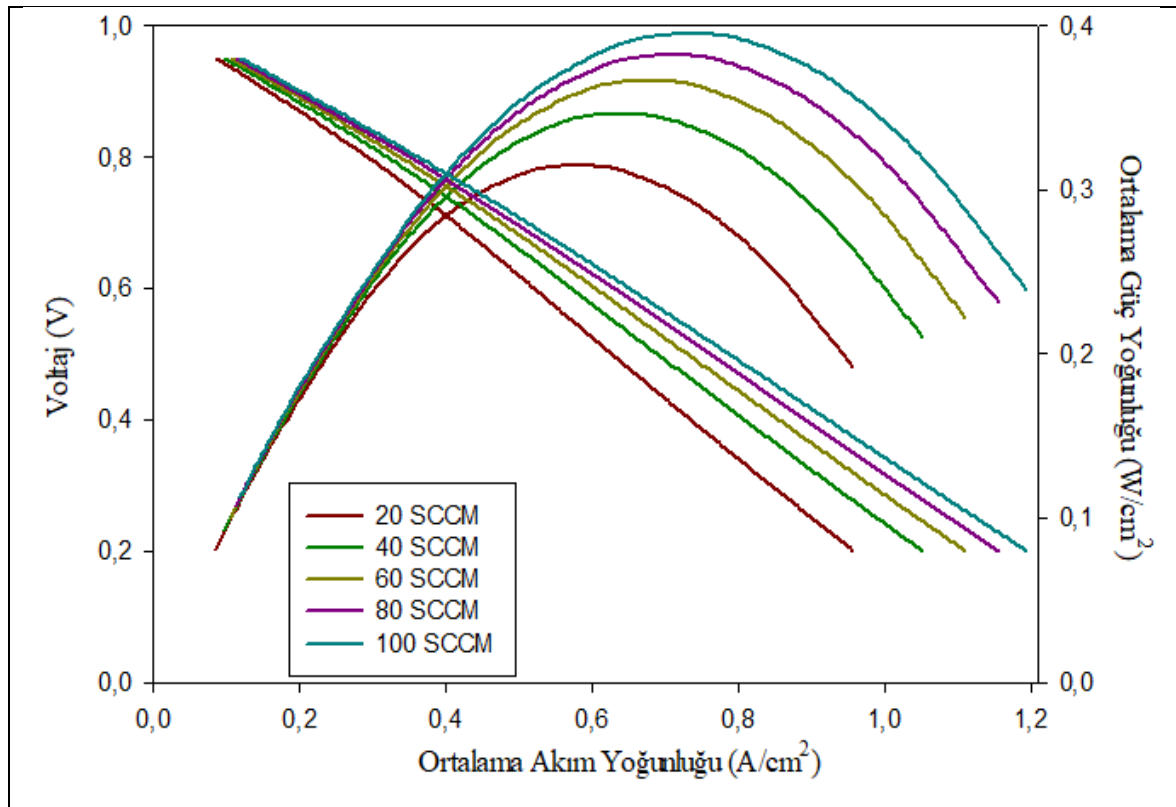


Şekil 5.20. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde elektrot gözenekliliğinin etkisi a) %30 b) %40 c) %50

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde her üç yakıt türü için elektrot gözenekliliğinin artırılmasının hidrojen mol dağılımı üzerinde oldukça az bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum performans ve polarizasyon eğrilerinin de birbiri ile oldukça yakın değerlere sahip olmasının da üzerinde etkili olan durumdur. Etkin gaz yayını, anot tabakasının gözenekliliğinin değişmesine bağlı olarak bir miktar değişim göstermesine rağmen potansiyodinamik koşula ve giriş gazı durumlarına karşılık gelen yerel tür konsantrasyon profili hemen hemen aynı kalır. Bu yüzden hidrojen gazı mol dağılımı grafiklerinde çok etkin bir değişim görülmemektedir [129].

5.2.5. Performans üzerinde yakıt akış hızının etkisi

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıktaki performansı üzerinde yakıt akış hızının etkisi Şekil 5.21’de gösterilmektedir.

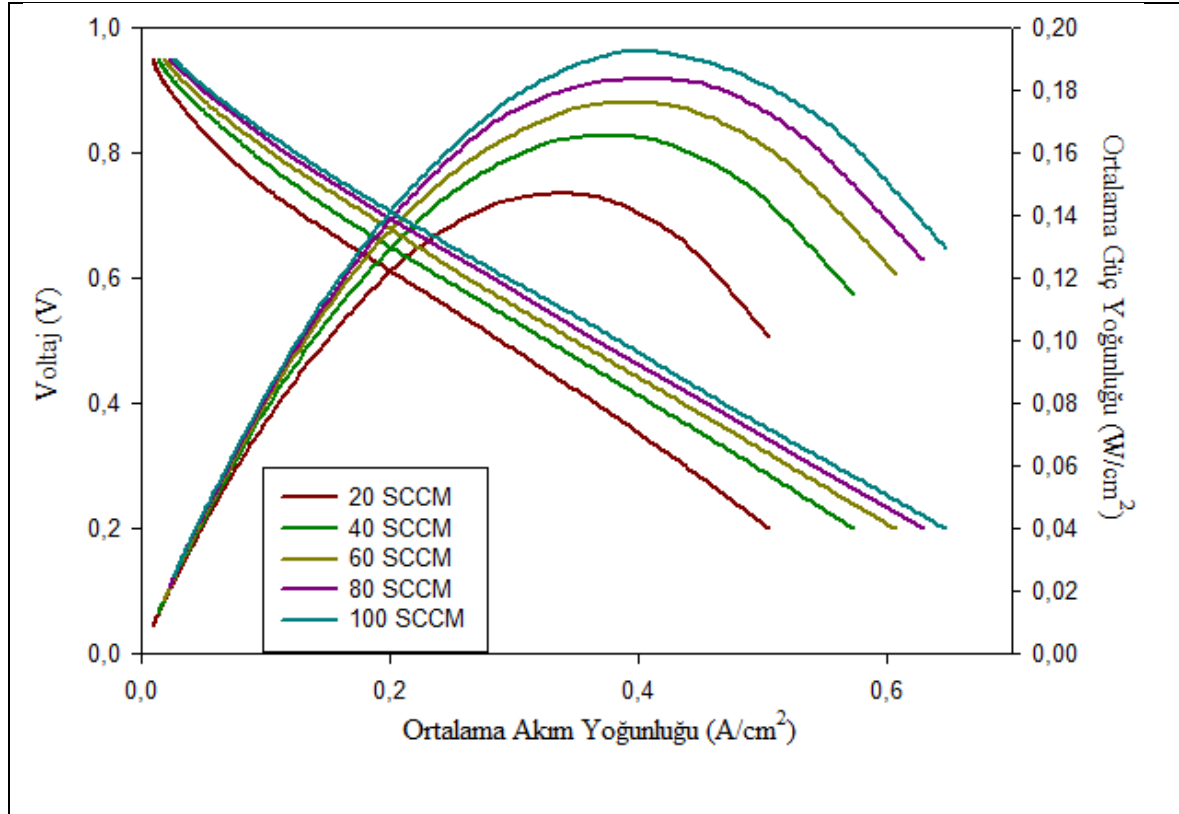


Şekil 5.21. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt akış hızının etkisi

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 20 SCCM, 60 SCCM ve 100 SCCM yakıt akış hızlarında sırasıyla 0,95; 1,11 ve 1,20 A/cm²

olarak bulunmuştur. Ayrıca bu yakıt akış hızı değerlerinde maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,31; 0,37 ve 0,40 W/cm²'dir.

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıktaki performansı üzerinde yakıt akış hızının etkisi Şekil 5.22'de gösterilmektedir.



Şekil 5.22. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt akış hızının etkisi

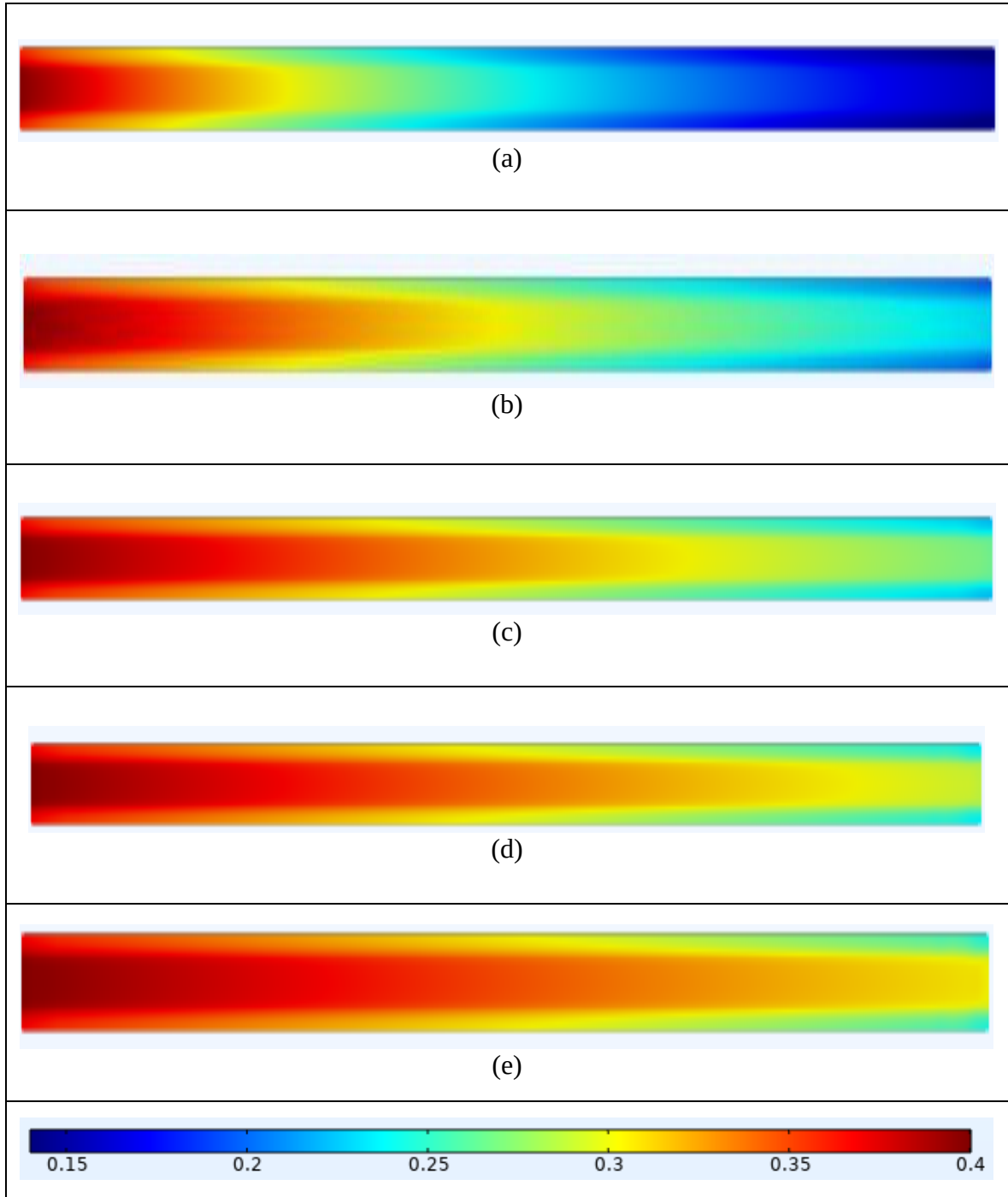
Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 20 SCCM, 60 SCCM ve 100 SCCM yakıt akış hızlarında sırasıyla 0,5; 0,6 ve 0,65 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu yakıt akış hızı değerlerinde maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,15; 0,18 ve 0,19 W/cm²'dir.

Yakıt akış hızı arttıkça elde edilen çıkış gücü ve akım yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Bu durum artan akış hızı ile birlikte aktif reaksiyon alanlarına daha fazla hidrojenin ulaşarak konsantrasyon kayıplarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu etki konsantrasyon kayıplarının etkin olduğu yüksek akım yoğunluklarında daha açık bir şekilde görülmektedir. Düşük akım yoğunluklarında, reaksiyonlarda daha az miktarda hidrojen kullanıldığından

hidrojenin toplam yakıt karışımına oranı, farklı akış hızları için eşdeğerdir, bu nedenle polarizasyon eğrileri hemen hemen aynıdır. Bununla birlikte, daha düşük akış hızları için, daha yüksek akım yoğunluklarında polarizasyon eğrilerinin eğimleri daha dik hale gelir ve bu da kütle taşıma sınırlamalarının daha belirgin olduğunu gösterir. Daha yüksek yakıt akış hızı, kütle taşınım kayıplarını azaltmak için avantajlıdır, ancak yakıt hücresi verimliliği söz konusu olduğunda birbirleri ile ters bağlantıları vardır. En iyi çalışma koşullarının bulunabilmesi için, yakıt akış hızı akım yoğunluğu göz önüne alınarak dikkatle seçilmelidir. Eğer yakıt pilinden orta derecede akım yoğunluğu elde edilmek isteniyorsa yüksek hızda yakıt akış hızına ihtiyaç bulunmamaktadır [130].

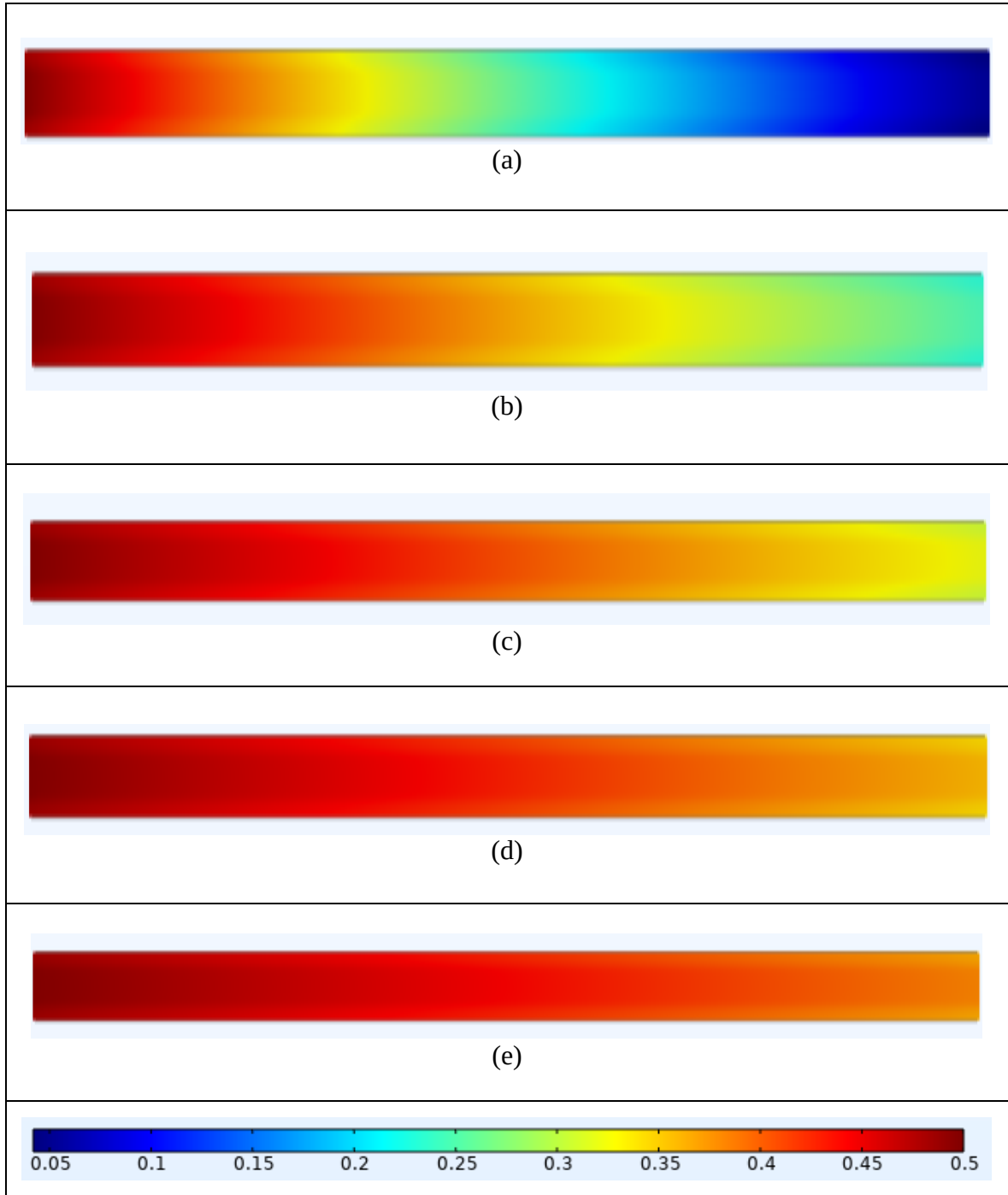
Yüksek yakıt akış hızı kullanmak sadece akım yoğunluğunu arttırmaz, aynı zamanda açık devre voltajı ve hücre kayıpları üzerinde de etkilidir. Özellikle açık devre voltajının da akış hızı arttıkça arttığı görülmektedir [131].

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde 800°C çalışma sıcaklığında yakıt akış hızının hidrojen mol dağılımı üzerine etkisi Şekil 5.23’de gösterilmektedir.



Şekil 5.23. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde yakıt akış hızının etkisi a) 20 SCCM b) 40 SCCM c) 60 SCCM d) 80 SCCM e) 100 SCCM

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde 800°C çalışma sıcaklığında yakıt akış hızının hidrojen mol dağılımı üzerine etkisi Şekil 5.24'te gösterilmektedir.



Şekil 5.24. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımı üzerinde yakıt akış hızının etkisi a) 20 SCCM b) 40 SCCM c) 60 SCCM d) 80 SCCM e) 100 SCCM

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi yakıt akış hızı arttıkça kullanılmamış hidrojen miktarının da artmaktadır. Düşük hızlarda gaz akış kanalı boyunca hidrojen mol dağılımı oldukça değişkendir ve elektrokimyasal reaksiyonlar korunum denklemlerine önemli katkı sağlarlar. Ancak, yüksek giriş hızlarında hidrojen mol dağılımı önemli bir miktarda değişim göstermemektedir. Yüksek giriş hızları gaz türleri için daha fazla ısı enerjisi gerektirdiğinden

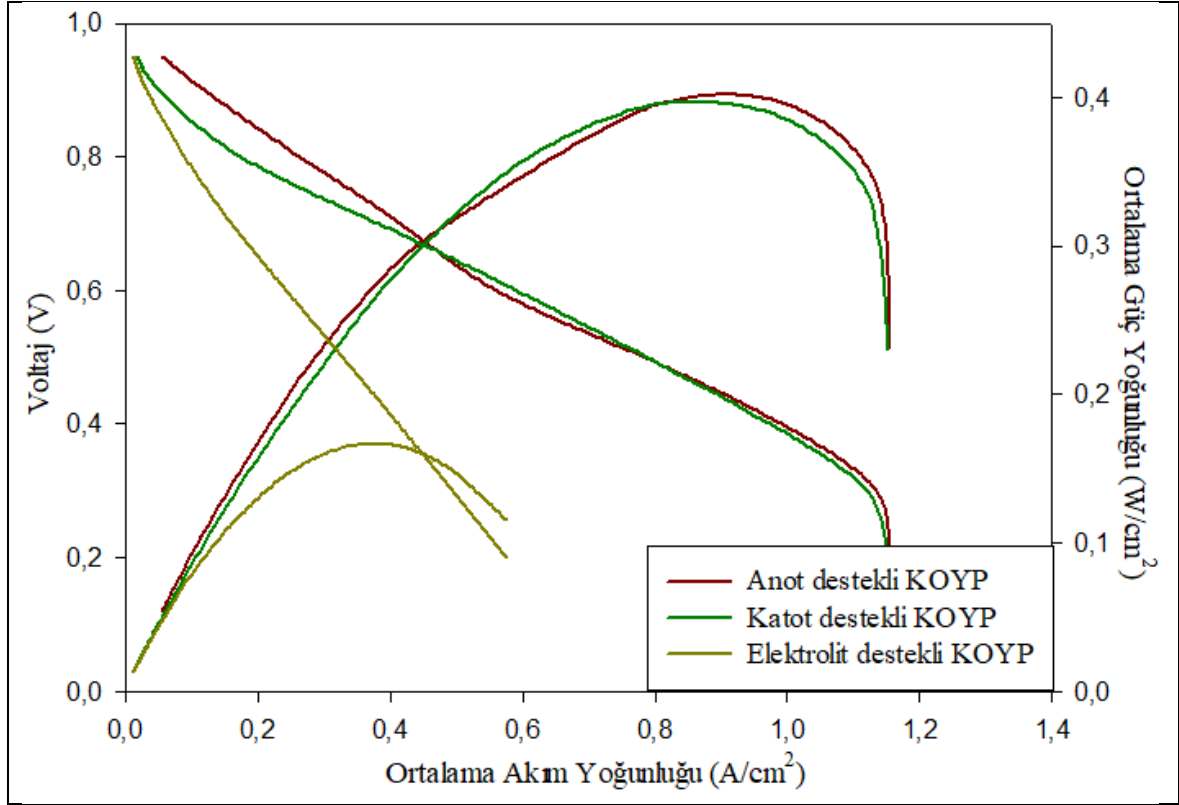
bazı problemlere neden olmaktadır. Ayrıca giriş hızının artması, akım yoğunluğu üzerinde önemli bir değişikliğe sebep olmamaktadır [127]. Yakıt akış hızı arttıkça hidrojen mol dağılımının artışı doğrusal bir oranda olmamaktadır. Aynı zamanda bu durum, hücre boyunca elektrokimyasal reaksiyonların düzenli bir şekilde meydana gelmediğini göstermektedir [44].

5.2.6. Performans üzerinde yakıt pili destek türünün etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt pili destek türünün etkisi Şekil 5.25'te gösterilmektedir. Modelde kullanılan katı oksit yakıt pilinin fiziksel ölçüleri ise Çizelge 5.1'de verildiği gibidir.

Çizelge 5.1. Karşılaştıma yapılan katı oksit yakıt pillerinin fiziksel ölçüleri

Parametre	Anot Destekli KOYP [m]	Elektrolit Destekli KOYP [m]	Katot Destekli KOYP [m]
Anot tabakası kalınlığı	500×10^{-6}	30×10^{-6}	45×10^{-6}
Elektrolit tabakası kalınlığı	10×10^{-6}	160×10^{-6}	10×10^{-6}
Katot tabakası kalınlığı	45×10^{-6}	30×10^{-6}	500×10^{-6}
Yakıt pili uzunluğu	0,04		
Gaz akış kanalı yüksekliği	10×10^{-5}		
Gaz akış kanalı genişliği	$0,5 \times 10^{-3}$		

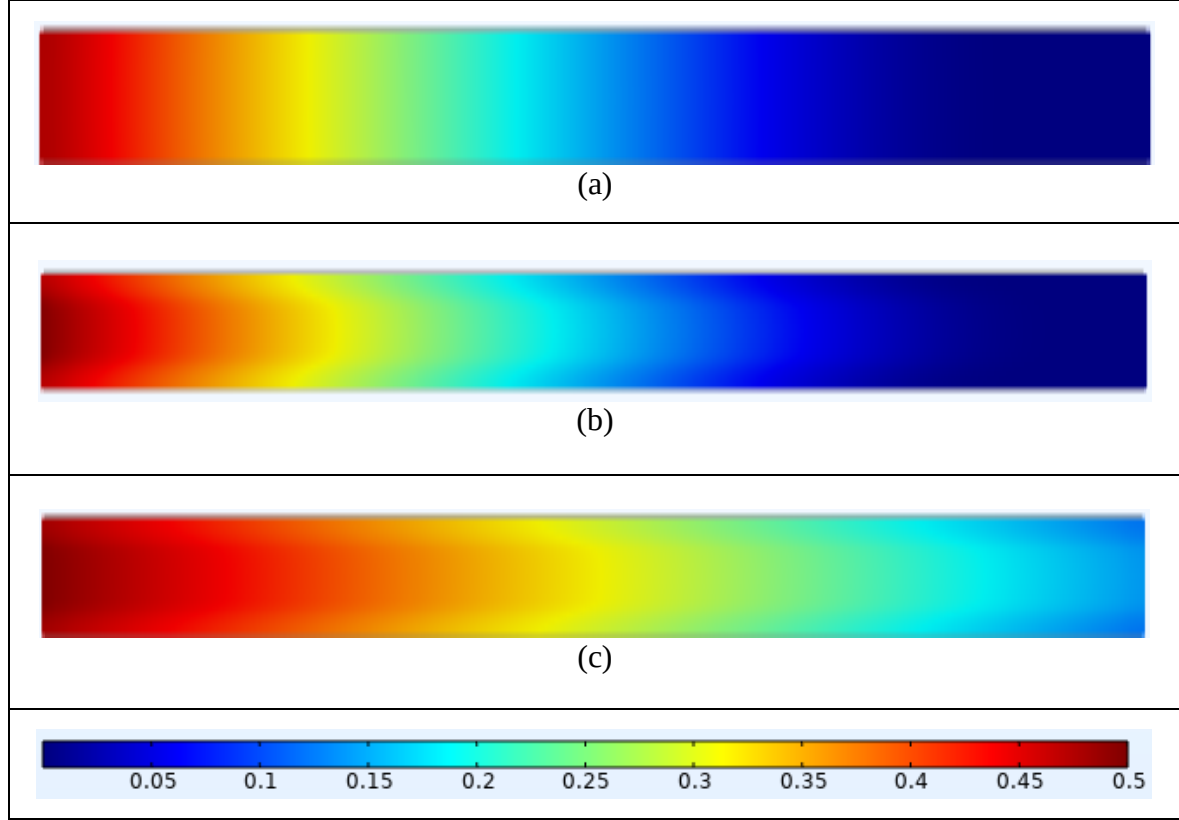


Şekil 5.25. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde yakıt pili destek türünün etkisi

Şekil 5.25'te görüldüğü gibi en kötü performansı kalın elektrolit tabakasından dolayı yüksek ohmik dirence sahip olduğundan elektrolit destekli katı oksit yakıt pili göstermiştir. Katot destekli katı oksit yakıt pili ile anot destekli katı oksit yakıt pili karşılaştırıldığında anot destekli katı oksit yakıt pilinin etkin oksijen gaz difüzyon katsayısının etkin hidrojen gaz difüzyon katsayısından yüksek olması sebebiyle anot destekli katı oksit yakıt pilinin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde katot tabakasındaki düşük oksijen difüzyonu yüksek konsantrasyon kaybına sebep olacağından daha düşük performansa sahiptir [132].

Katı oksit yakıt pilinde elektrot destekli yapının elektrolit destekli yapıdan daha iyi bir performans gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir. Elektrot destekli katı oksit yakıt pili, daha yüksek bir güç yoğunluğunda ve daha geniş bir akım yoğunluğu aralığında çalışabilir, bu durum katı oksit yakıt pili sistemini çalıştırmak için daha küçük bir hücre alanının gerekli olacağı anlamına gelir. Bilindiği gibi elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansında ohmik kayıplar, elektrot destekli katı oksit yakıt pilinde ise aktivasyon ve ohmik kayıpları baskındır [133]. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde

800°C çalışma sıcaklığında yakıt pili destek türünün hidrojen mol dağılımı üzerine etkisi Şekil 5.26'da gösterilmektedir.



Şekil 5.26. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde 800°C çalışma sıcaklığında yakıt pili destek türünün hidrojen mol dağılımı üzerine etkisi
a) anot destekli KOYP b) katot destekli KOYP c) elektrolit destekli KOYP

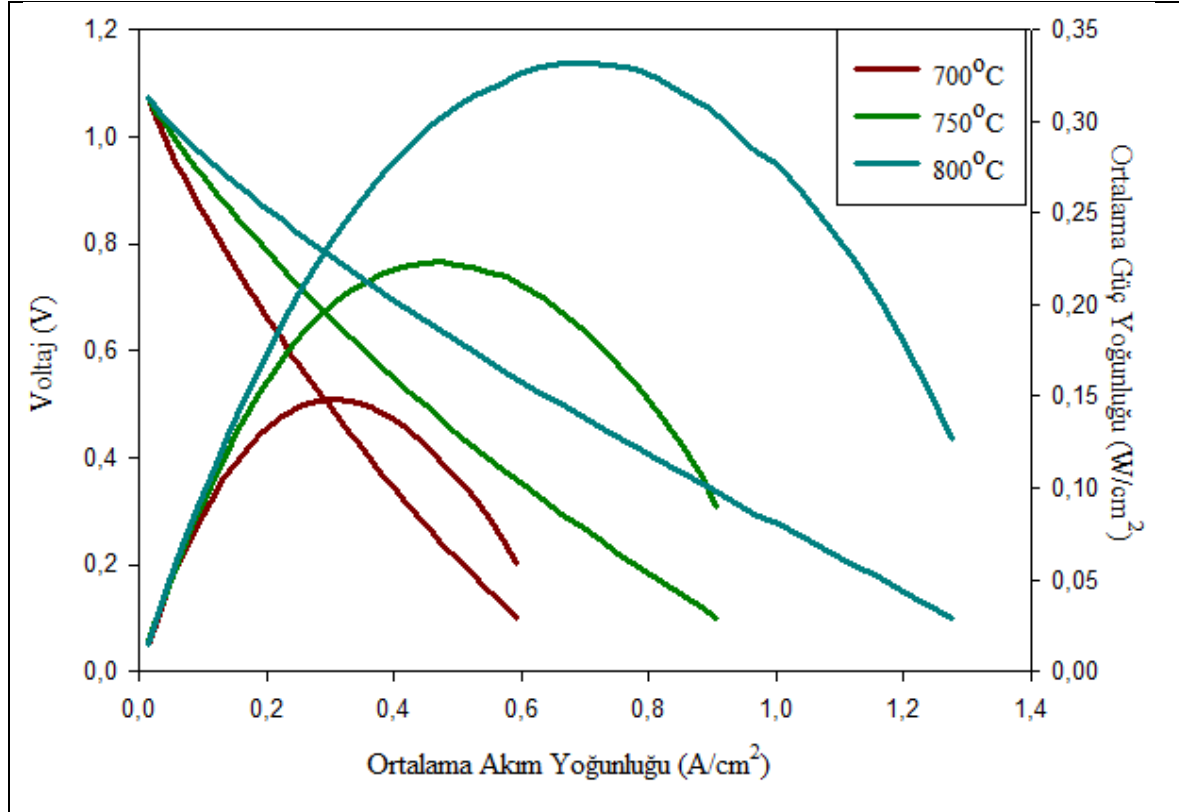
Şekil 5.26 incelendiğinde hidrojen mol dağılımının anot akış kanalı girişinde daha yüksekken kanal çıkışına doğru azaldığı görülmektedir. Ayrıca anot destekli katı oksit yakıt pili ile katot destekli katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımının benzer olduğu görülmektedir [134].

5.3. Deneysel Analiz Sonuçları

Bu tez kapsamında elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansına sıcaklık, basınç ve yakıt içeriğinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

5.3.1. Performans üzerinde sıcaklığın etkisi

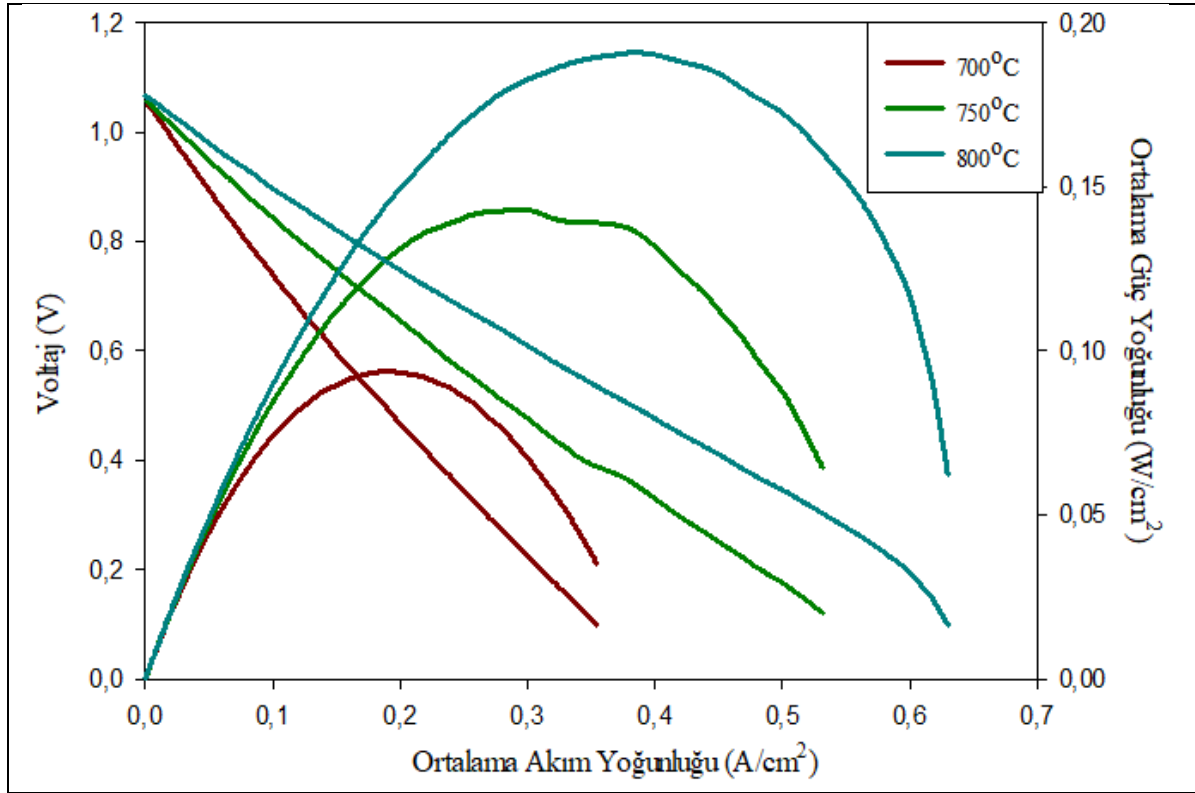
Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.27’de gösterilmektedir.



Şekil 5.27. Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi

Yakıt olarak hidrojen gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 700°C, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,6; 0,9 ve 1,3 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,15; 0,23 ve 0,33 W/cm²'dir.

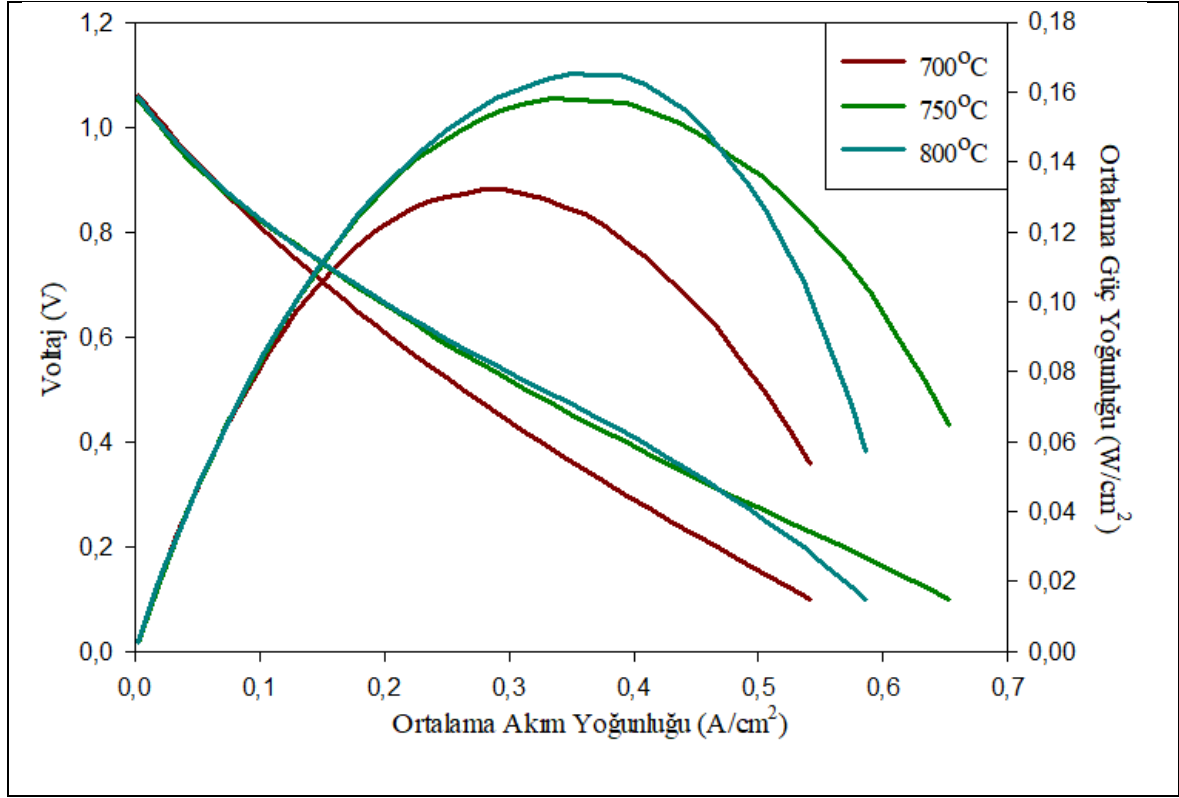
Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi Şekil 5.28’de gösterilmektedir.



Şekil 5.28. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 700°C, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,35; 0,54 ve 0,63 A/cm^2 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,09; 0,15 ve 0,19 W/cm^2 'dir.

Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi ise Şekil 5.29 'da gösterilmektedir.



Şekil 5.29. Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde sıcaklığın etkisi

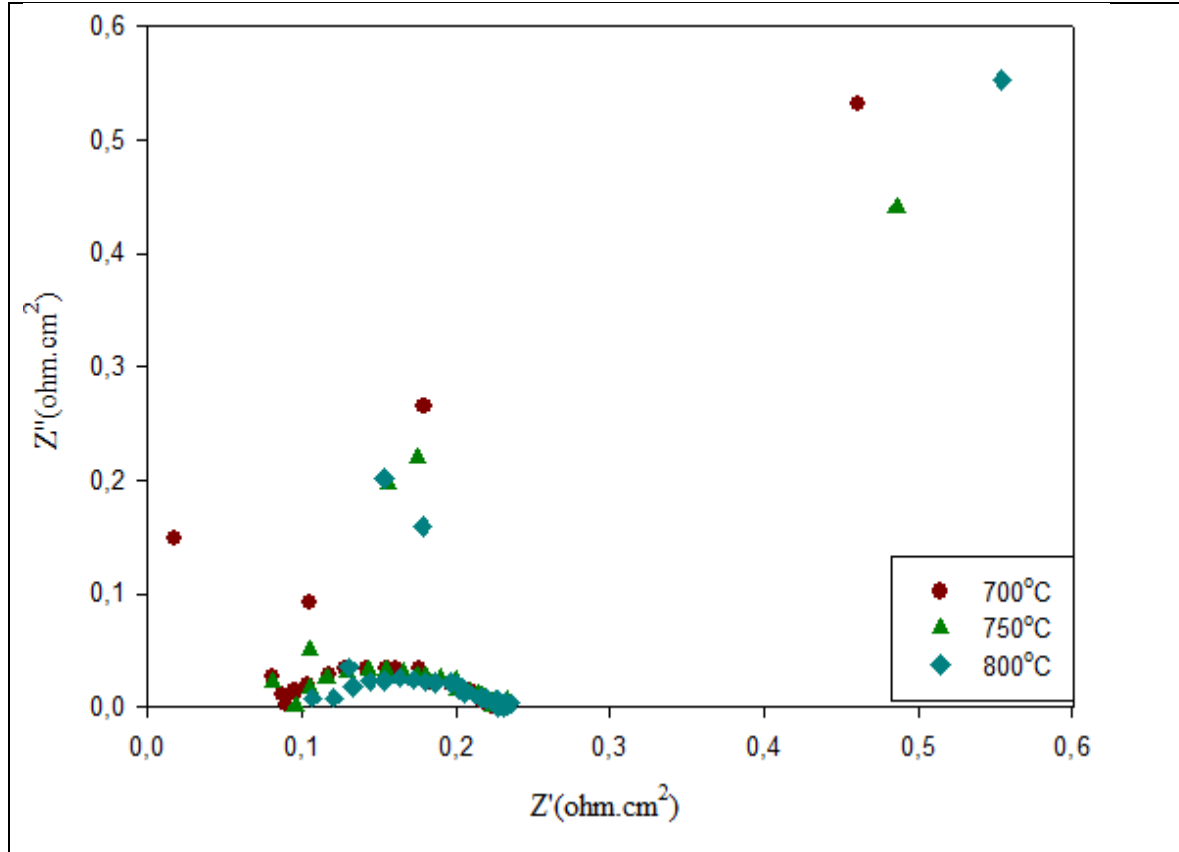
Yakıt olarak jeneratör gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 700°C, 750°C ve 800°C sıcaklıklarda sırasıyla 0,54; 0,65 ve 0,58 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sıcaklıklar için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,13; 0,15 ve 0,16 W/cm²'dir.

Sıcaklık arttıkça, aktivasyon ve ohmik kayıplar önemli ölçüde azaldığından dolayı yakıt pilinin performansı artmaktadır. Konsantrasyon kayıpları ise sıcaklığın artması ile artmaktadır. Ancak bu artış aktivasyon ve ohmik kayıplarda meydana gelen azalma ile karşılaştırıldığında oldukça az olmaktadır. Aynı zamanda düşük işletme sıcaklıklarında çalışılması katı oksit yakıt pilinin malzeme dayanımını arttırdığı gibi ayrıca daha yaygın ve uygun maliyetli malzemelerin kullanımını da kolaylaştırmaktadır [128].

Yüksek sıcaklıklarda yakıt pili performansındaki artış aktivasyon enerjisi, yayılım ve iyonik iletkenlik gibi özelliklerin sıcaklık artışı ile artmasından kaynaklanmaktadır. İşletme sıcaklığının en önemli etkisi elektrolit tabakasının iyonik iletkenliğini arttırmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda reaksiyon kinetiği hızlı olduğundan daha fazla akım üretilmektedir. Ayrıca

yayınım arttıkça hidrojen molekülleri reaksiyon alanına daha hızlı bir şekilde ulaşırlar. Böylece, kütle taşınım kayıpları azaldığından hücre performansı artar [130].

Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde yakıt olarak su gazı kullanıldığında oluşan empedans grafiği Şekil 5.30'da gösterilmektedir.

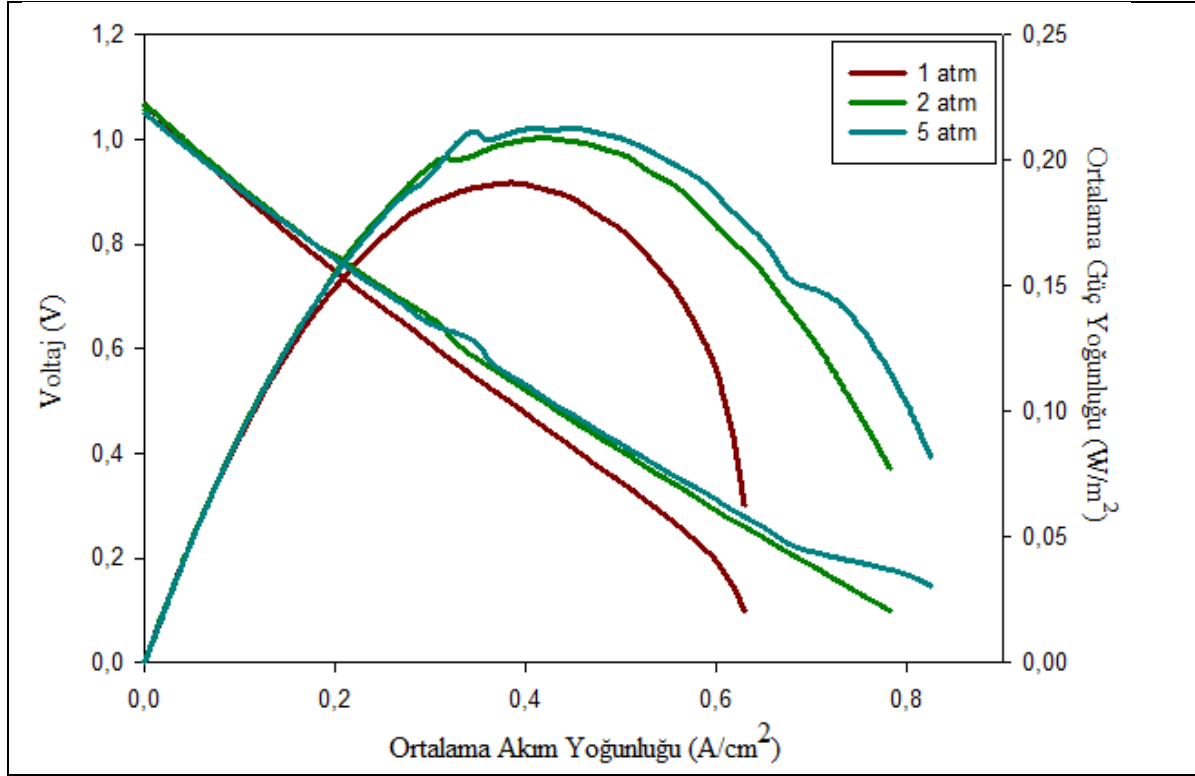


Şekil 5.30. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin empedans grafiği üzerinde sıcaklığın etkisi

Su gazı empedans grafiğine göre sıcaklık arttıkça katı oksit yakıt pili direncinin azaldığı görülmektedir. Katı oksit yakıt pilinin ohmik direnci (y eksen değeri) 700°C'de 0,048 ohm.cm²'den 800°C'de 0,042 ohm.cm²'ye düşmektedir. Ohmik ve polarizasyon dirençlerinin toplamının ise 0,20 ohm.cm²'den 0,18 ohm.cm²'ye düştüğü görülmektedir.

5.3.2. Performans üzerinde basıncın etkisi

Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıktaki performansı üzerinde basıncın etkisi Şekil 5.31'de gösterilmektedir.



Şekil 5.31. Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde basıncın etkisi

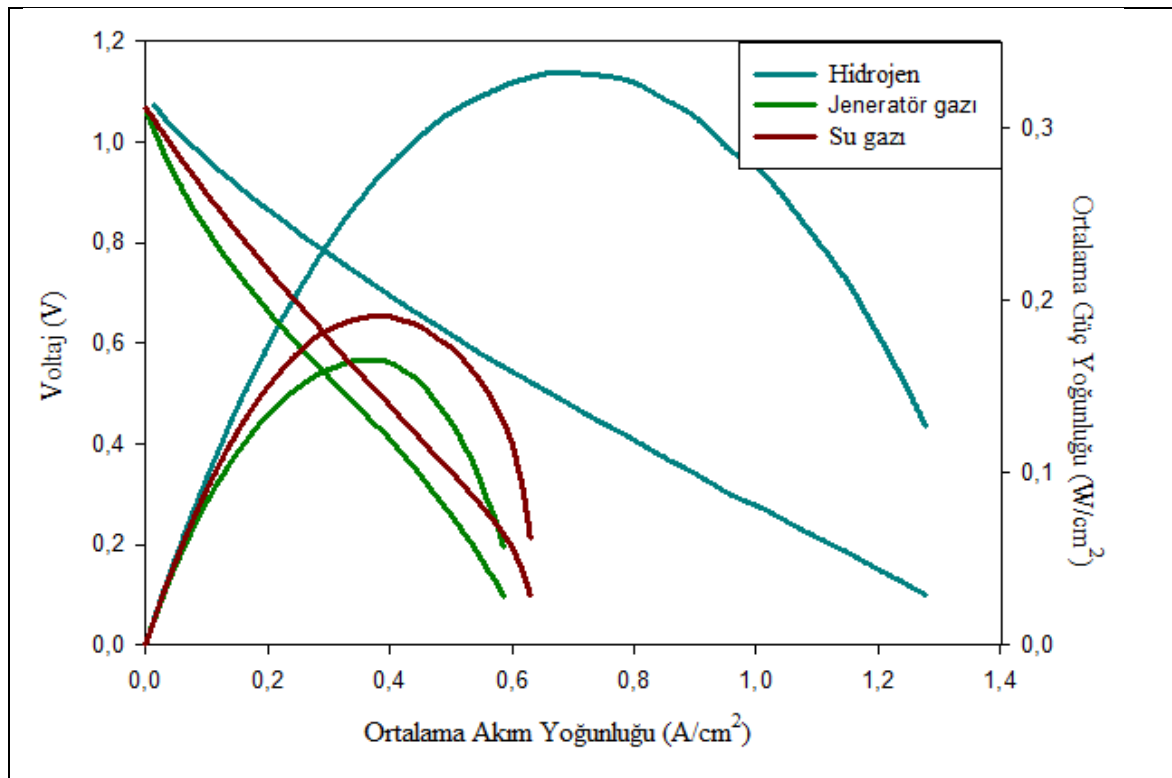
Yakıt olarak su gazı kullanılan bir katı oksit yakıt pilinde maksimum akım yoğunluğu 1 atm, 2 atm ve 5 atm basınçlarda sırasıyla 0,6; 0,8 ve 0, 85 A/cm² olarak bulunmuştur. Ayrıca bu basınç değerleri için maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 0,19; 0,20 ve 0,22 W/cm²'dir.

İşletme basıncı arttıkça, hücre voltajı da artmaktadır. Ancak bu artış basınç artışı ile doğrusal olarak değişen bir artış değildir. Hücre voltajında başlangıçta hızlı bir artış varken daha sonra basıncın artmasından daha az etkilenir. İşletme basıncının değişimi gaz konsantrasyonunu etkilediğinden katı oksit yakıt pili performansı üzerinde de doğrudan etkilidir. Artan basınç ile yakıt pili performansının arttığı gözlemlenirken basınç 2 atm'den fazla olduğunda bu artışın daha az olduğu görülmektedir. Bu durum açık devre voltajının artması ve aktivasyon kayıplarının azalması olarak iki temel sebebe dayanmaktadır. Yüksek çalışma basınçlarında kütle transferi de daha iyi gerçekleştiğinden açık devre voltajı da yüksektir. Açık devre voltajının hesaplanmasında elektrot ve elektrolit ara yüzeylerindeki gaz konsantrasyonları kullanılmaktadır. Bu yüzden, konsantrasyon kayıpları da açık devre voltajının içerisinde bulunmaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla daha fazla hidrojen ve karbon monoksit tüketilirken daha fazla su buharı ve karbon dioksit üretilmektedir. Bu durum yüksek akım yoğunluklarında açık devre voltajının düşük

olmasına neden olmaktadır. Sentez gazı kullanılan analizlerde açık devre voltajının yüksek akım yoğunluklarında düşme eğiliminde olduğu daha açık görülmektedir [135].

5.3.3. Performans üzerinde yakıt içeriğinin etkisi

Yakıt olarak farklı oranlarda hidrojen içeriğine sahip yakıt kullanılan katı oksit yakıt pilinin 800°C sıcaklıkta ortalama akım yoğunluğu ve ortalama güç yoğunluğu grafiği Şekil 5.32’de gösterilmektedir.



Şekil 5.32. Yakıt olarak farklı oranlarda hidrojen içeriğine sahip yakıt kullanılan katı oksit yakıt pilinin performansı

Bir yakıt pilinde yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığında en yüksek akım yoğunluğu 1,3 A/cm² ve en yüksek güç yoğunluğu 0,33 W/cm², %50 hidrojen içeriğine sahip su gazı kullanıldığında en yüksek akım yoğunluğu 0,63 A/cm² ve en yüksek güç yoğunluğu 0,19 W/cm², % 12 hidrojen içeriğine sahip jeneratör gazı kullanıldığında ise en yüksek akım yoğunluğu 0,58 A/cm² ve en yüksek güç yoğunluğu 0,16 W/cm² olarak bulunmuştur.

Sayısal sonuçlarla da desteklendiği gibi yakıt içeriğindeki hidrojen miktarı arttıkça konsantrasyon kayıplarının azalmasına bağlı olarak yakıt pili performansının arttığı

görülmektedir. Bu durum katı oksit yakıt pilinde yakıt olarak saf hidrojen gazı kullanımının güç üretimi açısından önemli bir etken olduğunu gösterse de içeriğinde hidrojen gazının depolanma ve taşınma gibi dezavantajları dolayısıyla farklı yakıtların da kullanılabileceğini göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde yakıt olarak kömür gazı kullanımının performans üzerindeki etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle yakıt olarak su gazı kullanılan bir elektrolit destekli katı oksit yakıt pili modeli geliştirilmiş ve sayısal olarak performans analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel performans sonuçları ile karşılaştırılarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Doğrulama sonuçlarına bağlı olarak sıcaklık, basınç ve yakıt içeriğinin etkisi hem deneysel hem sayısal olarak gerçekleştirilirken gözeneklilik, yakıt akış hızı ve destek türünün etkisi sadece sayısal olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen sayısal sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sıcaklık arttıkça elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansının arttığı görülmüştür. Bu durum sıcaklık arttıkça yakıt pilinde meydana gelen kayıpların azalırken elektrot reaktivitesi, iyonik iletkenlik ve difüzyon katsayılarının artmasına bağlı olarak açıklanmıştır.
- Çalışma sıcaklığının artması ile hidrojen gazının anot akış kanalı içerisinde oldukça hızlı bir şekilde tükendiği görülmüştür. Bu durum sıcaklık arttıkça akış kanalı boyunca meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların kinetiğinin ve gaz difüzyon katsayılarının artmasına bağlı olarak açıklanmıştır.
- Çalışma basıncının artması ile katı oksit yakıt pili voltajının da arttığı görülmüştür. Bu durum Nernst denkleminde bulunan gazların kısmi basıncı ile doğrudan ilgili olan değişkenler ile açıklanmaktadır. Ayrıca, çalışma basıncı arttıkça yakıt pilinin hücre kinetiği ve iletimde arttığından performans artışı da görülmüştür.
- Çalışma basıncının artması ile hidrojen gazı mol dağılımında küçük ama hızlı bir artış olduğu ve basınç arttıkça hidrojen gazının difüzyon kayıplarına bağlı olarak daha hızlı tükendiği görülmüştür.
- Katı oksit yakıt pilinde yakıt içeriğindeki hidrojen miktarı arttıkça konsantrasyon kayıpları azaldığından performansın da arttığı görülmüştür.
- Elektrot tabakalarının gözenekliliğinin artması ile yakıt pili performansında bir miktar iyileşme olduğu görülmüştür. Gözeneklilik üçlü faz sınırı bölgesinin uzunluğunu azaltarak sayısını arttırdığı için gaz taşınımını güçlendirir ve etkin difüzyon oranını

arttırır. Bu durum katı oksit yakıt pilinin performansının gözenekliliğin artması ile artışının temel sebebini açıklamaktadır.

- Elektrot tabakalarının gözenekliliği arttıkça hidrojen mol dağılımı üzerinde önemli bir etki görülmemiştir. Bu durum, etkin gaz yayılımı, anot tabakasının gözenekliliğinin değişmesine bağlı olarak bir miktar değişim göstermesine rağmen potansiyodinamik koşula ve giriş gazı durumlarına karşılık gelen yerel tür konsantrasyon profilinin aynı kalmasından kaynaklanmaktadır.
- Yakıt akış hızı arttıkça katı oksit yakıt pilinden elde edilen çıkış gücü ve akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Bu durum aktif reaksiyon alanlarına daha fazla hidrojen gazının ulaşmasına bağlı olarak açıklanmaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında konsantrasyon kayıplarının azalmasına bağlı olarak bu etki daha net bir şekilde görülmüştür. Ayrıca, düşük akış hızlarında ve yüksek akım yoğunluklarında kütle taşıma sınırlandırmalarından dolayı polarizasyon eğrilerinin eğimlerinin daha dik hale geldiği görülmüştür.
- Yakıt akış hızı arttıkça kullanılmamış hidrojen miktarının da arttığı görülmüştür. Düşük hızlarda anot akış kanalı boyunca hidrojen mol dağılımının daha değişken olduğu ancak yüksek hızlarda önemli bir miktarda değişim olmadığı görülmüştür.
- Destek türünün performans üzerindeki etkisi incelendiğinde elektrolit destekli modelin en düşük sonuçlara sahipken sırasıyla katot ve anot destekli modelin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pili modelinin düşük performansa sahip olmasının nedeni kalın elektrolit tabakasına bağlı olarak ohmik kayıpların oldukça baskın hale gelmesidir.
- Destek türünün hidrojen mol dağılımı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise hidrojen mol dağılımının anot akış kanalı girişinde daha yüksekken kanal çıkışına doğru azaldığı görülmektedir. Ayrıca anot destekli katı oksit yakıt pili ile katot destekli katı oksit yakıt pilinin hidrojen mol dağılımının benzer olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneysel sonuçlar incelendiğinde ise aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Çalışma sıcaklığı arttıkça, aktivasyon ve ohmik kayıplar önemli ölçüde azaldığından dolayı yakıt pilinin performansı arttığı görülmüştür. Konsantrasyon kayıpları ise sıcaklığın artması ile artmaktadır. Ancak bu artış aktivasyon ve ohmik kayıplarda meydana gelen azalma ile karşılaştırıldığında oldukça az olmaktadır.

- Çalışma sıcaklığının artışının empedans grafiği üzerindeki etkileri incelendiğinde sıcaklık arttıkça ohmik ve polarizasyon dirençlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durum sıcaklık arttıkça performans artışının önemli etkenlerinden birisidir.
- İşletme basıncı arttıkça, hücre voltajı artmaktadır. Artan basınç ile yakıt pili performansının da arttığı gözlemlenirken basınç 2 atm'den fazla olduğunda bu artışın daha az olduğu görülmektedir. Bu durum açık devre voltajının artması ve aktivasyon kayıplarının azalması olarak iki temel sebebe dayanmaktadır.
- Yakıt içeriğindeki hidrojen oranı arttıkça yük transferi, yüzey difüzyonu ve gaz difüzyon işlemlerinin verimleri arttığından katı oksit yakıt pilinin performansının da arttığı gözlemlenmiştir.

Hem deneysel hem sayısal çalışmalar incelendiğinde katı oksit yakıt pillerinde alternatif yakıtların kullanılabileceği ve çeşitli değişkenlere bağlı olarak saf hidrojenle yarışabilir düzeyde performans gösterebileceği görülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda ülkemizin yerli ve milli kaynağı olan kömürden elde edilen kömür gazlarının temiz enerji teknolojileri aracılığıyla daha etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak, kömür gazı kullanımının katı oksit yakıt pilinin anot tabakasında karbon oluşumuna etkisi sayısal ve deneysel olarak incelenebilir. Ayrıca, karbon oluşumu üzerinde bu tez kapsamında çalışılmış olan sayısal değişkenlerin etkisi araştırılabilir. Kömür gazları çeşitlendirilerek çalışma detaylandırılabilir ve en iyi performansın elde edilebileceği kömür gazı bileşimi bulunabilir.

KAYNAKLAR

1. TMMOB Maden Mühendisleri Odası. (2020). Kömür ve Enerji Raporu-2020. *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, 17-22.
2. Yakabe, H., Hishinuma, M., Uratani, M., Matsuzaki, Y., Yasuda, I. (2000). Evaluation and modeling of performance of anode-supported solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 86, 423–431.
3. Eguchi, K., Kojo, H., Takeguchi, T., Kikuchi, R., Sasaki, K. (2002). Fuel flexibility in power generation by solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics*, 152–153, 411–416.
4. Koh, J.H., Yoo, Y.S., Park, J.W., Lim, H.C. (2002). Carbon deposition and cell performance of Ni-YSZ anode support SOFC with methane fuel. *Solid State Ionics* 149, 157–166.
5. Weber, A., Sauer, B., Müller, A.C., Herbsttritt, D., Ivers-Tiffée, E. (2002). Oxidation of H₂, CO and methane in SOFCs with Ni/YSZ-cermet anodes. *Solid State Ionics*, 152–153, 543–550.
6. Kendall, K., Finnerty, C.M., Saunders, G., Chung, J.T. (2002). Effects of dilution on methane entering an SOFC anode. *Journal of Power Sources*, 106, 323–327.
7. Liu, J., Barnett, S.A. (2003). Operation of anode-supported solid oxide fuel cells on methane and natural gas. *Solid State Ionics*, 158, 11–16.
8. Aguilar, L., Zha, S., Cheng, Z., Winnick, J., Liu, M. (2004). A solid oxide fuel cell operating on hydrogen sulfide (H₂S) and sulfur-containing fuels. *Journal of Power Sources*, 135, 17–24.
9. Hernández-Pacheco, E., Mann, M.D., Hutton, P.N., Singh, D., Martin, K.E. (2005). A cell-level model for a solid oxide fuel cell operated with syngas from a gasification process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1221–1233.
10. Assabumrungrat, S., Laosiripojana, N., Pavarajarn, V., Sangtongkitcharoen, W., Tangjitmatee, A., Praserttham, P. (2005). Thermodynamic analysis of carbon formation in a solid oxide fuel cell with a direct internal reformer fuelled by methanol. *Journal of Power Sources*, 139, 55–60.
11. Costa-Nunes, O., Gorte, R.J., Vohs, J.M. (2005). Comparison of the performance of Cu-CeO₂-YSZ and Ni-YSZ composite SOFC anodes with H₂, CO, and syngas. *Journal of Power Sources*, 141, 241–249.
12. Kee, R.J., Zhu, H., Goodwin, D.G. (2005). Solid-oxide fuel cells with hydrocarbon fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(II), 2379–2404.

13. Sangtongkitcharoen, W., Assabumrungrat, S., Pavarajarn, V., Laosiripojana, N., Praserttham, P. (2005). Comparison of carbon formation boundary in different modes of solid oxide fuel cells fueled by methane. *Journal of Power Sources*, 142, 75–80.
14. Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Entchev, E., Charojrochkul, S., Pritzker, M.D., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Chewathanakup, S., Mahaudom, H. (2006). Experimental and modeling study of solid oxide fuel cell operating with syngas fuel. *Journal of Power Sources*, 161, 308–322.
15. Zhu, H., Kee, R.J. (2006). Thermodynamics of SOFC efficiency and fuel utilization as functions of fuel mixtures and operating conditions. *Journal of Power Sources*, 161, 957–964.
16. Gemmen, R.S., Trembly, J. (2006). On the mechanisms and behavior of coal syngas transport and reaction within the anode of a solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 161, 1084–1095.
17. Aloui, T., Halouani, K. (2007). Analytical modeling of polarizations in a solid oxide fuel cell using biomass syngas product as fuel. *Applied Thermal Engineering*, 27, 731–737.
18. Colpan, C.O., Dincer, I., Hamdullahpur, F. (2007). Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 787–795.
19. He, H., Hill, J.M. (2007). Carbon deposition on Ni/YSZ composites exposed to humidified methane. *Applied Catalysis A: General*, 317:284–292.
20. Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Pritzker, M.D., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Entchev, E. (2007). Modelling of a cathode-supported tubular solid oxide fuel cell operating with biomass-derived synthesis gas. *Journal of Power Sources*, 166, 386–399.
21. Trembly, J.P., Gemmen, R.S., Bayless, D.J. (2007). The effect of coal syngas containing HCl on the performance of solid oxide fuel cells: Investigations into the effect of operational temperature and HCl concentration. *Journal of Power Sources*, 169, 347–354.
22. Nikooyeh, K., Jeje, A.A., Hill, J.M. (2007). 3D modeling of anode-supported planar SOFC with internal reforming of methane. *Journal of Power Sources*, 171, 601–609.
23. Nikooyeh, K., Clemmer, R., Alzate-Restrepo, V., Hill, J.M. (2008). Effect of hydrogen on carbon formation on Ni/YSZ composites exposed to methane. *Applied Catalysis A: General*, 347, 106–111.
24. Zhi, M., Chen, X., Finklea, H., Celik, I., Wu, N.Q. (2008). Electrochemical and microstructural analysis of nickel-yttria-stabilized zirconia electrode operated in phosphorus-containing syngas. *Journal of Power Sources*, 183, 485–490.

25. Ni, M., Leung, D.Y.C., Leung, M.K.H. (2008). Modeling of methane fed solid oxide fuel cells: Comparison between proton conducting electrolyte and oxygen ion conducting electrolyte. *Journal of Power Sources*, 183, 133–142.
26. Wu, Y., Su, C., Zhang, C., Ran, R., Shao, Z. (2009). A new carbon fuel cell with high power output by integrating with in situ catalytic reverse Boudouard reaction. *Electrochemistry Communications*, 11, 1265–1268.
27. Arpornwichanop, A., Patcharavorachot, Y., Assabumrungrat, S. (2010). Analysis of a proton-conducting SOFC with direct internal reforming. *Chemical Engineering Science*, 65, 581–589.
28. Miao, H., Wang, W.G., Li, T.S., Chen, T., Sun, S.S., Xu, C. (2010). Effects of coal syngas major compositions on Ni/YSZ anode-supported solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195, 2230–2235.
29. Ye, X.F., Wang, S.R., Zhou, J., Zeng, F.R., Nie, H.W., Wen, T.L. (2010). Assessment of the performance of Ni-ytria-stabilized zirconia anodes in anode-supported Solid Oxide Fuel Cells operating on H₂-CO syngas fuels. *Journal of Power Sources*, 195, 7264–7267.
30. Li, C., Shi, Y., Cai, N. (2010). Elementary reaction kinetic model of an anode-supported solid oxide fuel cell fueled with syngas. *Journal of Power Sources*, 195, 2266–2282.
31. Alzate-Restrepo, V., Hill, J.M. (2010). Carbon deposition on Ni/YSZ anodes exposed to CO/H₂ feeds. *Journal of Power Sources*, 195, 1344–1351.
32. Wang, Y., Yu, J., Weng, S. (2011). Numerical investigation of different loads effect on the performance of planar electrode supported SOFC with syngas as fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 5624–5631.
33. Paradis, H., Andersson, M., Yuan, J., Sundén, B. (2011). Simulation of alternative fuels for potential utilization in solid oxide fuel cells. *International Journal of Energy Research*, 35, 1107–117.
34. Chen, T., Wang, W.G., Miao, H., Li, T., Xu, C. (2011). Evaluation of carbon deposition behavior on the nickel/yttrium-stabilized zirconia anode-supported fuel cell fueled with simulated syngas. *Journal of Power Sources*, 196, 2461–2468.
35. Iwai, H., Yamamoto, Y., Saito, M., Yoshida, H. (2011). Numerical simulation of intermediate-temperature direct-internal-reforming planar solid oxide fuel cell. *Energy*, 36, 2225–2234.
36. Lo Faro, M., Antonucci, V., Antonucci, P.L., Aricó, A.S. (2012). Fuel flexibility: A key challenge for SOFC technology. *Fuel*, 102, 554–559.
37. Yu, J., Wang, Y., Weng, S. (2012). Numerical analysis of the possibility of carbon formation in planar SOFC fueled with syngas. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 9, 1–6.

38. Lorente, E., Millan, M., Brandon, N.P. (2012). Use of gasification syngas in SOFC: Impact of real tar on anode materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 7271–7278.
39. O'Brien, J.S., Giorgi, J.B. (2012). Solid oxide fuel cell with NiCo-YSZ cermet anode for oxidation of CO/H₂ fuel mixtures. *Journal of Power Sources*, 200, 14–20.
40. Ni, M. (2013). The effect of electrolyte type on performance of solid oxide fuel cells running on hydrocarbon fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 2846–2858.
41. Shiratori, Y., Ogura, T., Nakajima, H., Sakamoto, M., Takahashi, Y., Wakita, Y., Kitaoka, T., Sasaki, K. (2013). Study on paper-structured catalyst for direct internal reforming SOFC fueled by the mixture of CH₄ and CO₂. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 10542–10551.
42. Razbani, O., Wærnhus, I., Assadi, M. (2013). Experimental investigation of temperature distribution over a planar solid oxide fuel cell. *Applied Energy*, 105, 155–160.
43. Lanzini, A., Leone, P., Guerra, C., Smeacetto, F., Brandon, N.P., Santarelli, M. (2013). Durability of anode supported Solid Oxides Fuel Cells (SOFC) under direct dry-reforming of methane. *Chemical Engineering Journal*, 220, 254–263.
44. Wang, Y., Yu, J., Cao, X. (2014). Numerical analysis of optimal performance of planar electrode supported solid oxide fuel cell at various syngas flow rates. *Energy Conversion Management*, 77, 637–642.
45. Ni, M., Shao, Z., Chan, K.Y. (2014). Modeling of proton-conducting solid oxide fuel cells fueled with syngas. *Energies*, 7, 4381–4396.
46. Fardadi, M., McLarty, D.F., Brouwer, J., Jabbari, F. (2014). Enhanced performance of counter flow SOFC with partial internal reformation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 19753–19766.
47. Baldinelli, A., Barelli, L., Bidini, G. (2015). Performance characterization and modelling of syngas-fed SOFCs (solid oxide fuel cells) varying fuel composition. *Energy*, 90, 2070–2084.
48. Bao, C., Jiang, Z., Zhang, X. (2015). Mathematical modeling of synthesis gas fueled electrochemistry and transport including H₂/CO co-oxidation and surface diffusion in solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 294:317–332.
49. Drewery, M., Kennedy, E., Alenazey, F., Dlugogorski, B., Stockenhuber, M. (2015). The effect of synthesis gas composition on the performance of Ni-based solid oxide fuel cells. *Chemical Engineering Research and Design*, 101, 22–26.
50. De Lorenzo, G., Fragiaco, P. (2015). Energy analysis of an SOFC system fed by syngas. *Energy Conversion and Management*, 93, 175–186.

51. Lebreton, M., Delanoue, B, Baron E, Ricoul F, Kerihuel A, Subrenat A, Joubert, O., Salle, A. (2015). Effects of carbon monoxide, carbon dioxide, and methane on nickel/yttria-stabilized zirconia-based solid oxide fuel cells performance for direct coupling with a gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 10231–10241.
52. Spallina, V., Mastropasqua, L., Iora, P., Romano, M.C., Campanari, S. (2015). Assessment of finite volume modeling approaches for intermediate temperature Solid Oxide Fuel Cells working with CO-rich syngas fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 15012–15031.
53. Chen, Z., Bian, L., Wang, L., Chen, N., Zhao, H., Li, F., Chou, K. (2016). Effect of hydrogen and carbon dioxide on the performance of methane fueled solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 7453–7463.
54. Kim, S.K., Mehran, M.T., Mushtaq, U., Lim, T.H., Lee, J.W., Lee, S.B., Park, S.J., Song, R.H. (2016). Effect of reverse Boudouard reaction catalyst on the performance of solid oxide carbon fuel cells integrated with a dry gasifier. *Energy Conversion and Management*, 130, 119–129.
55. Ong, K.M., Lee, W.Y., Hanna, J., Ghoniem, A.F. (2016). Isolating the impact of CO concentration in syngas mixtures on SOFC performance via internal reforming and direct oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 9035–9047.
56. Donazzi, A., Rahmanipour, M., Maestri, M., Groppi, G., Bardini, L., Pappacena, A., Boaro, M. (2016). Experimental and model analysis of the co-oxidative behavior of syngas feed in an Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 306, 467–480.
57. Miyake, M., Matsumoto, S., Iwami, M., Nishimoto, S., Kameshima, Y. (2016). Electrochemical performances of $\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x/\text{SDC}$ cermet anodes for intermediate-temperature SOFCs using syngas fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 13625–13631.
58. Aslannejad, H., Barelli, L., Babaie, A., Bozorgmehri, S. (2016). Effect of air addition to methane on performance stability and coking over NiO-YSZ anodes of SOFC. *Applied Energy*, 177, 179–186.
59. Choudhary, T., Sanjay. (2016). Computational analysis of IR-SOFC: Thermodynamic, electrochemical process and flow configuration dependency. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 1259–1271.
60. Lin, B., Shi, Y., Cai, N. (2017). Numerical simulation of cell-to-cell performance variation within a syngas-fuelled planar solid oxide fuel cell stack. *Applied Thermal Engineering*, 114, 653–662.
61. Reeping, K.W., Bohn, J.M., Walker, R.A. (2017). Palliative effects of H_2 on SOFCs operating with carbon containing fuels. *Journal of Power Sources*, 372, 188–195.

62. Ideris, A., Croiset, E., Pritzker, M. (2017). Ni-samaria-doped ceria (Ni-SDC) anode-supported solid oxide fuel cell (SOFC) operating with CO. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 9180–9187.
63. Jin, X., Singh, S., Verma, A., Ohara, B., Ku, A., Huang, K. (2018). The performance of syngas-fueled solid oxide fuel cell predicted by a Reduced Order Model (ROM): Pressurization and flow-pattern effects. *Journal of Power Sources*, 404, 96–105.
64. Stoeckl, B., Subotić, V., Preininger, M., Schroettner, H., Hochenauer, C. (2018). SOFC operation with carbon oxides: Experimental analysis of performance and degradation. *Electrochimica Acta* 275, 256–264.
65. Miyake, M., Iwami, M., Takeuchi, M., Nishimoto, S., Kameshima, Y. (2018). Electrochemical performance of Ni_{0.8}Cu_{0.2}/Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{1.9} cermet anodes with functionally graded structures for intermediate-temperature solid oxide fuel cell fueled with syngas. *Journal of Power Sources*, 390:181–185.
66. Tikiz, I., Taymaz, I., Pehlivan, H. (2019). CFD modelling and experimental validation of cell performance in a 3-D planar SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 15441–15455.
67. Rakesh, N., Dasappa, S. (2019, 10-12 Aralık). *Carbon Deposition on the Anode of a Solid Oxide Fuel Cell Fueled by Syngas—A Thermodynamic Analysis*. 7th International Conference on Advances in Energy Research, Bombay, 1083-1090.
68. Su, X., Zhang, F., Yin, Y., Tu, B., Cheng, M. (2020). Thermodynamic analysis and fuel processing strategies for propane-fueled solid oxide fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 204, 112279.
69. Lin, Y.C., Wei, W.C.J. (2020). Porous Cu–Ni-YSZ cermets using CH₄ fuel for SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 24253–24262.
70. Yu, F., Han, T., Wang, Y., Xie, Y., Zhang, J., Sun, H., Xiao, J., Yang, N. (2020). Performance improvement of a direct carbon solid oxide fuel cell via strontium-catalyzed carbon gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 23368–23377.
71. Chaudhary, T.N., Mehmood, M., Saleem, U., Abbasi, M.S., Chen, B. (2020). Modeling of thermal impacts in a single direct methane steam reforming solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 472, 228605.
72. Sarruf, B.J.M., Hong, J.E., Steinberger-Wilckens, R., de Miranda, P.E.V. (2020). Influence of novel anode design on the performance and coke resistance towards methane directly-fed solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 46, 5368–5379.
73. Corigliano, O., Fragiaco, P. (2020). Extensive analysis of SOFC fed by direct syngas at different anodic compositions by using two numerical approaches. *Energy Conversion and Management* 209, 112664.

74. Sugihara, S., Iwai, H. (2020). Experimental investigation of temperature distribution of planar solid oxide fuel cell: Effects of gas flow, power generation, and direct internal reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 25227–25239.
75. Arifin, N.A., Troskialina, L., Shamsuddin, A.H., Steinberger-Wilckens, R. (2020). Effects of Sn doping on the manufacturing, performance and carbon deposition of Ni/ScSZ cells in solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 27575–27586.
76. Farnak, M., Esfahani, J.A., Bozorgmehri, S. (2020). An experimental design of the solid oxide fuel cell performance by using partially oxidation reforming of natural gas. *Renewable Energy*, 147, 155–163.
77. Cao, Y., Dhahad, H.A., Sun, Y.L., Haghghi, M. A., Delpisheh, M, Athari, H., Farouk, N. (2021). The role of input gas species to the cathode in the oxygen-ion conducting and proton conducting solid oxide fuel cells and their applications: Comparative 4E analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 19569–19589.
78. Kong, W., Han, Z., Lu, S., Ni, M. (2021). A simple but effective design to enhance the performance and durability of direct carbon solid oxide fuel cells. *Applied Energy*, 287, 116586.
79. Yao, X., Asghar, M.I., Zhao, Y., Li, Y., Lund, P.D. (2021). Coking resistant Ni–La_{0.8}Sr_{0.2}FeO₃ composite anode improves the stability of syngas-fueled SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 9809–9817.
80. Guo, M., Xiao, G., Wang, J., Lin, Z. (2021). Parametric study of kW-class solid oxide fuel cell stacks fueled by hydrogen and methane with fully multiphysical coupling model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 9488–9502.
81. Panagi, K., Laycock, C.J., Reed, J.P., Guwy, A.J. (2021). The effects of fuel variability on the electrical performance and durability of a solid oxide fuel cell operating on biohythane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 2630–2645.
82. Lin, Z., Zhao, K., Cheng, G., Hu, S., Chen, M., Li, J., Chen, D., Xu, Q., Chang, M., Volodymyr O. (2021). Catalyst layer supported solid oxide fuel cells running on methane. *Journal of Power Sources*, 507, 230317.
83. Fan, L., Mokhov, A., Saadabadi, S.A., Brandon, N., Aravind, P.V. (2021). Methane steam reforming reaction in solid oxide fuel cells: Influence of electrochemical reaction and anode thickness. *Journal of Power Sources*, 507, 230276.
84. Xu, Q., Xia, L., He, Q., Guo, Z., Ni, M. (2021). Thermo-electrochemical modelling of high temperature methanol-fuelled solid oxide fuel cells. *Applied Energy*, 291, 116832.
85. Maza, W.A., Steinhurst, D.A., McIntyre, M.D., Walker, R.A., Owrutsky, J.C. (2021). Operando optical studies of solid oxide fuel cells operating on CO and simulated syngas fuels. *Journal of Power Sources*, 492, 229598.

86. Díaz-Aburto, I., Hidalgo, J., Fuentes-Mendoza, E., González-Poggini, S., Estay, H., Colet-Lagrange, M. (2021). Mo,Cu-doped CeO₂ as anode material of solid oxide fuel cells (SOFCs) using syngas as fuel. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 12, 246–256.
87. Xu, J., Wu, M., Song, Z., Chen, Y., Zhang, L., Wang, L., Cai, H., Su, X., Han, X., Wang, S., Long, W. (2021). In situ growth of LaSr(Fe,Mo)O₄ ceramic anodes with exsolved Fe–Ni nanoparticles for SOFCs: Electrochemical performance and stability in H₂, CO, and syngas. *Journal of the European Ceramic Society*, 41, 4537–4551.
88. Qiu, P., Yang, X., Sun, S., Jia, L., Li, J., Chen, F. (2021). Enhanced electrochemical performance and durability for direct CH₄–CO₂ solid oxide fuel cells with an on-cell reforming layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 22974–22982.
89. Williams, M.C. (2004). *Fuel Cell Handbook*. (7.Baskı). U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, Springfield, 1-2.
90. Zhu, B., Raza, R., Fan, L., Sun, C. (Editörler). (2020). *Solid Oxide Fuel Cells From Electrolyte-Based to Electrolyte-Free Devices*. Weinheim, Wiley, 15-20.
91. He, W., Lv, W., Dickerson, J.H. (2014). *Gas Transport in Solid Oxide Fuel Cells*. (1. Baskı), New York, Springer, 20-22.
92. College of the Desert and SunLine Transit Agency (2001). Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, *College of the Desert*, CA, 3.
93. Singhal, S., Kendall, K. (Editörler). (2003). *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*. (1. Baskı). Oxford, Elsevier Science; 20.
94. Stambouli, A.B., Traversa, E. (2002). Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 433–455.
95. Mahato, N., Banerjee, A., Gupta, A., Omar, S., Balani, K. (2015). Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review. *Progress in Materials Science*, 72, 141–337.
96. Nakajo, A., Mueller, F., Brouwer, J., Van Herle, J., Favrat, D. (2012). Mechanical reliability and durability of SOFC stacks. Part II: Modelling of mechanical failures during ageing and cycling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 9269–9286.
97. Ormerod, R. M. (2003). Solid oxide fuel cells. *Chemical Society Reviews*, 32, 17–28.
98. Zhu, B. (2009). Solid oxide fuel cell (SOFC) technical challenges and solutions from nano-aspects. *International Journal of Energy Research*, 33, 1126–1137.
99. Shri, P.B, Senthil, K. S., Aruna, S.T. (2014). Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 149–179.

100. Timurkutluk, B., Timurkutluk, C., Mat, M.D., Kaplan, Y. (2016). A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1101–1121.
101. Jazouli, S. (2016). Solid Oxide Fuel Cells Final Report. *Al Akhawayn University*, Ifrane, 15-18.
102. Cimenti, M., Hill, J.M. (2009). Direct Utilization of Liquid Fuels in SOFC for Portable Applications: Challenges for the Selection of Alternative Anodes. *Energies*, 2, 377–410.
103. Milewski, J., Lewandowski, J. (2010). Analysis of Design and Construction of Solid Oxide Fuel Cell in Terms of their Dynamic Operation. *Archivum Combustionis*, 30, 145–154.
104. Eziashi, J.J., Key, C., Smith, R., Amendola, R., Gannon, P.E., Froitzheim, J. (2013). Measuring Cr Volatility From Ferritic Stainless Steels: Novel and Conventional Methods Compared. *ECS Transactions*, 50, 43–49.
105. Ng, K.H., Rahman, H.A., Somalu, M.R. (2019). Review: Enhancement of composite anode materials for low-temperature solid oxide fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 30692–30704.
106. Internet: About the Solid Oxide Fuel Cell. (2020). Web: <https://www.osakagas.co.jp/en/rd/fuelcell/sofc/sofc/system.html> Erişim Tarihi: 23.09.2021.
107. Park, B.K., Lee, J.W., Lee, S.B., Lim, T.H., Park, S.J., Song, R.H., Shin, D.R. (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.
108. Sayan, Y. (2018). *Investigation of single-step sintering and performance of planar and wavy single-chamber solid oxide fuel cells*, Doktora Tezi, Loughborough University, 6-21.
109. Marin, G. B. (Editörler). (2014). *Advances in Chemical Engineering*, Elsevier; 25-32.
110. Veziroğlu, T.N., Şahin, S. (2008). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Energy Conversion and Management*, 49, 1820–1831.
111. Momirlan, M., Veziroğlu, T.N. (2005). The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 795–802.
112. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M.E., Akbulut, U., Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 25385–25412.
113. Al-Zareer, M., Dincer, I., Rosen, M.A. (2020). Production of hydrogen-rich syngas from novel processes for gasification of petroleum cokes and coals. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 11577–11592.

- 114.COMSOL Multiphysics Batteries & Fuel Cells Module User's Guide. U.S. Patents,USA,19-399.
- 115.Zhao, Y., Sadhukhan, J., Lanzini, A., Brandon, N., Shah, N. (2011). Optimal integration strategies for a syngas fuelled SOFC and gas turbine hybrid. *Journal of Power Sources*, 196, 9516–9527.
- 116.Kirubakaran, A., Jain, S., Nema, R.K. (2009). A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2430–2440.
- 117.Timurkutluk, B., Dokuyucu, S. (2018). The role of tape thickness on mechanical properties and performance of electrolyte supports in solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 44, 17399–17406.
- 118.Celik, S., Timurkutluk, B., Toros, S., Timurkutluk, C. (2015). Mechanical and electrochemical behavior of novel electrolytes based on partially stabilized zirconia for solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 41, 8785–8790.
- 119.Mat, A., Timurkutluk, B., Timurkutluk, C., Kaplan, Y. (2014). Effects of ceramic based pastes on electrochemical performance of solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 40, 8575–8583.
- 120.Celik, S., Timurkutluk, B., Mat, M.D. (2013). Measurement of the temperature distribution in a large solid oxide fuel cell short stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 10534–10541.
- 121.Ilbas, M., Bektas, A., Karyeyen, S. (2019). A new burner for oxy-fuel combustion of hydrogen containing low-calorific value syngases: An experimental and numerical study. *Fuel*, 256, 115990.
- 122.Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 57.
- 123.Zhang, H., Chen, J., Zhang, J. (2013). Performance analysis and parametric study of a solid oxide fuel cell fueled by carbon monoxide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 16354–16364.
- 124.Celik, S., Ibrahimoglu, B., Mat, M.D., Kaplan, Y., Veziroglu, T.N. (2015). Micro level two dimensional stress and thermal analysis anode/electrolyte interface of a solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 7895–7902.
- 125.Ben, M.H., Zitouni, B., Oulmi, K., Mahmah, B., Belhamel, M., Mandin, P. (2009). Hydrogen consumption and power density in a co-flow planar SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 5022–5031.
- 126.Henke, M., Kallo, J., Friedrich, K.A., Bessler, W.G. (2011). Influence of pressurisation on SOFC performance and durability: A theoretical study. *Fuel Cells*, 11, 581–591.

127. Mehdizadeh, C.Y., Adavi, K., Sayyad, A.J., Zendeboudi, S. (2021). A numerical simulation to effectively assess impacts of flow channels characteristics on solid oxide fuel cell performance. *Energy Conversion and Management*, 244, 114280.
128. Yang, S., Chen, T., Wang, Y., Peng, Z., Wang, W.G. (2013). Electrochemical Analysis of an Anode-Supported SOFC. *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 2330–2344.
129. Bae, Y., Lee, S., Hong, J. (2019). The effect of anode microstructure and fuel utilization on current relaxation and concentration polarization of solid oxide fuel cell under electrical load change. *Energy Conversion and Management*, 201, 112152.
130. Serincan, M.F., Pasaogullari, U., Sammes, N.M. (2009). Effects of operating conditions on the performance of a micro-tubular solid oxide fuel cell (SOFC). *Journal of Power Sources*, 192, 414–422.
131. Yahya, A., Ferrero, D., Dhahri, H., Leone, P., Slimi, K., Santarelli, M. (2018). Electrochemical performance of solid oxide fuel cell: Experimental study and calibrated model. *Energy*, 142, 932–943.
132. Ni, M., Leung, M.K.H., Leung, D.Y.C. (2007). Parametric study of solid oxide fuel cell performance. *Energy Conversion and Management*, 48, 1525–1535.
133. Patcharavorachot, Y., Arpornwichanop, A., Chuachuensuk, A. (2008). Electrochemical study of a planar solid oxide fuel cell: Role of support structures. *Journal of Power Sources*, 177, 254–261.
134. Su, S., Gao, X., Zhang, Q., Kong, W., Chen, D. (2015). Anode-Versus Cathode-Supported Solid Oxide Fuel Cell: Effect of Cell Design on the Stack Performance. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 2487–2503.
135. Wang, Y., Zhan, R., Qin, Y., Zhang, G., Du, Q., Jiao, K. (2018). Three-dimensional modeling of pressure effect on operating characteristics and performance of solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 20059–20076.



GAZİ GELECEKTİR..