



**KATOT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN
MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE NÜMERİK ANALİZİ**

Berre KÜMÜK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2018

Berre KÜMÜK tarafından hazırlanan “KATOT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE NÜMERİK ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Ayhan ALBOSTAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Atılım Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Adem ACIR

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 31/05/2018

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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

31/05/2018

KATOT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE NÜMERİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Berre KÜMÜK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Katı oksit yakıt hücresi, katı seramik elektrolit kullanarak yüksek sıcaklıkta çalışan ve bir yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisi ve ısıya dönüştüren elektrokimyasal cihazdır. Katı oksit yakıt hücreleri, ideal şartlar altında yüksek performansla çalışan cihazlardır. Bir katı oksit yakıt hücresinin performansını etkileyen sıcaklık, basınç gibi farklı işletme koşulları vardır. Bu tez çalışmasında, katı oksit yakıt hücresinin performansını etkileyen koşullar iyonik ve elektronik yük transferleri ile kütle, momentum, tür ve enerjinin korunumunu içeren hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) temelli model bir katı oksit yakıt hücresi geliştirilerek sayısal olarak incelenmiştir. Geliştirilen elektrolit destekli ve katot destekli katı oksit yakıt hücresi üzerinde farklı işletme koşullarının etkisi COMSOL Multiphysics® ticari yazılımı ile analiz edilmiş ve sonuçlar performans ve polarizasyon eğrileri ile verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde katot destekli katı oksit yakıt hücresinin performansının elektrolit destekli katı oksit yakıt hücresinin performansından çok daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, sıcaklık ve basınç değerlerinin artırılmasının ve oksitleyici olarak saf oksijen kullanılmasının katot destekli katı oksit yakıt hücresinin performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91408
Anahtar : Katot destekli KOYP, Matematiksel modelleme, Nümerik Analiz
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

MATHEMATICAL MODELLING AND NUMERICAL ANALYSIS OF CATHODE
SUPPORTED SOLID OXIDE FUEL CELL

(M. Sc. Thesis)

Berre KUMUK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

ABSTRACT

Solid oxide fuel cell is an electrochemical device that uses a solid ceramic electrolyte and operates at high temperature and converts the chemical energy that a fuel has directly into electrical energy and heat. Solid oxide fuel cells are devices that operate at high performance under ideal conditions. There are different operating conditions such as temperature, pressure, which affect the performance of a solid oxide fuel cell. In this thesis study, the conditions that affect the performance of the solid oxide fuel cell are numerically investigated by developing a model solid oxide fuel cell based on the computational fluid dynamics (HAD) model involving ionic and electronic charge transfer and conservation of mass, momentum, species and energy. The effect of different operating conditions on the developed electrolyte supported and cathode supported solid oxide fuel cell was analyzed with COMSOL Multiphysics® commercial software and the results are given in performance and polarization curves. When the results are evaluated, it is seen that the performance of the cathode supported solid oxide fuel cell is much better than the performance of the electrolyte supported solid oxide fuel cell. It has also been found that increasing the temperature and pressure values and using pure oxygen as the oxidant positively affects the performance of the cathode supported solid oxide fuel cell.

Science Code : 91408

Key : Cathode supported SOFC, Mathematical Modelling.

Page Number : 73

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluşmasında bilgisini ve deneyimlerini esirgemeyen ve her konu da yardım ve desteğini gördüğüm çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmam boyunca değerli tecrübelerini benden esirgemeyen ve tezimin gelişip sonuçlanmasında büyük emekleri bulunan Prof. Dr. Yüksel KAPLAN, Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK, Doç. Dr. Serkan TOROS ve Arş. Gör. Ömer GENÇ'e teşekkürü borç bilirim. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteğini benden esirgemeyen çok kıymetli aileme ve yürüdüğüm bu yolda bütün zorlukları benimle birlikte karşılayan sevgili eşim ve biricik oğluma bütün destekleri için teşekkür ederim. Ayrıca, 2016 yılında araştırma görevlisi olarak göreve başladığım Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm mesai arkadaşlarıma da ilgi ve yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım. Son olarak, tez çalışmamda yaptığım sayısal modelleme ve analizler için yazılım ve bilgisayar kaynaklarını benden esirgemeyen 'Ömer Halisdemir Üniversitesi-Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi' çalışanlarına minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. HİDROJEN ENERJİSİ	9
2.1. Hidrojenin Özellikleri	10
2.2. Hidrojen Üretimi	11
2.2.1. Fosil kaynaklardan hidrojen üretimi	12
2.2.2. Fotokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi	13
2.2.3. Güneş pili sistemleri ile hidrojen üretimi	13
2.2.4. Suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi	13
2.3. Hidrojenin Depolanması	14
3. YAKIT PİLLERİ.....	17
3.1. Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi	18
3.2. Yakıt Pillerinin Çeşitleri	19
3.2.1. Alkali yakıt hücresi	20
3.2.2. Fosforik asit yakıt hücresi.....	21
3.2.3. Eriyik karbonatlı yakıt hücresi	22
3.2.4. Polimer elektrolit yakıt hücresi	23
3.2.5. Katı oksit yakıt hücresi	24

4. KATOT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ	31
4.1. Katot Elektrot Tabakası	31
4.1.1. Katot tabakasında üçlü faz sınırı	31
4.1.2. Katot tabakasının reaksiyon mekanizması.....	32
4.2. Katot Destekli Katı Oksit Yakıt Pili	33
4.3 Katot Destekli Katı Oksit Yakıt Pilinin Avantaj ve Dezavantajları	33
5. SAYISAL (NÜMERİK) MODELLEME	35
5.1. Yakıt Pilinin Temelleri	35
5.1.1. Açık devre Potansiyeli	35
5.1.2. Polarizasyonlar	36
5.1.3. Gerçek hücre potansiyeli	38
5.1.4. Yakıt pili verimliliği	40
5.2. Matematiksel Modelleme.....	41
5.2.1. Genel denklemler	43
5.3. Sayısal Metot	48
5.4. Ağ Yapısı	48
5.5. Model Doğrulaması	49
6. BULGULAR VE İRDELEME	53
6.1. Destek Kalınlığının Etkisi	53
6.2. Oksitleyici Etkisi.....	57
6.3. Türlerin Dağılımı	60
6.4. Çalışma Sıcaklığının Etkisi	61
6.5. Çalışma Basıncının Etkisi	63
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69

ÖZGEÇMİŞ 73



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Enerji sistemlerinde üretilen kirletici miktarları	9
Çizelge 2.2. Hidrojen elementinin özellikleri	10
Çizelge 2.3. Hidrojen depolama yöntemleri ve yoğunlukları	15
Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitlerinin elektrolit malzemesi ve çalışma sıcaklığı.....	20
Çizelge 3.2. Silindirik ve düzlemsel katı oksit yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları ..	30
Çizelge 5.1. Katı oksit yakıt pilinin elektrokimyasal modelinde kullanılan giriş parametreleri	43
Çizelge 5.2. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin elektrokimyasal modelinde kullanılan giriş parametreleri	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. KOYP'nin sayısal modellemesinde dikkate alınması gereken parametreler...	2
Şekil 2.1. Hidrojen üretim yöntemleri	11
Şekil 2.2. Doğalgazdan buharlaştırma yöntemi ile hidrojen üretimi	12
Şekil 2.3. Kömürün gazlaştırılması ile hidrojen üretimi.....	12
Şekil 3.1. Yakıt pilinin çalışma prensibi.....	19
Şekil 3.2. Alkali Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi	21
Şekil 3.3. Fosforik asit yakıt hücresi çalışma prensibi.....	22
Şekil 3.4. Eriyik karbonatlı yakıt hücresi çalışma prensibi	23
Şekil 3.5. Polimer elektrolit yakıt hücresi çalışma prensibi.....	24
Şekil 3.6. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi	25
Şekil 3.7. Katı oksit yakıt pili MEG yapısının (a) kesit (b) izometrik görünüşü.....	37
Şekil 3.8. Katı oksit yakıt pili (a) tek hücre (b) stak	37
Şekil 3.9. Monolitik katı oksit yakıt pili	28
Şekil 3.10. Silindirik katı oksit yakıt pili	29
Şekil 3.11. Düzlemsel katı oksit yakıt pili	29
Şekil 3.12. Katı oksit yakıt pillerinin destek türlerine göre çeşitleri: (a) katot, (b) anot, (c) elektrolit destekli	30
Şekil 4.1. Üçlü faz sınırının gösterimi	32
Şekil 4.2. Katot destekli katı oksit yakıt pili.....	33
Şekil 5.1. Katı oksit yakıt pili için polarizasyon eğrisi	39
Şekil 5.2. Oluşturulan matematiksel modelin üç boyutlu görünümü	41
Şekil 5.3. Oluşturulan matematiksel modelin kesit görüntüsü	42
Şekil 5.4. Modelde kullanılan ağ örgü yapısı	49
Şekil 5.5. Matematiksel modelin doğrulanması.....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Elektrolit destekli KOYP ve katot destekli KOYP üzerinde destek kalınlığının etkisi.....	53
Şekil 6.2. Katot destekli katı oksit yakıt pili ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin toplam çıkış güçlerinin karşılaştırılması (a) farklı sıcaklıklarda ve (b) farklı basınçlarda	55
Şekil 6.3. Katot destekli katı oksit yakıt pili ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması (a) farklı sıcaklıklarda ve (b) farklı basınçlarda	56
Şekil 6.4. Elektrolit destekli ve katot destekli KOYP için farklı oksitleyici kullanımının hücre performansına etkisi	57
Şekil 6.5. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde farklı oksitleyiciler kullanıldığında hidrojen tüketimi (Kütle dağılımı)	58
Şekil 6.6. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde farklı oksitleyiciler kullanıldığında hidrojen tüketimi (Kütle dağılımı).....	59
Şekil 6.7. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde (a) oksijen tüketiminin (b) hidrojen tüketiminin (c) su üretiminin kütleli değişimi.....	60
Şekil 6.8. Farklı sıcaklık değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin performans eğrisi	61
Şekil 6.9. Farklı sıcaklık değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrisi	62
Şekil 6.10. Sıcaklık artışına bağlı olarak hidrojen tüketimi (kütleli).....	63
Şekil 6.11. Farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin performans eğrisi	64
Şekil 6.12. Farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrisi	65
Şekil 6.13. Basınç artışına bağlı olarak hidrojen tüketimi (kütleli).....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
c	Konsantrasyon
F	Faraday sabiti
I	Dış devre boyunca geçen akım
i	Akım yoğunluğu
i_{exc}	Değişken akım yoğunluğu
i_{lim}	Sınır akım yoğunluğu
\vec{J}	Difüzyon kütle akısı
k	Isıl iletkenlik
M_w	Moleküler ağırlık,
N	Avogadro sayısı
n	Dış devreden geçen elektronların mol sayısı
R	İdeal gaz sabiti
S/C	buhar/karbon
S_m	Kütle kaynak terimi
T	Sıcaklık
V	Potansiyel fark
ΔG	Molar Gibbs serbest enerjisi
ΔH	Entalpi değişimini
ΔS	Entropi değişimi
α	Yük transfer sabiti
ε	Gözeneklilik
ζ	Geçirgenlik
μ	Viskozite
μ_{yakıt}	Yakıt kullanım faktörü
η_{yakıt pili}	Yakıt pili verimliliği
$\vec{\tau}$	Gerilme tensörü

Simgeler**Açıklamalar** σ

İletkenlik

 ϕ

Elektrik potansiyeli

 ρ

Yoğunluk

Kısaltmalar**Açıklamalar****KOYP**

Katı oksit yakıt pili

LSM

Stronsiyum lantan manganit

MEG

Membran elektrot grubu

Ni/YSZ

Nikel- Yttrium stabilized zirkonyum sermet

ÜFB

Üçlü faz bölgesi

YSZ

Yttrium stabilized zirkonyum

1. GİRİŞ

Hızla artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte dünyada ve ülkemizde enerji ihtiyacı hızla artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan fosil yakıtlar ise sınırlı olup, petrol rezervlerine yaklaşık 50 yıl, doğalgaz rezervlerine yaklaşık 90 yıl, kömür rezervlerine ise yaklaşık 150 yıl ömür biçilmektedir. Ayrıca, elektrik üretme, ısıtma ihtiyacının karşılanması ve taşımacılıkta kullanılan bu yakıtlar karbon salınımına neden olarak çevreyi kirletmektedir. Aynı zamanda gelişen dünya ekonomisinde güç, enerji rezervlerini elinde bulunduran ülkelerdedir. Bu nedenle enerji kaynaklarını yeni teknolojilerle birlikte kullanabilen ülkeler dünya üzerinde söz sahibi olan ülkelerdir. Bu sebeplerden dolayı temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır [1].

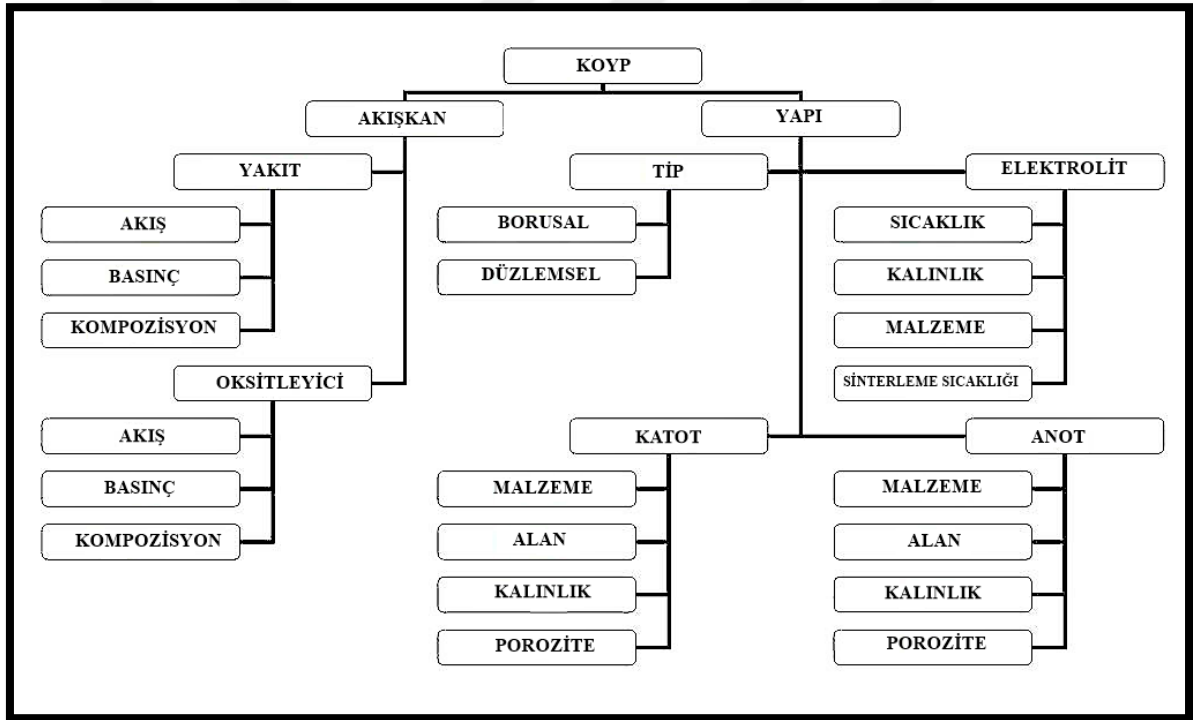
Bu tez çalışmasında, özellikle modüler olması ve çevreye zararlı salınımların neredeyse olmaması sebebiyle kullanımı oldukça yaygınlaşmaya başlayan katı oksit yakıt pilleri (KOYP) hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile matematiksel olarak modellenmiş ve farklı işletme koşulları altındaki performansları incelenmiştir. Katı oksit yakıt pilleri anot, elektrolit ya da katot destekli olmakta ve sahip oldukları destek türüne göre farklı performanslar göstermektedir. Çalışmada, elektrolit destekli KOYP ve katot destekli KOYP ayrı ayrı incelenmiş olup, ayrıca her ikisi arasında da karşılaştırma yapılmıştır. Literatürde, KOYP ait pek çok deneysel ve teorik çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar şöyle sıralanabilir:

Yakıt pillerine ait ilk çalışmalar 1839 yılında Sir William Grove tarafından çalışma prensibinin ortaya konulmasıyla ortaya çıkmıştır. Daha sonra 1889 yılında Nerst yakıt pilinde seramik malzeme kullanımına başlamış ve katı oksit yakıt pilini keşfetmiştir. İlk katı oksit yakıt pili çalışmaları 1937 yılında Baur tarafından 1000°C sıcaklıkta yapılmıştır [2].

Yakıt pilleri ile ilgili yapılan çalışmalar geçmişten günümüze kadar malzeme geliştirme, maliyet azaltma, yakıt çeşitliliğinin artırılması gibi konularda yapılmıştır. Bu çalışmalar deneysel olarak yürütüldüğü gibi çeşitli ticari yazılımlar kullanılarak sayısal modellemeler yapılmış ve çalışma parametrelerinin katı oksit yakıt pili üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu konudaki ilk çalışmalardan birisi Yakabe ve diğeri tarafından yapılan KOYP'nin üç boyutlu sayısal akışkanlar dinamiği modellemesi ile termo-akışkan analizidir [3].

KOYP yapısal olarak basit olsa da modelleme kısmında zorluklar çıkartan bir yapıdır. Çünkü sayısal modelleme yapılırken kullanılacak olan katsayıların sayısı bir hayli fazladır. Bu nedenle sayısal modelleme sonucunda genellikle belirli parametrelerin etkisi incelenebilir. Ayrıca sayısal modelleme de tek bir hücre incelendiyse bu çalışmanın uygulamada stak boyutuna taşınması farklı problemler ortaya çıkarabilmektedir. KOYP'ni sayısal olarak modellerken dikkate alınması gereken parametreler Şekil 1.1'de verilmiştir [4].



Şekil 1.1. KOYP'nin sayısal modellemesinde dikkate alınması gereken parametreler

Severson ve Assadi, yaptıkları çalışmada anot destekli KOYP'nde farklı sıcaklıklar, elektrolit kalınlıkları, gözeneklilik ve gözenek ölçülerinin performans üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda sıcaklık arttıkça konsantrasyon kayıpları artarken ohmik ve aktivasyon kayıplarının azaldığını görmüşlerdir. Konsantrasyon kayıpları üzerinde sıcaklık etkisini, sıcaklık arttıkça difüzyon katsayısı artmasına rağmen gaz yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak açıklamışlardır. Aynı zamanda gözenek ölçüleri büyüdükçe, Knudsen difüzyon katsayısı azaldığı için

konsantrasyon kayıplarının azaldığını görmüşlerdir. Gözeneklilik ise difüzyon katsayısını arttırdığı için konsantrasyon kayıplarını azaltmıştır [5].

Ni ve diğerleri KOYP'nin akım-voltaj eğrisini gösteren elektrokimyasal bir model geliştirmişlerdir. Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpları belirlemek için sırasıyla Butler-Volmer denklemi, Fick modeli ve Ohm kanunu kullanılmıştır. Çalışmanın önemli bir özelliği, hem değişken akım yoğunluğu hem de gaz difüzyon katsayısı hücrenin mikro yapısına ve işletme koşullarına bağlı olarak ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda aktivasyon ve ohmik kayıpların sıcaklık arttıkça azalırken, konsantrasyon kayıplarının arttığı gözlenmiştir. Bu durum, sıcaklığın artmasıyla gaz difüzyon katsayısı artarken gaz yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, yakıt içerisindeki hidrojen içeriğinin ve çalışma basıncının artırılması da hücre performansını olumlu yönde etkilemiştir [6].

Baldinelli ve diğerleri yaptıkları çalışmada anot destekli KOYP'nin performansına farklı yakıt karışımlarının etkisini incelemişlerdir. Başlangıçta, çeşitli gaz birleşimleri bir KOYP üzerinde denenmiştir. Daha sonra deneysel veriler kullanılarak matematiksel bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içinde olan bu çalışma, KOYP temelli hibrid sistemlerin oluşturulabileceğinin bir göstergesidir [7].

Morales ve diğerleri geleneksel elektrolit destekli KOYP yerine altıgen hücrelere sahip olan ve bal peteği olarak adlandırılan elektrolite sahip bir KOYP geliştirmiştir. Altıgen hücreler mekanik dayanımı arttırmıştır. Geliştirilen model, üretim maliyetini yaklaşık %70 düşürmüştür. Aynı zamanda 900°'de 1.13 V açık devre voltajı ve 320 mW/cm² hücre performansı ölçülmüştür [8].

Liu ve diğerleri yaptıkları çalışmada anot destekli KOYP'nde yakıt konsantrasyonu ve yakıt hızının akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımı üzerine etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Star-CD yazılımını kullanarak geliştirdikleri model, deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum göstermiştir. Çalışmanın sonucunda yakıt hızı arttıkça yakıt kullanımı azalırken güç yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir [9].

DiGiuseppe ve diğerleri, Comsol yazılımı aracılığıyla anot destekli KOYP performansını incelemişlerdir. Geliştirdikleri modelde akışkanlar dinamiği, elektrokimya, elektrik iletkenliği ve difüzyon fiziği yer almaktadır. Çalışmada hava ve yakıt hızı ile elektrot

gözenekliliğinin yakıt pili performansına etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda yakıt hücresinden yakıt besleme borusuna olan mesafenin ve hava odasının geometrisinin etkisi incelenmiştir. Modelleme sonunda, KOYP elektrokimyasal performansının hava ve yakıt hızının yüksek olduğu durumlarda akış hızından bağımsız olduğu görülmüştür. Akış hızlarının etkisini gözlemleyebilmek için elektrotların gözenekliliği değiştirildiğinde ise gözenekliliğinde hücre performansı üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Yakıt besleme borusuna olan mesafenin etkisi ise elektrot yüzeyi yakınındaki reaktanların mol dağılımlarının eşit olmaması sebebiyle hücre performansını etkilemektedir [10].

Anderson ve diğerleri, yaptıkları çalışmada COMSOL programı aracılığıyla orta sıcaklıkta çalışan anot destekli KOYP geliştirmişlerdir. Çalışmada, elektrotlardaki iyon ve elektron taşıma direncinin etkileri ile çalışma sıcaklığı ve hava akışı fazlalığının etkileri incelenmiştir. Modelleme sonucunda elektrotlardaki iyonik aktarım kıvrımları ile hava akış hızı azaltıldığında veya hücre çalışma sıcaklığı arttığında hücre akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür [11].

Oulmi ve diğerleri ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon kayıplarının yakıt pilinde sıcaklık dağılımına etkisini inceleyebilmek için Fortran dilinde anot ve elektrolit destekli iki farklı model geliştirmişlerdir. Çalışma sonunda anot veya elektrolit destekli olması farketmezsiniz, maksimum sıcaklık değerlerinin elektrolit tabakası içerisinde olduğu görülmüştür. Ancak, kayıpların neden olduğu ısı, düşük yakıt sıcaklıklarıyla beslenen elektrolit destekli KOYP içindeki sıcaklık dağılımı üzerinde daha fazla etkiye sebep olmuştur. Ayrıca, yakıt sıcaklığındaki artış, anot destekli KOYP içerisinde daha düşük sıcaklık gradyanına yol açmıştır. Sonuç olarak, yakıt pili performansı üzerinde sıcaklığın önemli bir rol oynadığı görülmüştür [12].

Hussain ve diğerleri yaptıkları çalışmada anot destekli düzlemsel katı oksit yakıt pili için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada yakıt olarak saf H_2 değil, H_2 , H_2O , CO , CO_2 ve CH_4 'ten oluşan bileşik kullanılmıştır. Geliştirilen modelde basınç, sıcaklık, gözeneklilik, akış kanalı kıvrımları ve hacimsel dağılım verim üzerindeki etkileri bakımından incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda anot destekli bir KOYP'nin konsantrasyon kayıplarının yüksek akım yoğunluklarında bile ohmik kayıplardan dört kat daha az olduğu görülmüştür. Aynı zamanda yakıt pilindeki toplam kayba en büyük etkinin

ohmik kayıplar olduğu bulunduğundan, hücre performansını arttırmak için bu kayıpların en aza indirilmesi gerektiği saptanmıştır [13].

Jiang vd. (2006) silindirik katı oksit yakıt pili üzerinde hücre konfigürasyonu ve işletme koşullarını parametrik olarak detaylı olarak incelemişlerdir. Basınç, sıcaklık, kütleli debi, buhar/karbon oranı (S/C) ve bu işletme koşullarına ek olarak hücre çapı ve uzunluğunu da verime etki eden hücre konfigürasyonları olarak incelenen parametrelerdir. Çalışma sonunda yüksek çalışma basıncının performansı arttırdığı görülmüştür. Aynı zamanda yüksek çalışma sıcaklığı hem Nerst potansiyelini hem de kayıpları azalttığı için yakıt pili performansını da artırır. S/C oranının yüksek olması Nerst potansiyelini azaltan H₂ konsantrasyonu ve kısmi basınçta artışa neden olmuştur. Ayrıca hücre çapının artmasının aktivasyon alanını artırması sebebiyle akım yolunu arttırdığı için ohmik kayıpta artışa neden olduğu bulunmuştur. Artan hücre uzunluğu ise basınç düşüşünün istenmeyen etkilerine neden olmuştur [14].

Serincan ve diğerleri yaptıkları çalışmada mikro silindirik bir katı oksit yakıt hücresinin performansına etki eden işletme koşullarını incelemişlerdir. Anot polarizasyon eğrisi üzerindeki sıcaklık, basınç, yakıt konsantrasyonu ve yakıtın kütleli debisinin etkisi Comsol programı yardımıyla analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda sıcaklık artışının kütle taşınım kayıplarının azaltırken iyonik iletkenlik ve katalitik etkinliği arttırdığından yakıt pili performansında olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca yakıt kütleli debisinin akım yoğunluğu seviyesine göre seçilmesi gerektiği saptanmıştır. Orta seviyelerdeki akım yoğunluklarında düşük kütleli debi, yüksek seviyelerdeki akım yoğunluklarında ise yüksek kütleli debi seçilmesi gereklidir. Aynı zamanda hidrojen açısından zengin olan yakıt konsantrasyonlarında daha yüksek çıkış gücü elde edilmiştir [15].

Niu ve diğerleri geliştirdikleri elektrolit destekli bir KOYP'nin gözenekli elektrotlarında gözeneklerin Knudsen difüzyonu ve toplam difüzyona olan etkisini incelemişlerdir. Gözeneklilik ve akım yoğunluğu ile konsantrasyon kayıplarının arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, gözenekliliğin yarıçapı arttıkça elektrotlardaki gaz difüzyonunun azaldığını ve akım yoğunluğu ile konsantrasyon kayıplarında kayda değer bir fark olmadığını tespit etmişlerdir [16].

Shy ve diğeri yaptıkları deneysel çalışmada anot destekli ve elektrolit destekli KOYP'nin performanslarını ölçmüşlerdir. Her iki yakıt pili 40 x 40 mm² etkin reaktif alana sahip olup her ikisi içinde 850°C'de anot ve katot tabakalarında aynı akış hızı beş farklı basınç değeri için çalışılmıştır. Çalışma sonucunda basınç değişimlerinin anot destekli KOYP'nde ohmik ve polarizasyon kayıpları daha az olduğu için güç %54 oranında artarken elektrolit destekli yakıt pilinde %30 oranında arttığı görülmüştür [17].

Hsieh ve diğeri, anot destekli KOYP ve elektrolit destekli KOYP'nin sıcaklık ve basınca bağlı olarak performans değişimlerini deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada üç farklı sıcaklık (750°C, 800°C ve 850°C) ve beş farklı basınç (1, 2, 3, 4, 5 atm) değeri için deneyler yapılmıştır. Deney sonucunda anot destekli KOYP'nin basınç artışına bağlı olarak elektrolit destekli KOYP'nden daha fazla güç ürettiği gözlenmiştir. Sıcaklık 750°C'den 850°C'ye arttığında ise anot destekli/elektrolit destekli güç yoğunlukları 175/97 mW cm⁻²'den 309/193 mW cm⁻² 'ye artmıştır. Bu durum ise güç yoğunlukları üzerinde sıcaklığın basınçtan daha etkin olduğunu göstermektedir [18].

Min ve diğeri derin daldırma yöntemi ile elektrolit destekli silindirik KOYP'ni üreterek saf hidrojen ve karbonca zengin yakıtlar için yakıt pilinin performansını test etmişlerdir. Çalışma sonucunda 800°C 'de maksimum güç yoğunluğu karbonca zengin yakıtlarda 280 mW cm⁻² iken hidrojen yakıt olarak kullanıldığında 330 mW cm⁻² değerindedir. Bu sonuçlar hücre performansının elektrolitin ohmik direncinden etkilendiğini göstermektedir [19].

Liu ve diğeri mikro-silindirik katot destekli KOYP'ni üreterek performansını test etmişlerdir. KOYP'nin performansı 500 °C, 550 °C ve 600 °C'de ölçülmüş ve sırasıyla 0.11 W cm⁻², 0.13 W cm⁻² ve 0.16 W cm⁻² maksimum güç yoğunlukları elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda maksimum güç yoğunluğunu tüp uzunluğunun katot akım toplama kollektörlerinin oluşturduğu yüksek yüzey direncinden daha fazla etkilediği bulunmuştur [20].

Su ve diğeri, KOYP'nin performansına hücre dizaynının etkisini gözlemleyebilmek için nümerik bir çalışma yapmışlardır. Nümerik analiz sonucu anot destekli KOYP'nde ortalama akım yoğunluğu 5580 A m⁻² iken katot destekli KOYP'nde bu değer 7033 A m⁻² olarak çıkmıştır. Bu sonuç anot destekli KOYP'nde daha ince katot tabakası olması ve

daha fazla katot ohmik kayıplarına sahip olması ile açıklanabilmektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde optimum rib genişliği olan bir katot destekli KOYP, anot destekli KOYP'nden çok daha fazla güç üretebildiği görülmektedir [21].

Su ve diğerleri yaptıkları nümerik çalışmada, anot destekli KOYP ve anot-katot destekli KOYP'nin ohmik ve konsantrasyon kayıplarının karşılaştırmasını yapmışlardır. Aynı işletme şartları altında anot destekli KOYP'nin ortalama akım yoğunluğu 6388 A m^{-2} iken anot-katot destekli KOYP'nde 7713 A m^{-2} 'dir. Anot-katot destekli KOYP'nin avantajı; aktif reaksiyon bölgesinin artmasını sağlayan yüksek oksijen konsantrasyonu altındaki ribler ve katot ohmik kayıplarının azalmasını sağlayan elektrik akımlarının geçiş yolundaki kesit alanının fazla olmasıdır. Çalışmada performans karşılaştırmaları farklı katot elektrik iletkenliği, gözeneklilik, kıvrımlılık ve çıkış voltajı değerleri için yapılmıştır. Sonuçlar, anot-katot destekli KOYP'nin anot destekli KOYP'nden daha avantajlı olduğunu göstermektedir [22].

Yu ve diğerleri geliştirdikleri iki boyutlu model ile anot destekli silindirik KOYP ve katot destekli silindirik KOYP'nin performansını incelemiştir. Farklı sıcaklık, elektriksel iletkenlik, gözeneklilik, temas direnci ve çıkış voltajı değerleri ile yapılan çalışma sonucunda katot destekli silindirik KOYP'nin performansının anot destekli silindirik KOYP'nden daha iyi olduğu gözlenmiştir. Özellikle katot destekli silindirik KOYP'nde düşük sıcaklık, düşük katot iletkenliği, yüksek katot gözenekliliği ve düşük çıkış voltajlarında performans oldukça yüksektir [23].

Yamaguchi ve diğerleri mikro-silindirik katot destekli KOYP'ni ekstrüzyon yöntemi ile üretmişlerdir. Ürettikleri bu yakıt pilinin performansını farklı sıcaklık değerlerinde ölçmüşlerdir. $550 \text{ }^\circ\text{C}$, $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 750°C sıcaklıklarda yapılan performans ölçümlerinde maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 46.5 mW cm^{-2} , 163.2 mW cm^{-2} ve 452.8 mW cm^{-2} olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar diğer literatür örnekleri ile karşılaştırıldığında yüksek performanslı mikro-silindirik KOYP üretildiği görülmüştür [24].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; anot ve elektrolit destekli KOYP'ne ait pek çok nümerik ve deneysel çalışmaların oldukça fazla olduğunu görülmektedir. Bu durum, anot destekli KOYP ve elektrolit destekli KOYP'nin deneysel olarak üretimi oldukça kolay olduğundan yapılan nümerik çalışmalar deneysel çalışmalarla rahatlıkla

doğrulanabilmektedir. Ancak katot destekli KOYP'nin deneysel olarak oldukça yüksek sıcaklıklarda sinterlenmesi gerektiğinden hala bu konudaki çalışmalar devam etmektedir. Bu sebeple katot destekli KOYP'nin analizleri hala nümerik çalışmalar aşamasındadır. Yukarıda bahsedilen eksiklikleri gidermek amacıyla yapılan bu tez çalışmasında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayısal analiz yöntemi kullanılarak katot destekli KOYP'nin performansı incelenmiştir. Katot destekli KOYP'nin performansının sıcaklık ve basınç parametrelerine göre nasıl değiştiği COMSOL programı aracılığıyla analiz edilmiştir.



2. HİDROJEN ENERJİSİ

Dünyada hızla artan enerji ihtiyacı ile birlikte fosil kaynakların kullanımıyla ortaya çıkan en büyük problemlerden biri CO₂ salınımının artması olmuştur. CO₂ salınımının artması ile birlikte atmosferdeki sera gazı etkisi artmış ve dünya ortalama sıcaklığı artış eğilimine geçmiştir. Artan ortalama sıcaklık ile iklim değişikliklerinin meydana gelmesi kaçınılmazdır. Meydana gelen bu olumsuz etkiler ile doğal ekolojik sistemlerin dengesi bozulacak, su kaynakları azalacak, orman yangınları, kuraklık ve çölleşme artacaktır [25].

Dünyamızı korumak ve gelecek nesillere yaşanabilir bir yer bırakmak hepimizin temel görevlerindedir. Bu nedenle, hükümetler enerji ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik oldukça çevreci ve yüksek verime sahip yakıtlara yönelik enerji politikaları geliştirmektedir. Bu noktada, hidrojen enerjisinin önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Çizelge 2.1’de kullanılan yakıtların çevreyi kirletme oranları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Enerji sistemlerinde üretilen kirletici miktarları [26]

Kirletici	Fosil Yakıt (kg/GJ)	Kömür/Sentetik Yakıt(kg/GJ)	Solar/Hidrojen(kg/GJ)
CO ₂	72,4	100	0
CO	0,8	0,65	0
SO ₂	0,38	0,5	0
NO _x	0,34	0,32	0,1
HC	0,2	0,12	0
Partikül Madde	0,09	0,14	0

Çizelge 2.1’de de görüldüğü üzere, hidrojen sistemlerinin kullanımı ile çevreye salınan zararlı gaz miktarı fosil yakıtlar kullanımına göre oldukça düşüktür. Ayrıca hidrojen enerjisi, çeşitli yöntemlerle çeşitli kaynaklardan üretilebilmekte, üretimi yapılan yerden kullanılacak yere taşınırken enerji kaybı oldukça az olan ve içten yanmalı motorlar, ulaşım araçları, sanayi, ev kullanımı gibi pek çok alanda kullanılabilen bir enerjidir. Hidrojen,

doğalgaz, kömür gibi fosil kaynaklardan elde edilebildiği gibi daha temiz kaynaklar olan biyokütle, su gibi kaynaklardan da üretilebilmektedir. Aynı zamanda hidrojen bu kaynaklardan üretilip kullanıldığı için enerji taşıyıcısı olarak adlandırılmaktadır.

2.1. Hidrojenin Özellikleri

Hidrojen, yeryüzünde en çok bulunan, en küçük ve en hafif olan ve bir proton ve bir elektrondan oluşan bir elementtir. Hidrojene ait özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Hidrojen elementinin özellikleri

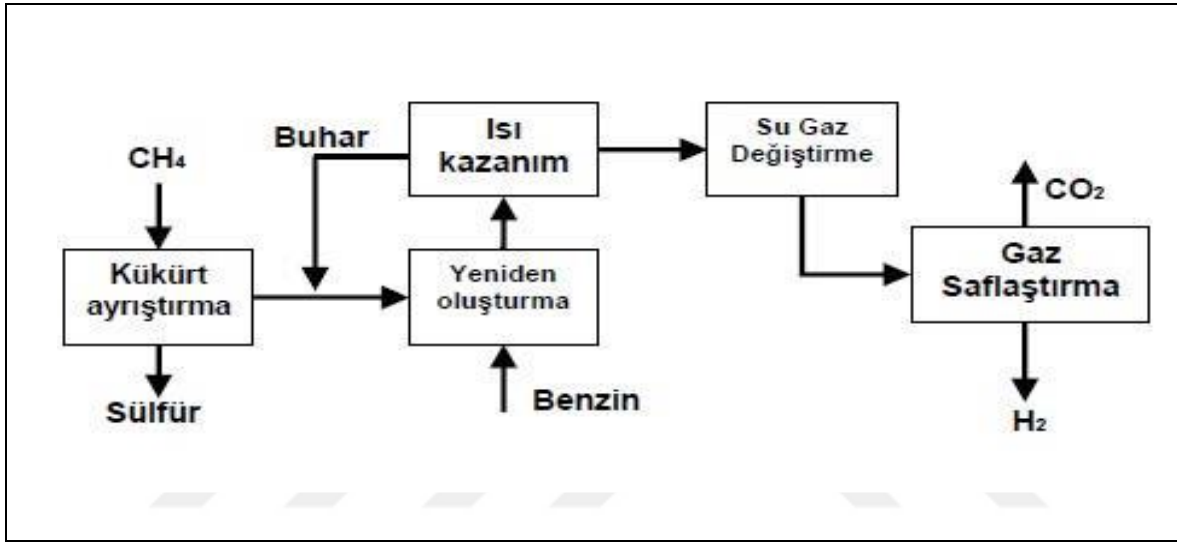
Sembol	H
Proton ve Elektron Sayısı	1
Nötron Sayısı	0
Elektron dizilişi	1s ¹
Yoğunluk(Gaz)	0.0852 kg/m ³
Isıl kapasite	14.32 J/kgK

Hidrojen, doğadaki en hafif element olup, kokusuz, renksiz ve saydam bir yapıdadır. Petrol yakıtlarına göre yaklaşık 1,5 kat daha verimli olan gaz hidrojenin birim hacminin ısı değeri 0,013 MJ/m³ olup doğalgazın %32,5’i değerindedir. Birim kütesinin değeri ise 141,9 MJ/kg olmakla birlikte doğalgazın yaklaşık 2 katı değerindedir. 1 kg hidrojenin sağladığı enerjiyi yaklaşık 2 kg doğalgaz ve 3 kg petrol sağlayabilmektedir. Bu bilgi ışığında, hidrojenin birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip olduğu söylenebilmektedir.

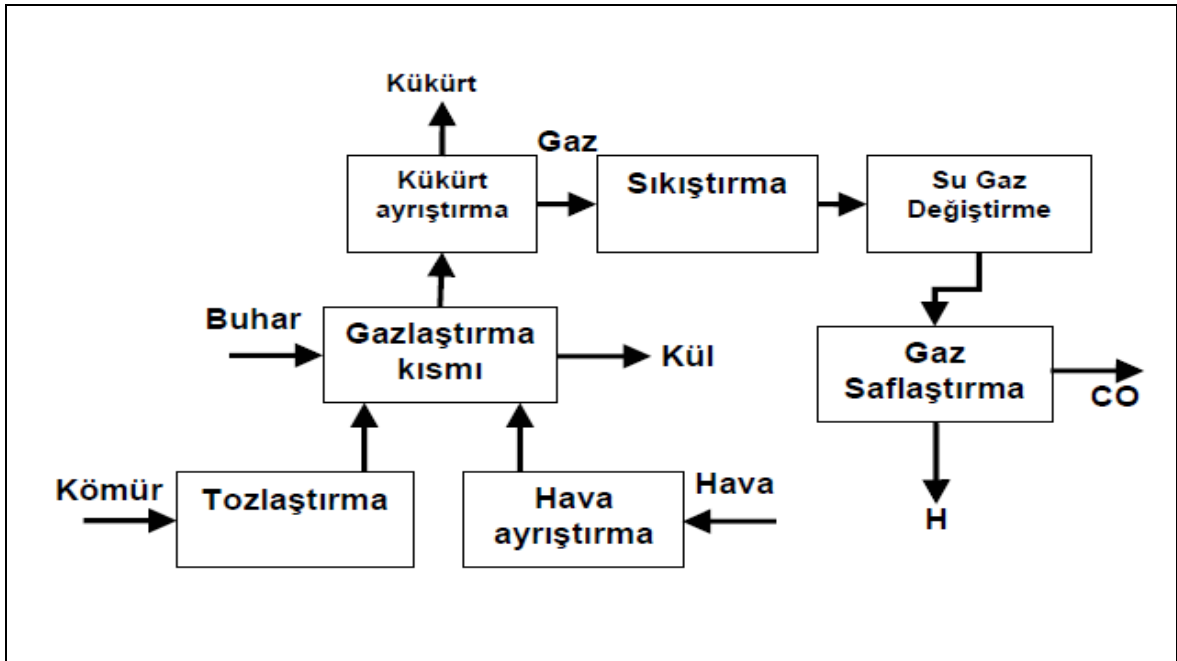
Hidrojen üretim, depolama ve taşıma kaynaklı sıkıntılardan dolayı diğer yakıtlara göre daha fazla maliyete sahip olmaktadır. Ancak bu sıkıntıları çözmek amaçlı araştırma-geliştirme çalışmaları tüm dünyada hızla devam etmektedir. Örneğin, günlük yaşamda kullanılan elektrik enerjisinin depolanma sorununa karşın, bu enerjinin hidrojene dönüştürülerek depolanması son zamanlarda dünya üzerinde kabul görmüş alternatif yöntemlerden biridir.

2.2.1. Fosil kaynaklardan hidrojen üretimi

Hidrojen, doğalgazın katalitik buhar ıslahı, petrolün kısmi oksidasyonu, kömür gazlaştırılması ve buhar demir işlemi ile doğalgaz, kömür ve petrol ürünleri gibi fosil kökenli kaynaklardan elde edilmektedir. Şekil 2.2’de doğalgazdan buharlaştırma yöntemi ile hidrojen üretimi gösterilirken Şekil 2.3’te kömürün gazlaştırılması ile hidrojen üretm şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Doğalgazdan buharlaştırma yöntemi ile hidrojen üretimi [28]



Şekil 2.3. Kömürün gazlaştırılması ile hidrojen üretimi[28]

2.2.2. Fotokimyasal yöntem ile hidrojen üretimi

Fotokimyasal yöntemde, su hidrojen ve oksijenlerine güneş enerjisinin mor ötesi (UV) ışınlarını kullanarak ayrışmaktadır.

2.2.3. Güneş pili sistemleri ile hidrojen üretimi

Güneş pili sistemleri ile hidrojen üretiminde öncelikle güneş pili ile DC elektrik akımı üretilerek bu akımın suyun oksijen ve hidrojenine ayrışması için kullanılması sağlanır.

2.2.4. Suyun elektrolizi ile hidrojen üretimi

Hidrojen üretimi için geçmişten günümüze kadar kolay ve verimli olması sebebiyle en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde elektrolit içinde bulunan suya elektrik akımı verilerek sahip olduğu hidrojen ve oksijen ayrıştırılmaktadır. Elektroliz işleminin basamakları Eş. 2.1-3'te verilmiştir.

Katot tepkimesi:



Anot tepkimesi:



Net tepkime:



2.3. Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin depolanması, hidrojeni ürettiğimiz noktada kullanmayacağımız durumlarda gerekli bir durumdur. Yani hidrojenin kullanıldığı hemen her yerde depolanması önemli bir noktadır. Ancak hidrojenin kritik sıcaklığının düşük olması ve hızlı yayılabilen bir gaz olması nedeniyle depolamada bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunları aşmak için geliştirilen yöntemler ise depolamaya ek maliyetler getirmektedir. Bu nedenle, hidrojenin kullanılacağı ortama ve uygulamaya göre bir depolama yönteminin seçilmesi oldukça önemlidir.

Hidrojenin depolanması üzerine yapılan ilk çalışmalarda hidrojenin gaz halinde depolanması düşünülmüştür. Ancak bu durumda çok yüksek hacimler gerekeceği için boru hatlarının ve depolama tanklarının boyutlarının oldukça büyük olması gerekmektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için düşünülen bir yöntem olan hidrojen gazının basınç altında taşınması ise tankların yüksek basınca dayanıklı olmasını gerektirmiş ve bu durumda da tankların ağırlığı oldukça artmıştır. Bu durumda kapasite sorunlarını ortaya çıkartmıştır. Örneğin, hidrojenin çelik tüplerde yaklaşık 200-250 atm basınç altında depolanması düşünüldüğünde kullanılacak olan tüpün kütlesi depolanan hidrojenin kütlesinden yaklaşık 100 kat fazladır. Bunun için üretilen çözüm yöntemi ise kompozit tüplerin kullanılmasıdır ancak bu tüpler çelik tüplerden yaklaşık 3 kat daha az kütleye sahip olmasına rağmen maliyeti oldukça fazladır.

Hidrojen sıvı olarak depolandığında ise depolama yapılan tanktan günde yaklaşık %2-3'ü buharlaşarak kaybolmaktadır. Çünkü sıvı hidrojen -253°C 'de buharlaşmaya başlamaktadır.

Hidrojenin bir diğer depolanma şekli olan ağır metallere tutturularak depolanmasında ise yine ağırlık konusunda sıkıntılar yaşandığı için başarılı olunamamıştır.

Çizelge 2.3'de hidrojenin depolama yöntemleri ile birlikte yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 2.3. Hidrojen depolama yöntemleri ve yoğunlukları

Depolama Şekli	kgH ₂	kgH ₂ /m ³
Yüksek kapasite (10 ² -10 ³ m ³)		
Yer altı	-	5-10
Yer üstü (Basınç altında)	0.01-0.014	2-16
Metal Hidrit	0.013-0.015	50-55
Sıvı Hidrojen Tankı	~1	65-69
Düşük Kapasite (1-100 m ³)		
Basınçlı Silindirik	0.012	~15
Metal Hidrit	0.012-0.014	50-53
Sıvı Hidrojen Tankı	0.15-0.50	~65
Araç Tankları(0.1-0.5 m ³)		
Basınçlı Silindirik	0.05	15
Metal Hidrit	0.02	55
Sıvı Hidrojen Tankı	0.09-0.13	50-60



3. YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri, yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine ve ısıya dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır. Temiz ve yüksek verimliliğe sahip enerji dönüştürücüsü olarak tanımlanabilirler.

İlk yakıt pili 1839 yılında İngiliz fizikçi William Grove tarafından yapılmıştır. Ancak o dönemlerde araştırma ve uygulamada daha çok ısı makineleri ön planda olduğundan yakıt pilleri yaklaşık yüz yirmi yıl sonra günlük hayatta kullanılmaya başlanmıştır. Yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar ABD Uzay Ajansı NASA'nın uzay çalışmaları sürecinde Apollo ve Gemini uzay programlarında yakıt pili teknolojisinin kullanılmasıyla artmıştır. Japonya ve ABD'de otomotiv sanayisinde kullanılmasıyla da elektrik üretimi amaçlı sabit sistemlerde kullanım artmaya başladığından yakıt pilleri üzerindeki çalışmalar hızla artmaktadır.

Yakıt pilleri ilk kullanılmaya başladığı zamanlarda yakıt olarak sadece saf hidrojen kullanılabilirdi. Ancak uzun araştırmalar sonucunda günümüzde çeşitli hidrokarbonlar işlenerek yakıt pilinde kullanılan yakıt çeşitleri petrol ürünleri, doğal gaz, etanol ve metanol olarak arttı. Son zamanlarda ise çalışmalar biyokütleden metanol üretilerek yakıt pillerinde kullanıldığını görmekteyiz.

Yakıt pilleri, geçmişten günümüze kadar yaygın bir şekilde kullanılan alışlagelmiş elektrik üretim sistemleri ile bazı benzerlikler göstermektedir. Bilindiği gibi bu sistemlerde yakıt pillerinde olduğu gibi bir yakıt ve bir oksitleyici madde tepkimeye girmektedir. Ancak yakıt pilinden farklı olarak bu sistemlerde elektrik enerjisini elde edebilmek için yakıt ve oksitleyici maddenin bir yanma tepkimesine girmesi ve birçok ara işlemin gerçekleşmesi gerekmektedir. Gerçekleşen ara işlemlerin her birinde enerji kaybı olduğundan sistem düşük verimli olmaktadır. Ancak yakıt pillerinde bu ara işlemlere ihtiyaç duyulmaz [30]. Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürdüklerinden daha verimlidirler. Ayrıca, bahsedilen elektrik üretim sistemlerinde yanma tepkimeleri gerçekleştiğinden çok yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Ancak yakıt pillerinde daha düşük sıcaklıklarda elektrik üretilmektedir.

Yakıt pilleri, isimlendirilmesinden de anlaşılacağı üzere bataryalar (piller) ile de benzerlik göstermektedir. Bataryalar, bir yakıt ve oksitleyiciye ile dolu oldukları sürece akım,

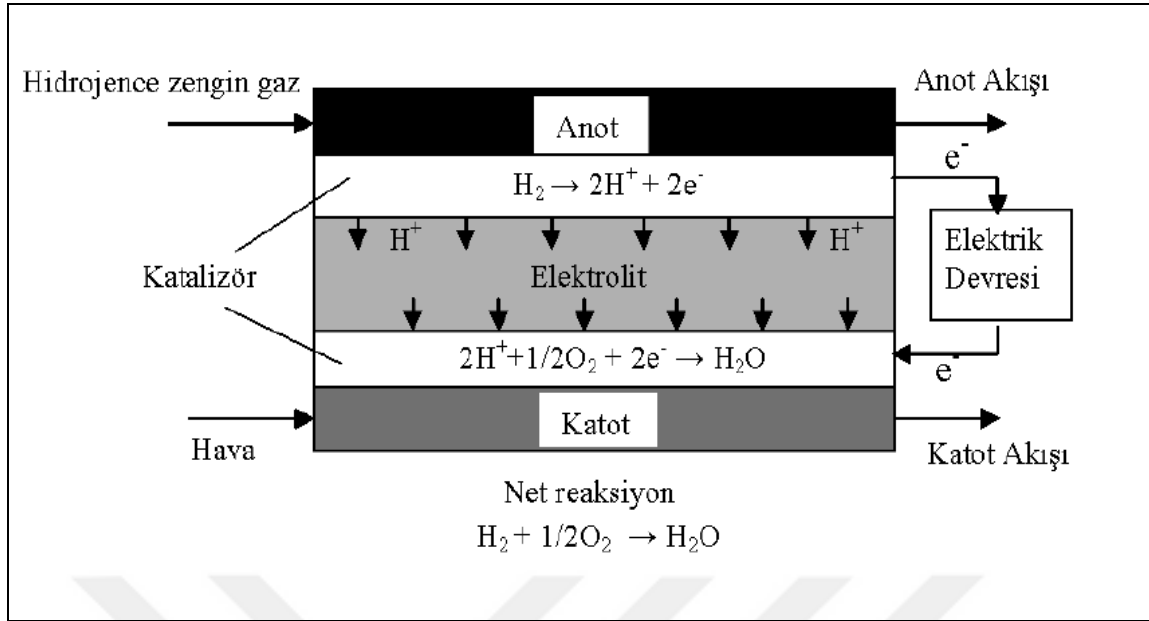
reaksiyonun kimyasal ürünlerini ve ısı üretirler. Bu durum, batarya boşalınca kadar sürekli şekilde devam eder. Bu basit temelden, yakıt pillerinin de yakıt ve oksitleyici sağlandığı sürece bir batarya gibi çalıştığı düşünülmektedir. Yani bir yakıt pili, şarj edilebilir bir bataryadır. Yakıt pili ve batarya arasındaki fark ise pozitif ve negatif kutuplardır. Bir bataryada pozitif ve negatif kutuplar daima belliyken, yakıt pilinde yakıtın gönderildiği taraf pozitif kutup, oksitleyicinin gönderildiği taraf negatif kutuptur.

Yakıt pilleri, küçük ölçekli (0-100 W) ve büyük ölçekli (1-500 kW) olmak üzere pek çok ısı ve elektrik üretimi uygulamalarında, araç motorlarında ve uzay teknolojilerinde olmak üzere çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yakıt pillerinin avantajları;

- Alışlagelmiş elektrik üretim makineleri gibi verimlerinin Carnot verimi ile sınırlı olmaması,
- Modüler olmaları,
- Zararlı emisyonlarının olmaması,
- Hareketli parça içermemeleri,
- Yakıt çeşitliliğine sahip olmaları,
- Sessiz çalışmaları olarak sıralanabilir. Dezavantajları ise;
- Maliyetlerinin yüksek olması,
- Yakıt depolama sorunu,
- Yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığında yakıt maliyetinin yüksek olması olarak sıralanabilir.

3.1. Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yakıt pilinin çalışma prensibi [29]

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere, anot tarafından gönderilen hidrojen, proton ve elektronlarına ayrılarak yükseltgenir. Katot tarafından gönderilen hava içerisindeki oksijen ise indirgenir. Bu durum, anot ve katot elektrotlar arasında potansiyel bir fark oluşturur. Oluşan bu potansiyel fark dış bir devrede kullanıldığında ürün olarak su elde edilir ve reaksiyonun kimyasal enerjisi elektrik ve ısı olarak serbest bırakılır [29].

3.2. Yakıt Pillerinin Çeşitleri

Yakıt pilleri, elektrolit tipine göre sınıflandırılabilirler gibi, çalışma sıcaklığı ve kullandıkları yakıtı göre de sınıflandırılabilirler. Ancak yaygın olan çalışma sıcaklığı ve elektrolit tipine göre sınıflandırmaktır. Yakıt pilleri çalışma sıcaklıklarına göre; düşük sıcaklık yakıt pili ($25^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$), orta sıcaklık yakıt pili ($100^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$), yüksek sıcaklık yakıt pili ($500^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$) ve çok yüksek sıcaklık yakıt pili (1000°C ve daha yüksek) olarak sınıflandırılırlar. Ayrıca, elektrolit tipine göre; alkali yakıt hücresi, fosforik asit yakıt hücresi, katı oksit yakıt hücresi, erimiş karbonat yakıt hücresi, polimer elektrolit yakıt hücresi olarak sınıflandırılırlar. Çizelge 3.1'de yakıt hücresi çeşitleri ve temel özellikleri görülmektedir.

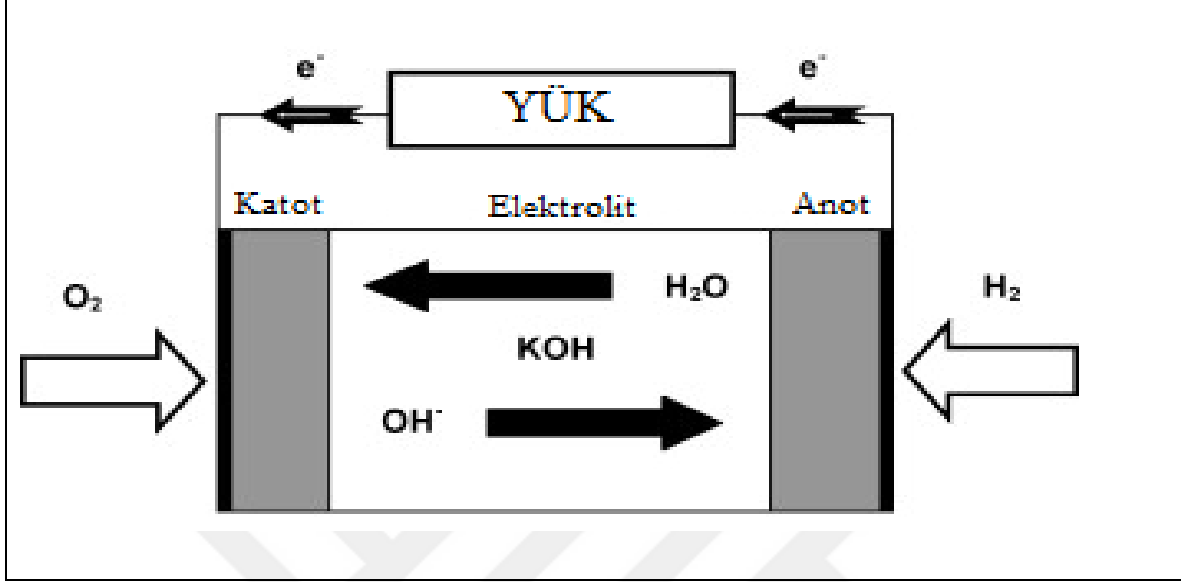
Çizelge 3.1. Yakıt hücresi çeşitlerinin elektrolit malzemesi ve çalışma sıcaklığı [30]

YAKIT HÜCRESİ TİPİ	ELEKTROLİT MALZEMESİ	ÇALIŞMA SICAKLIĞI
Alkali Yakıt Hücresi	Sulu potasyum hidroksit çözeltisi	60°C-250°C
Fosforik Asit Yakıt Hücresi	Gözenekli silikon karbit matriks içinde sulu fosforik asit	160°C-220°C
Katı Oksit Yakıt Hücresi	Zirkonyum tabanlı yittra	600°C-1000°C
Eriyik Karbonatlı Yakıt Hücresi	Gözenekli matriks içinde eriyik alkali metal	600°C-800°C
Polimer Elektrolit Yakıt Hücresi	Katı porfluro sülfonik asit polimer	30°C-100°C

3.2.1. Alkali yakıt hücresi

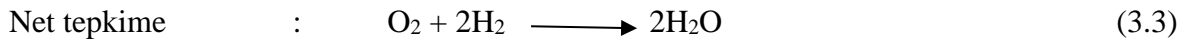
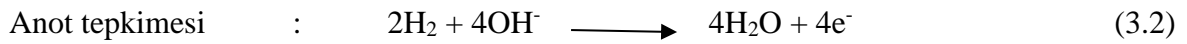
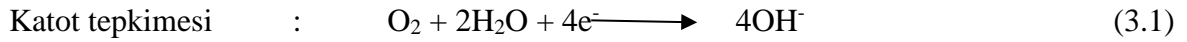
Alkali yakıt hücresinde elektrolit olarak sulu potasyum hidroksit çözeltisi kullanılır ve yaklaşık olarak 80°C civarında çalışılır. En önemli avantajları elektrolit malzeme maliyetlerinin düşük ve verimliliğinin yüksek (uzay aracı uygulamalarında %60 kadar) olmasıdır. Ancak karbondioksit karşı oldukça hassas olan bu yakıt hücresinde karbondioksit zehirlenmesinin önüne geçmek için kullanılan yakıt saf hidrojen olmalıdır. Bu yakıt hücresinde hidroksil iyonları (OH⁻) katottan anota doğru hareket ederken anotta

hidrojenle tepkimeye girer ve su ve elektron açığa çıkar. Şekil 3.2’de alkali yakıt hücresinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Alkali yakıt hücresi çalışma prensibi [31]

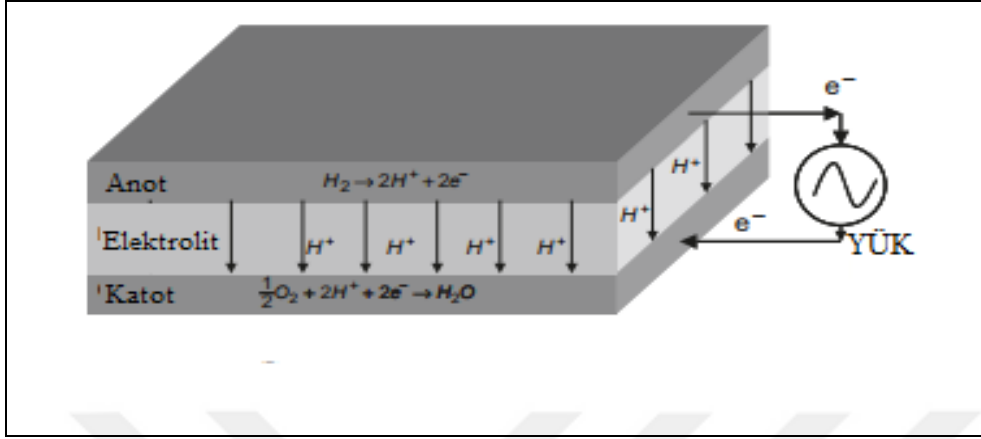
Alkali yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen tepkimeler Eş. 3.1-3’te gösterildiği gibidir.



3.2.2. Fosforik asit yakıt hücresi

1960 yıllarında ticari uygulamalar için geliştirilen fosforik asit yakıt hücresi, asidik ve yüksek yoğunlukta sıvı bir elektrolite sahiptir. Yaklaşık olarak 160-220°C arasında çalışma sıcaklığına sahiptir. Elektrolit olarak kullanılan fosforik asitin kararlı bir asit olmasından dolayı elektrot olarak sadece platin ve/veya platin alaşımlar kullanılabilir. Bu yakıt hücresinde hidrojen iyonları elektrolit vasıtasıyla anottan katoda doğru ilerlerken anotta oluşan elektronların oluşturduğu akım dış bir devre aracılığıyla toplanır. Katotta ise

hidrojen iyonları ve oksijen birleşerek suyu oluştururlar. Şekil 3.3’de fosforik asit yakıt hücresinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



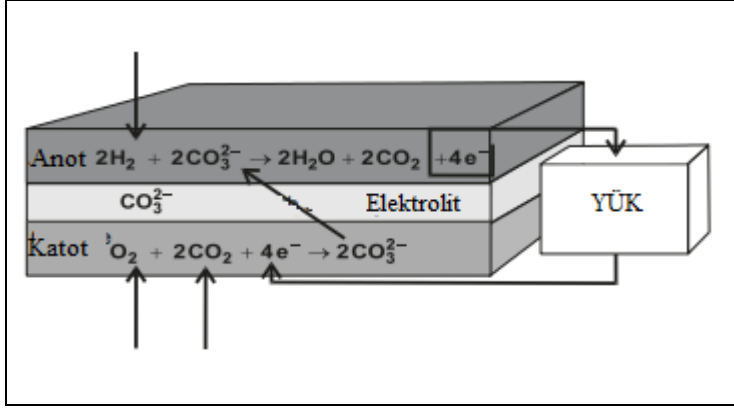
Şekil 3.3. Fosforik asit yakıt hücresi çalışma prensibi [32]

Fosforik asit yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen tepkimeler Eş. 3.4-6’da gösterildiği gibidir.



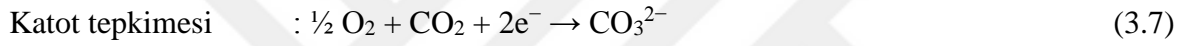
3.2.3. Eriyik karbonatlı yakıt hücresi

Eriyik karbonatlı yakıt hücresinde elektrolit olarak eriyik alkali karbon karışımı kullanılır. Çalışma sıcaklığı 650 °C civarındadır. Bu sıcaklıkta eriyen karbonat iyonları anottan katoda doğru hareket ederler. Anotta ise hidrojen karbonat iyonlarıyla tepkimeye girerek su, karbondioksit ve elektron üretir. Diğer düşük sıcaklık yakıt hücrelerine göre karbonmonoksit zehirlenme ihtimali daha düşük olduğundan kömür kökenli yakıtların kullanılabilmesi eriyik karbonatlı yakıt hücreleri için bir avantajdır. Ayrıca elektrolitin sıvı olması bu yakıt hücresi için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Şekil 3.4’de eriyik karbonatlı yakıt hücresinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



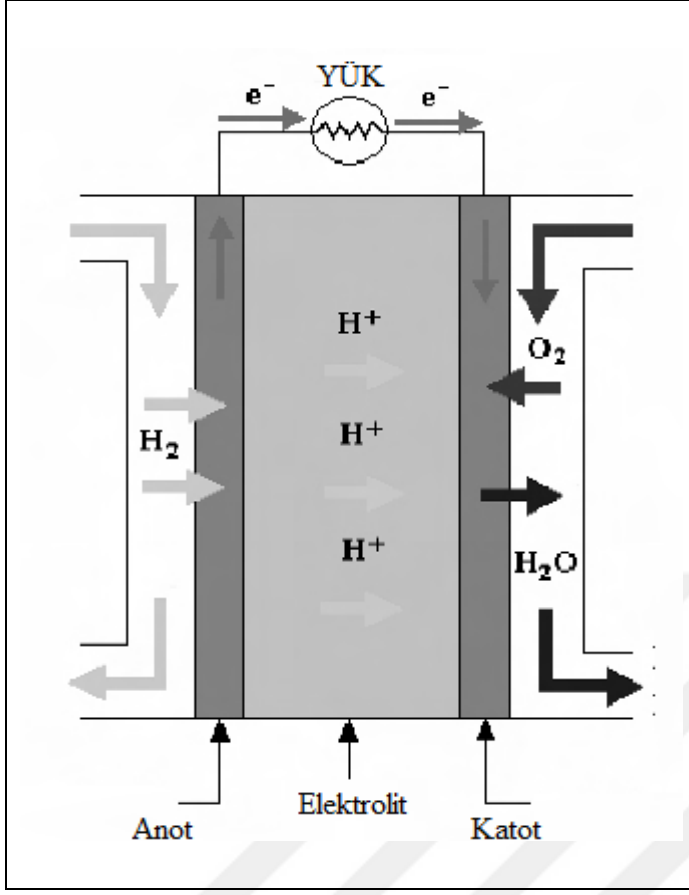
Şekil 3.4. Eriyik karbonatlı yakıt hücresi çalışma prensibi [32]

Eriyik karbonatlı yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen tepkimeler Eş. 3.7-9'da gösterildiği gibidir.



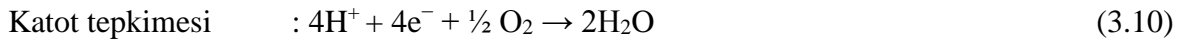
3.2.4. Polimer elektrolit yakıt hücresi

Uygulamada pek çok yerde kullanılan polimer elektrolit yakıt hücreleri yaklaşık olarak 20-100°C'de çalışırlar. Sahip oldukları proton ileten polimerik zar sayesinde korozyona karşı dirençli, karbondioksit gazına karşı toleranslı ve yüksek güç üretimi mümkün olan yakıt hücresi çeşitleridir. Polimer elektrolit yakıt hücresinde hidrojenin pozitif yüklü protonları anottan katoda doğru yayılırlar. Elektronlar ise dış bir devre aracılığıyla toplanırlar. Bu yakıt hücresinin verimi yaklaşık olarak %40-50 arasındadır. Şekil 3.5'de polimer elektrolit yakıt hücresinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Polimer elektrolit yakıt hücresi çalışma prensibi [30]

Polimer elektrolit yakıt hücresinin elektrotlarında gerçekleşen tepkimeler Eş. 3.10-12'de gösterildiği gibidir.



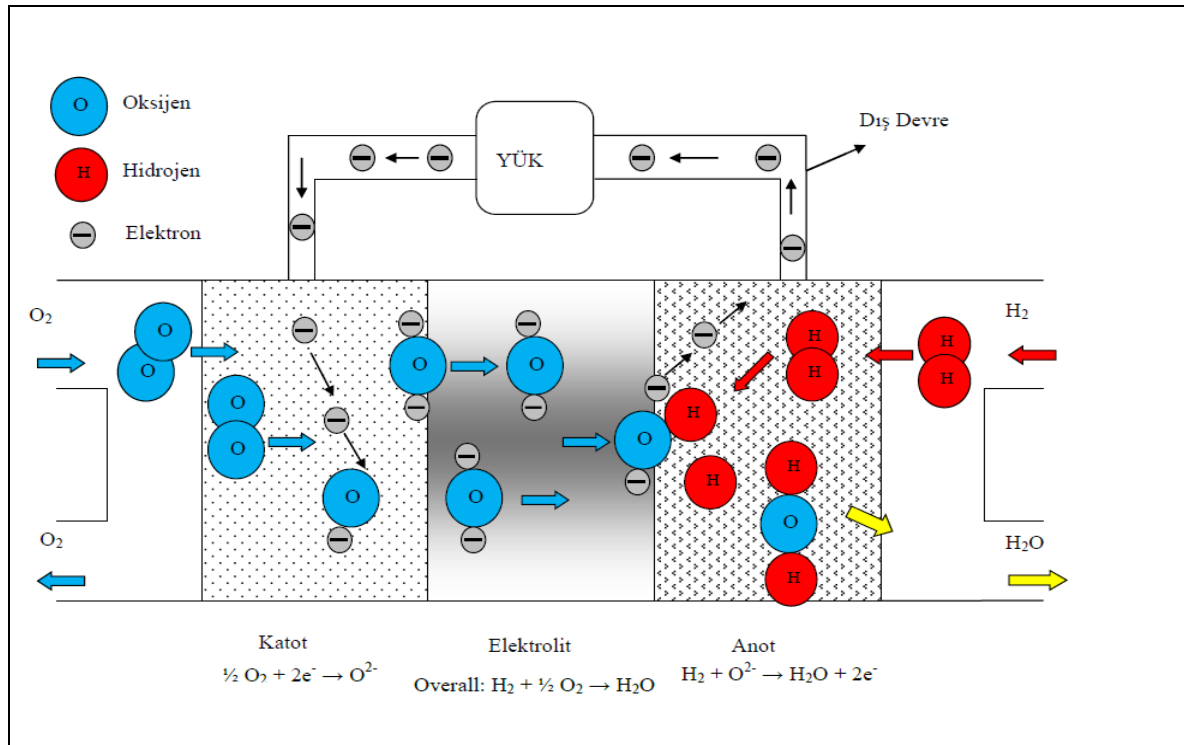
3.2.5. Katı oksit yakıt hücresi

Katı oksit yakıt hücreleri, katı seramik elektrolit kullanan yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücresi sistemleridir. Gelişen teknoloji ile yaklaşık 500°C'de çalışabileceği söylene de, genellikle 800-1000 °C arasında çalışır. Katı oksit yakıt hücrelerinin avantajı, tepkime süresince salınan yüksek sıcaklıklı ısının yeniden bir başka işlem ısısı olarak kullanılabilmesidir. Bu yakıt hücresinde negatif yüklü oksijen iyonları elektrolit üzerinden

anot tarafına geçerler. Anotta üretilen elektronlar ise diğer yakıt hücrelerinde olduğu gibi dış bir devre aracılığıyla toplanır. Katı oksit yakıt hücrelerinin verimleri yaklaşık %60 civarındadır.

Katı oksit yakıt hücresinin çalışma prensibi

Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi [34]

Katı oksit bir yakıt pilinde anotta yüksek sıcaklık etkisiyle hidrojen proton ve elektronlarına ayrılır. Burada oluşan elektronlar dış bir devre aracılığıyla katot tabakasına geçer ve katot tabakasında bulunan oksijen gazı ile birleşerek O²⁻ iyonlarını oluşturur. Bu iyonlar elektrolit tabakasından doğru anot tabakasına geçer ve hidrojenle birleşir. Böylelikle su ve elektrik üretilmiş olur. Burada dikkat edilmesi gereken konu, yukarıda bahsedilen diğer yakıt pili çeşitlerinden farklı olarak iyon hareketinin anot tabakasından katot tabakasına doğru değil, katot tabakasından anot tabakasına doğru gerçekleşmesidir.

Katı oksit yakıt pilinin anot/elektrolit ara yüzeyinden ve katot tabakasında meydana gelen reaksiyonlar Eş. 3.13 ve Eş.3.14'de verildiği gibidir:

Elektrolit/anot ara yüzeyinde:



Katotta:



Katı oksit yakıt pilleri, diğer yakıt pili çeşitleri ile karşılaştırıldığında pek çok avantaja sahiptir. Ancak, diğer yakıt pili çeşitlerinde de olduğu gibi her uygulamada rahatlıkla kullanılamaz. Yüksek sıcaklıkta çalışması çoğu zaman önemli bir avantaj oluştursa da bazı durumlarda dezavantaj olabilmektedir.

Katı oksit bir yakıt pilinin avantajları:

- Asil olmayan metal katalizörler kullanıldığından malzeme maliyeti düşüktür.
- Yüksek çalışma sıcaklığı ve anot tabakasında su üretimi aktivasyon kayıplarını ve pahalı katalizör kullanımını büyük ölçüde azaltmaktadır.
- Yüksek sıcaklıklı atık ısıya sahip olduğundan kojenerasyon sistemleri ile entegre edildiğinde sistem verimliliği %80'e kadar çıkabilmektedir.
- Karbon monoksit zehirlenmesine karşı toleranslıdır.
- Kullanılan katı seramik elektrolit, yüksek sıcaklıkta çalışan sıvı elektrolite sahip yakıt pillerine göre elektrolit buharlaşmasına ve korozyona karşı dirençlidir.

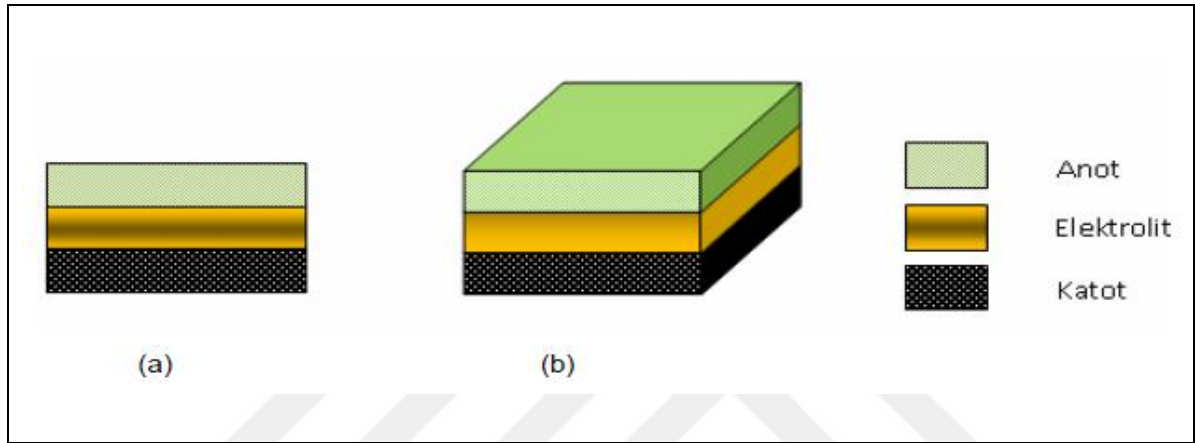
Katı oksit yakıt pilinin dezavantajları:

- Sistemin güç yoğunluğu polimer elektrolit yakıt pilinden daha düşüktür.
- Elektrolitin belli bir sıcaklığa kadar iletken olmaması yakıt pilinin çalışmaya başlaması için geçen süreyi arttırır.
- Üretim ve çalışma sırasında meydana gelen ısıl gerilmelerden kaynaklanan malzeme zararlarının kontrolü zordur.

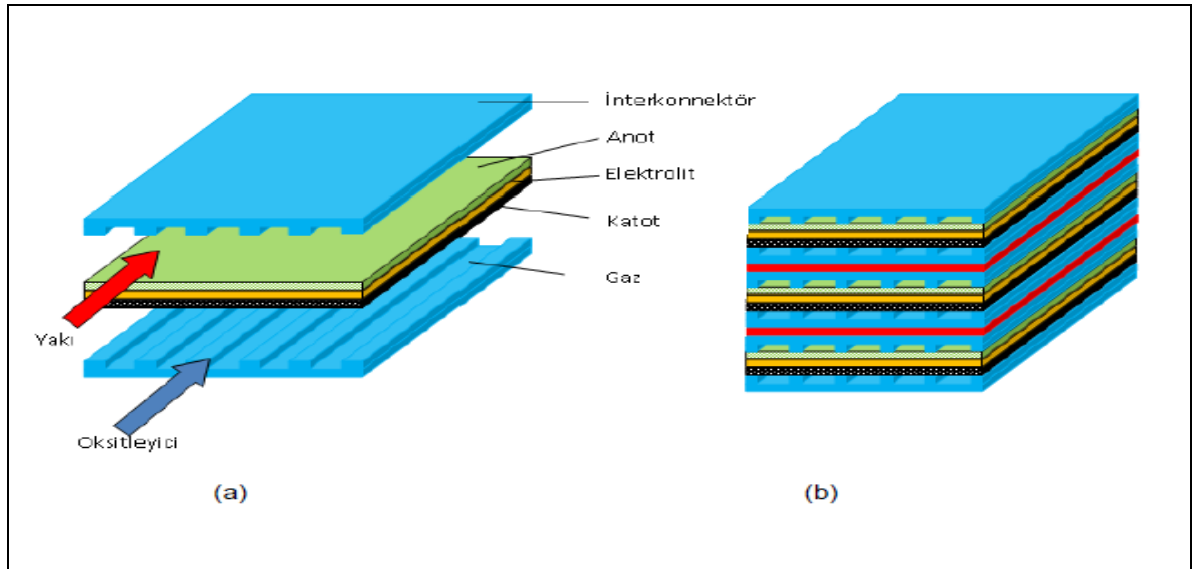
Katı oksit yakıt hücresinin elemanları

Katı oksit yakıt pili temel olarak membran elektrot grubu (MEG) ve interkonnektör elemanlarından oluşmaktadır. MEG, iyon geçirgenliği olan katı seramik bir elektrolitin iki

yüzeyinde olan gaz geçirgenliğine sahip anot ve katot elektrot tabakalarından oluşmaktadır. İnterkoneksiörler ise elektrotlardan akım toplayabilmek için geliştirilmişlerdir. Katı oksit yakıt pilinde tek bir hücre gaz sızdırmazlık malzemeleri, MEG ve iki adet koneksiörden oluşmaktadır. Tek hücre 0,5-0,9 V arasında DC voltaj üretebilir ve bu güç arttırılmak istendiğinde bu hücreler seri ve/veya paralel bağlanarak katı oksit yakıt pili stakları oluşturulur [35]. Şekil 3.7’de MEG yapısının kesit ve izometrik görünüşü, Şekil 3.8’de ise tek hücre ve stak görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.7. Katı oksit yakıt pili MEG yapısının (a) kesit (b) izometrik görünüşü [36]



Şekil 3.8. Katı oksit yakıt pili (a) tek hücre (b) stak [36]

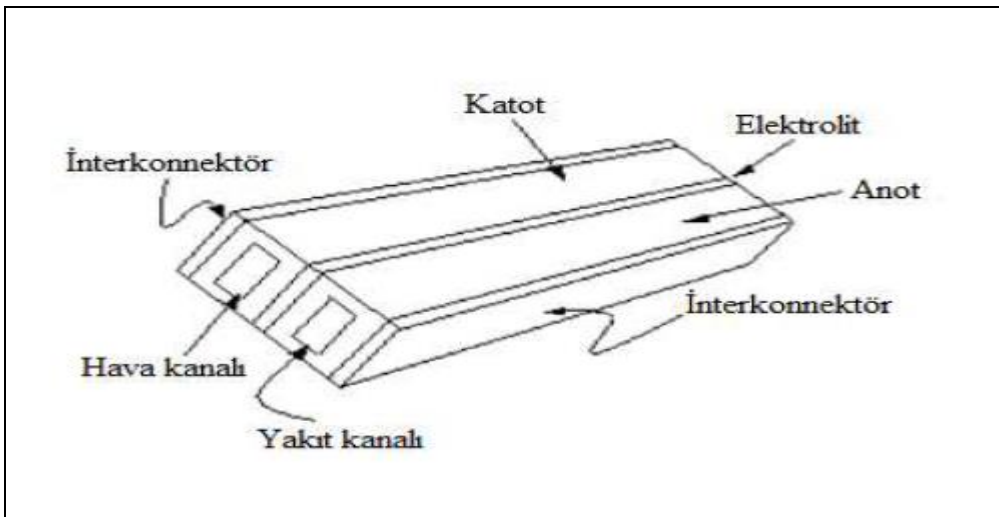
Katı oksit yakıt pilinde anot ve katot elektrot olarak kullanılan malzemeler metal olduklarından elektronik iletkenliğe sahiptirler. Bu tabakalara iyonik iletkenlik ise

elektrolit malzemesinin eklenmesi ile kazandırılır. Ayrıca bu tabakalar gaz geçişine izin verecek şekilde gözenekli yapıdadır. Ancak elektrolit tabakası gazı geçirmez özellikte olmalı ve elektronik olarak yalıtkan olmalıdır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında sahip oldukları özellikler dolayısıyla katı oksit bir yakıt pilinde genel olarak elektrolit, anot ve katot tabakalarında sırasıyla yttrium stabilize zirkonyum oksit (YSZ), nikel ve YSZ sermet (Ni/YSZ) ve stronsiyum lantan manganit (LSM) malzemeleri kullanılır. YSZ, termodinamiksel ve kimyasal kararlılığı yüksek ve 1000°C civarlarında iyonik iletkenliği oldukça iyi olan bir malzemedir. LSM ise perovskit yapıda olup elektriksel ve iyonik iletkenliği oldukça yüksektir. Ni/YSZ iyi bir kimyasal kararlılığa sahip olmakla birlikte iyi bir akım toplayıcısıdır. Aynı zamanda maliyeti düşük olduğundan tercih edilirliliği artmaktadır.

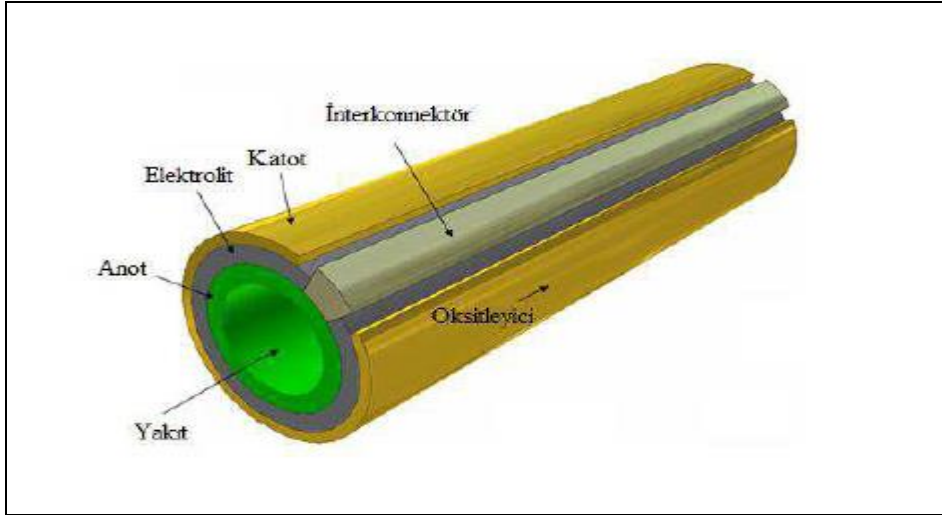
Katı oksit yakıt hücresinin çeşitleri

Katı oksit yakıt pilleri dizayn ve destek türüne göre çeşitli şekillerde üretilebilirler. Dizayn tasarımına göre silindirik, düzlemsel ve monolitik olarak tasarlanabilirken, destek türüne göre anot destekli, katot destekli veya elektrolit destekli olarak tasarlanabilirler. Bu tasarımlardan Şekil 3.9'da gösterilen monolitik tasarımın üretim aşaması zor olduğu için araştırma aşamasında kalmıştır.



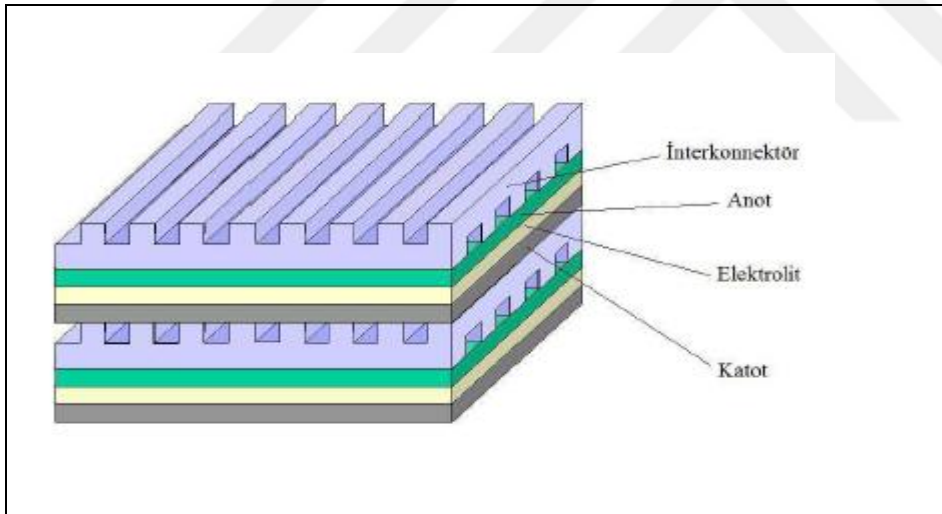
Şekil 3.9. Monolitik katı oksit yakıt pili [37]

Şekil 3.10'da verilen silindirik tasarım oldukça yaygın kullanılır ancak bu tasarımda da üretim aşaması zordur ve diğer tasarımlar arasında en düşük güç yoğunluğuna sahiptir.



Şekil 3.10. Silindirik katı oksit yakıt pili [38]

Şekil 3.11’de verilen düzlemsel tasarımın ise diğer tasarımlara göre daha yüksek güç yoğunluğu sahip olmakla birlikte imalatı oldukça kolaydır.



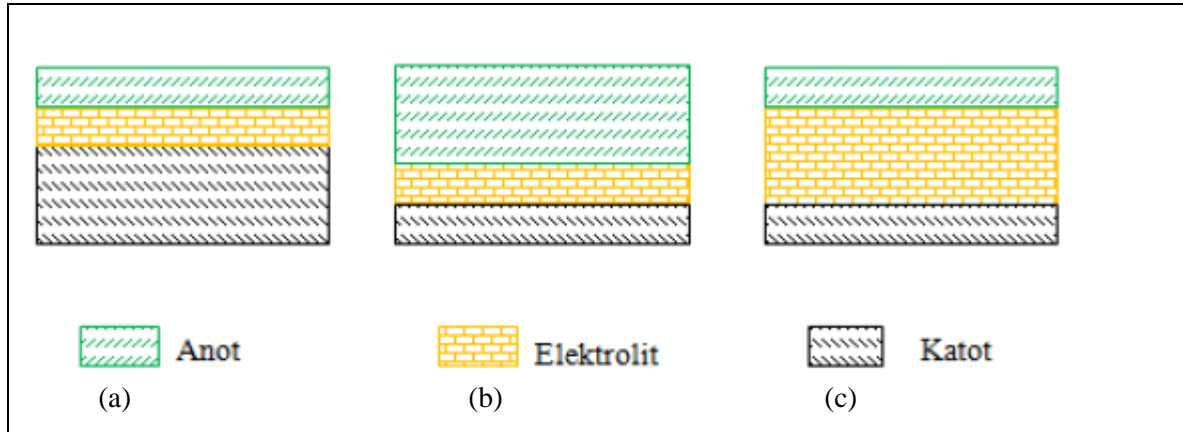
Şekil 3.11. Düzlemsel katı oksit yakıt pili [36]

Silindirik ve düzlemsel katı oksit yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları gösteren tablo Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Silindirik ve düzlemsel katı oksit yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları [36]

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

Yukarıdaki katı oksit yakıt pili çeşitlerine ek olarak katı oksit yakıt pilleri anot veya katot elektrot destekli ve elektrolit destekli olarak üretilebilmektedir. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pili mekanik olarak sağlamdır ve anot veya katot elektrot destekli katı oksit yakıt pillerinde kalın elektrotlardan kaynaklanan kütle transfer problemlerine sahip değildir. Şekil 3.12’de katı oksit yakıt pillerinin destek türlerine göre çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Katı oksit yakıt pillerinin destek türlerine göre çeşitleri: (a) katot, (b) anot, (c) elektrolit destekli [36]

4. KATOT DESTEKLİ KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ

4.1. Katot Elektrot Tabakası

Katı oksit yakıt pillerinde katot elektrot tabakası oksijenin elektrokimyasal indirgendiği yerdir. İndirgenme tepkimesi için katot tabakasının sahip olması gereken özellikler aşağıda verilmiştir.

- Yüksek elektronik iletkenlik (Genellikle oksitleyici ortamda 100 S/cm 'den yüksek olması beklenir.),
- Elektrolit ve interkonnekt malzemeleri ile kimyasal ve ısıl genleşme katsayısı açısından uyumlu olması,
- Katot tabakasından katot/elektrolit yüzeyine doğru olacak oksijen gazının difüzyonunu sağlayacak gözenekliliğe sahip olması,
- Üretim ve kullanım boyunca kararlı olması,
- Oksijen indirgenme reaksiyonu için yüksek katalitik aktivite,
- Düşük maliyet.

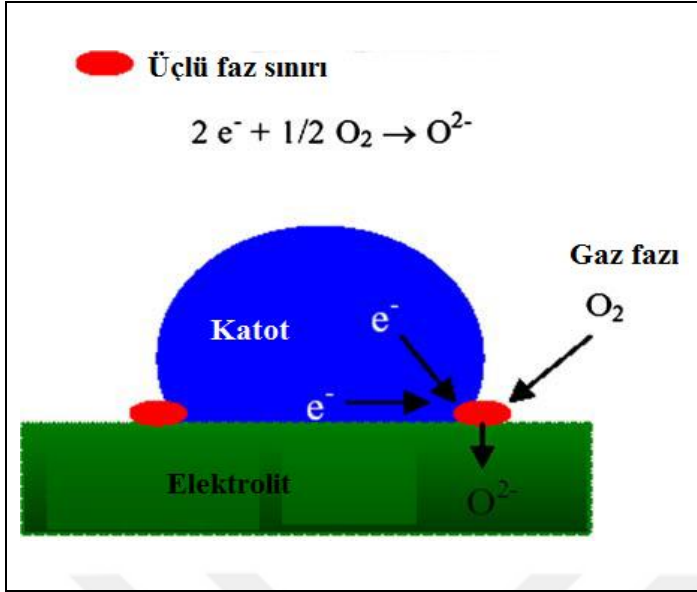
Katı oksit yakıt pillerinde işletme sıcaklığı elektrolitteki yeterli iyon iletkenliğini sağlamaya bağlıdır. Aynı zamanda katot malzemesinin seçimi genellikle ısıl genleşme katsayısının uyumlu olması ve beklenmeyen yüzey reaksiyonları ile karşılaşılması için elektrolit malzemesine bağlıdır.

4.1.1. Katot tabakasında üçlü faz sınırı

Katot tabakası yüzeyinde Eş. 4.1'de ifade edilen oksijen indirgenme reaksiyonu gerçekleşir.



Elektrokimyasal reaksiyonlar birçok açıdan normal heterojen katalitik reaksiyonlardan farklıdır. Örneğin, elektrokimyasal reaksiyonlar sadece oksijen iyonu iletkeni, elektronik iletken ve gaz fazının temas ettiği alanların birleştiği alan olarak tanımlanan üçlü faz sınırında meydana gelir. Şekil 4.1'de üçlü faz sınırı görülmektedir.



Şekil 4.1. Üçlü faz sınırının gösterimi [39]

Katı oksit yakıt pilinin mikroyapısı ve bileşimi üçlü faz sınırının boyutlarını ve dağılımını etkilemektedir. Üçlü faz sınırının zarar görmesi halinde reaksiyon meydana gelmez.

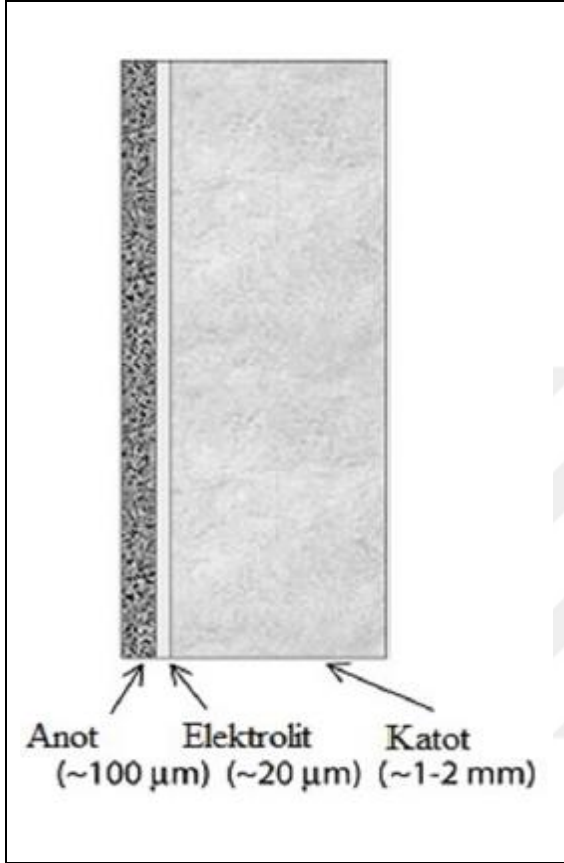
4.1.2. Katot tabakasının reaksiyon mekanizması

Katod tabakasındaki elektrokimyasal reaksiyonlarda yer alan moleküler türler iki atomlu olmasına rağmen (O₂), öncelikle bir veya daha fazla işlemle ‘elektroaktif’ denilen ara forma dönüştürülmelidir [30]. Genellikle bu ara işlemler, üçlü faz sınırı bölgelerine yakın yerlerde gerçekleştirilirler. Elektrot tepkimesindeki temel reaksiyonlar genellikle (1) O₂ moleküllerinin indirgenmesi, (2) gözenekli katod tabakadan elektrolite doğru gerçekleşen iyon hareketi ve (3) elektrolit tabakasındaki iyon hareketi olarak meydana gelmektedir. Bu üç temel reaksiyon içerisinde oksijen indirgenme reaksiyonlarını sınırlandıran çeşitli durumlar ortaya çıkabilir. Ortaya çıkan bu durumlar hücre direncini artırır ve katı oksit yakıt pilinin performansı üzerinde önemli bir yere sahip olur.

Katı oksit yakıt pillerinde sıcaklığın azaltılması katod tabakasında meydana gelen polarizasyonları arttırmaktadır. Bu nedenle katı oksit yakıt pillerinde yapılan çalışmaların başında orta sıcaklıktaki çalışma koşullarında katod/elektrolit tabakasında meydana gelen polarizasyonu azaltmak gerekmektedir. Ayrıca, katotta meydana gelen polarizasyonlar genellikle oksijen iyonlarının geçişi ve katod tabakasının pürüzlü yapısından da kaynaklanmaktadır.

4.2. Katot Destekli Katı Oksit Yakıt Pili

Şekil 4.2’de katot destekli bir katı oksit pilinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.2. Katot destekli katı oksit yakıt pili [30]

Katı oksit yakıt pilleri mekanik olarak dayanımlarını arttırabilmek ve kayıplarını en az dereceye indirebilmek için anot, elektrolit ve katot destekli olmak üzere üç farklı şekilde üretilmektedir. Katot destekli katı oksit yakıt pilinin diğer yakıt pillerine göre üstünlükleri bir sonraki bölümde detaylıca incelenecektir.

4.3. Katot Destekli Katı Oksit Yakıt Pilinin Avantaj ve Dezavantajları

Katı oksit yakıt pilleri destek türlerine elektrot destekli ve elektrolit destekli olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bütün destek türlerinin birbirlerine karşı avantajları vardır. Elektrot destekli katı oksit yakıt pilleri ince bir elektrolite sahip olduğu için düşük dirence sahiptirler. Ancak kalın elektrot tabakaları gaz molekülleri daha fazla yol aldığı için

yüksek konsantrasyon polarizasyonuna sahiptir. Ancak elektrolit destekli katı oksit yakıt pillerinde ise ince elektrolit tabakası iletkenliği azaltmaktadır [40].

Elektrolit destekli katı oksit yakıt pillerinde elektrolitin ohmik polarizasyonlarını azaltmak için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır. Ancak yüksek sıcaklık değerleri katı oksit yakıt pilinin bileşenlerinin malzeme ömrünü ve azaltırken üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Elektrot destekli katı oksit yakıt pillerinde ise elektrolit oldukça incedir. Daha düşük sıcaklıklarda çalışılabildiği içinse genellikle elektrot destekli katı oksit yakıt pilleri tercih edilmektedir.

Elektrot destekli katı oksit yakıt pilleri ise anot veya katot destekli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Katot destekli katı oksit yakıt pilleri, anot destekli katı oksit yakıt pillerine göre oldukça fazla avantaja sahiptir. Bu avantajların başında katot malzemelerinin daha düşük maliyetli olmasından kaynaklanan maliyet avantajı gelmektedir. Ayrıca anot tabakasının ince olması, yakıt olarak hidrokarbon yakıtlar kullanıldığında karbon çökmesini önleyerek gözeneklerin tıkanmasını engeller ve anot tabakasında meydana gelen redoks döngülerinden kaynaklı oluşan hacim değişikliklerine tolerans sağlar. Ancak bu durum katot destekli katı oksit yakıt pillerinin imalatını zorlaştırır. Yüksek sinterleme sıcaklıklarında katot ve elektrolit tabakaları arasında kimyasal reaksiyon olma ihtimali veya düşük sıcaklıkta sinterlemenin elektrolit yoğunluğunun azalmasına sebep olması bu zorlukların başında gelmektedir.

Anot destekli katı oksit yakıt pilleri, katot destekli katı oksit yakıt pillerine göre daha düşük performans göstermektedir. Bu durum anot destekli katı oksit yakıt pilinde oksijen geniş bir alana yayılmadığından reaksiyon bölgesinin sınırlı olması ve ince bir katot tabakasına sahip olduğundan katot ohmik polarizasyonunun artmasından kaynaklanmaktadır [41].

5. SAYISAL (NÜMERİK) MODELLEME

5.1. Yakıt Pili Temelleri

5.1.1. Açık devre potansiyeli

Açık devre potansiyeli, bir devreden akım geçmezken ölçülen potansiyeldir. Yakıt olarak hidrojeni kullanan bir katı oksit yakıt pilinin genel denklemini Eş. 5.1’de görüldüğü gibi ifade edersek:



Katı oksit yakıt pilinde maksimum teorik iş reaksiyonun molar Gibbs serbest enerjisine eşittir. Bu durum Eş. 5.2 ile ifade edilir:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (5.2)$$

Yukarıdaki denklemde ΔH entalpi değişimini, T sıcaklığı (Kelvin biriminde) ve ΔS entropi değişimini göstermektedir. Katı oksit yakıt pilinde yapılan iş elektrik işi olduğundan, maksimum teorik iş Gibbs serbest enerjisi olarak ifade edilmektedir.

Bir yakıt pilinden elde edilecek maksimum elektrik gücü Eş. 5.3’te görüldüğü gibi ifade edilir.

$$P_{elek}^{maks} = \Delta G = VI \quad (5.3)$$

Yukarıdaki denklemde V hücrenin potansiyel farkını ve I dış devre boyunca geçen akımı ifade etmektedir.

Katı oksit yakıt pilinde devreden geçen akım Eş. 5.4’teki gibi hesaplanır:

$$I = -nNe = -nF \quad (5.4)$$

Yukarıdaki denklemde, elektronun yükü $-e$ olarak kabul edilmiştir ve N Avogadro sayısını, n dış devreden geçen elektronların mol sayısını ve F Faraday sabitini ifade

etmektedir. Katı oksit yakıt pilinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarda bir mol su üretebilmek için devreden $2e^-$ geçmektedir. Bu durumda Eş. 5.4 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$I = -nNe = -2Ne = -2F \quad (5.5)$$

Eş. 5.3 ve Eş. 5.5 voltaj için düzenlenirse:

$$V = \frac{\Delta G}{I} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (5.6)$$

denklemi oluşur. Bu denklemde V açık devre potansiyelini göstermektedir. Denklemde değişkenlerinden biri olan ΔG , çalışma sıcaklığı ve maddelerin basınç ve konsantrasyonlarına bağımlı olan bir değişkendir. Yakıt olarak hidrojeni kullanan bir katı oksit yakıt pilinde ΔG Eş. 5.7'deki gibi hesaplanır:

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left(\frac{P_{H_2}(P_{O_2})^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (5.7)$$

Yukarıdaki denklemde ΔG^0 standart şartlardaki serbest Gibbs enerjisinin değişimini, R ideal gaz sabitini ve P reaksiyona giren maddelerin kısmi basınçlarını göstermektedir. Eş. 5.7 denklemi, Eş. 5.6'da yerine yazılırsa Nerst voltajı olarak ifade edilen açık devre potansiyeli Eş. 5.8'deki gibi ifade edilebilir:

$$V = -\frac{\Delta G^0}{2F} + RT \ln \left(\frac{P_{H_2}(P_{O_2})^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (5.8)$$

5.1.2. Polarizasyonlar

Önceki bölümde bahsedildiği gibi katı oksit yakıt pilinde üretilebilecek maksimum teorik potansiyel Nerst potansiyelidir. Ancak bu potansiyele bir katı oksit yakıt pilinin ulaşması imkânsızdır. Çünkü bütün sistemlerde olduğu gibi katı oksit yakıt pillerinde de tersinmezliklerden kaynaklı olarak elde edilen çalışma voltajı Nerst voltajının altında kalmaktadır. Katı oksit yakıt pillerinde bu tersinmezlikler polarizasyon olarak adlandırılmaktadır ve ohmik polarizasyon, aktivasyon polarizasyonu ve konsantrasyon polarizasyonu olmak üzere üç çeşittir.

Ohmik polarizasyon

Ohmik polarizasyon, elektron iletimi ve oksijen anyonlarının iyonik iletimine bağılı olarak ortaya çıkmaktadır. Elektron iletimi sırasında oluşan polarizasyon interkonnektör ve elektrotlar arasında meydana gelirken iyonik iletime bağılı olarak oluşan polarizasyonlar katı elektrolit boyunca meydana gelmektedir. Bu nedenle katı oksit yakıt pilinde ohmik polarizasyonların azaltılmasında malzeme seçimi önemli bir rol oynamaktadır. Ohmik kayıpların neden olduğu voltaj kaybı Eş. 5.9'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_{ohm} = iR \quad (5.9)$$

Yukarıdaki denklemde i akım yoğunluğunu ifade ederken R yakıt pilinde 1 cm^2 başına düşen direnç anlamına gelen alan özgül direncini ifade etmektedir.

Aktivasyon polarizasyonu

Aktivasyon enerjisi, bir tepkimenin gerçekleşmesi için aşılması gereken enerji değeri olarak tanımlanmaktadır. Bu bilgiden hareketle, katı oksit yakıt pilinde tepkimenin gerçekleşmesi için gereken enerjiye ulaşmak için gereken ekstra voltaj değerinin oluşturduğu kayıplara aktivasyon polarizasyonu ismi verilmektedir. Aktivasyon polarizasyonu anot ve katot elektrotlarda meydana gelmektedir ve bu nedenle elektrotlardaki elektrokimyasal reaksiyonların başlamasına karşı oluşan direnç olarak da tanımlanabilmektedir. Aktivasyon polarizasyonu Eş. 5.10'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_{akt} = \frac{RT}{2\alpha_a F} \ln \left(\frac{i}{i_{exc}^a} \right) + \frac{RT}{2\alpha_k F} \ln \left(\frac{i}{i_{exc}^k} \right) \quad (5.10)$$

Yukarıdaki denklemde $i_{exc}^{a,k}$ anot ve katot için değişken akım yoğunluklarını, $\alpha_{a,k}$ ise anot ve katot için yük transfer sabitlerini ifade etmektedir. Değişken akım yoğunluğu reaksiyon hızını ifade ettiğinden mümkün olduğunca yüksek tutulmalıdır.

Konsantrasyon polarizasyonu

Katı oksit yakıt pilinde, yakıt ve oksitleyici madde tüketime bağlı olarak zamanla azalmaktadır. Bu azalma hidrojen ve oksijenin kısmi basınçlarını düşürmekte ve bu basınç düşümü de hücre potansiyelinin azalmasına neden olmaktadır. Katı oksit yakıt pilinde oluşan konsantrasyon polarizasyonu Eş. 5.11’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_{kons} = -\frac{RT}{nF} \left[\frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{lim}^k} \right) + \ln \left(1 - \frac{i}{i_{lim}^a} \right) - \ln \left(1 + \frac{P_{H_2} i}{P_{H_2O} i_{lim}^a} \right) \right] \quad (5.11)$$

Yukarıdaki denklemde $i_{lim}^{a,k}$ anot ve katot için sınır akım yoğunluğudur. Anot sınır akım yoğunluğu, hidrojenin tamamen tüketilirken anot/elektrolit yüzeyinde hidrojen gazının kısmi basıncının sıfır olması durumu iken katot sınır akım yoğunluğu da benzer şekilde oksijenin tamamen tüketilirken katot/elektrolit yüzeyinde oksijen gazının kısmi basıncının sıfır olma durumudur.

5.1.3. Gerçek hücre potansiyeli

Katı oksit yakıt pilinin sahip olacağı gerçek hücre potansiyeli Eş. 5.12’de gösterildiği gibi Nerst voltajından yukarıda açıklanan üç polarizasyon değerinin çıkartılması ile elde edilir.

$$V_{yakıt\ pili} = V - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{akt} - \Delta V_{kons} \quad (5.12)$$

Voltaj ve akım arasındaki ilişkiyi gösteren polarizasyon eğrisi, yakıt pilinin performansının değerlendirilmesi için oluşturulmuş standart bir eğridir. Bir yakıt piline ait tipik bir polarizasyon eğrisi Şekil 5.1’de görülmektedir.

Ayrıca yukarıdaki grafikte elektrik ve ısı üretimi bölgeleri de görülmektedir. Üretilen elektrik gücü, yakıt pili akımı ile voltajının çarpımıdır. Isı üretimi ise yakıt pilinin voltaj değerinden farklı olan termal voltajı ile akımının çarpımıdır.

5.1.4. Yakıt pili verimliliği

Eş. 5.2'yi yeniden ele alalım:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (5.2)$$

Bu eşitliğe göre üretilebilecek olan maksimum elektrik enerjisi ΔH değeridir. Bu durumda üretilebilecek teorik voltaj değeri Eş. 5.13'te verilmiştir:

$$V_{teorik} = \frac{\Delta H}{2F} \quad (5.13)$$

Bu durumda yakıt pili voltajına göre verimlilik ifadesi Eş. 5.14'te verilmiştir:

$$\eta_{yakıt\ pili} = \frac{V_{yakıt\ pili}}{V_{teorik}} \quad (5.14)$$

$V_{yakıt\ pili}$ gerçek hücre voltajını ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlikte katı oksit yakıt piline beslenen bütün yakıtın tüketildiği varsayılmaktadır. Ancak gerçekte bütün yakıt tüketilmez ve yakıt kullanım faktörü ifadesi ortaya çıkar. Yakıt kullanım faktörü Eş. 5.15'te verildiği gibi hesaplanmaktadır:

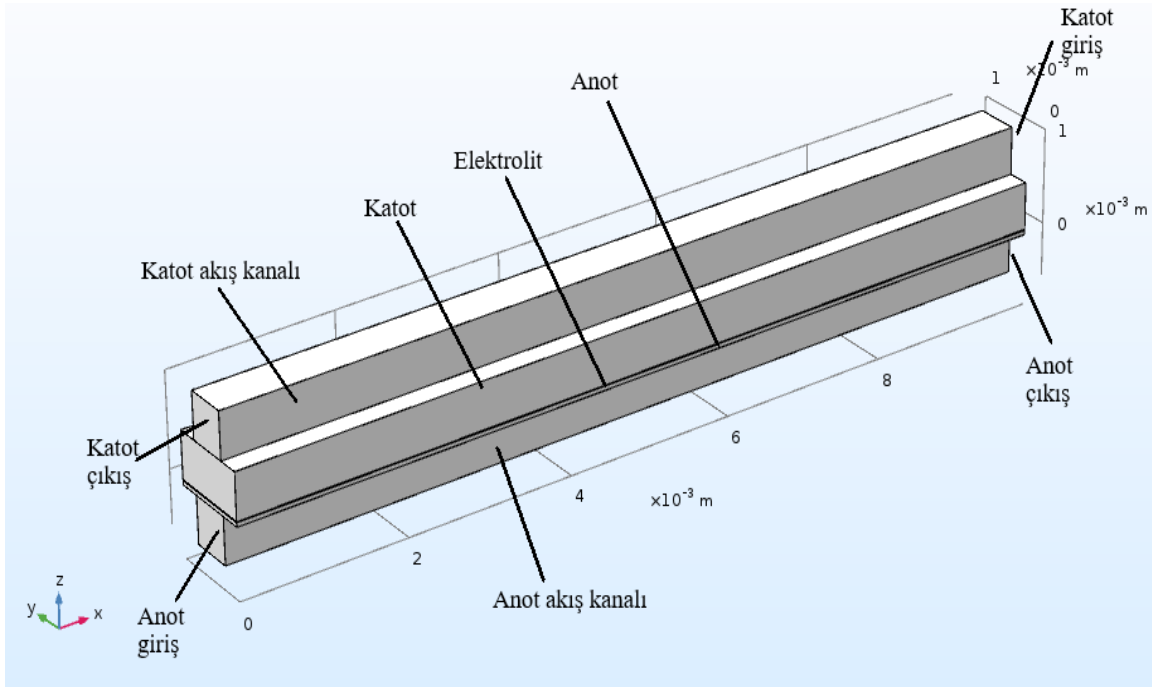
$$\mu_{yakıt} = \frac{Yakıt\ pilinde\ tüketilen\ yakıt}{Yakıt\ piline\ beslenen\ yakıt} \quad (5.15)$$

Yakıt kullanım faktörü gözönüne alındığında ise yakıt pilinin verimliliği Eş. 5.16'da verildiği gibi hesaplanmaktadır:

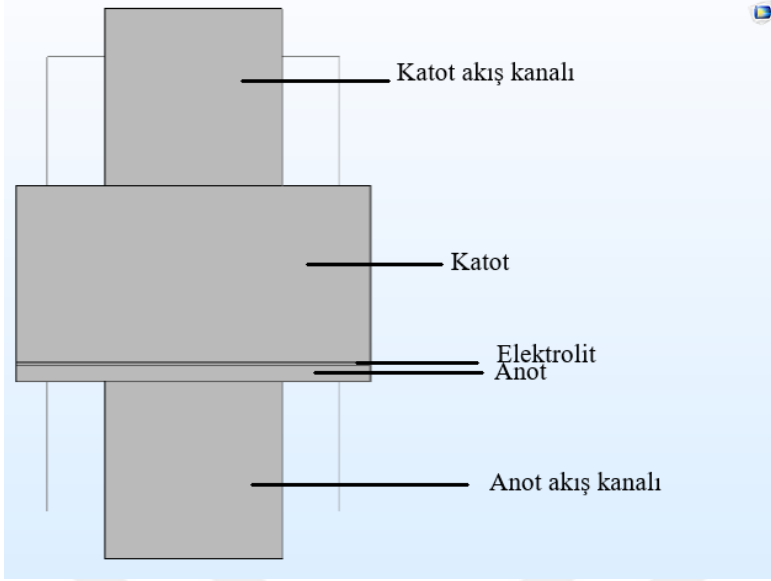
$$\eta_{yakıt\ pili} = \mu_{yakıt} \frac{V_{yakıt\ pili}}{V_{teorik}} \quad (5.16)$$

5.2. Matematiksel Modelleme

Oluşturan modele ait üç boyutlu görüntü Şekil 5.2’de ve kesit görüntüsü Şekil 5.3’te görülmektedir. Yakıt pili, temel olarak gözenekli anot ve katot tabakaları, ince bir elektrolit tabakası ve anot ve katot akış kanallarından meydana gelmektedir. Gözenekli anot, elektrolit ve katot tabakaları gözeneklilik, geçirgenlik ve iletkenlik açısından homojen olarak tanımlanmıştır. Ayrıca şekil üzerinde de görüleceği üzere hidrojen ve oksijen akışı zıttır. Elektrolit tabakası iyon geçişine izin verecek incelikte iken katot tabakası yakıt piline destek olacak kalınlıktadır.



Şekil 5.2. Oluşturulan matematiksel modelin üç boyutlu görünümü



Şekil 5.3. Oluşturulan matematiksel modelin kesit görüntüsü

Yakıt pilinin elektrolit, anot ve katot tabakalarının malzemeleri sırasıyla itriyum oksitle kararlı hale gelmiş zirkonyum oksit (YSZ: 8 mol% $Y_2O_3-ZrO_2$), nikel oksit (NiO)/YSZ (ağırlıkça% : 60/40), $La_{0.60}Sr_{0.40}FeO_{3-d}$ (LSF)'dir.

Katı oksit yakıt pilinde elektrokimyasal reaksiyonlar membran-elektron grubu olarak adlandırılan ve elektrolitin iki yüzeyinde bulunan anot ve katot katalizör tabakalarda meydana gelmektedir. Anot ve katot tabakalarda reaksiyonlar gaz fazı, elektronik iletken fazı ve iyonik iletken fazın bir arada bulunduğu üçlü faz bölgesinde (ÜFB) meydana gelmektedir.

Katı oksit bir yakıt pili için model oluştururken yakıt pilindeki kütle, momentum ve enerji transferi, meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar ve yük dengesinin doğru bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Ancak bu analizlerin detayları hesaplamalarda zorluklara neden olduğu için, modeli basitleştirmek için bazı kabuller yapılmalıdır. İdeal gaz, laminar, sıkıştırılmaz ve tek fazlı akış ve kararlı hal kabulleri denklemlerin çözümlerini kolaylaştırmak için kullanılmıştır [39].

Katı oksit yakıt pilinin elektrokimyasal modelinde kullanılan giriş parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Katı oksit yakıt pilinin elektrokimyasal modelinde kullanılan giriş parametreleri

Parametre	Katot destekli katı oksit yakıt pili için değeri
Gaz akış kanalı genişliği	$0.5 \times 10^{-3} \text{m}$
Rib genişliği	$0.5 \times 10^{-3} \text{m}$
Anot elektrot kalınlığı	45 μm
Katot elektrot kalınlığı	500 μm
Elektrolit kalınlığı	10 μm
Gaz akış kanalı yüksekliği	$0.5 \times 10^{-3} \text{m}$
Akış kanalı uzunluğu	10^{-2}m

5.2.1. Genel denklemler

Kütlenin korunumu

Kütlenin korunumu; tepkime sırasında tepkimeye giren her bir elementin kütlesinin sabit kalması şeklinde tanımlanabilir [42]. Katı oksit yakıt hücrelerini oluşturan anot, katot ve gaz akış kanalları için kütlenin korunumu denklemi Eş. 5.17’de verilmiştir.

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{V}) = S_m \quad (5.17)$$

Yukarıdaki denklemde ε gözeneklilik, ρ gaz karışımının yoğunluğu, \vec{V} hız vektörü ve S_m kütle kaynak terimini ifade etmektedir.

Gaz karışımının yoğunluğu ise karışımda bulunan maddelerin hacimsel oranlarına bağlı olarak Eş. 5.18’de verildiği gibi yazılmaktadır.

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i c_i \quad (5.18)$$

Yukarıdaki denklemde ρ_i i türünün yoğunluğu ve c_i i türünün konsantrasyonu iken N gaz karışımında bulunan tür sayısını ifade etmektedir.

Katı oksit yakıt pilinde anot ve katot elektrotlar ve elektrolit tabakalar arasındaki ara yüzeyde hidrojen ve oksijen tüketilirken su üretilmektedir. Üretilen ve tüketilen malzemelerin miktarı ise elektrokimyasal reaksiyon oranına bağlı olup Eş. 5.19-21 gibi ifade edilmektedir.

$$S_{H_2} = - \frac{M_{w,H_2}}{2F} i_{anot} \quad (5.19)$$

$$S_{O_2} = - \frac{M_{w,O_2}}{4F} i_{katot} \quad (5.20)$$

$$S_{H_2O} = \frac{M_{w,H_2O}}{2F} i_{katot} \quad (5.21)$$

Yukarıdaki denklemlerde M_w moleküler ağırlık, i akım yoğunluğu ve F Faraday sabitidir.

Türlerin korunumu

Türlerin korunumu denkleminde, gaz karışımı içerisindeki her bir maddenin diferansiyel hareketi tanımlanmaktadır. Denklem Eş. 5.22’de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon c_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{V} c_i) = -\nabla \cdot \varepsilon \vec{J}_i + S_{s,i} \quad (5.22)$$

Yukarıda verilen denklemde \vec{J}_i türünün difüzyon kütle akısı iken $S_{s,i}$ akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olan ek bir tür terimidir ve Eş. 5.23’teki gibi ifade edilir.

$$S_{s,i} = i \frac{M_i}{nF} \quad (5.23)$$

Yukarıda ifade edilen denklemde M_i türünün moleküler ağırlığı, i yerel akım ve n elektrokimyasal reaksiyondaki elektron sayısı olarak tanımlanır.

Fick yasasına göre difüzyon terimi basitçe Eş. 5.24’teki gibi ifade edilir.

$$\vec{J}_i = [\rho D_i \vec{\nabla}(c_i)] \quad (5.24)$$

Momentum korunumu

Bir sisteme etki eden net kuvvet sıfır olduğunda sistemin momentumu sabit kalır. Bu durum momentumun korunumu ilkesi olarak ifade edilmektedir [43].

Katı oksit yakıt pilinde laminar akış olduğu varsayımıyla momentumun korunumu Eş. 5.25'te verildiği gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon\vec{V})}{dt} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{V}\vec{V}) = -\varepsilon\nabla\rho + \rho\varepsilon\vec{g}\nabla \cdot \vec{\tau} + \frac{\varepsilon^2\mu V}{\zeta} \quad (5.25)$$

Yukarıdaki denklemde μ viskozite ve ρ statik basınç ifadesidir. Ayrıca ζ geçirgenlik ve ε gözeneklilik ifadeleri gözenekli bölgedeki akışı ifade eden Darcy kanunu terimleridir. $\vec{\tau}$ ise gerilme tensörüdür ve Eş. 4.26'daki gibi ifade edilir.

$$\vec{\tau} = \mu \left\{ (\nabla\vec{V} + \nabla\vec{V}^T) - \frac{2}{4}(\nabla \cdot \vec{V}) \right\} \quad (5.26)$$

Yüklerin korunumu

Ohm kanununa göre yüklerin korunumu Eş.5.27'de ifade edilmiştir.

$$\vec{j} = \sigma\nabla\phi \quad (5.27)$$

Yukarıdaki denklemde \vec{j} iyonik ya da elektronik akım yoğunluğu, σ iletkenlik ve ϕ elektrik potansiyeli ifade etmektedir.

Yük transfer akım yoğunluğu üçlü faz sınırı bölgesinde ve elektrolit tabakasında sıfırken anot ve katot tabakalarında Butler-Volmer denkleminden hesaplanabilmektedir. Bu denklemler anot ve katot tabakaları için sırasıyla Eş. 5.28 ve 5.29'da ifade edilmiştir.

$$i_{a,yt} = i_{0,a}x_{H_2} \frac{c_t}{c_{H_2,ref}} \left[\exp\left(\frac{\alpha F\eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1-\alpha)F\eta}{RT}\right) \right] \quad (5.28)$$

$$i_{kat,yt} = i_{0,kat}x_{O_2} \frac{c_t}{c_{O_2,ref}} \left[\exp\left(\frac{\alpha F\eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-(1-\alpha)F\eta}{RT}\right) \right] \quad (5.29)$$

Yukarıdaki denklemlerde i_0 anot ve katot için değişken akım yoğunluğunu, x hidrojen ve oksijen için molar kesri, c_t maddelerin toplam konsantrasyonunu, c_{ref} referans konsantrasyonu, F Faraday sabitini, R gaz sabitini, T sıcaklığı ve η gerilimi ifade etmektedir.

Enerjinin korunumu

Katı oksit yakıt pili içerisindeki enerji dengesi Eş. 5.30'da ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho \epsilon e)}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \vec{V} e) = \nabla \cdot \epsilon (k \nabla T) + S_e \quad (5.30)$$

Yukarıdaki denklemde k ısı iletkenliği belirtirken S_e ohmik direnç, elektrokimyasal reaksiyonlar veya radyasyona bağlı olarak Joule etkisinde sebep olduğu enerji kaybını belirtir.

Katı oksit bir yakıt pilinde meydana gelen reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan toplam enerji değişimi, teorik olarak elektriğe dönüştürülen oluşum entalpisi (ΔH) ve oluşumun Gibbs serbest enerjisi (ΔG) arasındaki farktır, kalan kısım ise enerjiye dönüştürülür. Ohmik ve aktivasyon polarizasyonu da, kimyasal enerjinin ısıya dönüşmesine neden olur. Bu durumda kayıplar Eş. 5.31'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$S_e = i \left(\frac{\Delta H}{nF} - V \right) \quad (5.31)$$

Yukarıdaki denklemde V elektrokimyasal tepkime nedeniyle oluşan toplam ısı kaynağını ifade etmektedir.

Elektrolit tabakası için ısıya dönüşen miktar Eş. 5.32'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$S_e = \frac{i^2}{k} \quad (5.32)$$

Elektrokimyasal model

Katı oksit yakıt pilinin gerçek voltajı, önceki bölümlerde açıklanan polarizasyonlara bağlı olarak açık devre voltajından daha düşüktür ve Eş. 5.33'te verildiği gibi hesaplanır.

$$V_{hücre} = V - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{akt} - \Delta V_{kons} \quad (5.33)$$

Elektrokimyasal reaksiyonlar

Anot ve katot tabakalarında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar, Eş. 5.34 ve Eş.5.35'te verilen reaksiyonlara göre elektrot gözenekleri içerisinde gerçekleşen yüzey reaksiyonları olarak modellenir.



Sınır şartları

Katı oksit yakıt pilinin sınırları türlere karşı geçirimsiz kabul edilir. Aynı zamanda Eş. 5.36'da belirtildiği gibi sınırlarda hız sıfır olarak ayarlanır.

$$\vec{V} = 0 \quad (5.36)$$

Sınırlarda akı üretimi olmadığı kabul edilir ve Eş. 5.37'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial c_i}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (5.37)$$

Yukarıdaki denklemde \vec{n} sınır duvarlarının normal vektörüdür.

Tüm sınır duvarları adyabatik yüzeyler olarak kabul edilir ve sınırlarda elektrik alana akı uygulanmaz. Bu durum Eş. 5.38'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (5.38)$$

5.3. Sayısal Metot

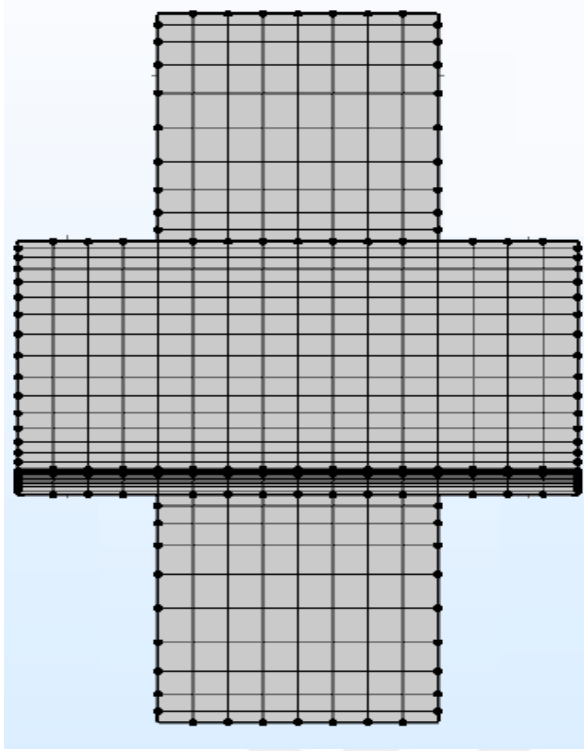
Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümlerinde kullanılan iki farklı yöntem bulunmaktadır: Sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemi. Sonlu elemanlar yöntemi, geometri üzerinde belirlenen düğüm noktaları üzerinden çözümlenmeleri gerçekleştirirken, sonlu farklar yönteminde geometri üzerinde seçilen bazı noktalarda sonlu farklardan oluşan cebirsel denklemi diferansiyel denkleme dönüştürerek çözümlenmesi gerçekleştirilir [44].

Piyasada bu iki yöntem üzerinden ticari olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları bulunmaktadır. Bu yazılımlardan birisi olan COMSOL Multiphysics® sonlu elemanlar yöntemini kullanan kısmi diferansiyel denklemler çözüm aracı olarak tanımlanabilir. Comsol programı yaklaşık otuz farklı modülü içerisinde barındıran ve ihtiyaca göre modelleme yapmamızı sağlayan bir programdır. Comsol'un en önemli avantajı modelleme sayesinde çözümlenmelerde farklı yaklaşımları deneme imkânı sağlayıp uygulama aşamasına geçildiğinde doğru bir şekilde ilerlenmesini sağlamaktır.

Bu tezde Comsol programının 'Batteries & Fuel Cells Module' içerisinde bulunan 'SOFC Unit Cell' kullanılmıştır.

5.4. Ağ Yapısı

Matematiksel modelleme oluşturulduktan sonra modelimize ağ örgü yapısı ataması yapılmıştır. Yapılan ağ örgü yapısı, çözümlenmeyi kolaylaştırmak ve hızlandırmak için program tanımlı 'normal düzeyde' ağ örgü yapısı olarak seçilmiştir. Oluşturulan modelde kullanılan ağ örgü yapısı Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Modelde kullanılan ağ örgü yapısı

5.5. Model Doğrulaması

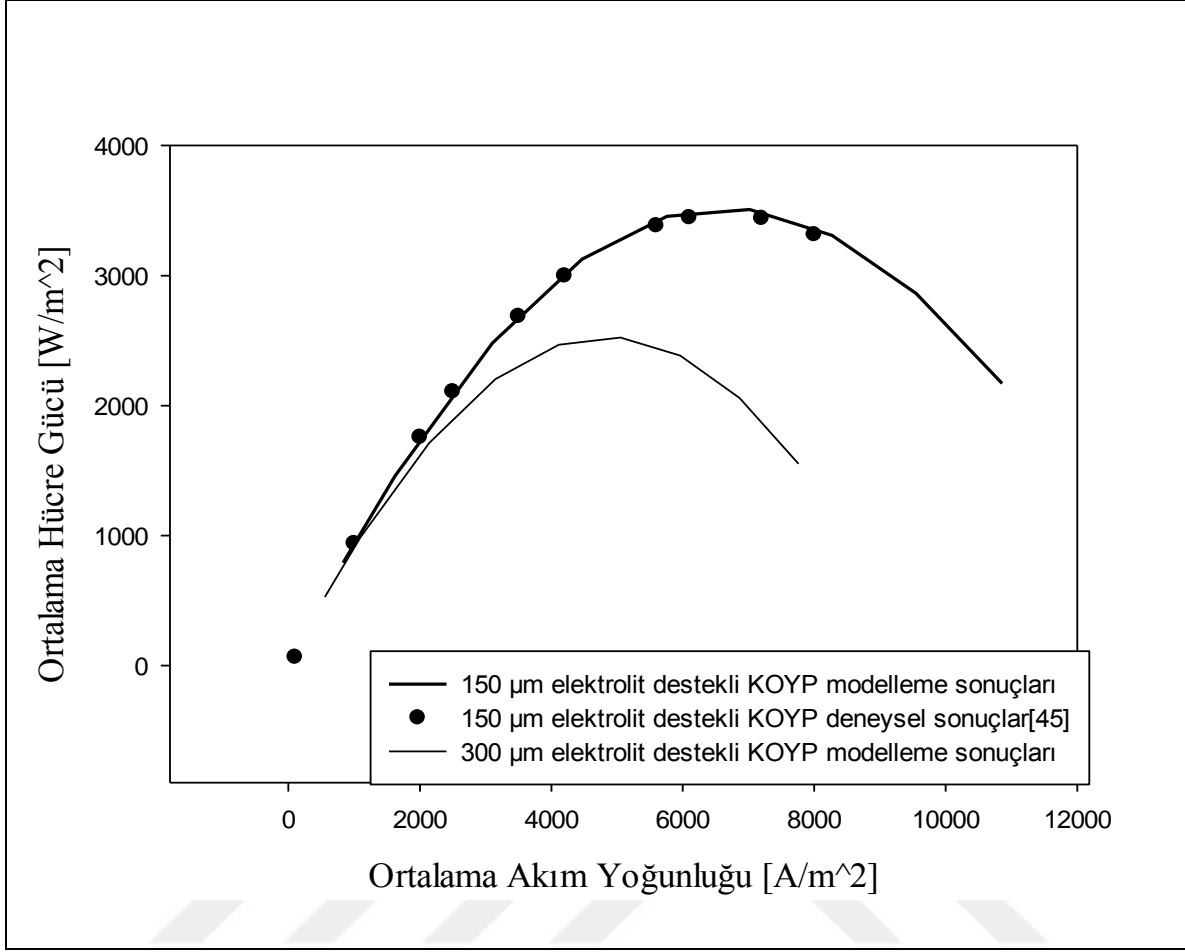
Oluşturulan katot destekli katı oksit yakıt pilinin doğrulanması için literatürde deneysel olarak sonuçları alınmış makale araştırması yapılmıştır. Ancak uygulamada katot destekli katı oksit yakıt pilinin üretimi aşamasındaki zorluklardan dolayı bu tarz bir çalışma bulunamamış olup doğrulama için elektrolit destekli katı oksit yakıt pili çalışılmıştır.

Doğrulama için modellenen elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin giriş parametreleri Çizelge 5.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin elektrokimyasal modelinde kullanılan giriş parametreleri

Parametre	Elektrolit destekli katı oksit yakıt pili için değeri
Gaz akış kanalı genişliği	$0.5 \times 10^{-3} \text{m}$
Rib genişliği	$0.5 \times 10^{-3} \text{m}$
Anot/katod elektrot kalınlığı	50 μm
Elektrolit kalınlığı	300 μm
Gaz akış kanalı yüksekliği	$0.5 \times 10^{-3} \text{m}$
Akış kanalı uzunluğu	10^{-2}m

Modelleme doğrulaması, literatürde katot destekli katı oksit yakıt pili için deneysel çalışmanın oldukça yetersiz olmasından dolayı elektrolit destekli katı oksit yakıt pili için yapılmıştır. Modelleme için seçilen çalışmada elektrolit kalınlığı 150 μm olduğu için oluşturduğumuz modelde de öncelikle 150 μm elektrolit kalınlığı ile doğrulama yapılmış daha sonra 300 μm elektrolit kalınlığı için analizler gerçekleştirilmiştir. 300 μm elektrolit kalınlığına sahip olan katı oksit yakıt pilinin analiz sonuçları katot destekli katı oksit yakıt pilinin performans sonuçlarıyla karşılaştırmak üzere kullanılmıştır. Model doğrulamasına ait grafik Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Matematiksel modelin doğrulanması

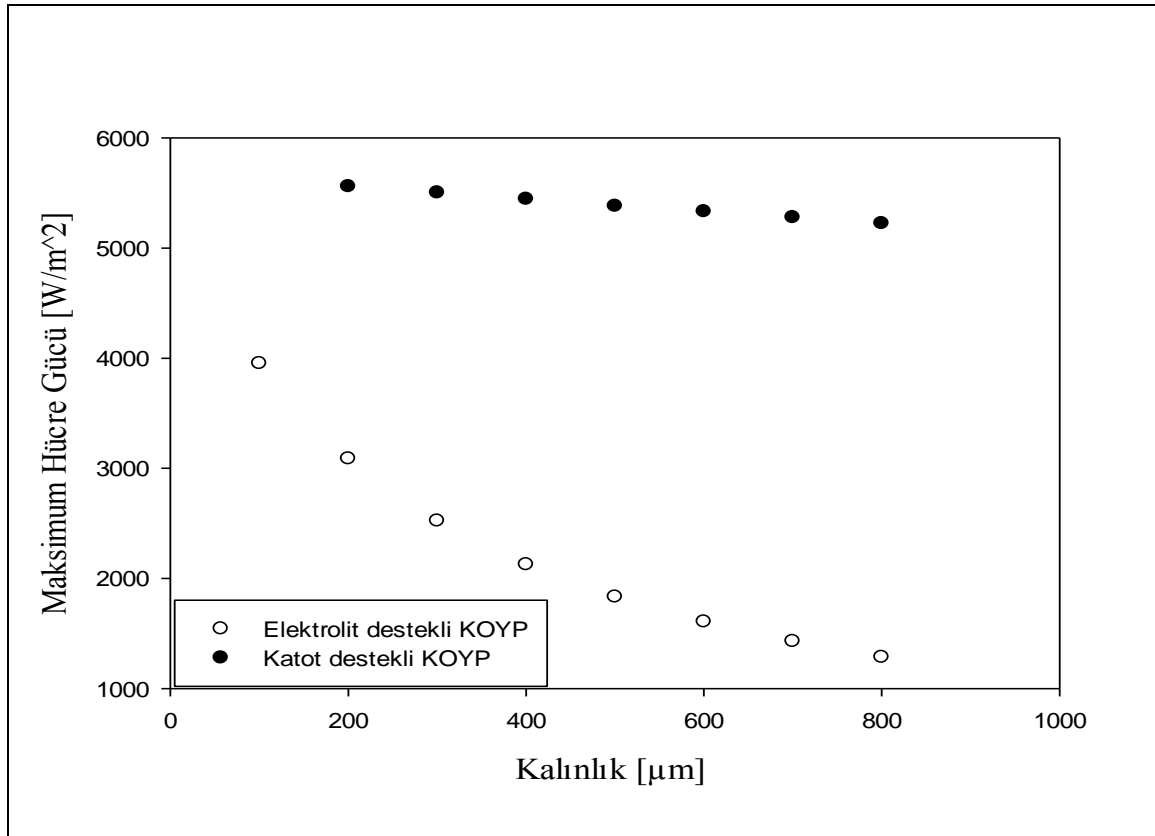
Doğrulama yapılan deneysel çalışmada 150 μm elektrolit kalınlığına sahip katı oksit yakıt pili için maksimum güç 3450 W/m² iken aynı şartlar altında (1 atm basınç ve 750°C sıcaklık) yapılan sayısal çalışmada bu değer 3510 W/m²'dir. Bu iki değer karşılaştırıldığında birbiriyle oldukça uyumlu sonuçlar ortaya çıktığı görülmektedir. Aynı şartlar altında 300 μm elektrolit kalınlığına sahip katı oksit yakıt pilinin sayısal çalışmada maksimum güç yoğunluğunun 2500 W/m² olduğu görülmektedir. Bu azalmanın sebebi, elektrolit tabakası arttıkça ohmik direncin artarak polarizasyonu arttırmasıdır.



6. BULGULAR VE İRDELEME

6.1. Destek Kalınlığının Etkisi

Elektrolit destekli ve katot destekli katı oksit yakıt pili modelleri üzerinde kalınlığın etkisi Şekil 6.1’de verilmiştir. Hücre gücünün destek tabakasının kalınlığı ile ters orantılı olduğu şekil üzerinde açıkça görülmektedir.

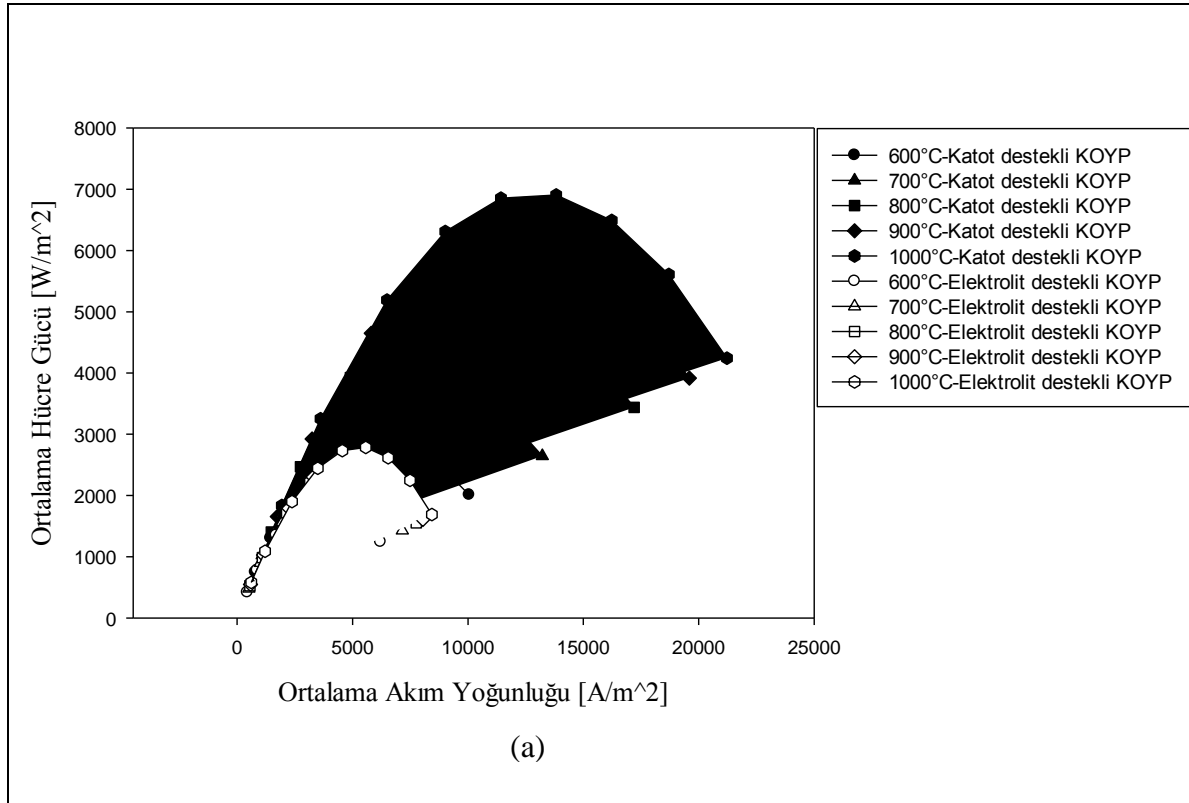


Şekil 6.1. Elektrolit destekli KOYP ve katot destekli KOYP üzerinde destek kalınlığının etkisi

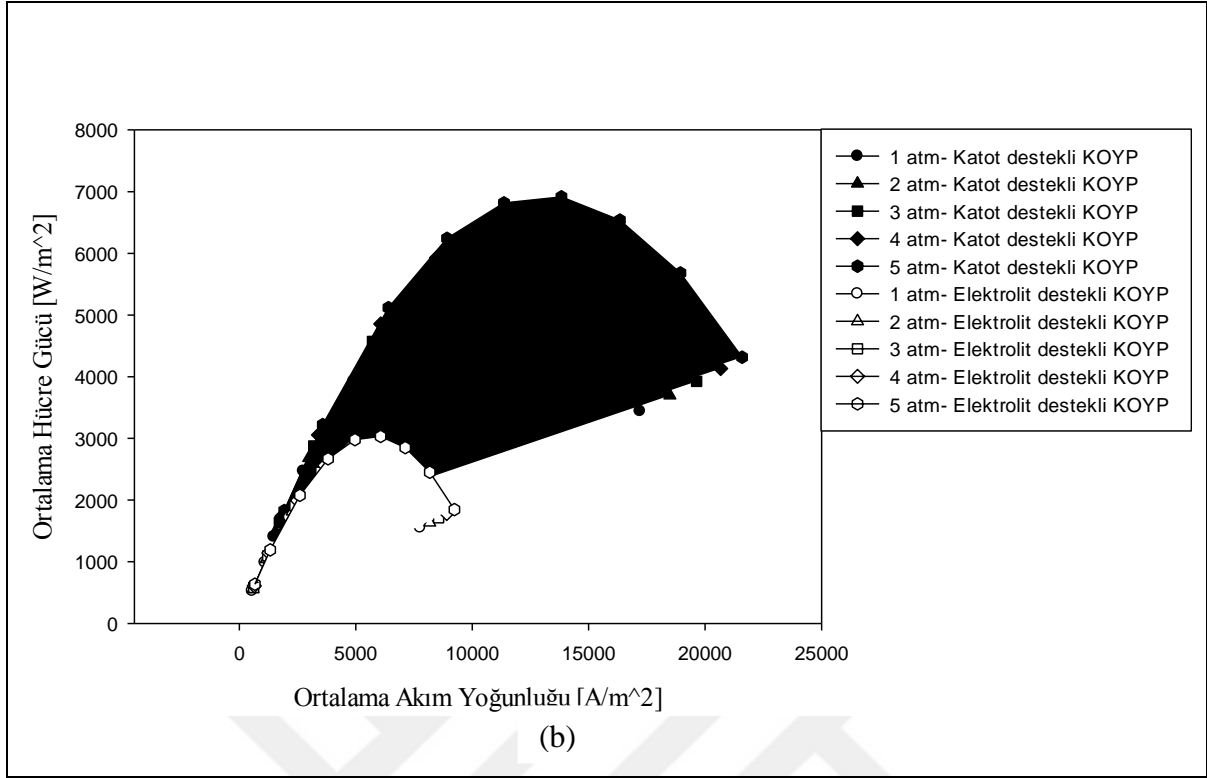
Şekil 6.1’de görüldüğü gibi, elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde elektrolit kalınlığı 200 µm iken maksimum hücre gücü yaklaşık 3090 W/m², 800 µm iken 1286 W/m²’dir. Yani kalınlık 600 µm arttığında maksimum hücre gücünde yaklaşık olarak %60 azalma olmaktadır. Bu azalmanın sebebi, ohmik polarizasyonların elektrolit tabakasında oluşmasıdır. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde ise kalın bir katot tabakası, oksijen difüzyonu katot tabakasında gerçekleştiğinden, oksijen difüzyonunu engellemektedir. Ayrıca, anot tabakası ince olacağından bazı gerilmeler de oluşabilmektedir. Ancak bu

etkiler katı oksit yakıt pilinin performansını ohmik polarizasyonlarının sebep olduğu kadar düşürmemektedir.

Farklı sıcaklık ve farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pili ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pili için ortalama akım yoğunluğuna karşılık ortalama hücre gücü grafiği Şekil 6.2’de görülmektedir.



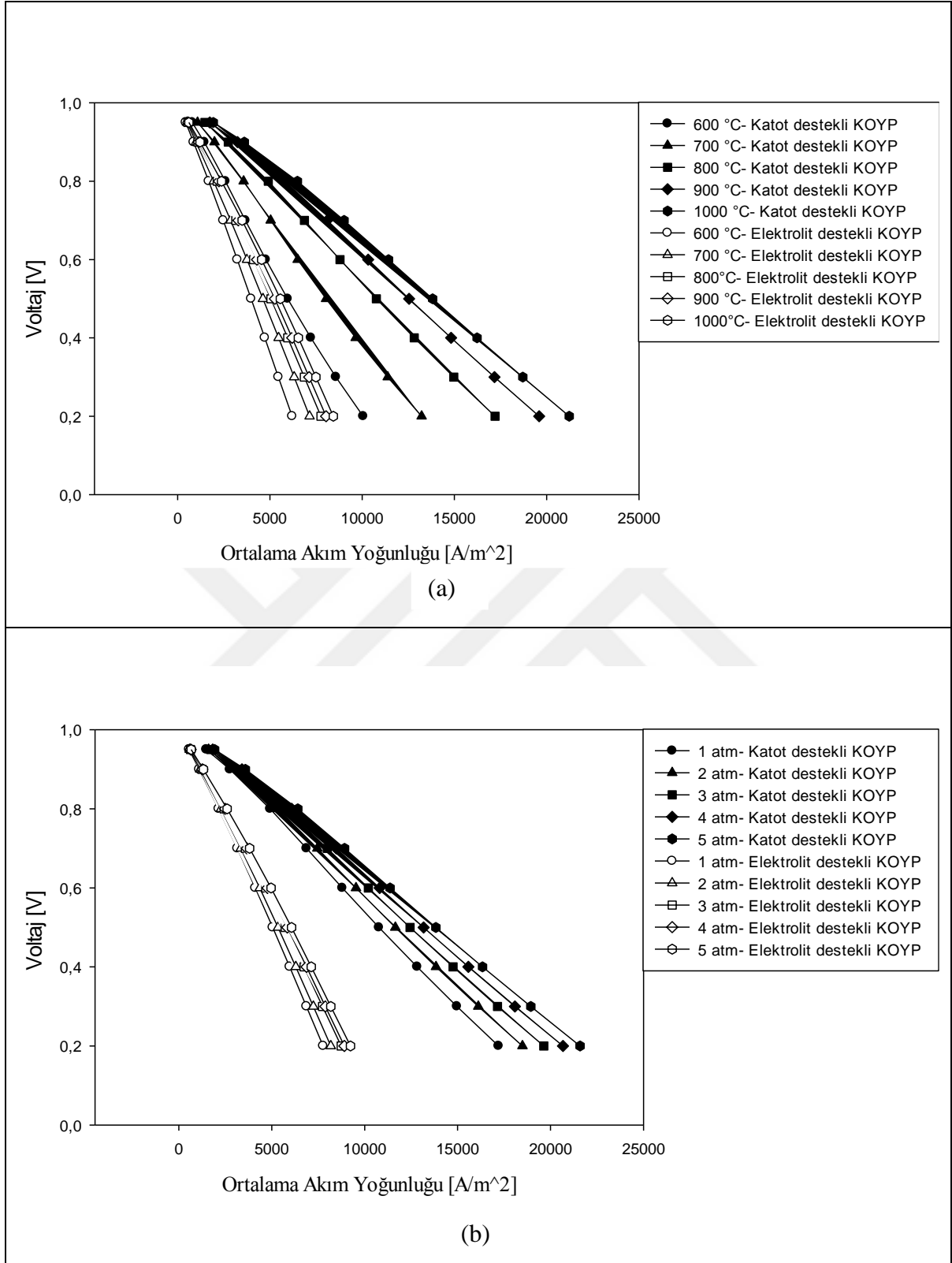
Şekil 6.2. Katot destekli katı oksit yakıt pili ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin toplam çıkış güçlerinin karşılaştırılması (a) farklı sıcaklıklarda ve (b) farklı basınçlarda



Şekil 6.2. (devam) Katot destekli katı oksit yakıt pili ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin toplam çıkış güçlerinin karşılaştırılması (a) farklı sıcaklıklarda ve (b) farklı basınçlarda

Şekil 6.2'ye bakıldığında sıcaklık artışının elektrolit destekli katı oksit yakıt pili ile karşılaştırıldığında katot destekli katı oksit yakıt pilinin ortalama hücre gücü üzerinde daha fazla etkisi olduğu görülmektedir. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde sıcaklık 600°C'den 1000°C'ye artırıldığında ortalama hücre gücü yaklaşık %56 artarken elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde bu artış yaklaşık %29'dur. Basınç artırıldığında ise her iki destek türü içinde ortalama hücre gücü üzerindeki artışın sıcaklık artışında olduğu kadar fazla olmadığı görülmektedir. Basınç değerinin 1 atm'den 5 atm'e artmasıyla katot destekli katı oksit yakıt pilinin ortalama hücre gücünde yaklaşık %22, elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin ortalama hücre gücünde ise yaklaşık %16 oranında artış görülmüştür.

Farklı sıcaklık ve basınç değerleri için ortalama akım yoğunluğuna karşılık hücre voltajı değeri Şekil 6.3'te görülmektedir.

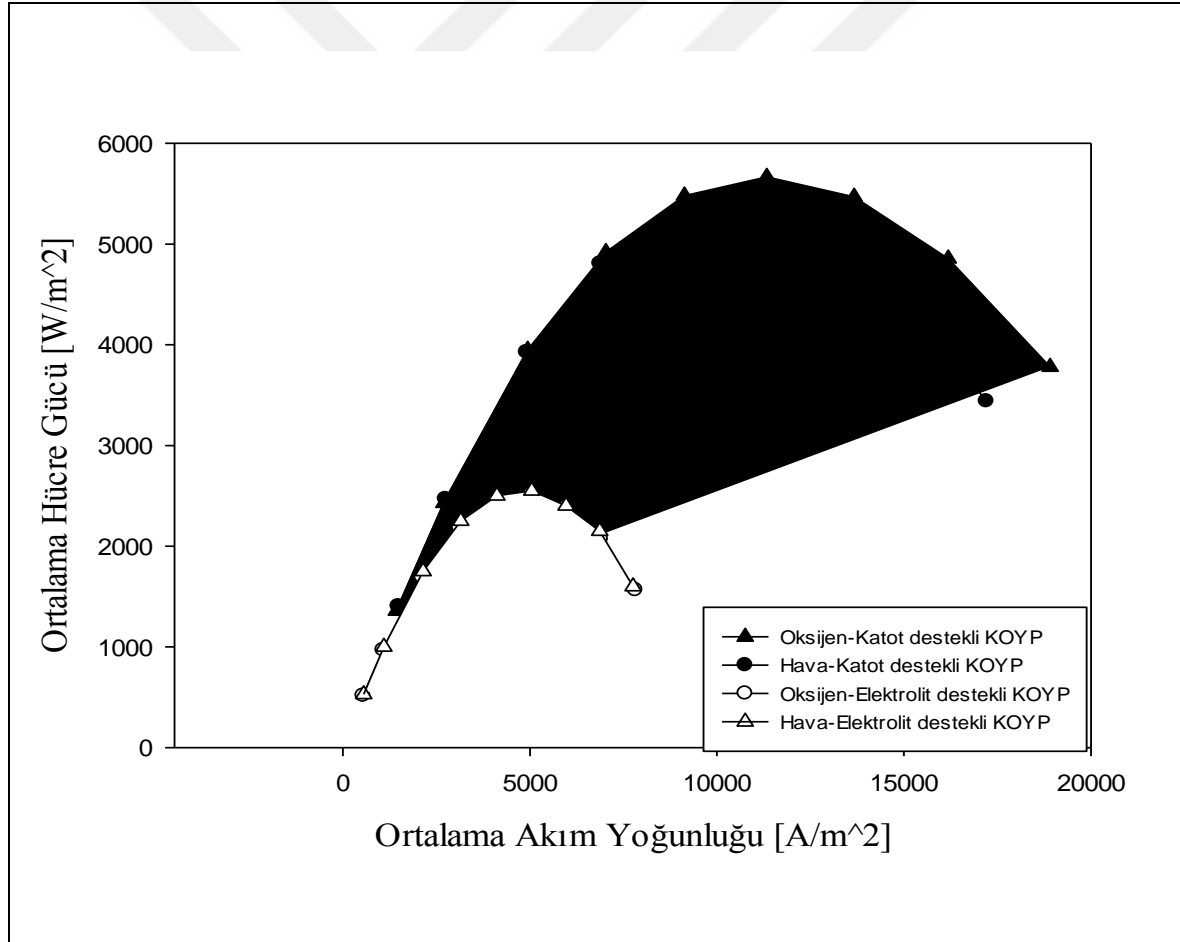


Şekil 6.3. Katot destekli katı oksit yakıt pili ve elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması (a) farklı sıcaklıklarda ve (b) farklı basınçlarda

Farklı sıcaklık ve farklı basınç değerleri için çizilen polarizasyon eğrilerine bakıldığında, her iki destek türü içinde sıcaklık ve basınç değerlerinin artmasının yakıt pilinin ortalama akım yoğunluğunu arttırdığı görülmektedir.

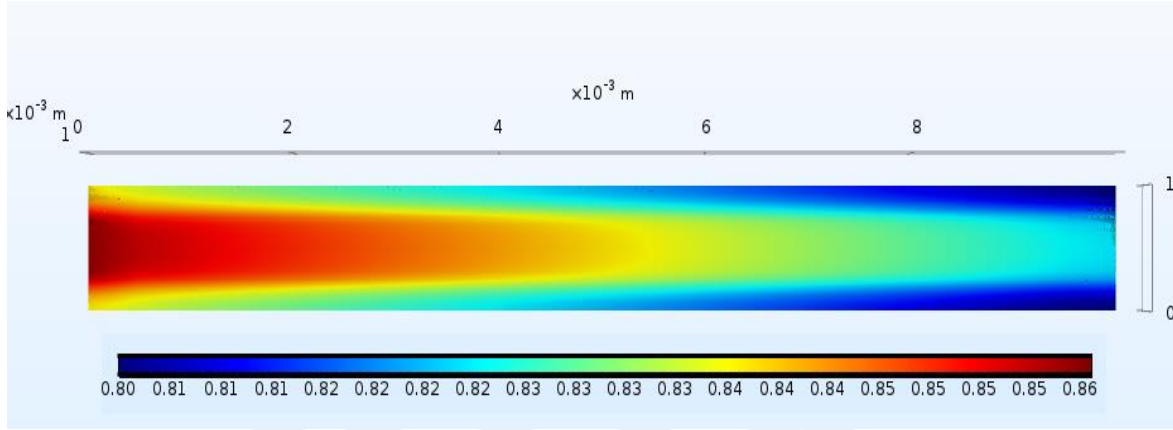
6.2. Oksitleyici Etkisi

Yakıt pillerinde oksitleyici olarak saf oksijen veya hava kullanımı oldukça yaygındır. Bu tez çalışmasında yapılan modellemede ise elektrolit destekli katı oksit yakıt pili ve katot destekli katı oksit yakıt pilinde oksitleyici olarak hava kullanımının hücre performansına ve hidrojen tüketimine etkisi incelenmiştir. Şekil 6.4'te oksitleyici olarak hava ve saf oksijen kullanmanın hücre performansına etkisini gösteren grafik verilmiştir.

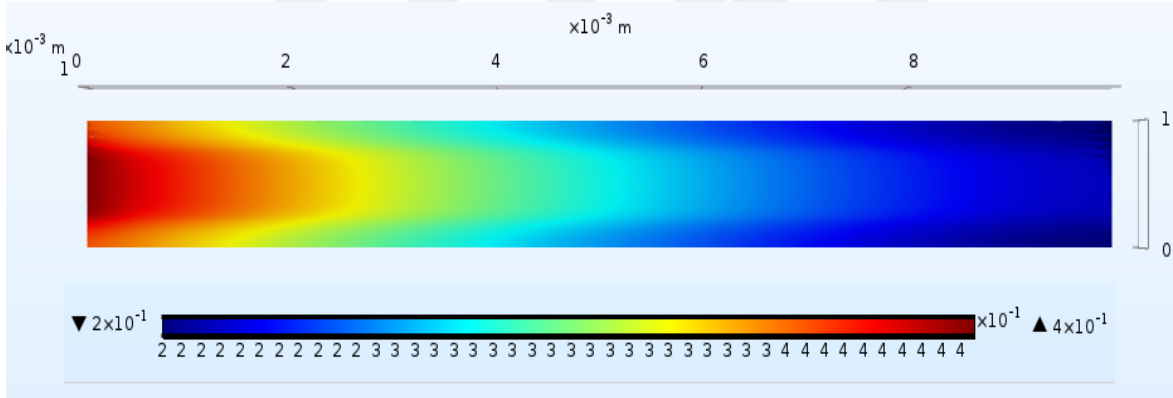


Şekil 6.4. Elektrolit destekli ve katot destekli KOYP için farklı oksitleyici kullanımının hücre performansına etkisi

Şekilde görüldüğü üzere, oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığında elektrolit destekli ve katot destekli katı oksit yakıt pilinde hücre performansının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 6.5'te katot destekli katı oksit yakıt pilinde hidrojen tüketimi gösterilirken Şekil 6.6'da ise elektrolit destekli katı oksit yakıt pili için hidrojen tüketimi gösterilmiştir.

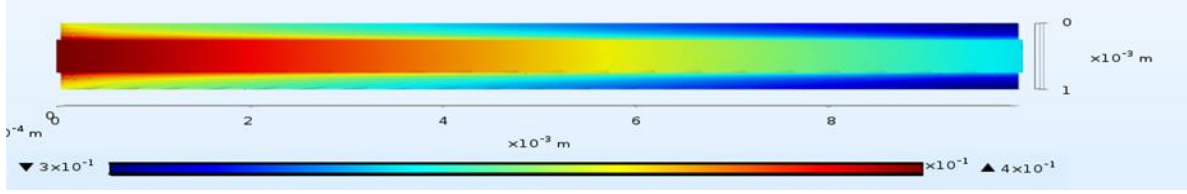


(a) Oksitleyici olarak hava kullanıldığında

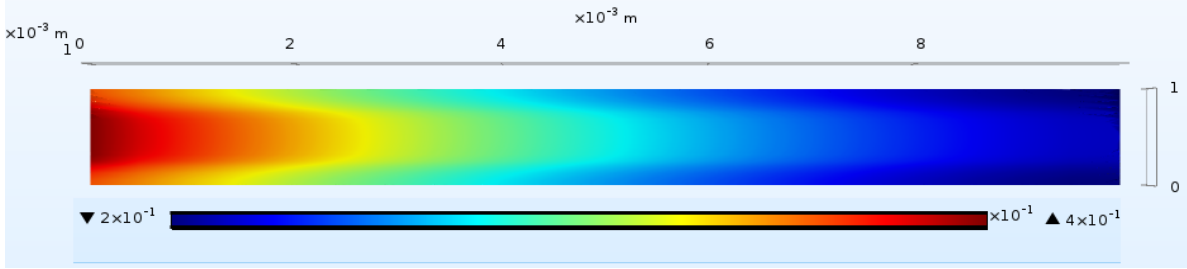


(b) Oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığında

Şekil 6.5. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde farklı oksitleyiciler kullanıldığında hidrojen tüketimi (Kütle dağılımı)



(a) Oksitleyici olarak hava kullanıldığında



(b) Oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığında

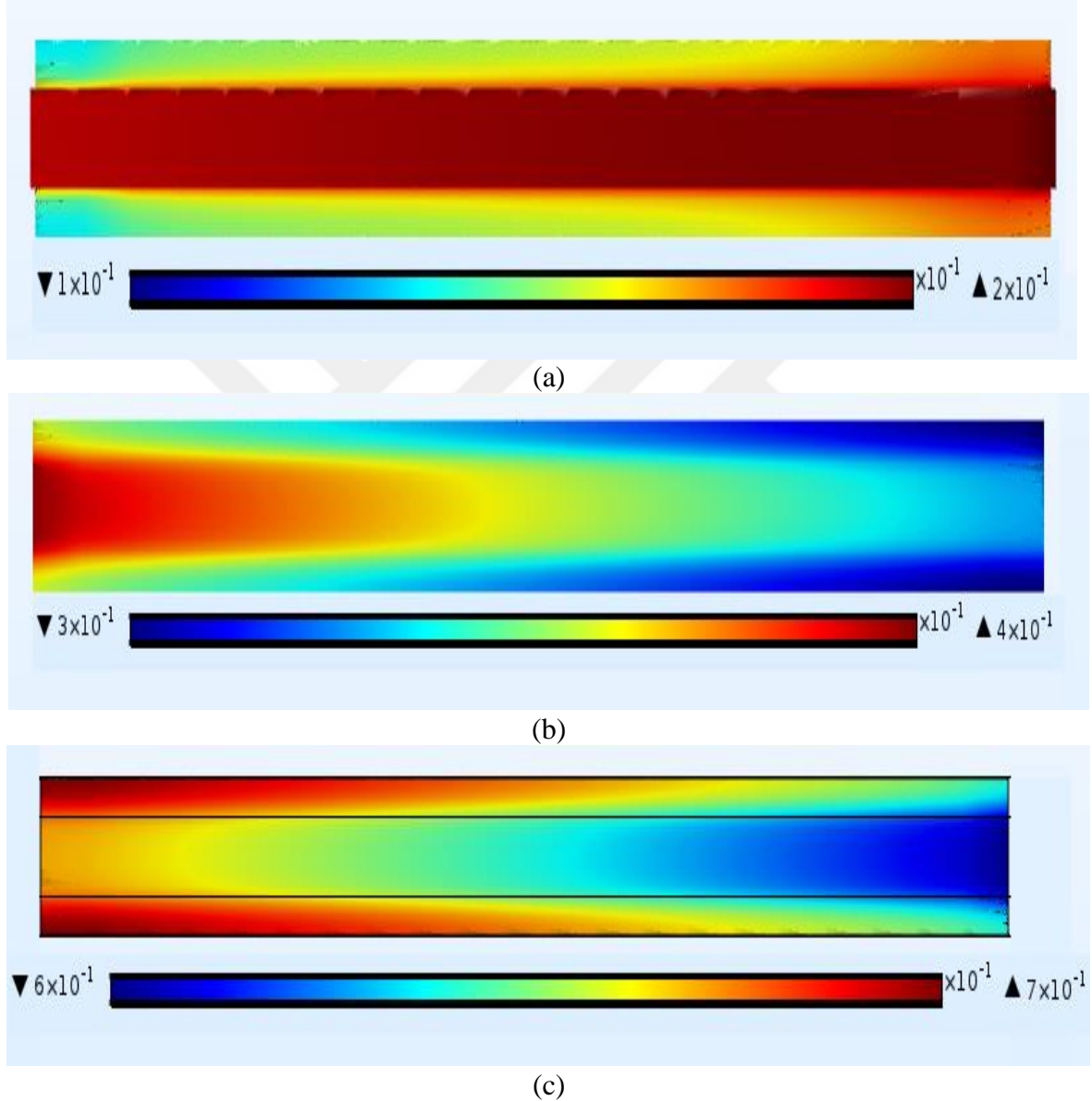
Şekil 6.6. Elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde farklı oksitleyiciler kullanıldığında hidrojen tüketimi (Kütle dağılımı)

Yukarıdaki şekillerde de açıkça görüldüğü gibi hem elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinde hem de katot destekli katı oksit yakıt pilinde hava oksitleyici olarak kullanıldığında hidrojen tüketimi, oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığı durumda olan hidrojen tüketiminden daha azdır. Oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığında, hidrojenin büyük çoğunluğu anot elektrotun yarısında tüketilmesine rağmen; oksitleyici olarak hava kullanıldığında hidrojenin anot elektrotun neredeyse çıkışında tüketildiği görülmektedir. Hava kullanıldığında hücre performanslarının düşük olmasını elektrokimyasal reaksiyon hızının yavaş olmasının etkilediği düşünülmektedir. Yani saf oksijen kullanıldığında hücre performansının yüksek olması, hava içerisinde var olan azotun saf oksijende olmamasına ve elektrokimyasal reaksiyonun daha hızlı gerçekleşmesine bağlıdır.

Tez çalışması içerisinde şimdiye kadar yapılan sayısal çalışmalarla, katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansının elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansından çok daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, literatürde sayısal ve deneysel olarak katot destekli katı oksit yakıt piline ait çalışmaların az olduğu görülmektedir. Bu nedenle tezin bundan sonraki kısmında sayısal çalışmalar katot destekli katı oksit yakıt pili için yürütülmüştür.

6.3. Türlerin Dağılımı

Katot destekli katı oksit yakıt pilinin, 1 atm basınç ve 800°C sıcaklık altında çalışması ile tüketilecek hidrojen ve oksijen ile oluşacak suyun kütlelesel değişimini gösterir grafik Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Katot destekli katı oksit yakıt pilinde (a) oksijen tüketiminin (b) hidrojen tüketiminin (c) su üretiminin kütlelesel değişimi

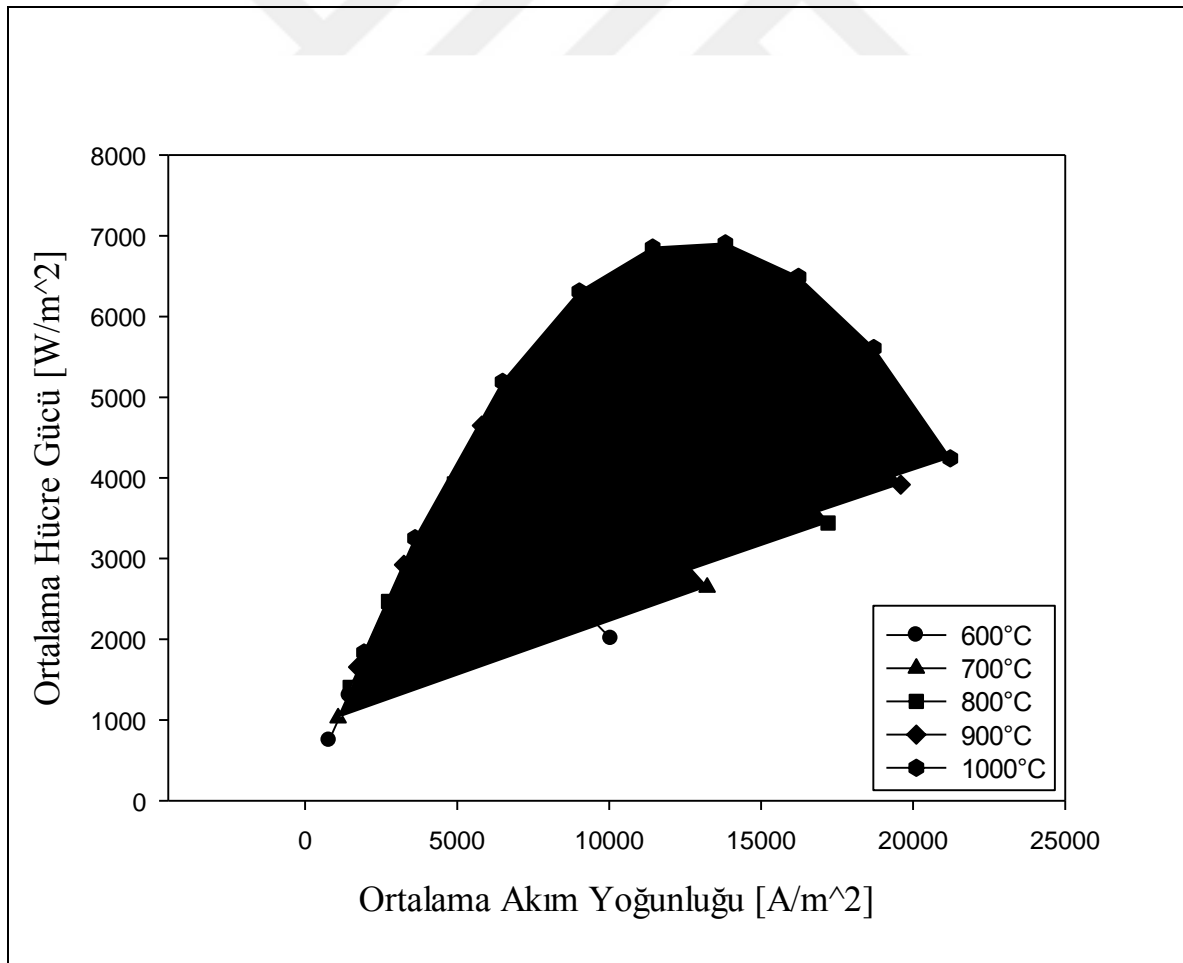
Yukarıdaki şekil incelendiğinde oksijen tüketiminin katot tabakasının girişinde hızlı olduğu daha sonra ise yavaşladığı görülmektedir. Aynı şekilde hidrojen tüketimi anot tabakası girişinde hızlı iken zamanla yavaşlamaktadır. Difüzyon hızlarının zamanla azalması reaksiyon oranlarını da zamanla azaltacağından hücre performansı azalacaktır. Bu

durumda katot destekli bir katı oksit yakıt pilinin performansı difüzyona uğrayan yakıt ve oksitleyici maddelerin miktarına da bağlı olmaktadır.

6.4. Çalışma Sıcaklığının Etkisi

Katı oksit yakıt pillerinin performansını etkileyen en önemli etkenlerden birisi işletme sıcaklığıdır. Katı oksit yakıt pillerinde kullanılan seramik malzemelerin iletkenlikleri sıcaklık arttıkça artmaktadır. Çalışma sıcaklığının katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansına etkisini gözlemleyebilmek amacıyla 600, 700, 800, 900 ve 1000°C sıcaklıklarda analizler gerçekleştirilmiştir.

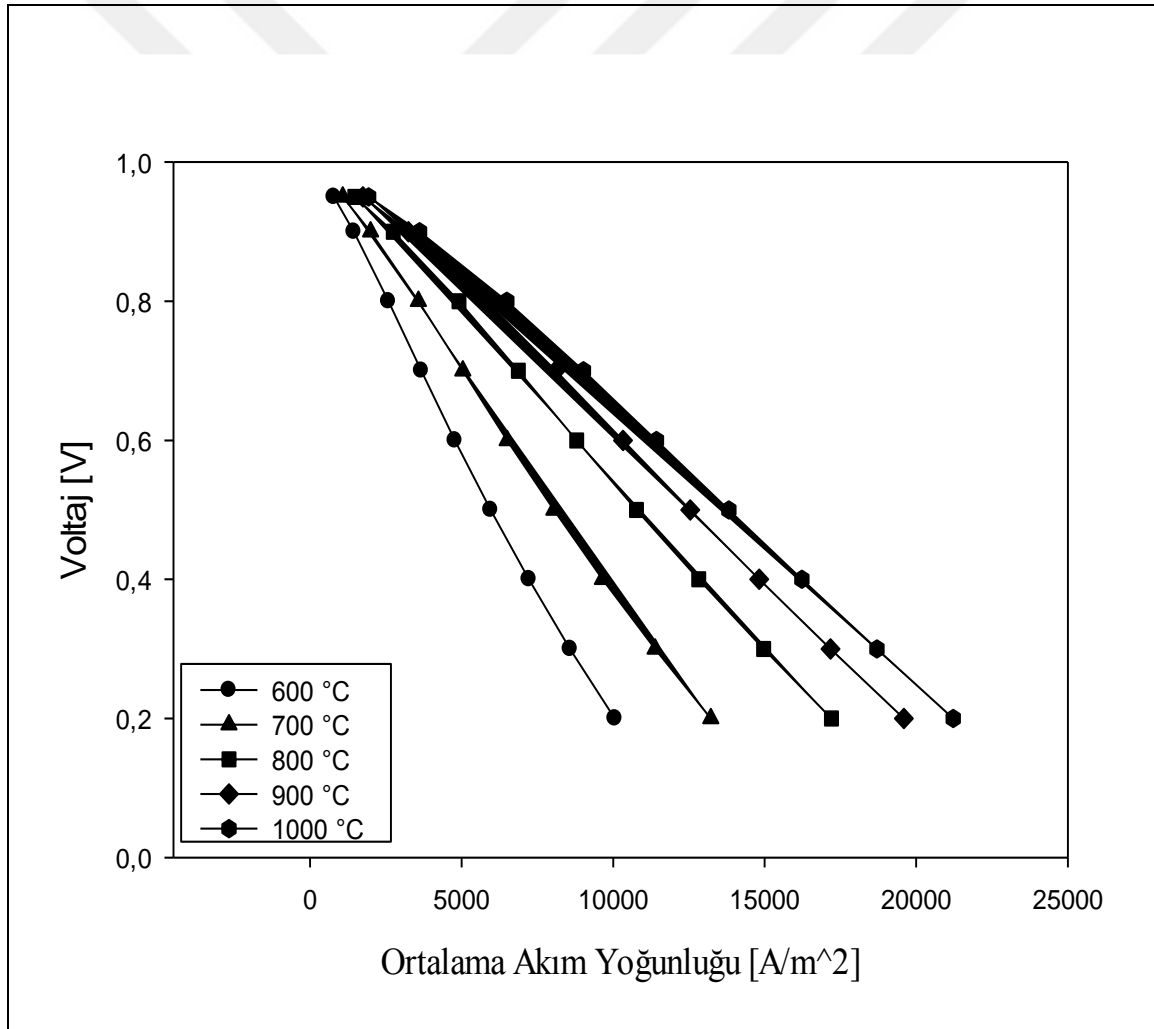
Katot destekli katı oksit yakıt pilinin çalışma performansına sıcaklığın etkisini gösteren eğri Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. Farklı sıcaklık değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin performans eğrisi

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi işletme sıcaklığı 600°C'den 1000°C'ye arttırıldığında, ortalama hücre gücü 2978 W/m² değerinden 6909 W/m² değerine artmıştır. Sıcaklık arttıkça katot destekli katı oksit yakıt pili içerisinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların iyileşmesi bu artışın en önemli sebeplerindendir. Sıcaklığın arttırılması performans üzerinde olumlu etki yaparken, malzemelerin dayanımını ve yakıt piline müdahaleyi olumsuz etkilediği için katı oksit yakıt pillerinin çalışma sıcaklığını optimum koşullarda tutmak önemli bir rol oynamaktadır.

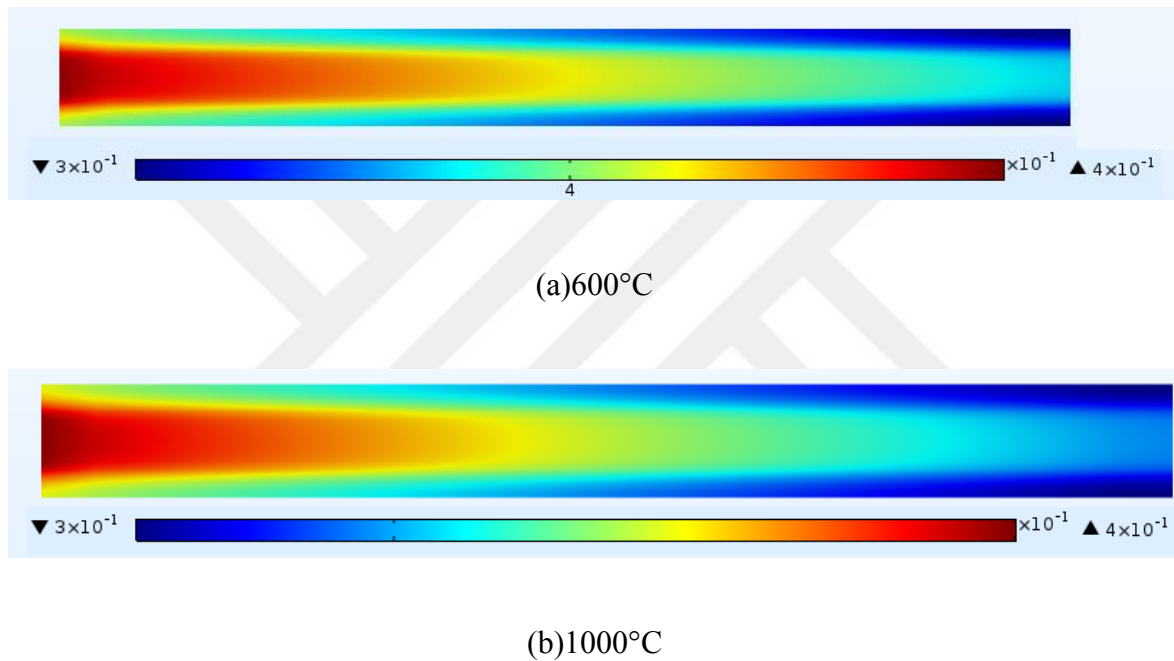
Farklı sıcaklık değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt piline ait polarizasyon eğrisi Şekil 6.9'da görülmektedir.



Şekil 6.9. Farklı sıcaklık değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrisi

Polarizasyon eğrisinde görüldüğü gibi katot destekli katı oksit yakıt pilinde sıcaklık arttıkça ortalama akım yoğunluğu da artmaktadır. Bir yakıt pilinde, hücreden akım çekildiğinde polarizasyonlar sebebi ile voltaj düşer. Bu nedenle yüksek akım yüksek voltaj düşüşüne sebep olmaktadır. Sıcaklık arttıkça daha fazla akım çekilmesi, gazların viskozite değerinin artması ve kullanılan malzemelerde oluşan olumsuz etkiler sonucunda yukarıdaki gibi bir polarizasyon eğrisi oluşmaktadır.

Şekil 6.10'da ise sıcaklığa bağlı olarak hidrojen tüketimi gösterilmektedir.

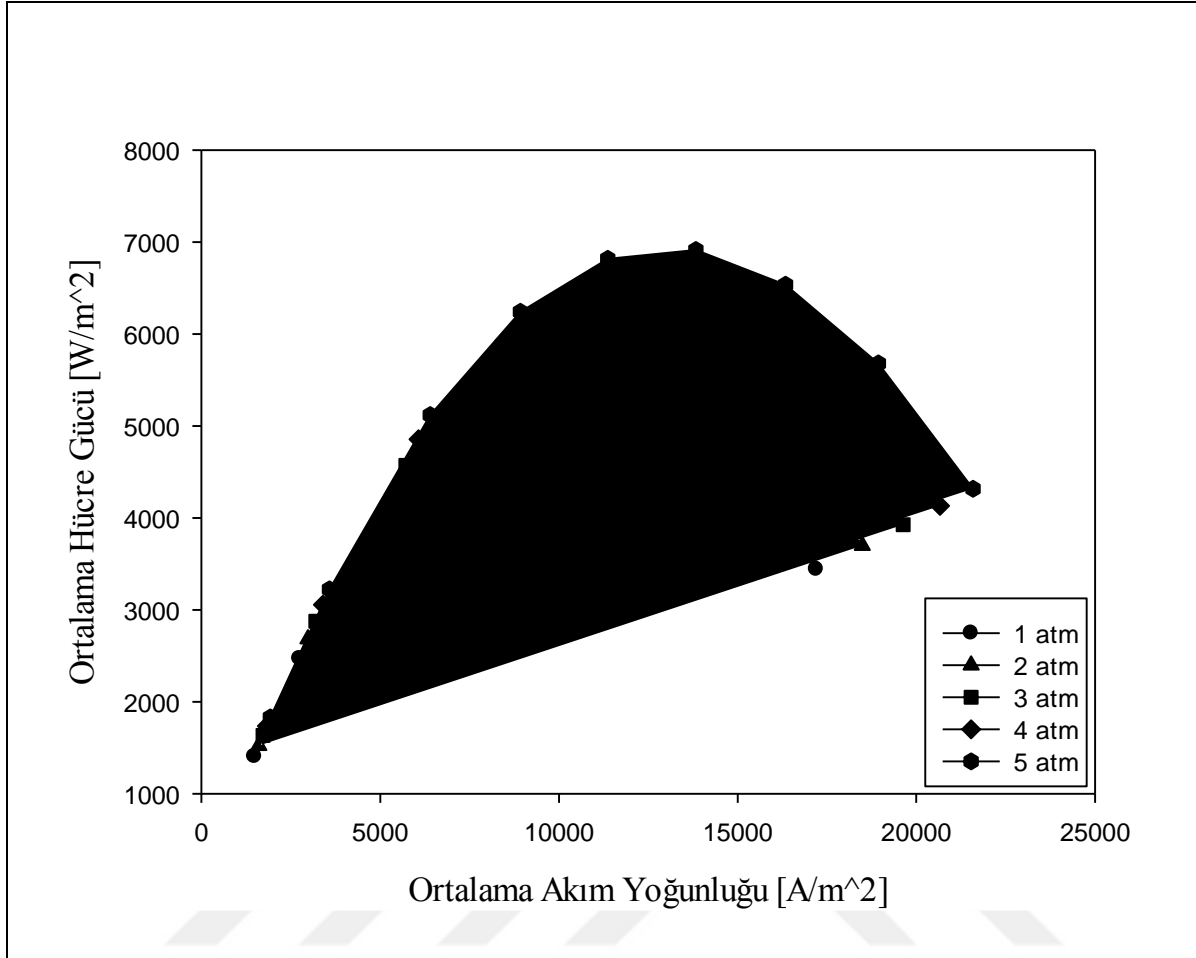


Şekil 6.10. Sıcaklık artışına bağlı olarak hidrojen tüketimi (kütlesel)

Beklenildiği gibi, sıcaklık arttıkça hidrojen tüketimi de artmaktadır. Hidrojen tüketiminin artması da tıpkı katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansının iyileşmesine sebep olduğu gibi sıcaklık artışının yakıt pilinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların iyileşmesi ile açıklanabilmektedir.

6.5. Çalışma Basıncının Etkisi

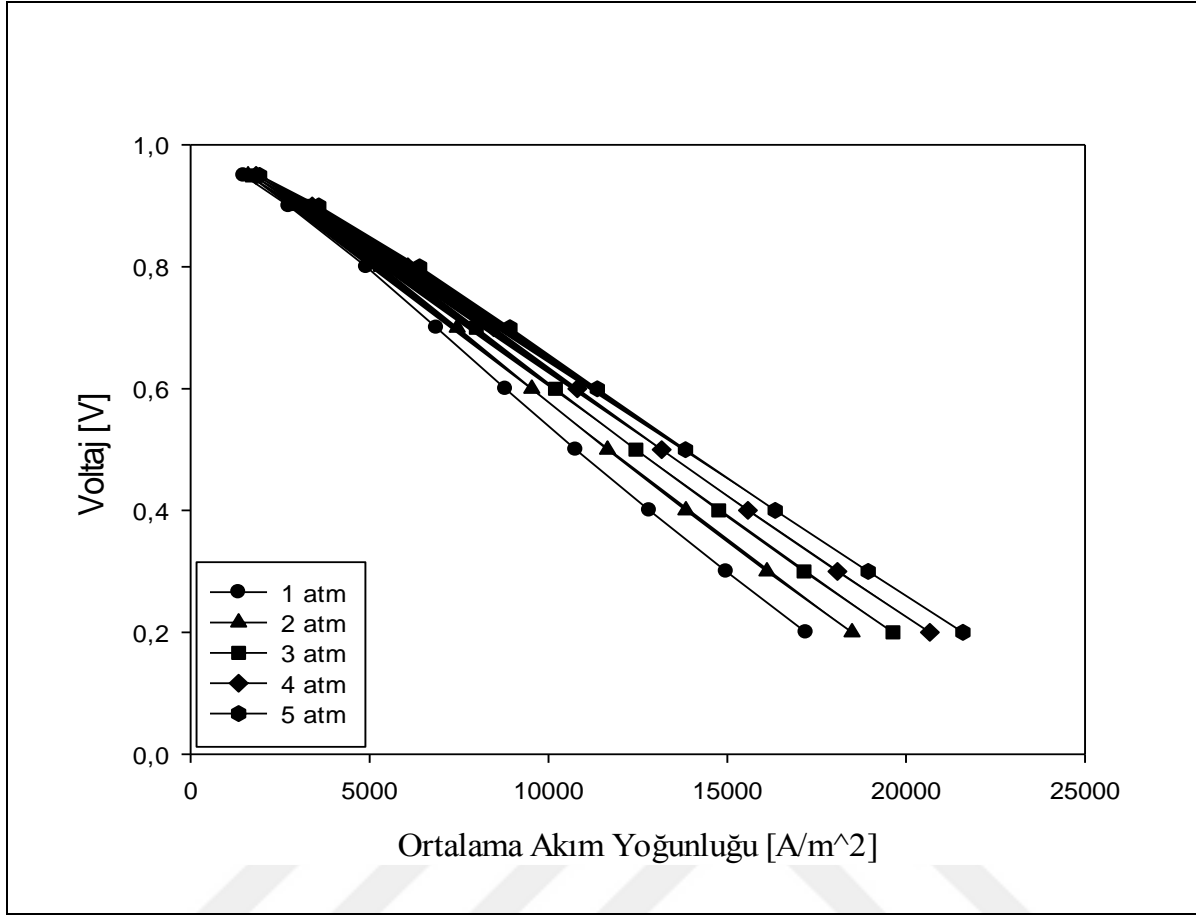
Çalışma basıncının katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansına etkisini gözlemleyebilmek amacıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 atm çalışma basınçlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11'de basıncın katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin performans eğrisi

Yukarıdaki şekilde farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt piline ait ortalama akım yoğunluğuna karşılık ortalama hücre gücü grafiği görülmektedir. Grafiğe göre basınç değeri 1 atm iken ortalama hücre gücü 5382 W/m², 5 atm iken 6915 W/m²'dir. Basınç artışı konsantrasyon polarizasyonlarını ve reaktant difüzyonunu azaltırken Nerst potansiyelini arttırmaktadır. Bu durum katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansının basınç artışıyla artmasının en önemli sebeplerindendir.

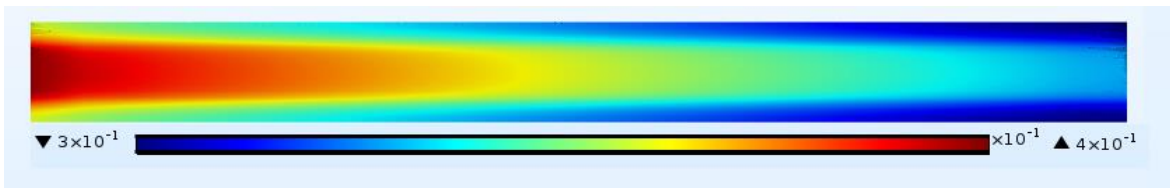
Farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt piline ait polarizasyon eğrisi Şekil 6.12'de görülmektedir.



Şekil 6.12. Farklı basınç değerlerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin polarizasyon eğrisi

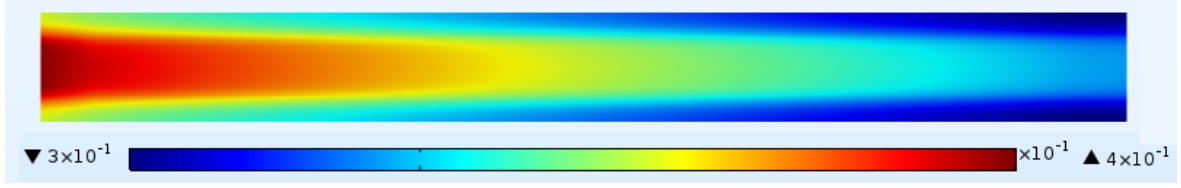
Yukarıdaki polarizasyon eğrisinde de görüldüğü gibi basınç değerinin artırılması ile ortalama akım yoğunluğu artmıştır. Ortalama akım yoğunluğu, basınç değeri 1 atm iken 17000 A/m² değerlerinde iken basınç değeri 5 atm olduğunda 21600 A/m² değerine yaklaşmıştır. Ortalama akım yoğunluğundaki artışın en büyük sebebi çalışma basıncının Nerst voltajı değerini artırmasıdır.

Şekil 6.13'de ise basınca bağlı olarak hidrojen tüketimi gösterilmektedir.



(a) 1 atm

Şekil 6.13. Basınç artışına bağlı olarak hidrojen tüketimi (kütlesel)



(b) 5 atm

Şekil 6.13. (devam) Basınç artışına bağlı olarak hidrojen tüketimi (kütlesel)

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi çalışma basıncının arttırılması katot destekli katı oksit yakıt pilinde hidrojen tüketimini arttırmaktadır. Bunun sebebi, basıncın artmasıyla yakıt pilinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların hızlanmasıdır. Bu durum, çalışma basıncı arttıkça katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca basıncın artması yakıt ve oksitleyici maddenin difüzyon katsayılarını arttırmakta ve konsantrasyonlar da buna bağlı olarak önemli derecede artmaktadır. Bu artışların sonucunda ise katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansı çalışma basıncı arttıkça artmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 3 boyutlu elektrolit destekli ve katot destekli katı oksit yakıt pili modelleri geliştirilmiş ve farklı işletme koşulları altında performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, literatürdeki katot destekli katı oksit yakıt piline ait sayısal ve deneysel çalışmaların eksikliğinden dolayı elektrolit destekli katı oksit yakıt pili modeli geliştirilmiş ve yapılan çalışmanın doğrulaması bu model üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme sonuçları, deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu çıkmıştır. Bu doğrulamadan ardından katot destekli katı oksit yakıt pilinin performans ve polarizasyon eğrileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmada, katot destekli katı oksit yakıt pili performansı üzerinde kalınlığın etkisinin elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansı kadar etkili olmadığı görülmüştür. Ayrıca, sıcaklık ve basınç değişimlerinin elektrolit destekli katı oksit yakıt pili performansı üzerinde katot destekli katı oksit yakıt pilinin performansına göre daha az etkili olduğu görülmüştür.

Oksitleyici olarak hava veya saf oksijen kullanımı karşılaştırıldığında ise hava kullanıldığında hem katot destekli hem de elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinin performansı daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi, oksitleyici olarak hava kullanıldığında elektrokimyasal reaksiyon hızının ve reaksiyon gerçekleşecek alan sayısının azalmasıdır. Bu nedenle oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığında hava içerisinde bulunan azot saf oksijende bulunmadığından elektrokimyasal reaksiyon hızı ve böylelikle hidrojen tüketimi artar. Bunun sonucunda ise hücre performansı oksitleyici olarak saf oksijen kullanıldığında daha yüksektir.

Katot destekli katı oksit yakıt pilinde işletme sıcaklığı 600°C'den 1000°C'ye arttırıldığında ortalama akım yoğunluğu %53 ve ortalama hücre gücü %56 oranında artmıştır.

Katot destekli katı oksit yakıt pilinde işletme basıncı 1 atm'den 5 atm'ye arttırıldığında ise ortalama akım yoğunluğu %20 ve ortalama hücre gücü %22 artmıştır.

Yapılan tüm sayısal modelleme sonuçları göz önüne alındığında, katot destekli katı oksit yakıt pilinin elektrolit destekli katı oksit yakıt pilinden daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Bu tez çalışmasının sonucunda önerilebilecek olan çalışma, katot destekli katı oksit yakıt pillerinin sayısal modellemeler ile desteklenerek deneysel olarak çalışılması, böylelikle performans açısından daha etkin kullanabileceğimiz bir yakıt pili çeşidinin literatür ve uygulamadaki yerini doldurmaktır.



KAYNAKLAR

1. Züttel, A., Borgschulte, A. and Schlapbach L. (Editors). (2008). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Company, 1-3.
2. Yamamoto, O. (2000). Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects. *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2423-2435.
3. Yakabe, H., Ogiwara, T., Hishinum, M. and Yasuda, I. (2001). 3-D model calculation for planar SOFC. *Journal of Power Sources*, 102(2001), 144-154.
4. Milewski, J., Swirski, K., Santarelli, M., Leone, P. (2011). *Advanced Methods of Solid Oxide Fuel Cell Modeling*. (Birinci Baskı). Springer-Verlag London, 91-92.
5. Severson, H. and Assadi, M. (2011, October). Modeling of Overpotentials in an Anode-Supported Planar SOFC Using a Detailed Simulation Model. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 8(5), 051021-13.
6. Ni, M., Leung, M.K.H. and Leung, D.Y.C. (2007). Parametrik Study of Solid Oxide Fuel Cell Performance. *Energy Conversion and Management*, 48 (2007), 1525-1535.
7. Baldinelli, A., Barelli, L. and Bidini, G. (2015). Performance Characterization and Modelling of Syngas-Fed SOFCs(Solid Oxide Fuel Cells) Varying Fuel Composition. *Energy*, 90 (2015), 2070-2084.
8. Morales, J. C.R., Lopez, D. M., Martinez, J.P., Vazquez, J.C., Roa, J.J., Segarra, M., Savvin, S.N. and Nunez, P. (2009). Performance of a Novel Type of Electrolyte-Supported Solid Oxide Fuel Cell With Honeycomb Structure. *Journal of Power Sources*, 195 (2010), 516-521.
9. Liu, H. C., Lee, C.H., Shiu, Y. H., Lee, R. Y. and Yan, W.M. (2007). Performance Simulation for an Anode-Supported SOFC Using Star-CD Code. *Journal of Power Sources*, 167(2007), 406-412.
10. DiGiuseppe, G., Gowda, Y. J. and Honnagondanahalli N. K. (2011, 7-10 August). *Performance Study of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Using a COMSOL Based 2D Model and Actual Cell Testing Geometry and Operating Conditions*. Paper presented at the ASME 2011 9th Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference, Washington, DC, USA.
11. Andersson, M., Yuan, J. and Sunden, B. (2012). SOFC Modeling Considering Electrochemical Reactions at the Active Three Phase Boundaries. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(4-5), 773-788.
12. Oulmi, K., Zitouni, B., Moussa, H. B., Abdenebi, H. and Andreadis, G.M. (2010). Total Polarization Effect on the Location of Maximum Temperature Value in Planar SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 4236-4243.

13. Hussain, M. M., Li, X. and Dincer, I. (2006). Mathematical modeling of planar solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 161 (2006), 1012-1022.
14. Jiang, W., Fang, R., Khan, J. A. and Dougal, R. A. (2006). Parameter setting and analysis of a dynamic tubular SOFC model. *Journal of Power Sources*, 162 (2006), 316-326.
15. Serincan, M. F., Pasaogullari, U. and Sammes N. M. (2009). Effects of operating conditions on the performance of micro-tubular solid oxide fuel cell (SOFC). *Journal of Power Sources*, 192, 414-422.
16. Niu, Y., Lv, W., Rao, G. and He, W. (2016). A critical look into effects of electrode pore morphology in solid oxide fuel cells. *Wiley Online Library*, 63 (2017), 2312-2317.
17. Shy, S. S., Hsieh, Y. D., Huang, C. M. and Chan Y. H. (2014). Comparison of electrochemical impedance measurements between pressurized anode-supported and electrolyte-supported planar solid oxide fuel cells. *Journal of Electrochemical Society*, 162, 172-177.
18. Hsieh, Y. D., Chan, Y. H., and Shy, S. S. (2015). Effects of pressurization and temperature on power generating characteristics and impedances of anode-supported and electrolyte-supported planar solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 299, 1-10.
19. Min, X. Y., Qiang, W. X., Jiang, L. and Lin, Y. C. (2016). Fabrication and performance of tubular electrolyte-supporting direct carbon solid oxide fuel cell by dip coating technique. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 33(2), 386-392.
20. Liu, Y., Hashimoto, S. I., Nishino, H., Takei, K., Mori, M., Suzuki, T. and Funahashi, Y. (2007). Fabrication and characterization of micro-tubular cathode-supported SOFC for intermediate temperature operation. *Journal of Power Sources*, 174 (2007), 95-102.
21. Su, S., Gao, X., Zhang, Q., Kong, W. and 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.
22. Su, S., Zhang, Q., Gao, X., Periasamy, V. and Kong, W. (2016). Effects of changes in solid oxide fuel cell electrode thickness on ohmic and concentration polarizations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 16181-16190.
23. Yu, Z., Liu, S., Zheng, F. and Ding, Y. (2016). Effects of the different supported structures on tubular solid oxide fuel cell performance. *International Journal of Electrochemical Science*, 11, 10210-10222.
24. Yamaguchi, T., Shimizu, S., Suzuki, T., Fujishiro, Y. and Awano, M. (2008). Fabrication and characterization of high performance cathode supported small-scale SOFC for intermediate temperature operation. *Electrochemistry Communications*, 10, 1381-1383.
25. Öztürk, K. (2002). Küresel iklim değişikliği ve Türkiye'ye olası etkileri. *G.Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(1), 47-65.

26. Genç, Ö. (2013). *PEM elektrolizörlerin performansına etki eden parametrelerin sayısal incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 1.
27. Turner, J.A. (1999) Hydrogen Production Pathways. *Science* 285, 687-689.
28. Steinberg, M. and Cheng, H.C. (1998) Modern and Prospective Technologies for Hydrogen Production from Fossil Fuels, *Oxford*, 2, 699-740.
29. Biyikoglu, A. (2003). Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi, çalışma prensipleri ve bugünkü durumu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 523-542.
30. Mench, M. M. (2008). *Fuel Cell Engines*. (1). United States of America: John Wiley&Sons, Inc, 10.
31. Bidault, F., Brett, D.J.L., Middleton, P.H. and Brandon, N. P. (2008, August). Review of gas diffusion cathodes for alkaline fuel cells. *Journal of Power Sources*, 187(2009), 39-48.
32. Brandon, N. and D. Thompsett. (2005). *Fuel Cells Compendium* (Birinci Baskı). Elsevier, 148-157.
33. Zhang, J. (2008). *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers* (Birinci Baskı). Springer-Verlag London, 5.
34. Timurkutluk, B., (2013). *Redox toleranslı katı oksit yakıt pili geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 9.
35. Aksongur, S. (2012). *Farklı çalışma parametrelerinde katı oksit yakıt pillerinin sayısal analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 11.
36. Timurkutluk, B. (2007). *Orta sıcaklık katı oksit yakıt pili performans analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-6.
37. Murthy, S. and Fedorov, A. G. (2003). Radiation heat transfer analysis of the monolith type solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 124 (2003), 453-458.
38. Singhal, S.C. (2000). Advances in solid oxide fuel cell technology. *Solid State Ionics*, 135, 305-303.
39. Sun, C., Hui, R. and Roller, J. (2010). Cathode materials for solid oxide fuel cells: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 14:1125-1144.
40. Su, S., Gao, X., Zhang, Q., Kong, W. and 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.
41. Ho, T. X., Kosinski, P., Hoffman, A. C. and Vik, A. (2008). Numerical modeling of solid oxide fuel cells. *Chemical Engineering Science*, 63 (2008), 5356-5365.
42. Çengel, A. and Y., Boles, M. A. (2011). *Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla*. (Beşinci Baskı). İzmir: Güven Kitabevi Ltd. Şti., 754.

43. Çengel, A. and Y., Cimbala, J. M. (2012). *Akışkanlar Mekaniği* (İkinci Baskı). İzmir: Güven Kitabevi Ltd. Şti., 172.
44. Ergün, A. (1999). İnce plakaların sonlu eleman metodu ve sonlu farklar metodu ile çözümü ve bu iki metodun karşılaştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 109-121.
45. Timurkutluk, B., Celik, S., Timurkutluk, C., Mat, M.D. and Kaplan, Y. (2012). Novel electrolytes for solid oxide fuel cells with improved mechanical properties. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (2012), 13499-13509.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÜMÜK, Berre
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.10.1993, Kayseri
 Medeni hali : Evli
 e-mail : berrekumuk@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	2015
Lise	Kdz.Ereğli Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
Nisan -Ağustos 2015	Cansolar Enerji	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

1. İlbaş M., KümüK B. (2017). *Model Bir Katı Oksit Yakıt Pilinin (KOYP) Performansına Etki Eden Faktörlerin Sayısal İncelenmesi*. 21. Ulusal Isı Bilimi Ve Tekniği Kongresi, Çorum, Türkiye.

Hobiler

Kitap okuma, sinema,tiyatro



GAZİ GELECEKTİR..