



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLİNDE AKIŞ TİPİNİN
PERFORMANS VE SICAKLIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

RİDVAN İŞİK

Temmuz 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KATI OKSİT YAKIT PİLİNDE AKIŞ TİPİNİN
PERFORMANS VE SICAKLIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN
SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

RİDVAN IŞIK

Yüksek Lisans Tezi

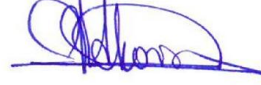
Danışman

Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Temmuz 2019

Rıdvan IŞIK tarafından **Prof. Dr. Yüksel KAPLAN** danışmanlığında hazırlanan “**Katı Oksit Yakıt Piliinde Akış Tipinin Performans ve Sıcaklık Dağılımına Etkisinin Sayısal Ve Deneysel Olarak İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. S. Orhan Akansu, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Prof. Dr. Yüksel Kaplan, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Doç. Dr. Serkan TOROS, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Rıdvan IŞIK

ÖZET

KATI OKSİT YAKIT PİLİNDE AKIŞ TİPİNİN PERFORMANS VE SICAKLIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

IŞIK, Rıdvan

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Yüksel Kaplan

Temmuz 2019, 59 Sayfa

Bu yüksek lisans tezinde, katı oksit yakıt pilinde akış tipinin performans ve sıcaklık dağılımına olan etkisi incelenmiştir. Yakıt pilinin performansı açısından yakıt pili içerisindeki sıcaklık dağılımı çok önemlidir. Sıcaklık farkı termal gerilmelere sebep olmaktadır. Sıcaklık farkından kaynaklanan termal gerilmeler sebebi ile performans düşmekte ve yakıt pilinin ömrü kısalmaktadır. Sıcaklık dağılımını ve yakıt pili performansını görmek için önce iki farklı tasarım incelenmiştir. Bunlar standart düz kanallı tasarım ve ikincil tasarımıdır. İlk olarak standart düz kanallı tasarımın performansının ikincil tasarıma göre daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Daha sonrasında ise çalışmaya standart tasarım ile devam edilmiştir. Standart tasarımda paralel ve karşı akış tipi kullanılarak sıcaklık dağılımı ve akış tipinin performansa etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Karşı akış tipi; paralel akış tipine göre bir miktar daha iyi performans göstermesine karşın, paralel akış tipinde sıcaklık dağılımı daha uniform olarak gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Yakıt pili, katı oksit yakıt pili, akış tipinin performansa ve sıcaklık dağılımına etkisi, sıcaklık dağılımı

SUMMARY

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FLOW TYPE ON PERFORMANCE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SOLID OXIDE FUEL CELL

IŞIK, Rıdvan

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Professor Dr. Yüksel Kaplan

July 2019, 59 pages

In this master thesis, the effect of flow type on the temperature and performance of solid oxide fuel cells was investigated. For the performance of the fuel cell, the temperature distribution in the fuel cell is very important. The temperature difference causes thermal stresses. Due to thermal stresses caused by the temperature difference, performance decreases and the life of the fuel cell is shortened. Two different designs were first examined to see the temperature distribution and fuel cell performance. These are standard flat channel design and secondary design. First, the performance of the standard flat channel design has been shown to provide better performance than the secondary design. Then, the study was continued with the standard design. In the standard design, the effect of flow type on temperature distribution and the performance was numerically and experimentally investigated using parallel and counter flow type. Although the counter-flow type showed slightly better performance than the parallel flow type, the temperature distribution in parallel flow type was observed more uniformly.

Key Words: Fuel cell, solid oxide fuel cell, effect of flow type on performance and temperature distribution, temperature distribution

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, katı oksit yakıt pilinde akış tipinin performans ve sıcaklık dağılımına olan etkisi incelenmiştir. Yakıt pilinin çalışma esnasında yakıt pilini oluşturan her bir tabakada termal genleşmeler meydana gelmektedir. Bu termal gerilmeler yakıt hücresi içerisinde çatlaklara sebebiyet vermektedir. Bundan dolayı da yakıt pilinin performansında düşme meydana gelir ve yakıt pilinin kullanım ömrü azalır. Katı oksit yakıt pilinin çalışma sıcaklığı yüksek olduğundan tam anlamıyla sıcaklık dağılımını görebilmemiz zordur. Çalışmamızda biri standart kanallı tasarım, diğeri ise ikincil tasarım olmak üzere iki farklı akış geometrisine sahip akış kanalını ele aldık. Standart tasarımda hidrojen, oksijen tüketimi ve elektrolit akım yoğunluğu ikincil tasarıma göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun ardından standart tasarımda paralel ve karşı akış tipi kullanılarak performans ve sıcaklık dağılımı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Karşı akış performans olarak paralel akışa göre daha iyi performans sonuçları vermesine karşın paralel akışta sıcaklık dağılımı daha uniformdur.

Yaptığım bu yüksek lisans tez çalışmasının yürütülmesi sürecinde, bilgileriyle çalışmama destek olan danışman hocam Prof. Dr. Yüksel Kaplan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tecrübe, deneyim ve sahip oldukları birikimleri ile yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine ayrıca teşekkür ederim. Ayrıca Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanlarına da teşekkür ederim.

Hayatımın her anından yanımda olan ve desteğini her zaman arkamda hissettiğim, gösterdiğim her türlü başarının arkasındaki gizli mimar olan, en zor anımda bile hem maddi hem de manevi desteğini esirgemeyen aile fertlerime de sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAF DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Yakıt Pili	3
1.2 Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları	5
1.3 Yakıt Pillerinin Avantaj ve Dezavantajları	6
1.4 Yakıt Pili Çeşitleri	7
1.5 Katı Oksit Yakıt Pilleri	10
1.6 Katı Oksit Yakıt Pili Çalışma Prensipleri	13
1.7 Katı Oksit Yakıt Pili Bileşenleri	14
1.7.1 İnterkonnektörler	15
1.7.2 Elektrolit	16
1.7.3 Anot	17
1.7.4 Katot	18
1.7.5 Sealant	19
1.7.6 Akım toplayıcılar	20
1.8. KOYP Akış Türleri	21
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI	23
BÖLÜM III MATERYAL VE METOD	27
3.1 Kullanılan Araç ve Gereçler	27
3.2 Sayısal Çalışma	30
3.2.1 Kullanılan denklemler	32
3.3 Deneysel Çalışma	35
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA	37

BÖLÜM V SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	52
ÖZ GEÇMİŞ	59



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve aralarındaki farklar	8
Çizelge 1.2. Yakıt pili çeşidine bağlı olarak gerçekleşen reaksiyonlar	8
Çizelge 1.3. Yakıt pillerinin kullanıldığı alanlar	9
Çizelge 1.4. Düzlenmsel ve tüp şekilli KOYP'un arasındaki farklar	12
Çizelge 1.5. KOYP'da meydana gelen reasksiyonlar	14
Çizelge 1.6. Crofer 22 APU kimyasal bileşimi (Pyo vd., 2009).....	16
Çizelge 3.1. Sayısal çözümlemede kullanılan parametreler	31

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yakıt pili ve çalışma prensibi	4
Şekil 1.2. Yakıt piline ait temel elemanlar.....	5
Şekil 1.3. Tüp şekilli KOYP (Stambouli ve Traversa, 2002)	11
Şekil 1.4. Düzlemsel tip KOYP (Bove ve Ubertini, 2006).....	11
Şekil 1.5. Radyal tip KOYP (Stambouli ve Traversa, 2002)	12
Şekil 1.6. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)	13
Şekil 1.7. KOYP akış tipleri (Kakac vd.,2007)	21
Şekil 2.1. Tasarım parametreleri.....	25
Şekil 3.1. Yakıt pili test düzeneği	28
Şekil 3.2. Akış kanalı geometrisi	28
Şekil 3.3. Standart tasarımın akış alanı geometrisi ve ağ yapısı.....	30
Şekil 3.4. İkincil tasarımın akış alanı geometrisi ve ağ yapısı.....	30
Şekil 4.1. Karşı akışın deneysel; (voltaj-akım) ve güç yoğunluğu grafiği	37
Şekil 4.2. Paralel akışın deneysel; (voltaj-akım) ve güç yoğunluğu grafiği	38
Şekil 4.3. Elektrolit SEM görüntüsü.....	39
Şekil 4.4. Anot SEM görüntüsü	39
Şekil 4.5. Katot SEM görüntüsü	40
Şekil 4.6. Standart tasarım karşı akış tipi hidrojen tüketimi	41
Şekil 4.7. İkincil tasarım karşı akış tipi hidrojen tüketimi.....	41
Şekil 4.8. Standart tasarım karşı akış tipi hidrojen tüketimi.....	42
Şekil 4.9. İkincil tasarım karşı akış tipi oksijen tüketimi.....	42
Şekil 4.10. Standart tasarım karşı akış tipi elektrolit akım yoğunluğu	43
Şekil 4.11. İkincil tasarım karşı akış tipi elektrolit akım yoğunluğu.....	43
Şekil 4.12. Standart ve ikincil tasarımın performans sonuçları	44
Şekil 4.13. Karşı akış hidrojen tüketimi	44
Şekil 4.14. Paralel akış hidrojen tüketimi	45
Şekil 4.15. Karşı akış oksijen tüketimi	45
Şekil 4.16. Paralel akış oksijen tüketimi.....	46
Şekil 4.17. Karşı akış elektrolit akım yoğunluğu.....	46
Şekil 4.18. Paralel akış elektrolit akım yoğunluğu	47

Şekil 4.19. Karşı akış tipinde katot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı.....	48
Şekil 4.20. Paralel akış tipinde katot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4.21. Karşı akış tipinde anot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı	49
Şekil 4.22. Paralel akış tipinde anot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı.....	49



FOTOĞRAF DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Anot Yüzeyi	18
Fotoğraf 1.2. Katot Yüzeyi	19
Fotoğraf 1.3. Sealant	20
Fotoğraf 1.4. Akım toplama kolu.....	21
Fotoğraf 3.1. Deneyin hazırlanışı	29
Fotoğraf 3.2. Gözenekli nikel (Ni)-corofer elekler (a) ve (b)	29
Fotoğraf 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar	36

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
SO ₂	Kükürt dioksit
NO	Azot oksit
CO	Karbonmonoksit
Pb	Kurşun
CO ₂	Karbondiokdit
H ⁺	Hidrojen İyonu
O ⁻²	Oksijen İyonu
H ₂ O	Su
ZrO ₂	Zirkonyumdioksit
Y ₂ O ₃	Yitrinyum oksit
LaCrO ₃	Lanthanum chromite
ZrO ₂	Zirkonyum
σ_1	Akım besleyicisinin elektronik iletkenliği (S/m)
σ_2	İyonik iletkenlik (S/m)
$\phi_{elektronik}$	Besleyicinin elektronik iletkenliği (V)
S_a	Spesifik yüzey alanı (1/m)
i_{ict}	Yük transfer yoğunluğu (A/m ²)
$i_{0,a}$	Anodun değişen akım yoğunluğu (A/m ²)
x_{h2}	Hidrojenin molar kesri
x_{h4}	Metanın molar kesri
c_t	Türlerin toplam konsantrasyonu (mol/m ³)
$c_{h2,ref}$	Referans konsantrasyonu(mol/m ³)
F	Faraday sabiti (96500 C/mol)
R	Gaz sabiti (J/mol-K)
T	Sıcaklık (K)
η	Aşırı gerilim (V)
$\Delta\phi_{eq}$	Denge potansiyel farkı (V)
V_{cell}	Hücre voltajı (V)

V_{pol}	Polarizasyon
$\bar{D}_{ij}$	Fick difüzyonunun ij bileşeni
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
p	Basınç (Pa)
R_i	i için tepki kaynak terimi (J/(m ³ .s))
x_j	j için molar kesri
V_i	Stokiyometrik katsayısı
n_i	Tepkimeye giren elektron sayısı
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ε	Ortamin gözenekliliği
κ	Ortamin geçirgenliği
Q	Kütle kaynağı terimi (kg/(m ³ .s))

Kısaltmalar

Açıklama

KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
PEMYP	Proton Değişim Membran Yakıt Pili
AYP	Alkali Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
DMYP	Doğrudan Metanol Yakıt Pili
EKYP	Erimiş Karbonat Yakıt Pili
PM	Partikül Madde
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
DC	Doğru Akım
MEG	Membran Elektrot Gurup
AC	Alternatif Akım
kW	Kilowat
LT-FC	Düşük Sıcaklık Yakıt Hücresi
IT-FC	Orta Sıcaklık Yakıt Hücresi
HT-FC	Yüksek Sıcaklık Yakıt Hücresi
VHT-FC	Çok Yüksek Sıcaklık Yakıt Hücresi
AYP	Alkali Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
EKYP	Erimiş Karbonat Yakıt Pili

YSZ

İtriyum Oksit İle Stabilize Edilmiş Zirkonyum Oksit

LSM

Lantan Stronsiyum Manganez



BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünyadaki nüfusun gün geçtikçe hızlıca artması, teknolojik gelişmelerde elde edilen önemli başarılar ve sanayileşmenin getirdiği enerji ihtiyacının fazlalığı insanoğlunun içerisinde yaşadığı yeryüzünde enerjiye olan ihtiyacını gün geçtikçe artırmaktadır.

İnsanların günlük ihtiyaçlarını karşılamak, üretim yapmak gibi bazı konularda enerjinin verimli bir şekilde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Enerji üretiminin büyük bir kısmını oluşturan fosil yakıtların çevreye verdiği olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Fosil kaynakların çevreye verdiği olumsuz etkilerinden dolayı, bu kaynakların daha az kullanılmasının önünü açacak başka enerji kaynaklarının keşfedilmesi ve bu kaynakların çevre ile uyumlu bir şekilde çalışması günümüzde önemli konular arasında yer almaktadır.

Dünya üzerinde yaşayan insanların enerji ihtiyaçları birçok yerde fosil yakıtların kullanılarak enerji üretilmesi ile sağlanmış ve bu durum içinde yaşadığımız zaman dilimine kadar bu şekilde devam etmiştir. Fosil yakıtların kullanımına dayalı enerji üretimi ile birlikte çoğu sayıda olumsuz durum meydana gelmiş, çevre ve insan sağlığı bu durumlardan olumsuz yönde etkilenmiştir. (Öz vd., 2005)

Isınmada, güç üretiminde, motorlu taşıtlarda, endüstriyel süreçlerde fosil yakıtların yakılarak kullanılması ile birlikte, şehirlerimizde atmosfere verilen hava kirleticilerinin kaynağında bir artış yaşanmıştır. Bu yakıtların fazlaca kullanılmasıyla, zehirli etkiye sahip olan gazların çevreye salınması sonucunda soluduğumuz havanın kalitesini de azaltmıştır. Fosil yakıtların kullanılması sonucu havaya yaygın olarak karbon monoksit (CO), kurşun (Pb,) kükürt dioksit SO₂, azot oksitler, partikül maddeler ve kurşun (Pb) gibi maddeler bol oranlarda havaya salınmaktadır. Hal böyle olunca dünyamız ve canlı yaşamı için büyük bir tehlike oluşturmaktadır. Fosil yakıt kullanımı ile birlikte açığa çıkan karbondioksit gazının çevreye bırakılması ile birlikte atmosferdeki karbondioksit miktarında aşırı bir artış meydana gelmiştir (Sevim, 2011). Bu durumun bu şekil devam etmesi sonucunda dünya üzerinde yaşayan birçok canlı varlık türü bundan olumsuz yönde etkilenmiştir.

Gelişen sanayi ve teknolojinin getirdiği enerjiye olan ihtiyaç ile birlikte son yıllarda, fosil yakıtların çokça kullanılmasıyla birlikte dünyamızın atmosferinde biriken karbondioksit miktarında büyük bir artış yaşanmıştır. Bu durumun bu şekilde devam etmesi daha da fazla miktarda karbondioksit gazının atmosferde artacağı ön görülmektedir. Sera etkisine neden olan fosil yakıtlar bu şekilde kullanılmaya devam etmesi halinde dünyadaki sıcaklığın artacağı endişesi artmaktadır. Sıcaklığın bu şekilde artmaya devam etmesi dünyada iklim değişikliğine sebebiyet verebilir (Gönüllü ve Varınca, 2006). Ayrıca, dünyada hazır bulunan rezervlerden petrol 41 yıl, doğal gaz 67 yıl ve kömür ise 164 yıl sonra tükenmesi öngörülmektedir.

Fosil yakıtlar bu şekilde tükenmeye devam ederse, tahminlere göre yaklaşık olarak elli yıl kadar sonra dünyadaki enerji tüketiminde fosil yakıt kullanıma ihtimali kalmayacağı ön görülmektedir. Fosil yakıtların kullanılmasının dünya üzerinde çok fazla olumsuz etki doğurması nedeniyle küresel çapta bu yakıtların azaltılması için adımlar atılmaktadır. Dünya devletleri fosil yakıt temelli yakıtların kullanımını azaltmaya yönelik anlaşmalar yapılmaktadır. Hal böyle olunca fosil yakıtlara alternatif olabilecek enerji kaynaklarının kullanılması yönünde bir yönelim başlamıştır.

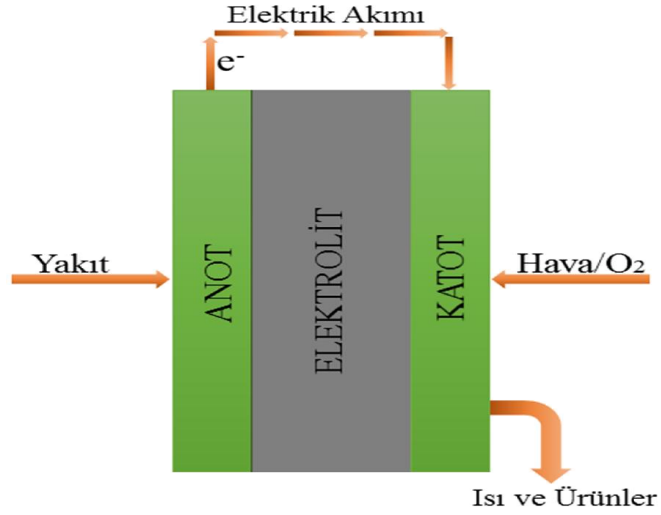
Fosil yakıtlara en büyük alternatif olabilecek enerji kaynaklarından biri de yenilenebilir enerjidir. Yenilenebilir enerji genel olarak doğanın kendi içinde sürekli olarak devam eden doğal olaylar ile dünyada hep var olacak enerji akışının kullanılması olarak adlandırılmaktadır (Drabyk, 2001). Doğal süreçler sonucu oluşan bu enerji akışını kullanılması ile elde edilecek enerji üretimi doğal yaşam için olumsuz yönde bir etki de oluşturmamaktadır.

Rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir olan enerji kaynaklarının günlük hayatımızdaki kullanımı giderek yaygın bir hale gelmektedir. Rüzgâr ve güneş gibi kaynakların haricinde farklı uygulamalarda kullanılabilen yakıt pilleri üzerinde çalışmalar başlamıştır. Yakıt pilleri, harici kaynaktan sistem içine verilen yakıtın, yine dışarıdan sistem içerisine verilen oksitleyicinin, sistem içerisinde elektrokimyasal olarak gerçekleşen bir dizi reaksiyon sonucu kimyasal enerjinin direk olarak elektrik enerjisine çevrilmesine yarayan sistemlerdir. Bu sistemde kimyasal reaksiyonlar sonucunda direk olarak elektrik enerjisi üretildiği için, fosil yakıtlı sistemler gibi mekanik elemanlara ihtiyaç duymamaktadır.

Sağlanan yakıt ile havanın oluşturduğu elektrokimyasal reaksiyonların sonucunda kimyasal enerjiyi direk olarak elektrik enerjisine çevirebilen yakıt pillerinin ana çalışma şeklini 1938 yılında Christian Friedrich Schönbein bulmuştur (Sammes, 2006). Belirtilen bu esasa uygun olarak elektrolit malzemesi olarak sülfürik asit çözeltisi kullandığı yakıt pilini oluşturmuştur (Hoogers, 2002). ABD'nin 1960'lı yıllarda uzay çalışmalarında büyük ilerlemeler kat etmesi ile birlikte yakıt pillerine olan ilgi giderek artmıştır (Yamamoto, 2000).

1.1 Yakıt Pili

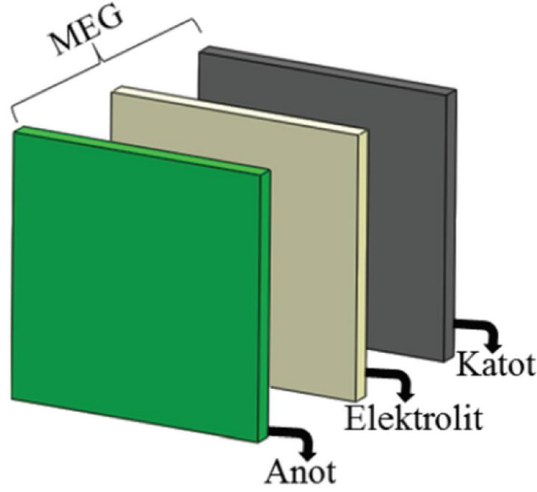
Yakıt pilinin tanımı genel olarak sisteme verilen hidrojen ve oksijeni kullanarak elektrokimyasal reaksiyonlar ile direkt olarak elektrik enerjisi üretmeye yarayan güç üretim elemanıdır. Bu durum tersine elektroliz reaksiyonu olarak da düşünülebilir. Bu reaksiyonlar sonucunda elektrik üretimi sağlanmaktadır (Barbir, 2008). Yakıt pilleri, elektrokimyasal bir süreç ile elektrik ürettiği olmaları bakımından piller ve aküler ile benzerlik gösterirler. Günlük hayatımızda kullandığımız pilleri düşündüğümüzde, içerisinde var olan enerjiyi elektrokimyasal bir reaksiyon ile kullanılabilir elektrik enerjisi olarak verirler. Verilebilecek olan enerjileri, daha önce sahip oldukları enerji tükenene kadar devam eder. Bu enerji tükendikten sonra ise istenilen elektrik enerjisini veremezler. Aksine yakıt pili sistemine yakıt ve hava verilmesinin kesintiye uğramaması durumunda, yakıt pili talep edilen elektrik enerjisini vermeye devam edecektir (Pettersson ve Westerholm, 2001). Şekil 1.1'de yakıt pili ve çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Yakıt pili ve çalışma prensibi

Yakıt pili yapısal olarak genellikle; geçirgen bir yapıya sahip olmayan bir elektrolit, geçirgen yapıda ve elektrolitin her iki tarafıyla da temas halinde olan anot, katot elektrottan meydana gelmektedir. Elektrolit geçirgen bir yapıda olan elektrotların arasında bulunur. Anot kutbuna gaz halindeki yakıt, oksitleyici ise yakıt pilinin katot kısmına gönderilmesiyle birlikte, meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan potansiyel fark sebebiyle elektron akışı meydana gelir. Reaksiyonların gerçekleşmesi sonrasında elektrik enerjisi üretilmiş olur ve harici olarak da ısı ve saf su oluşur İçeriğinde karbon bulunduran yakıtın sisteme verildiği durumlarda, ayrıyeten karbondioksit gazı açığa çıkmaktadır.

Yakıt pillerindeki anot, elektrolit ve katottan meydana gelen gruba “Membran Elektrot Grubu” denilir (Wachsman ve Lee, 2011). Şekil 1.2’de bir membran elektrot gurubu ana hatları ile gösterilmektedir ve bunların bir araya gelmesi ile oluşan sisteme de “Yakıt Hücresi” adı verilmektedir.



Şekil 1.2. Yakıt piline ait temel elemanlar

Yakıt hücreleri seri bir şekilde birbirine bağlanılarak tek bir yakıt pili hücresinden sağlanan güç çıktısından daha fazla güç çıktısı elde edilebilmektedir. Yakıt ve oksidant gazlarının içirişinde yol aldığı, elektrotla ile temas halinde bulundan akım toplayıcı plakalar, elektrik enerjisinin sistemden transferini sağlarlar. Bu akım toplayıcı plakaların maruz kalacakları sıcaklıklara karşı mekanik olarak dayanıklı özellikte ve iyi bir ısı iletkenliğine sahip olması beklenir. Bahsedilen bu detaylar doğrultusunda, akım toplayıcı plaka malzemesi olarak, genellikle çelik veya karbon içeriğine sahip metaller kullanılmaktadır. Mekanik olarak rijit, kimyasal reaksiyonlara karşı kararlı ve iyi bir ısı iletkenliğe sahip olan grafitin akım toplama plakası olarak fazla tercih edilmemesinin sebebi yüksek işleme maliyetinden kaynaklanmaktadır (Hottinen, 2004).

Reaksiyonun hızını arttırmak için yakıt pillerinde katalizörlerde kullanılmaktadır. Bu katalizörler yakıt pilinin türüne göre değişmektedir. Katalizörler genellikle; elektrotlar birbirleriyle temas halindeyken kullanılır. Yakıt pilinden sağlanan gerilimin düzenlenmesi gerektiği durumlarda regülatör kullanılabilmektedir. Ayrıca doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi ihtiyacının olduğu durumlarda inverter kullanılabilmektedir (Larminie vd., 2003).

1.2 Yakıt Pilinin Kullanım Alanları

Yakıt pillerinin kullanım alanlarına bakılacak olursak; genel olarak kullanım alanları şunlardır:

- ❖ Uzay çalışmalarında
- ❖ Askeri uygulamalarda
- ❖ Yüksek güç üretim sistemi uygulamalarında
- ❖ Taşınabilir güç kaynağı uygulamalarında

1.3 Yakıt Pilinin Avantaj ve Dezavantajları

Birçok teknolojik cihazda olduğu gibi, yakıt pilinin de sağladığı avantajlı ve dezavantajlı özellikleri vardır:

Avantajlı özellikler:

- ❖ Fosil yakıtlara göre daha yüksek enerji verimine sahiptirler.
- ❖ Kullandığı yakıtın dünyada en fazla miktarda bulunan hidrojen olması
- ❖ Sıfır veya düşük emisyonu sahip olmasından dolayı kapalı mekânlarda da kullanılabilir olması.
- ❖ Geleneksel fosil yakıtlı motorlar gibi hareketli parçalar(piston, miller vs.) içermezler ve uzun ömürlülerdir.
- ❖ Benzinli ve dizel motorlara göre daha yüksek verime sahiptirler
- ❖ Hızlı enerji dönüşümü sağlarlar
- ❖ Yakıt hücreleri modüler yapıya sahiptir. Daha fazla güç gereksinimi halinde fazla sayıda yakıt hücresi, stak yapısı şeklinde eklenebilirler.
- ❖ Yakıt hücreleri mikrowatt güçlerinden megawatt güçlerine kadar yapılabilir.

Yakıt pilini dezavantajlı kılan sebepler ise; yapım maliyetlerinin yüksek olması, ağırlıklarının yüksek ve hacimlerinin büyük yer kaplayabiliyor olması, kullanılacak olan yakıtın depolanmasının zor olması, direkt hidrojen kullanılması durumunda yakıt fiyatının yükselmesi, kullanım ömürlerinin kesin olarak bilinmemesidir

1.4 Yakıt Pili Çeşitleri

Dünya üzerinde hale hazırda ve üretilen çok sayıda yakıt pili çeşidi mevcuttur. Bu yakıt pilleri; tükettiği yakıt ve oksitleyicinin tipi, yakıt pilinin içinde veya dışında yakıtın işlenişi, çalışma sıcaklığı, yakıt pilinin kullanıldığı alan, sahip olduğu elektrolitin yapısı gibi belirli özelliklere göre farklı çeşitlerde olabilmektedir. Çalışma sıcaklığına göre yakıt pili; düşük, orta ve yüksek sıcaklık olarak sınıflandırılabilirler (Fang vd., 2002). Çalışma sıcaklığına göre sınıflandırma yapılırsa; düşük sıcaklık (25 °C -100 °C) yakıt hücresi (LT-FC), orta sıcaklık (100 °C -500 °C) yakıt hücresi (IT-FC), yüksek sıcaklık (500 °C -1000 °C) yakıt hücresi (HT-FC) ve çok yüksek sıcaklık (1000 °C ve üzeri) yakıt hücresi (VHT-FC) olarak sınıflandırılabilirler. Yakıt pilleri genel olarak hücrenin içinde kullanılan elektrolitin tipine göre sınıflandırılır (Blomen ve Mugerwa, 2013). Genel olarak yakıt pillerini kategorize edecek olursak, be çeşit yakıt pili türü karşımıza çıkmaktadır. Bu yakıt pili türleri;

- ❖ Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)
- ❖ Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)
- ❖ Alkali Yakıt Pili (AYP)
- ❖ Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)
- ❖ Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP)
- ❖ Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)

Çizelge 1.1’de yakıt pilleri arasındaki farkları; kullanılan elektrolit, çalışma sıcaklığı, elektriksel verim ve kullanılan yakıt/oksitleyici cinsinden görmek mümkündür.

Çizelge 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve aralarındaki farklar

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Elektriksel Verim	Yakıt/Oksitleyici
Alkali	Potasyum Hidroksit Çözeltisi	Oda sıcaklığı – 250 °C	60 - 70%	H ₂ /O ₂
PEM	Proton Dönüşüm Membran	Oda sıcaklığı – 80 °C	40 - 60%	H ₂ /O ₂ , hava
Direkt Metanol	Polimer Membran	Oda sıcaklığı – 130 °C	20 - 30%	CH ₃ OH/O ₂ , hava
Fosforik Asit	Sıvı Fosforik Asit	160 - 220 °C	55%	Doğalgaz, biyogaz, H ₂ /O ₂ , hava
Erimiş Karbonat	Alkali Karbonatlar	620 - 660 °C	65%	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava
Katı Oksit	Erimiş Alkali Metal Karışımı	800 - 1000 °C	60 - 65%	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava

Ayrıca yakıt pili türüne bağlı olarak yakıt hücrelerinde gerçekleşen reaksiyonlar farklılık göstermektedir. Aşağıda Çizelge 1.2’de bu farklı reaksiyonları görebilmekteyiz.

Çizelge 1.2. Yakıt pili çeşidine bağlı olarak gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar

Yakıt pili	Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
PEMYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
DMYP	$C_2H_5OH \rightarrow 5H^+ + CO_2 + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
AYP	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e$	$1/2O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 2(OH)$
FAYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
EKYP	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e \rightarrow CO_3^{2-}$
KOYP	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e$	$1/2O_2 + 2e \rightarrow O^{2-}$

Yakıt pilleri birçok alanda karşımıza çıkmaktadır Farklı türdeki yakıt pillerinin kullanım alanları ihtiyaca ve kullanılacak sektöre göre farklılıklar göstermektedir. Çizelge 1.3’de yakıt pilinin çeşidine göre kullanım alanları gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. Yakıt pillerinin kullanıldığı alanlar

Alkali Yakıt Pili	• Uzay Araçları
Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili	• Taşınabilir Cihazların (bilgisayar, cep telefonu vb.) Bataryaları, Otomotiv ve Evsel Uygulamalar
Doğrudan Metanol Yakıt Pili	• Taşınabilir Cihazların (bilgisayar, cep telefonu vb.) Bataryaları • Otomotiv sektörü
Fosforik Asit Yakıt Pili	• Sabit Güç Üretim Sistemleri • Askeri Uygulamalar
Erimiş Karbonat Yakıt Pili	• Kojenerasyonlu Sabit Uygulamalar • Sürekli Üretim
Katı Oksitli Yakıt Pili	• Kojenerasyonlu Sabit Uygulamalar • Sürekli üretim

1960'lı yıllarda NASA'nın uzay çalışmalarında kullanması için PEM yakıt pili Amerika'da geliştirilmiştir. PEM yakıt pili, oksidant olarak hava ya da oksijen, yakıt olarak ise hidrojen elektrolit olarak ise katı polimerli membran kullanmaktadır. Kimyasal olarak asidik bir özelliğe sahip membran sayesinde hidrojen iyonları veya protonlar taşınır (Karaoğlu ve Kuralay, 2014; Ural ve Gencoglu, 2010; Liv d., 2008)

Yakıt hücresi, kullanılan yakıttan aldığı kimyasal enerjiyi direk olarak elektrokimyasal süreçler ile elektrik enerjisine çevirir. Yakıt ve oksijen, sürekli olarak reaksiyonun gerçekleştiği yakıt hücresinin iki ayrı elektrotuna gönderilir. Elektrotlar arasında bulunan elektrolitte ise yakıt (hidrojen) beslemesinin yapıldığı anottan oksijenin bulunduğu katoda doğru bir iyon geçişi gerçekleşir.

Elektronlar, elektrik devresine akarken hidrojen protonları da elektrolite doğru akar. Hidrojen protonları ile elektronların katotta oksijen akışı ile birleşmesiyle su oluşurken, atık ısı ve elektrik enerjisi açığa çıkar. Yakıt hücresindeki reaksiyonlar ile elde edilen termodinamik voltaj, açığa çıkan enerji ve reaksiyon sonucu katoda geçen elektron sayısı ile ilgilidir.

Yakıt pillerinin kullanma şekline bağlı olarak birbirlerine göre avantajlı durumları söz konusu olmasına karşın son yıllarda katı oksit yakıt pilleri verim, maliyet ve enerji

dönüşüm veriminin yüksek olması sebebiyle diğer yakıt pili çeşitlerine göre daha fazla dikkat çekmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir.

1.5 Katı Oksit Yakıt Pilleri

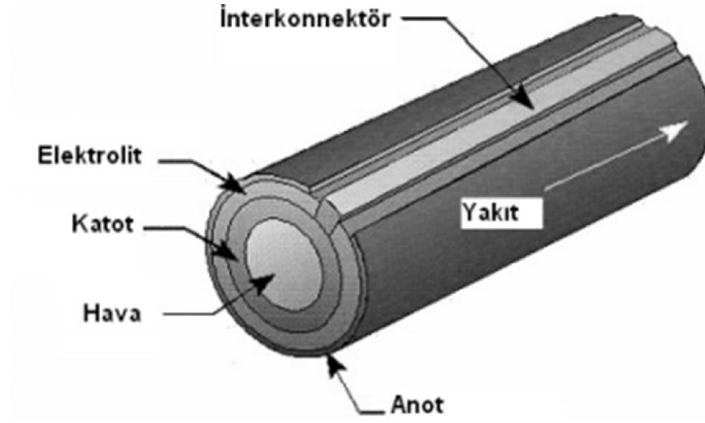
Katı oksit yakıt pilleri (KOYP) temelde, elektrokimyasal reaksiyonların üzerinde gerçekleştiği membran elektrot grup (MEG), anot ve katotta üretilen akımın toplandığı elekler, kontak artırıcı, akım toplayıcı ve katalizör görevi gören anot ve katot pastaları, sızdırmazlığı ve kısa devreyi önleyici contalar ve ayrıca tüm bu bileşenleri bir arada tutarak reaksiyon gazlarının iletimini ve egzoz gazlarının uzaklaştırılmasını, aynı zamanda üretilen akımının toplanmasını sağlayan yüksek iletkenlik katsayısına sahip olan Crofer 22 APU malzemeden üretilen interkonnektörlerden oluşmaktadır.

KOYP kimyasal enerjiyi direkt DC elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır ve yaklaşık 700 °C - 1000 °C sıcaklıkta çalışırlar. Elektrolitteki iyon iletimi oksijen iyonları sayesinde gerçekleşmektedir. KOYP'ların çalışma verimleri % 60-65'e (kojenerasyonla yaklaşık %80 - 85) yaklaşmaktadır.

KOYP' da, interkonnektör aynı zamanda bipolar plaka olarak da adlandırılır ve aynı zamanda interkonnektörlerin yüzeylerinde oluşturulan kanallarda gaz akışı sağlanır. Gaz akış kanalları anot ve katot elektrotları boyunca gazı dağıtmak için kullanılır. Katı oksit yakıt pilinin üç ana tasarım çeşidi vardır. Bunlar;

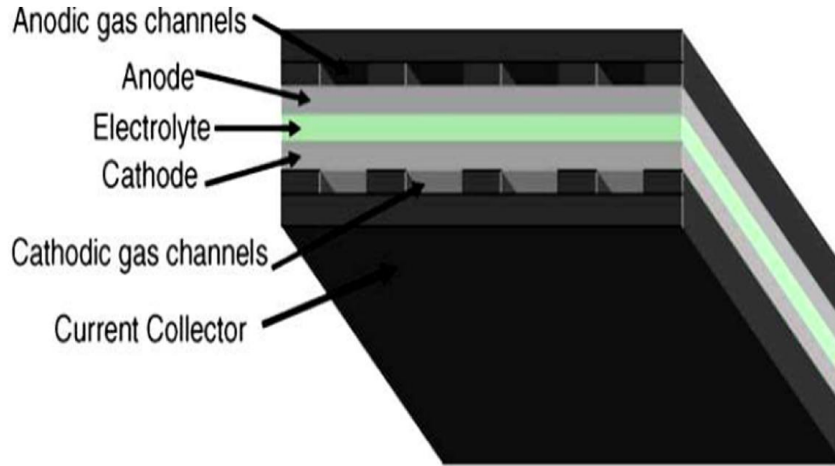
- ❖ Tüp KOYP
- ❖ Düzlemsel KOYP
- ❖ Radyal tip KOYP

Tüp şeklinde olan KOYP tasarımı Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Üretimleri zordur ve en küçük güç yoğunluğuna sahiptir. Diğer yandan gaz sızdırmazlığı açısından avantajlıdır.

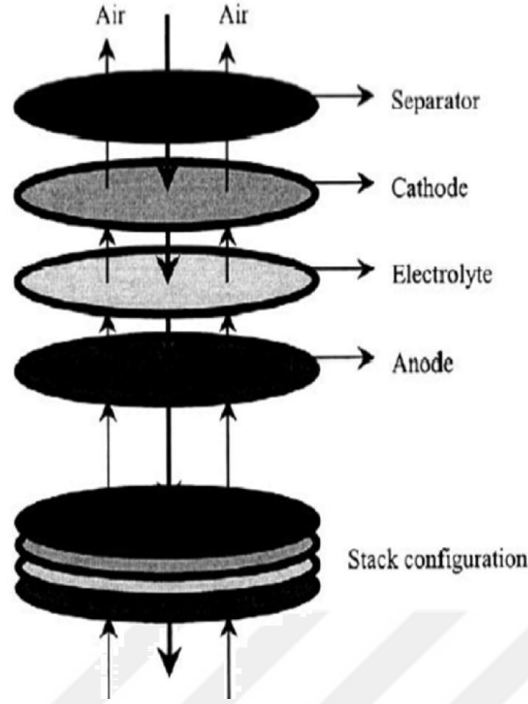


Şekil 1.3. Tüp şekilli KOYP (Stambouli ve Traversa, 2002)

Düzlemsel tasarım konfigürasyonu, diğer tasarımların ulaşamadığı seviyede güç yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca üretimleri kolaydır. Düzlemsel KOYP tasarımı Tüp KOYP tasarımı ile karşılaştırılırsa, fabrikasyon maliyeti yüksek olsa da, düzlemsel tasarımın servis bakım ömrü fazla olmasından dolayı üretim maliyetleri düşüktür. Bu nedenle son yıllarda sırasıyla düz ve radyal formdaki iki tasarım araştırma konusu olarak daha ilgi çekici olmuştur. Düz ve radyal tasarım Şekil 1.4 ve Şekil 1.4’de görüldüğü şekildedir.



Şekil 1.4. Düzlemsel tip KOYP (Bove ve Ubertaini, 2006)



Şekil 1.5. Radyal tip KOYP (Stambouli ve Traversa, 2002)

Tasarım olarak çoğunlukla tercih edilen düzlemsel KOYP ve tüp şekilli KOYP’ların birbirleri arasında diğerine göre daha iyi özellikler sahip olabilmektedir. Bazı özelliklere göre birinin diğerine göre daha iyi olduğu özellikleri Çizelge 1.4 ile gösterilmiştir.

Çizelge 1.4. Düzlemsel ve tüp şekilli KOYP’un arasındaki farklar

ÖZELLİKLER	Düzlemsel KOYP	Tüp KOYP
i. Güç yoğunluğu	Yüksek	Düşük
ii. Yüksek çalışma sıcaklığında sızdırmazlık elemanı kullanımı	Gerekli	Gerekli değil
iii. Devreye alma ve çıkartma süresi	Yavaş	Hızlı
iv. İnterkonnektör yapısı	Pahalı	Yapımı zor
v. Üretim maliyeti	Düşük	Yüksek

KOYP yakıt pili sisteminin sahip olduğu özellikler bakımından diğer yakıt pillerine göre bazı avantajlı özelliklere sahiptir.

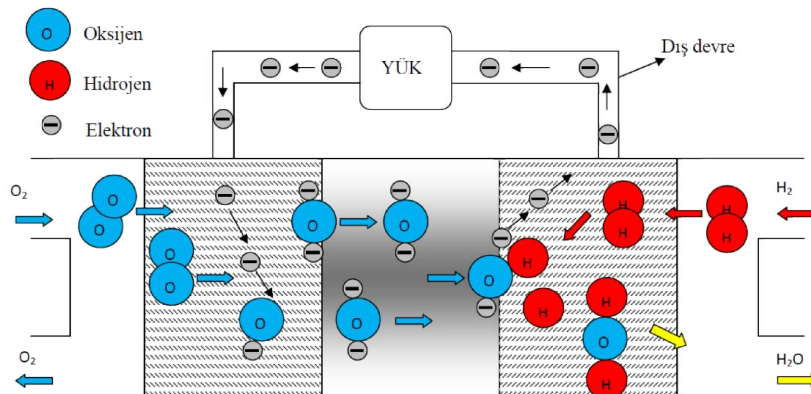
❖ Yakıt olarak sadece hidrojen gazına bağımlı değildir.

- ❖ Çalışma sıcaklığı yüksek olduğu için diğer yakıt pillerinde olduğu gibi platinyum, rutenyum gibi pahalı katalizörlere ihtiyaç yoktur.
- ❖ Çalışma sıcaklıklarının yüksek olması sebebiyle enerji dönüşüm verimi fazladır.
- ❖ Kullanılan elektrolitin katı olması sayesinde, sisteme sağlanan yakıtın nemli olmasına ihtiyaç yoktur.
- ❖ Atık ısıyı kullanan sistemler ile beraber kullanıldıkları zaman verimleri artmaktadır.
- ❖ Diğer yakıt pilleriyle kıyaslandığı zaman KOYP'un verimi yüksektir.

1.6 Katı Oksit Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi

KOYP'da oksijen veya hava katot tarafındaki akış kanallarına gönderilir ve akış kanallarına yayılarak burada O^{2-} iyonu haline gelir. Aynı zamanda anot tarafındaki akış kanallarına da yakıt olarak hidrojen gönderilir. Seramik elektrolit sadece oksijen iyonunun anot tarafına geçişine izin verir. Oksijen iyonunun anot tarafına geçmesinin ardından hücrede meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon sonucu elektronlar açığa çıkar. Açığa çıkan elektrotlar akım toplayıcılar yardımı ile toplanmaktadır ve elektronların anottan katoda hareketi ile elektrik enerjisi üretilmektedir.

KOYP'da hidrojenin başka doğalgaz da yakıt olarak kullanılabilir. Doğalgaz kolay bir şekilde 800 °C - 1000 °C gibi yüksek çalışma sıcaklıklarında hidrojene dönüşmektedir ve dönüşüm yakıt hücresinde olur. Yüksek çalışma sıcaklığıyla elektrotlardaki reaksiyon hızı yüksektir (Singhal, 2000).



Şekil 1.6. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)

KOYP’da anot, katot ve toplam pildeki oluşan reaksiyonlar aşağıda Çizelge 1.5’deki gibidir.

Çizelge 1.5. KOYP’da meydana gelen reaksiyonlar

Anot	$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$
Katot	$1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Toplam	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$

KOYP’un avantajları (Çiçek vd., 2009);

- ❖ Yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip olmaları (yaklaşık % 65, kojenerasyonla % 85).
- ❖ Çevreye duyarlı olmaları.
- ❖ Üretilmesi istenen elektrik ihtiyacına göre fiziksel boyutu değiştirilebilmektedir.
- ❖ Farklı yakıtlar ile çalışması istendiğinde yakıt pilinin tasarımında karmaşık yapıda elemanlar içermemesi
- ❖ Yüksek çalışma sıcaklığı sonrası oluşan egzoz çıktısının ısısı farklı alanlarda kullanılabilir.

KOYP’un dezavantajları ise (Kaarsberg vd., 2000);

- ❖ Çalışmaya başlamasının uzun zaman alabilmesi.
- ❖ Çalışma sıcaklıklarının yüksek olması sebebiyle, bu yüksek sıcaklığa dayanımı olan malzemelere ihtiyaç duyulması.
- ❖ Üretim maliyetlerinin yüksek olması.

1.7 Katı Oksit Yakıt Pili Bileşenleri

KOYP aşağıda verilen ana temel eleman oluşmuştur. Bunlar;

- ❖ İnterkonnektör (Crofer 22 APU)
- ❖ Membran Elektrot Grup (MEG)

- ❖ Sealant
- ❖ Akım Toplayıcılar

1.7.1 İnterkonnektörler

İnterkonnektör katot ve anot arasında elektriksel bir bağlantı sağlar. Genellikle, Her biri interkonnektörlerin arasına oturmuş tüm hücrenin elektriksel çıkışını stakta birleştirir. Katot tarafında hava hem oksitlenirken anot tarafında ise yanı zamanda indirgenir ve her iki ortamda da çalışma sıcaklığı yüksek olması nedeniyle yüksek elektrik iletkenliğine sahip ve kararlı olmalıdır. Bu nedenlerle interkonnektörler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır;

- ❖ Anot ve katot bileşenleri ile reaksiyona girmemesi
- ❖ Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması
- ❖ Anot, katot ve elektrolit ile benzer ısıl genleşme katsayısına sahip olması
- ❖ İndirgenme ve oksitlenme reaksiyonları sırasında kararlılığını yapısını koruyabilmesi
- ❖ Sızdırmaz olması

Bu gereksinimler malzemenin seçimini ciddi bir şekilde kısıtlar, özellikle yüksek çalışma sıcaklığındaki YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia) temelli katı oksit yakıt pillerinde olur. Ayrıca Zirkonyum temelli katı oksit yakıt pillerinde en çok LaCrO_3 (lanthanum chromite) kullanılır. Çalışma sıcaklığının yüksek olması sebebiyle yukarıda değinilen sebepler de göz önüne alındığında, interkonnektör malzemesi olarak genelde Corofer 22 APU kullanılmaktadır (Smeacetto vd., 2008) Crofer 22 APU; yüksek sıcaklığa dayanıklı, düşük ısıl genleşme katsayısına sahip, yüksek sıcaklıkta kararlı ve iyi ısıl iletkenlikli oksit tabakası ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip paslanmaz bir çeliktir. Crofer 22 APU'nun diğer korozyon direnci ve oksitlenme durumu deneysel olarak diğer interkonnektör malzemelerine göre incelenmiştir ve sonuçlar aşağıdadır (Chen vd., 2010).

İnterkonnektör malzemesi olarak kullandığımız Crofer 22 APU'nun özelliklerine bakılacak olursa Crofer 22 APU özellikle katı oksit yakıt pillerinde kullanılan yüksek sıcaklık ferritik paslanmaz bir çeliktir. 900 °C kadar sıcaklıklarda termodinamik olarak

yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. Termal genleşme katsayısı katı oksit yakıt pilinde kullanılan ve sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ile 900 °C arasında olan seramik malzeme ile aynıdır.

Crofer 22 APU özellikleri (Alman ve Jablonski, 2007);

- ❖ Yüksek sıcaklıktaki anot ve katot gazları için yüksek korozyon direncine sahiptir.
- ❖ Krom buharlaşma özelliği düşüktür.
- ❖ Isıl genleşme katsayısı düşüktür.
- ❖ İyi elektrik iletkenliği

Crofer 22 APU'nun kimyasal bileşimi ise Çizelge 1.6 ile verilmiştir.

Çizelge 1.6. Crofer 22 APU kimyasal bileşimi (Pyo vd., 2009)

	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Al	S	P	Ti	La
min.	20	bal.	-	0.30	-	-	-	-	-	0.03	
maks.	24	bal.	0.03	0.80	0.50	0.50	0.50	0.020	0.050	0.20	

1.7.2 Elektrolit

Elektrolit seçimi yapılacağı zaman aşağıdaki özellikler göz önünde bulundurulmalıdır.

- ❖ Yüksek iyonik iletkenlik
- ❖ İhmal edilebilir düzeyde elektronik iletkenlik
- ❖ Anot ve katot malzemeleriyle reaksiyona girebilme
- ❖ Çalışma sıcaklığı

KOYP için genellikle malzeme olarak YSZ veya zirkonyum (ZrO_2) ile dengelenmiş yttria (Y_2O_3) kullanılır. Çalışma için genellikle 850°C üzerinde sıcaklık gerekmektedir. Yüksek sıcaklıktan dolayı sıcaklığa dayanıklı malzeme gerekmektedir. Çalışma sıcaklığını düşürmek için iki olası yaklaşım vardır. Bunlar; elektrolitin kalınlığını

azaltmak ve yüksek oksijenle iyon iletimi sağlayan alternatif elektrolit malzemelerin araştırılmasıdır (Ormerod, 2003).

Kalınlık devam eden çalışmalarda mobil elektronik uygulamaları için ince film depozitasyon tekniği kullanılarak azaltılabilmektedir. Lantanyum galat bazlı yapılar, zirkon, seryum katkılı diğer oksitler, lantanyum galat bazlı yapılar, stronsiyum titanat ve perovskit tipi oksitler gibi farklı türden malzemeler araştırılmaktadır.

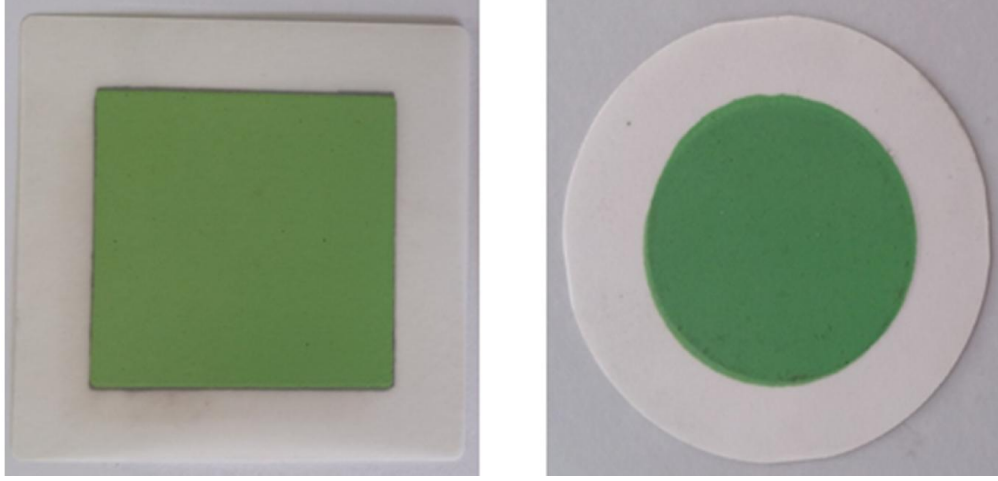
Bu malzemelerin iyon iletkenliği ve oksitlenmeye dayanıklılığı konusunda farklı dayanımları ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bir diğer araştırma konusu da mikro yapı optimizasyonu ile performans artışı sağlamaktır.

1.7.3 Anot

Hidrojen veya hidrojen yerine kullanılabilen yakıt anot kısmına geldiğinde oksijen iyonu ile oksitlenmektedir.

Anot malzemesi aşağıdaki özellikleri karşılaması gerekmektedir;

- ❖ Hidrojenin oksidasyonunu artırmalı
- ❖ Elektriksel iletkenlik
- ❖ Gözenekli yapı
- ❖ Elektrolit ile benzer ısıl genleşmeye sahip olmalı
- ❖ Elektrolit ile reaksiyona girebilmeli
- ❖ İyon iletkenliği olmalı



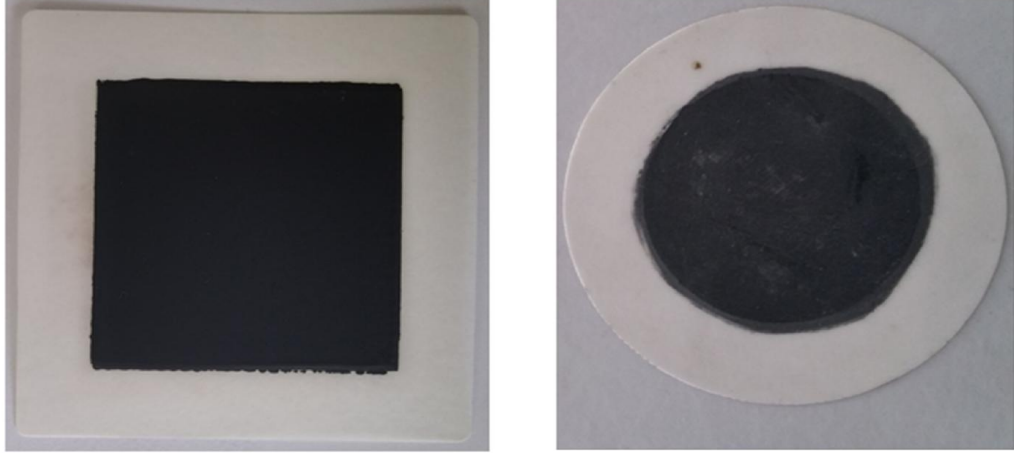
Fotoğraf 1.1. Anot yüzeyi

Yakıt anoda ulaştığında indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. Anot metalden yapılmış olabilir. Ancak çalışma esnasında malzeme oksitlenmemelidir. Bu sınırlandırmaya göre en uygun nikel, kobalt ve birkaç özel malzemedir. Nikel diğer malzemelere göre daha ucuz olmasından dolayı daha sık kullanılmaktadır. Elektrolite yakıt akışının sağlanabilmesi için anodun artan sıcaklıklarda değerlerinde gözenekli yapısını koruyabilmesi gerekmektedir. Anot ve elektrolit yüzeylerinin birbirleriyle yapışık bir halde kalabilmeleri için termal genleşmelerdeki farklılıkların minimize edilmesi gerekir. Termal genleşmelerdeki farklılık yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkıldığı zaman birbirleri arasında var olan kontak zarar görmekte, kırılmalar gerçekleşebilmekte ve bunların sonucu olarak da yakıt pilinin performansında düşüşler meydana gelmektedir. Bunları gerçekleştirebilmek güçlendirilmiş nikel ile mümkün olabilmektedir.

1.7.4 Katot

Havadan veya sisteme dolaysız yoldan verilen oksijen katot bölgesinde oksijen iyonuna indirgenme reaksiyonu meydana gelmektedir. Katodun sağlaması gereken belirli özellikleri;

- ❖ Oksijenin indirgenmesini artırmalı
- ❖ Elektronik iletkenlik ve iyon iletkenliği
- ❖ Gözenekli yapı
- ❖ Elektrolit ile benzer ısı genleşme



Fotoğraf 1.2. Katot yüzeyi

Yüksek çalışma sıcaklıkları için katot malzemesi özel malzemelerden seçilir. Özel malzemeler pahalı olduğundan elektriksel olarak iletken oksitler kullanılmaktadır. Lantan manganez katkılı strontium (LSM) kullanımı yaygınlaşmıştır. LSM, YSZ ile benzer ısıl genleşmeye sahiptir. Anotta olduğu gibi katot için malzeme seçimi elektrolit malzemelerin değişmesi ile çeşitlenmektedir.

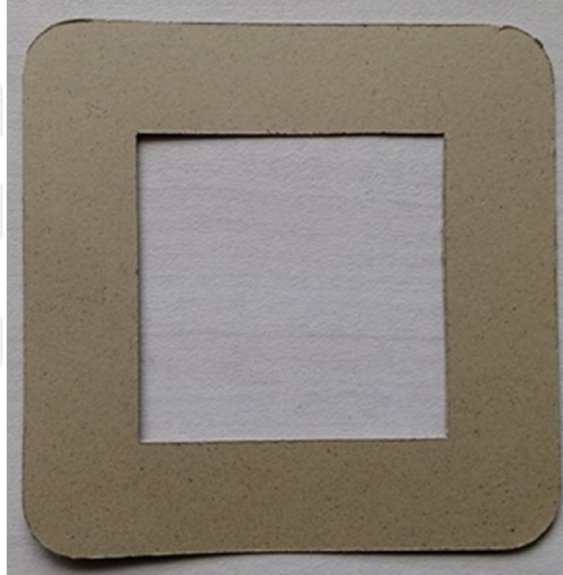
1.7.5 Sealent

Kendilerine has tasarımları olsa da, Düzlemsel KOYP, Tübular KOYP ile karşılaştırıldığında daha yüksek güç yoğunluğuna sahiptir (Steele ve Heinzl, 2011). Ancak düzlemsel stak tasarımları yakıt ve oksidan gaz karışımları bir arada tutmak için sızdırmazlık elemanına gereksinim duymaktadır. Gerekli olan bu malzeme KOYP'un çalışma sıcaklığı olan (600-1000 °C) gibi yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olmak durumundadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki ortam şartlarında KOYP elemanlarında termal genleşmeler meydana gelmektedir. Anot, elektrolit ve katot malzemelerinin ısıl genleşmelerinin farklı olması glass malzemenin kırılabilirliği değişen sıcaklıklarda sealantta meydana gelecek çatlakların artmasında en önemli etkenlerdir Kullanılacak olan bu sızdırmazlık elemanı diğer KOYP elemanları ile uyumlu çalışabilir olması için termal genleşme katsayısının kullanılan diğer elemanlara yakın olması gerekir. Çalışma esnasında interkonnektörleri bir arada tutabilmek için uygulanan basınca da mukavemetli olması beklenir. Bunun aksi bir durumunda sızdırmazlık elemanında meydana gelebilecek olan herhangi bir çatlak veya içerdeki gazları dışarı veren bir

durum olduğuunda yakıt pili bundan olumsuz yönde etkilenecektir. Böyle bir durumda yakıt pili performansında düşüş meydana gelecektir.

Gaz kaçağını önlemek için birbiriyle kontak halinde olan malzemelerin sealant ile birbirine sıkı bir bağ halinde olmaları gerekmektedir. Ara yüzey reaksiyonları, malzemelerin orijinal fazlarından farklı ürünler oluşturmamalıdır. Aksi takdirde, meydana gelen artık gerilmeler gazın dışarı kaçabileceği çatlaklar oluşturur.

Sealant teknolojisindeki gelişmeler düzlemsel tasarımın en büyük sorunu olan sızdırmazlık problemi çözülmüştür (Timurkutluk vd., 2019).



Fotoğraf 1.3. Sealant

1.7.6 Akım toplayıcılar

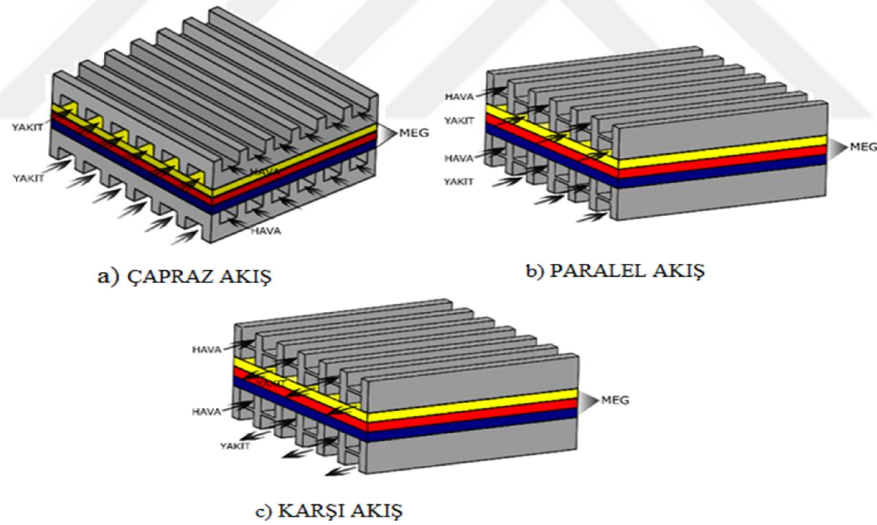
Akım toplayıcı plakalar genellikle alüminyum, kurşun, pirinç vs. gibi metallerden yapılarak, son plakaların üzerlerine bağlı bir şekilde bulunur.



Fotoğraf 1.4. Akım toplama kolu

1.8 KOYP Akış Türleri

Katı oksit yakıt pili kanalları yakıt ve oksidantı elektrot yüzeyine dağıtır. KOYP'un yüzeyine yapılan kanallar KOYP performansını da etkileyebilmektedir. KOYP staklarında çoğunlukla üç tip akış tipi kullanılır. Bu akış tipleri olan paralel akış, çapraz akış ve karşı akış tipi sırasıyla Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. KOYP akış tipleri (Kakac vd., 2007)

Hücreler stak haline getirildiği zaman, interkonnektörler elektronları hücrenin anot tarafından katot tarafına transfer eder. Alt ve üst interkonnektörler negatif ve pozitif kutupları temsil eder.

Genellikle tekli hücre 0.5 ile 0.9V arasında kullanılabilir güç üretir. Bu bilgi dahilinde hücreler birbiri üzerine koyularak stak haline getirilir. Bu düzenlemeler ile istenilen voltajda daha fazla güç elde edilir.



BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

Katı oksit yakıt pilleri (KOYP) hidrokarbon esaslı yakıtların sahip olduğu kimyasal enerjiyi doğrudan yüksek bir verimle elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Sadece saf hidrojen kullanımıyla sınırlı olmayıp, farklı yakıtları kullanabilme esnekliği sunması en büyük avantajlarından biridir. Ayrıca pahalı katalizörlere ihtiyaç duymadan yüksek sıcaklıkta (600-1000 °C) çalışabilmektedir. Bu yüksek sıcaklık aynı zamanda reaksiyonlar sonucu oluşan su buharının ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanımına olanak vermektedir. Bu üstün özelliklerine rağmen KOYP'un ticari bir ürüne dönüşmesini engelleyen bazı problemler vardır. Bu kısıtlayıcılar; üretim ve çalışma sırasında meydana gelen termal gerilmeler (Faes vd., 2009; Faes vd., 2011), geleneksel Ni-tabanlı anotların redox problemlerinden dolayı hücrede meydana gelen bozulma (Laurencin vd., 2010; Sumi vd., 2010; Vedasri vd., 2010), hidrokarbon esaslı yakıt kullanımında meydana gelen karbon birikimi (Barelli vd., 2013; Penchini vd., 2013), interkonnektör ve sızdırmazlık elemanı gibi özel malzemelere ihtiyaçtan dolayı oluşan yüksek üretim maliyeti (Leng vd., 2003; Sarat vd., 2006; Xin vd., 2006; Fontana vd., 2007; Yang vd., 2007; Chu vd., 2009) ve malzemelerden kaynaklanan kısa servis ömrü olarak (Hattori vd., 2004; Ma vd., 2004; Zhang vd., 2006) sayılabilir.

KOYP'un faydaları; doğal gazlarla çalışıyor olması, nitrojen ve sülfür oksit gazı emisyonu içermemesi, gaz türbinleri ile de birlikte kullanıldığı zaman yüksek verime sahip olması gibi özelliklerle özetlenebilir.

Akım toplama elemanlarında ve metalik interkonnektörler gibi stak elemanları ve her bir tabakadaki termal genişlemeler termal gerilmeleri oluşturur. Bu termal gerilmeler çatlaklara sebebiyet verir ve bunun sonucunda performans düşer. KOYP çalışma sıcaklığının çok yüksek olmasından dolayı (600°C - 1000°C) çalışma esnasında sıcaklık dağılımını hesaplamak zordur. Birçok çalışma nümerik analiz metodu ile sıcaklık dağılımını hesaplama üzerinedir. Nümerik çalışmalar, akış tipinin ve çalışma akım yoğunluğunun sıcaklık dağılımını ve bunun sonucu olarak da gerilim dağılımını etkileyen ana sebep olduğunu göstermektedir. (Yakabe vd., 2000; Recknagle vd., 2003; Wang vd., 2007; Pasaogullari ve Wang, 2003)

KOYP'un performansını birçok parametre etkilemektedir. Bunlardan bazıları düşük sıcaklıkta yüksek iletkenlik özelliği gösterebilen katı elektrolit malzemesinin seçimi, performansı artırıcı yönde etki yapan katot ve anot elektrotların kullanılması, katı elektrolit ve elektrotların tabaka kalınlıkları, hücreler arası iç bağlantılar (akım toplayıcılar ve interkonnektörler), tabaka boyutları, anot ve katot elektrotunun aktif yüzey alanı gibi faktörlerdir. Katı oksit hücresi bileşenlerinin (katot, katı elektrolit, anot) özellikleri üzerinde ise kullanılan malzeme/maddelerin türü, bileşenlerin üretiminde uygulanan deneysel işlem yöntemleri, tanecik boyutları, ısıtım işlem sıcaklıkları, süreleri, katkı maddelerinin cinsi ve miktarları gibi çok sayıda parametre belirleyici olmaktadır (Fergus, 2006; Steele, 2000)

Recknagle, geleneksel kod ve düzlemsel KOYP stak için üç boyutlu ısı ve kütle transferi çalışmıştır. Sıcaklık dağılımı, akım yoğunluğu gaz özelliklerini çapraz akış, paralel akış ve karşı akış sırası ile verilen akış tipleri için incelemiştir. Bunlar arasında paralel akış tipinin daha uniform bir sıcaklık dağılımı sağladığı, daha küçük termal gredyenler olduğu ve bunun sonucu olarak da termal yapı olarak diğer akış tiplerine göre daha avantajlı olduğunu görmüştür.

(Yahya vd., 2018), ısı kaynağının katı oksit yakıt pili bileşenleri içerisindeki sıcaklık alanına etkisini sayısal simülasyon yöntemi ile incelemişlerdir. Bu sıcaklık dağılımı iki seramik tabanlı elektrotu birbirinden ayıran bir elektrolit kullanılarak paralel akış tipinde kanallara sahip düzlemsel tip katı oksit yakıt pili modelinde simülasyonunu yapmışlar. Fiziksel modelin simülasyonu için Kafes Boltzmann Metodunu kullanmışlardır. Daha önce yapılan çalışmalar vasıtası ile de yapılan simülasyonu doğruladıktan sonra farklı geometrik akış kanalının ve katı oksit yakıt pili parametreleri olan gözenekli yapı, anodun termal iletkenliği, ortam sıcaklığı ve akım yoğunluğunun sıcaklık dağılımı üzerine olan etkisine bakılmıştır. Sıcaklık dağılımı üzerindeki etkinin giriş sıcaklığı, termal iletkenlik ve akım yoğunluğunun daha fazla etkili olduğunu görmüşlerdir. Ek olarak elektrot gözenekliliğinin sıcaklık dağılımına etkisinin verilen diğer parametrelere göre daha az olduğunu görmüşlerdir.

(Farhad vd., 2013) çeşitli mikro ve makro yapıdaki kompozit elektrotlar kullanarak anot destekli paralel akışa sahip düzlemsel katı oksit yakıt pilinde sıcaklık dağılımını sayısal simülasyon kullanarak görmeye çalışmışlardır. Anot tabakasındaki nikel parça

hacminin, katot tabakasında bulunan LSM parça hacmine nazaran sıcaklık dağılımında daha fazla etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Anot fonksiyonel katmanının kalınlığı, katot fonksiyonel tabakasının kalınlığına göre sıcaklık dağılımı üzerinde daha fazla bir etkiye sahip olduğunu görmüşler. Ayrıca anot fonksiyonel katmanının gözenekliliği, katoda göre sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin daha fazla olduğunu görmüşlerdir.

(Stoeckl vd., 2019), serbest karbon türü olan, kolay depolanabilir ve yüksek hidrojen yoğunluğuna sahip olmasından yüksek enerji yoğunluğu sunmasını bekledikleri amonyanın KOYP’da yakıt olarak kullanılabilirliği üzerinde çalışma yapmışlar. Çalışmaları endüstriyel boyuttaki Ni/YSZ anot içerikli KOYP’un doğrudan çalışmasını içermektedir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi, yakıt olarak kullanılan amonyanın endotermik ayrışmadan kaynaklanan düşük performans çıktısını yaptıkları çalışmada doğrulamışlardır. Endotermik ayrışma ağırlıklı olarak amonyanın akış orandan kaynaklanan ımmik kayıpları artırdığı düşünülmüştür. Ayrıca bu çalışmada karşı akış tipi, paralel akış tipine göre daha az ımmik ve difüzyon direnci oluşturduğu görülmüşlerdir.

(Xu vd., 2019), düzlemsel KOYP’da sıcaklık dağılımının tam olarak belirlemenin zor olduğunu düşünmüşler ve karşı akış tipine sahip tasarımlarında sonlu düğüm yöntemi kullanarak sıcaklık dağılımını belirleme ve iteratif algoritmalar vasıtası ile de gerçek zamanlı voltaj değerini belirleme yoluna gitmişler. Ayrıca test düzeneği oluşturarak karşılaştırmalı olarak değişimleri görme fırsatı bulmuşlar. Sayısal çözümleme için kullandıkları parametreler aşağıda Şekil 2.1’de görüldüğü gibidir.

Parameter		Test bench variables		System variables	
Length	0.15m	Fuel flow	2NL/min/piece	Fuel flow	0.16NL/min/piece
Width	0.15m*0.15m	Air flow	3NL/min/piece	Air flow	10NL/min/piece
Connector thickness	0.001m	Fuel temperature	950K	Fuel temperature	950K
Fuel Channel height	0.001m	Air temperature	900K	Air temperature	900K
Air Channel height	0.002m	Pressure	~1.1bar	Pressure	~1.1bar
PEN thickness	0.0005m	Current	40A	Current	40A

Şekil 2.1. Tasarım parametreleri

Test düzeneğinde düzlemsel tip ve karşı akış tipi kullanılan KOYP’da sıcaklık hem hidrojen hem de hava akış yönü boyunca arttığını, maksimum ve minimum sıcaklıkları sırasıyla 1090K ve 1020K olarak ölçmüşlerdir. Sistem çıktılarına ise sıcaklık hidrojenin akış yönünde bir düşüş, hava akış yönü boyunca arttığını, minimum ve maksimum sıcaklıkları da sırası ile 975K ve 920K olarak okumuşlardır.

(Razbani vd., 2013), Elektrolit destekli, karşı akış tipinde kullanarak, düzlemsel tip KOYP’da sayısal modellemeyi Comsol Multiphysics programında nümerik olarak çözdürmüşler. Sayısal modellemeyi doğrulamak için de altılı stak ile bir de deney yapmışlar. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar arasında birbirine yakın sonuçlar elde etmişler. Deneylerinde yakıt olarak metan gazını kullanmışlar ve metan gazı hidrojene göre, akım yoğunluğu dağılımında daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşler.

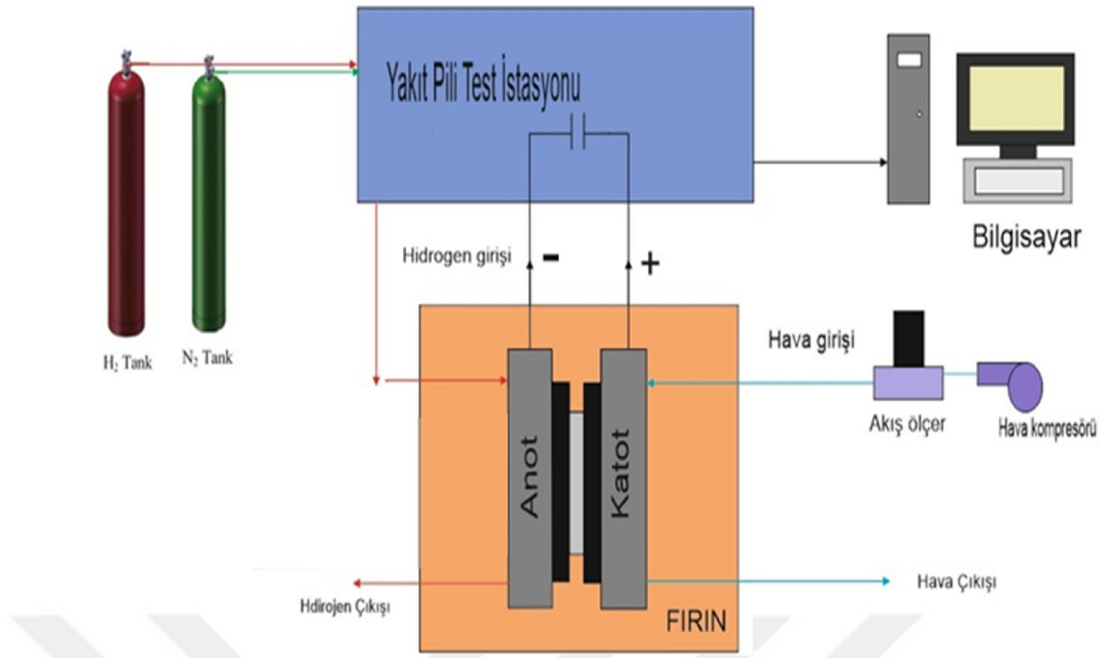
BÖLÜM III

MATERYAL VE METOD

Bu tez kapsamında amacımız katı oksit yakıt pili içerisindeki sıcaklık dağılımını belirlemek. Sıcaklık dağılımını belirlememizdeki amaç membran elektrolit gurup üzerindeki sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan ısı gerilmeler hakkında bilgi sahibi olmaktır. Sıcaklık farklılıklarından dolayı meydana gelen bu ısı gerilmeler hücre üzerinde mikro veya makro ölçekli çatlaklara sebep olmakta ve KOYP performansını düşürmektedir. Çalışmamızda ilk olarak dikdörtgen şeklinde kanalar kullanarak paralel ve karşı akış için yakıt (hidrojen) tüketimi, oksijen tüketimi, elektrolit akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımını görmeyi hedefledik. Bunu deneysel olarak da yaparak sayısal çalışmamız ve deneysel çalışmamızı kıyaslama fırsatı bulduk. Ayrıca ilk çalışmamıza ek olarak standart kanalımızda bir takım geometrik değişikliklere giderek karşı akış tipi referans alınarak bu iki tasarım arasındaki hidrojen tüketimi, oksijen tüketimi ve elektrolit akım yoğunluğunun değişen geometriyle nasıl değiştiğini görmeyi hedefledik.

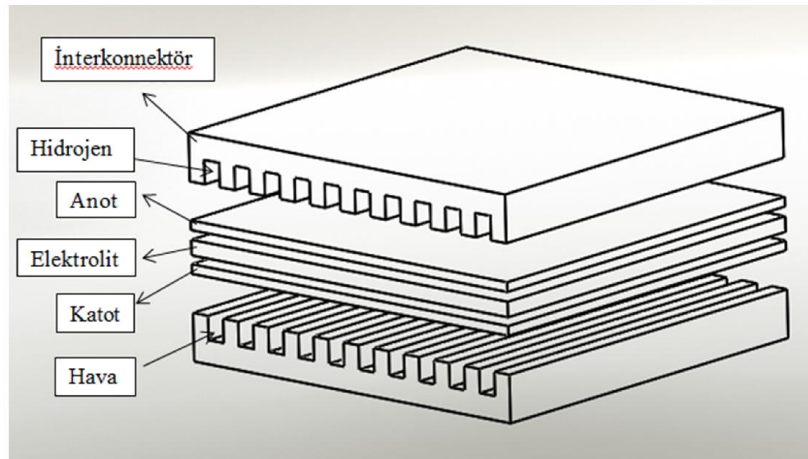
3.1 Kullanılan Araç ve Gereçler

Tekli stak için kullanılan bu interkonnektörlerin testleri için kurulan düzenek aşağıda Şekil 3.1 ile verilmiştir. Stak hale getirilen KOYP bileşenleri sıcaklık kontrollü ve üzerine akuple edilmiş pnömatik sistem ile basınçlandırma özelliğine haiz fırına yerleştirildi. Fırın sayesinde stağın teste hazırlığı ve test boyunca ihtiyaç duyduğu çalışma sıcaklığı sağlandı. Hidrojen, azot tanklarından sağlanan gazlar ve kompresörden gelen hava test istasyonu ile kontrollü olarak test hücresine gönderildi. Anota gönderilen hidrojen ve katoda gönderilen hava sayesinde elektrokimyasal reaksiyonlar başlamakta ve interkonnektör kollarına bağlanan akım ve voltaj kablolarıyla ölçümler test istasyonu tarafından yapılmaktadır. Test istasyonu ara yüzü ise bir bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 3.1. Yakıt pili test düzeneği

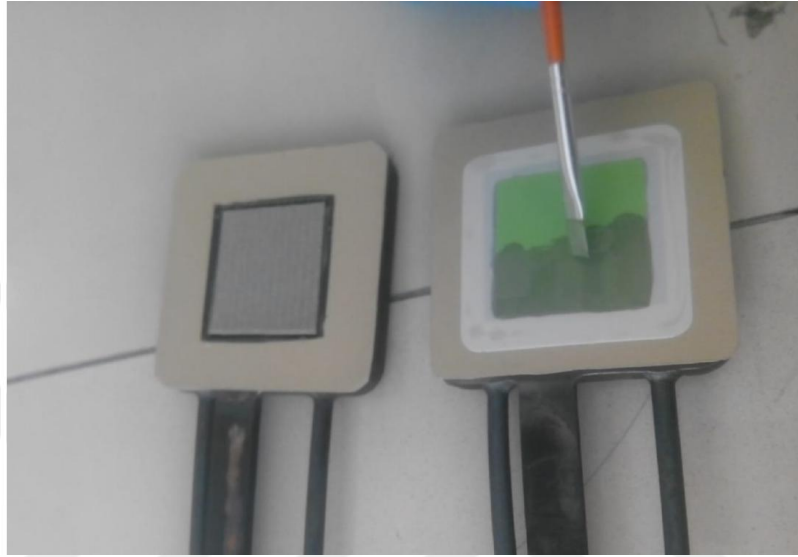
Sıcaklık profili belirlenecek ve performans araştırmaları yapılacak interkonnektör tasarımları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. 1.5x1.5 dikdörtgen tasarımına sahip interkonnektörler ile hidrojen yakıtı anot yüzeyine, oksidant ise katot yüzeyine paralel olarak temas etmektedir.



Şekil 3.2. Akış kanalı geometrisi

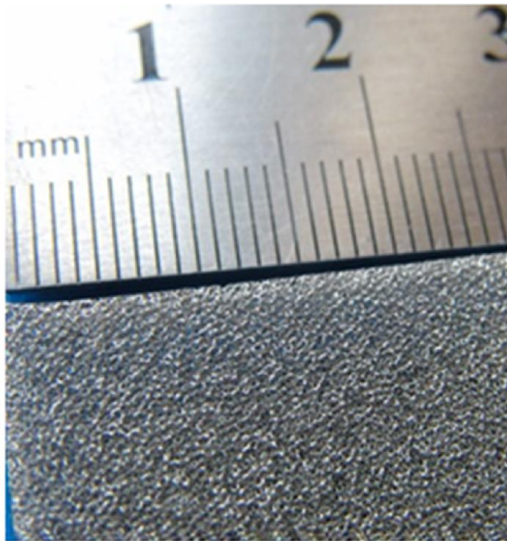
Deneyin hazırlanma aşamasında interkonnektörlerin akış kanalları iletkenliği sağlamak amacıyla anot tarafı NiO kimyasal pasta ve katot tarafı da LSM pasta ile boyanmaktadır. Yakıt hücresi elemanlarının temasını daha iyi bir biçimde sağlaması için gözenekli nikel elek ve corofer elek kullanılmıştır. Hücre içerisindeki gazların

dışarı çıkmasını engelleyen ve interkonnektörler arasında elektriksel yalıtımı sağlayan conta istenilen kalınlığa getirilmek amacı ile Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan hidrolik pres kullanılarak anot kısmındakiler 0.70 mm, katot kısmındakiler 0.45mm kalınlığına getirilmişlerdir.

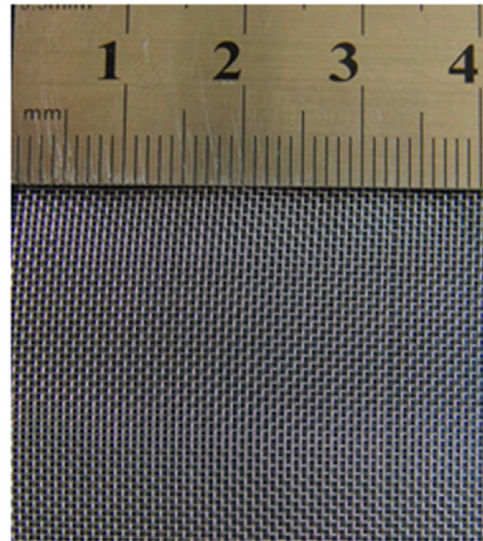


Fotoğraf 3.1. Deneyin hazırlanışı

Gözenekli nikel ve corofer elekler aşağıda Fotoğraf 3.2. de gösterilmiştir.



(a)

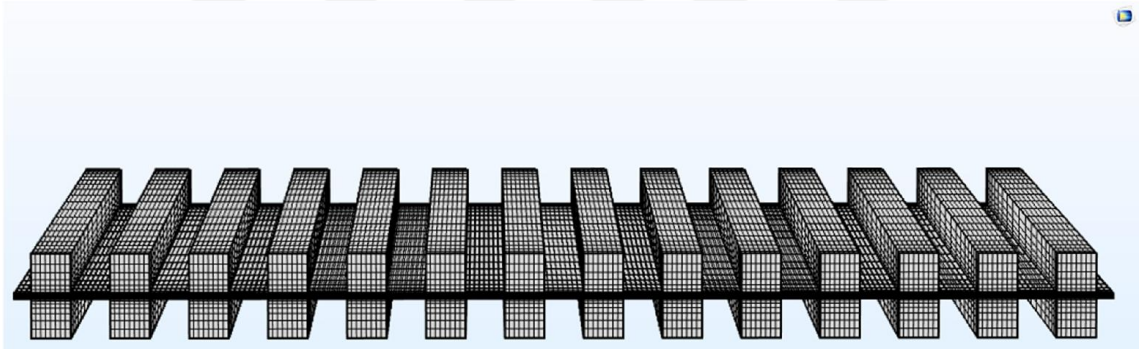


(b)

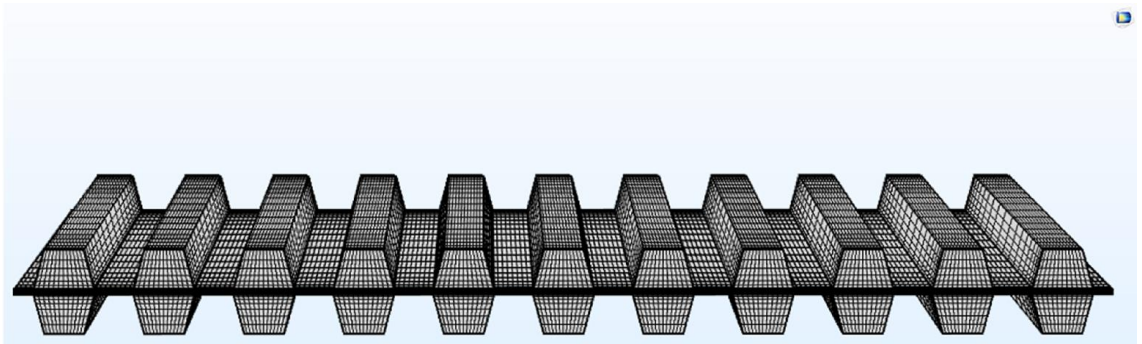
Fotoğraf 3.2. Gözenekli nikel (Ni)-Corofer elekler (a) ve (b)

3.2 Sayısal Çalışma

Katı oksit yakıt pilinde çalışma esnasında gerçekleşen hidrojen tüketimini, oksijen tüketimini, su oluşumunu ve sıcaklık dağılımını belirlemek üzere Comsol Multiphysics Programı kullanılmıştır. Yakıt pili fiziği; akım dağılımı, katot ve anot serbest ve serbest ortam, katot ve anot reaksiyona girer türlerin transportu olarak beş temel fizikten oluşmaktadır. Sıcaklık dağılımını belirlememizdeki amaç membran elektrolit gurup üzerindeki sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan ısı gerilmelerin etkilerini incelemektir. Böylece meydana gelen bu ısı gerilmeler hücre üzerinde mikro veya makro ölçekli çatlaklara sebep olmakta ve KOYP performansını düşürmektedir. İki farklı tasarımla çalışmaktaki amaç değişen geometriye bağlı olarak hidrojen tüketimi, oksijen tüketimi, su oluşumu ve sıcaklık dağılımının nasıl değiştiğine bakmaktır. Ayrıca akış türüne bağlı olarak sıcaklık dağılımının bundan nasıl etkileneceğini de incelenmiştir. KOYP çalışmasını temsil eden iki farklı geometrik tasarım aşağıda Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.3. Standart tasarımın akış alanı geometrisi ve ağ yapısı



Şekil 3.4. İkincil tasarımın akış alanı geometrisi ve ağ yapısı

Tasarımlar Comsol Multiphysics programında yapıldıktan sonra ağ yapıları oluşturuldu. Daha sonra fizikler atandı ve çözümleme başlatıldı. Sayısal çözümlemede kullanılan parametreler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sayısal çözümlemede kullanılan parametreler

p_atm	1(atm)	Atmosferik basınç
Top	800(degC)	Çalışma sıcaklığı
Mu	3 e-5(Pa*s)	Havanın viskozitesi
dp_a	2(Pa)	Anottaki basınç düşümü
dp_c	6(Pa)	Katottaki basınç düşümü
i0_a	0.1(A/m^2)	Anottaki akım yoğunluğu değişimi
i0_c	0.01(A/m^2)	Katottaki akım yoğunluğu değişimi
Sa_a	1e9(1/m)	Anodun spesifik yüzey alanı
Sa_c	1e9(1/m)	Katodun spesifik yüzey alanı
V_pol	0.05(V)	İlk hücre polarizasyonu
Kl	5(S/m)	Elektrolit iletkenliği
Ks	5000(S/m)	Akım toplatıcısının iletkenliği
mh2	2(g/mol)	H2’nin molar kütlesi
mo2	32(g/mol)	O2’nin molar kütlesi
mn2	28(g/mol)	N2’nin molar kütlesi
mh2o	18(g/mol)	H2O’nun molar kütlesi
W_channel	0.15e-3(m)	Gaz akış kanalı genişliği
H_gde	40e-6(m)	Gaz difüzyon elektrot kalınlığı
H_electrolyte	140e-6(m)	Elektrolit kalınlığı
H_channel	1.5e-3(m)	Gaz akış kanalı yüksekliği
L	4e-3(m)	Akış kanalının uzunluğu

3.2.1 Kullanılan denklemler

Çalışma kapsamında KOYP’da meydana gelen ısı ve kütle transferi, akış ve kimyasal reaksiyonlar için iki boyutlu bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde tüm fiziksel olayların kapsanması için kütle ve momentumun korunumu denklemlerinin, enerji denklemlerinin ve özel denklemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu özel denklemlere maddelerin korunumunu içeren Maxwell-Stefan denklemi, proton hareketi için Nernst–Planck denklemi örnek olarak verilebilir.

Anot ve katot akım besleyicilerinde elektronik yük dengesi;

$$\nabla \cdot (-\sigma_1 \nabla \phi_{elektronik}) = 0 \quad (3.1)$$

Burada σ_1 akım besleyicisinin elektronik iletkenliği ve $\phi_{elektronik}$ de bu akım besleyicisinin elektronik iletkenliğidir.

Benzer şekilde iyonik yük dengesi;

$$\nabla \cdot (-\sigma_2 \nabla \phi_{iyonik}) = 0 \quad (3.2)$$

Burada σ_2 akım besleyicisinin iyonik iletkenliği ve ϕ_{iyonik} de iyonik potansiyeli ifade etmektedir.

Anot ve katot elektrotlarında, elektronlar iyonik iletken olan elektrolit faz ve elektronik olarak iletken olan faz arasında transfer edilmektedir.

$$\nabla \cdot (-\sigma_1 \nabla \phi_{elektronik}) = S_a i_{ict} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma_2 \nabla \phi_{iyonik}) = S_a i_{ict} \quad (3.4)$$

S_a spesifik yüzey alanı ve i_{ict} yük transfer yoğunluğudur. Burada elektronlar, anot ve katot akım toplatıcısından dış elektrik devresine doğru geçmektedir.

Anottaki Butler-Volmer yük transfer kinetikleri;

Butler-Volmer yük transfer kinetiği yük transfer akım yoğunluğunu tanımladığı kabul edilir. Anot tarafında, hidrojen suya indirgenir ve aşağıdaki yük transfer kinetik denklemi uygulanır

$$i_{a,ct} = i_{0,a} x_{h_2} \frac{c_t}{c_{h_2,ref}} + i_{0,a} x_{h_4} \frac{4c_t}{c_{h_4,ref}} \left(\left[\exp\left(\frac{0,5F}{RT}\eta\right) - \exp\left(\frac{-0,5F}{RT}\eta\right) \right] \right) \quad (3.5)$$

Burada $i_{0,a}$ anodun değişen akım yoğunluğu, x_{h_2} hidrojenin molar kesri, x_{h_4} metanın molar kesri c_t türlerin toplam konsantrasyonu, $c_{h_2,ref}$, $c_{h_4,ref}$ referans konsantrasyonu, F Faraday sabiti, T Sıcaklık, R Gaz sabiti, η ise aşırı gerilimdir.

Katottaki yük transfer kinetikleri;

$$i_{c,ct} = i_{0,c} \left[\exp\left(\frac{0,5F}{RT}\eta\right) - x_{o_2} \frac{c_t}{c_{o_2,ref}} \exp\left(\frac{-0,5F}{RT}\eta\right) \right] \quad (3.6)$$

Burada $i_{0,c}$ katodun değişen akım yoğunluğu, x_{o_2} oksijenin molar kesridir.

Aşırı gerilim denklemi;

Kimyasal reaksiyon süresince, katı elektronik faz ϕ elektronik ve iyonik faz iyon arasındaki yüksek gerilim itici güçtür bu da aktivasyon kaybı olarak bilinmektedir. Yüksek gerilim aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\eta = \phi_{elektronik} - \phi_{iyonik} - \Delta\phi_{eq} \quad (3.7)$$

Burada $\Delta\phi_{eq}$ denge potansiyel farkını ifade eder.

Potansiyel hücre voltajı;

İyonik yük denge denklemleri için, dış sınırlarda mükemmel yalıtılmış sınır şartları ve iç sınırlar için akım ve voltaj içinde süreklilik varsayılan olarak uygulanır.

$$V_{cell} = \Delta\phi_{eq,c} - \Delta\phi_{eq,a} - V_{pol} \quad (3.8)$$

Burada V_{pol} ; polarizasyonu ifade etmektedir.

Reaksiyon gazlarının taşınımı;

Bileşenlerin taşınmasında ise Maxwell-Stefan difüzyon denklemi ve taşınım denklemleri ile ifade edilir.

$$\nabla \left(\omega_i \rho u - \rho \omega_i \sum_{j=1}^k \bar{D}_{ij} \left(\frac{M}{M_j} \left(\nabla \omega_j + \omega_j \frac{\nabla M}{M} \right) + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right) \right) = R_i \quad (3.9)$$

Burada $\bar{D}_{ij}$ fick difüzyonunun ij bileşeni ρ yoğunluk, p basınç R_i i için tepki kaynak terimi, x_j j için molar kesridir.

Yük transfer akım yoğunluğu Faraday yasası;

$$R_i = V_i \frac{i_{c,t} M_i}{n_i F} \quad (3.10)$$

Bağıntısından hesaplanmaktadır. Burada V_i , stokiyometrik katsayısı ve n_i , tepkimeye giren elektron sayısını ifade etmektedir.

Gözenekli elektrotlarda efektif difüzivite aşağıdaki Bruggeman bağıntısı ile bulunur;

$$D_{i,eff} = D_i \varepsilon^{1,5} \quad (3.11)$$

Gaz akışı;

Sıkıştırılabilir Navier-Stokes denkliği;

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pI + \mu \left((\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right) \right] \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.13)$$

Burada μ dinamik viskoziteyi ifade etmektedir.

Geçirgen tabakanın içinden geçen akışta ise Brinkman denkliği akış hızı;

$$\left(\frac{\mu}{\kappa} + Q\right) u = \nabla \cdot \left[-pI + \frac{\mu}{\varepsilon} \left(\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right) \right] \quad (3.14)$$

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q \quad (3.15)$$

Burada ε ortamın gözenekliliği, κ ortamın geçirgenliği, Q kütle kaynağıdır.

Kütle kaynağının yük akım yoğunluğuyla ilişkisi ise,

$$Q = \sum_i S_a \frac{i_{ct,i} M_i}{\eta_i F} \quad (3.16)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.

3.3 Deneysel Çalışma

Tezi çalışmaları kapsamında yapılan deneyler, Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi imkânları kullanılarak yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı düzenek Fotoğraf 3.3'de verilmiştir.

Yakıt pili test istasyonu, çoklu staktan akımın çekilmesini, belirlenmiş profillere göre voltaj değişimine bağlı akım ve güç elde edilmesini, reaksiyon gazlarının aktif bölgeye gönderilmesini ve bilgisayar ortamı ile hücre arasında iletişimin kurulmasını sağlar. Tez çalışmaları ElectroChem marka test istasyonu kullanılarak yapılmıştır.



Fotoğraf 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan cihazlar

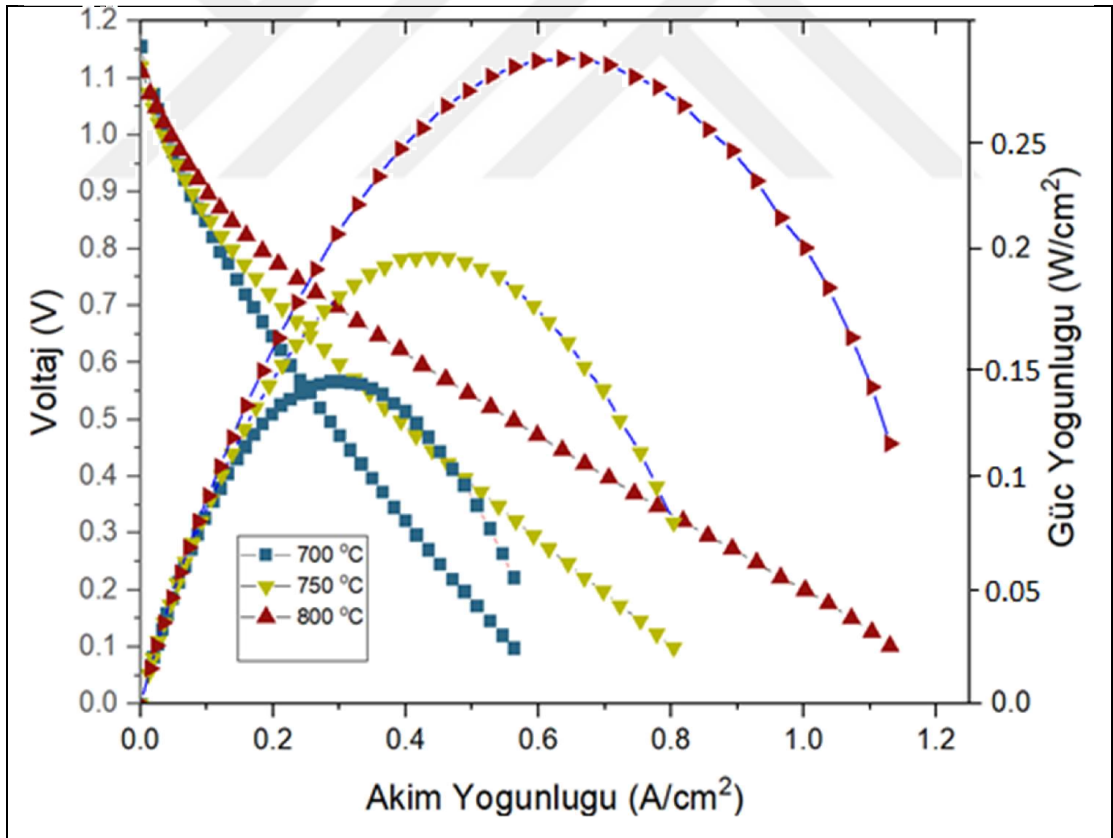
Test fırını yüksek çalışma sıcaklığını ve ilave edilen pnömatik sistemle kontak basıncını sağlamak için kullanılmıştır. ProTherm marka fırınlar hücre yerleşimine bağlantılarına imkân verecek şekilde optimize edilmiştir. Hidrojen, azot tanklarından sağlanan gazlar ve kompresörden gelen hava test istasyonu ile kontrollü olarak test hücresine gönderilmiştir. Anoda gönderilen hidrojen ve katoda gönderilen hava sayesinde elektrokimyasal reaksiyonlar başlamakta ve interkonnektör kollarına bağlanan akım ve voltaj kablolarıyla ölçümler test istasyonu tarafından yapılmıştır.

Deneyler karşı ve paralel akış tipinde, üç farklı çalışma sıcaklığında tekrar edilmiştir. Bu sıcaklıklar sırası ile 700°C, 750°C ve 800°C dir. Her farklı sıcaklık değeri için okumalar yapıldı ve elde edilen veriler excel programına aktarıldı. Daha sonrasında toplanan verilerden grafikler oluşturuldu ve değişen çalışma sıcaklığına göre performanstaki değişimler deneysel olarak gözlenmiş oldu.

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

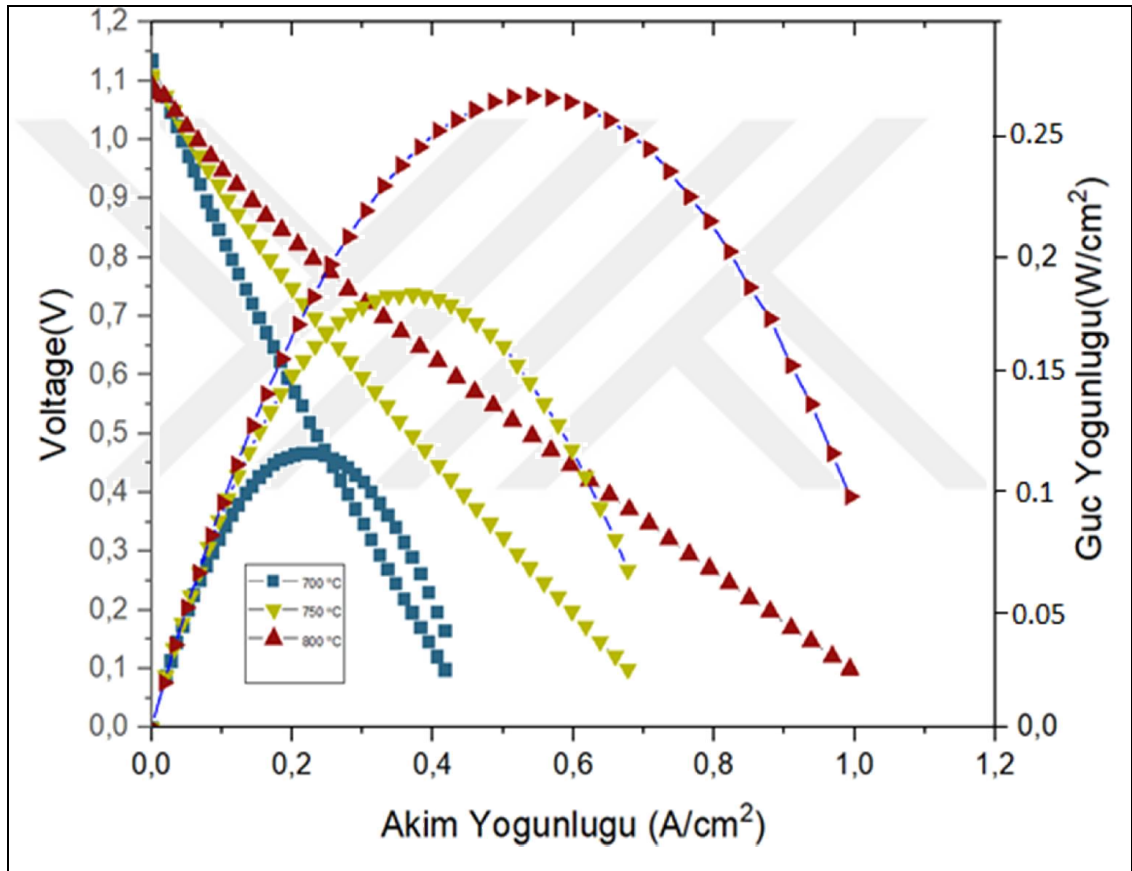
Standart tasarım olarak adlandırdığımız 1.5x1.5x1.5 mm sırasıyla kanal/kaburga genişliği ve kanal derinliğine sahip ara plakalar üç boyutlu olarak modellenerek COMSOL Multiphysics programına aktarıldı. Sayısal model oluşturulurken yakıt pilini temsil eden altı adet fizik uygulandı. Bu fizikler temel olarak elektrokimyasal reaksiyonları, reaksiyon gazlarının taşınmasını, serbest ve gözenekli ortamı ayrıca sıcaklık dağılımını temsil etmektedir. Standart tasarıma ek olarak bir ikincil tasarım modellendi. Değişen akış geometrisine bağlı olarak performansta meydana gelebilecek değişimleri de bu tasarım vasıtasıyla sayısal olarak görme imkânı bulduk. Ayrıca tekli stakta sayısal çalışmaya ek olarak deneysel çalışmalar da yapıldı. karşı akış ve paralel akış tipi için 700 °C ,750 °C, ve 800 °C için tekrarlandı.



Şekil 4.1. Karşı akışın deneysel; (voltaj-akım) ve güç yoğunluğu grafiği

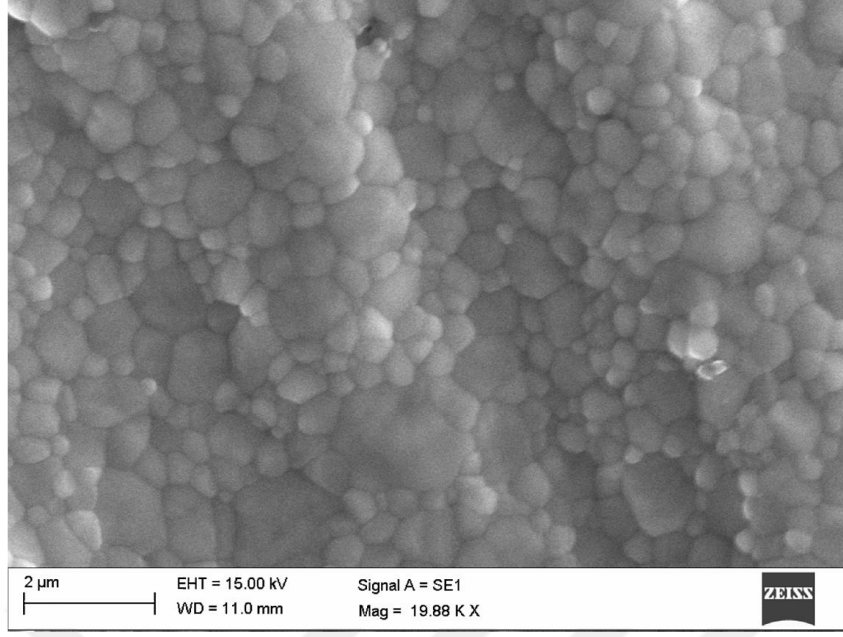
Şekil 4.1’de karşı akış tipi kullanılarak deneysel çalışmadan elde edilen voltaj-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu görülmektedir. Deney 700 °C, 750 °C ve 800 °C fırın sıcaklıklarında tekrar edilmiş ve elde edilen performans çıktıları sıcaklığın artmasına bağlı olarak artış göstermiştir.

Karşı akış tipinde kullanılan deneysel parametreler aynı kalarak paralel akış tipine sahip tekli stakla yapılan bir diğer deneyle akış tipine bağlı olarak deneysel performans sonuçlarının nasıl değiştiğini Şekil 4.2’de görebilmekteyiz.

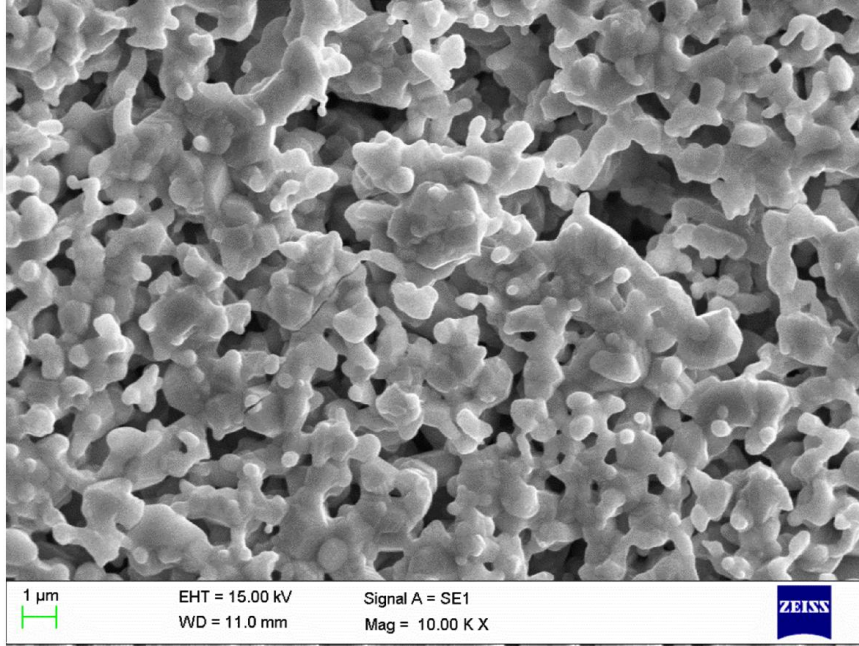


Şekil 4.2. Paralel akışın deneysel; (voltaj-akım) ve güç yoğunluğu grafiği

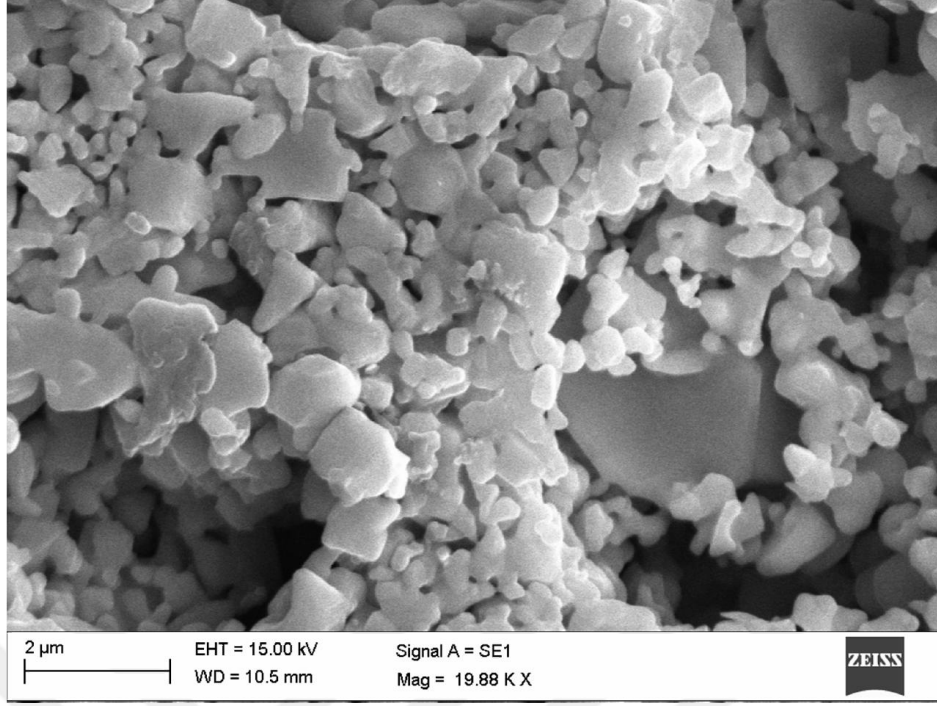
Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de gördüğümüz üzere performans sonuçları akış tipine göre değişmektedir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre karşı akış tipine sahip yakıt hücresinden elde edilen performans, paralel akış tipine göre daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. Elektrolit SEM görüntüsü



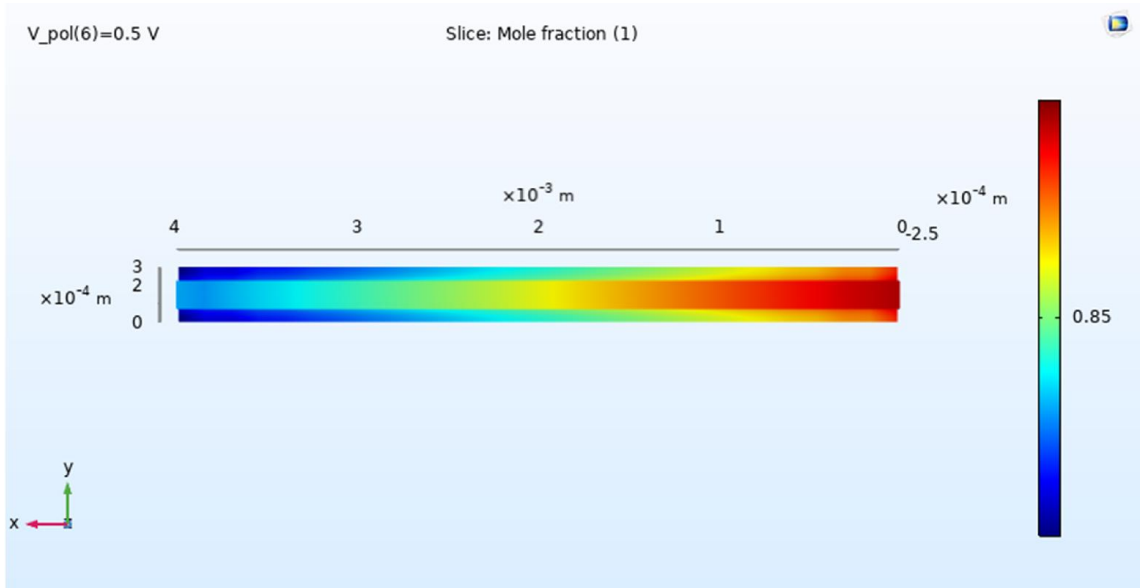
Şekil 4.4. Anot SEM görüntüsü



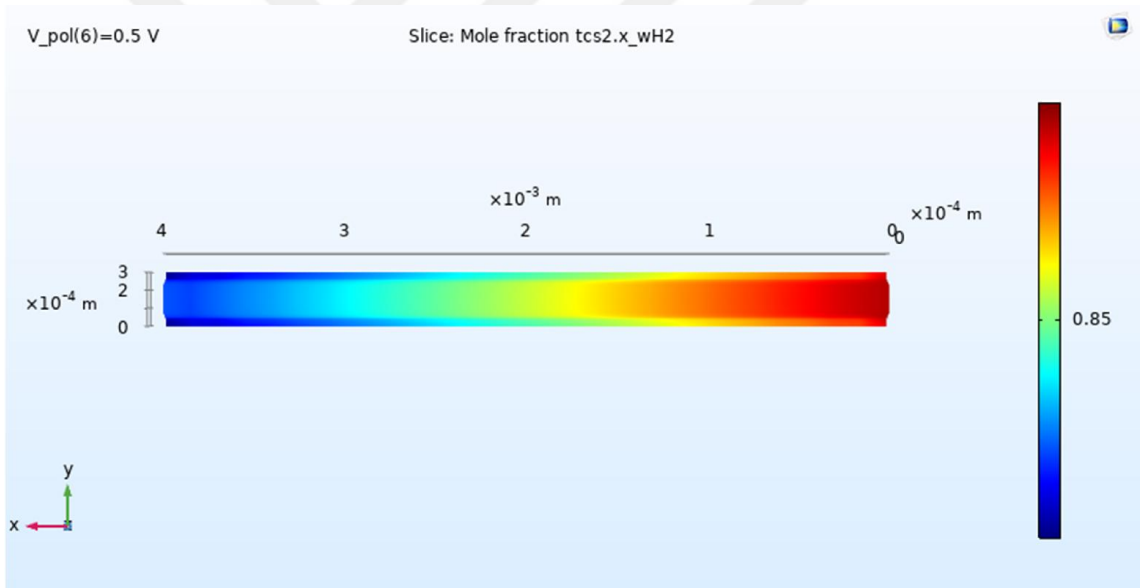
Şekil 4.5. Katot SEM görüntüsü

Deney sonrasında kullanılan membranın Sem görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere elektrot gözenekli yapıda değildir. Burada meydana gelebilecek herhangi bir çatlak veya kopma durumunda elektron ve iyon iletiminde kesintiler elektrokimyasal reaksiyonlarda azalmalara sebep olmakta ve bu durum da performans düşüşüne sebep olmaktadır.

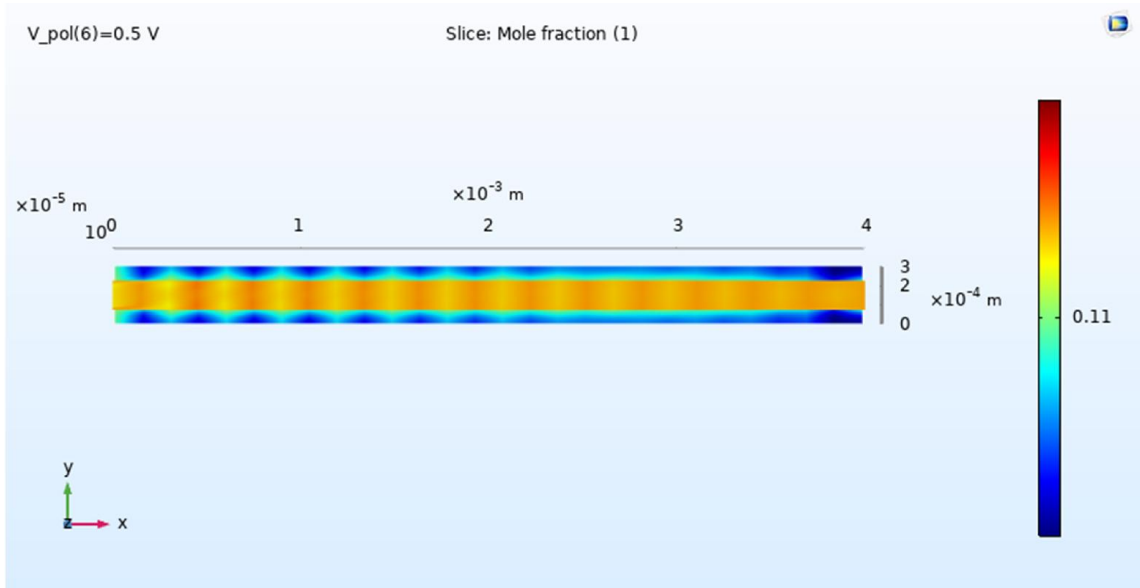
Elektron geçişinin verimli bir şekilde devam edebilmesi için anot ve katot tabakasının gözenekli olması önemli bir parametredir. Burada malzeme özellikleri, bu malzemelerin birbirleri ile karışım oranları, taneli yapının büyüklüğü gözenek yapısını etkilemektedir. Bunlar da performans üzerinde önemli etkiye sahiptirler. Gözenekli yapı elektronların daha kolay geçişine imkân sağlayan bir yapıda olması beklenir.



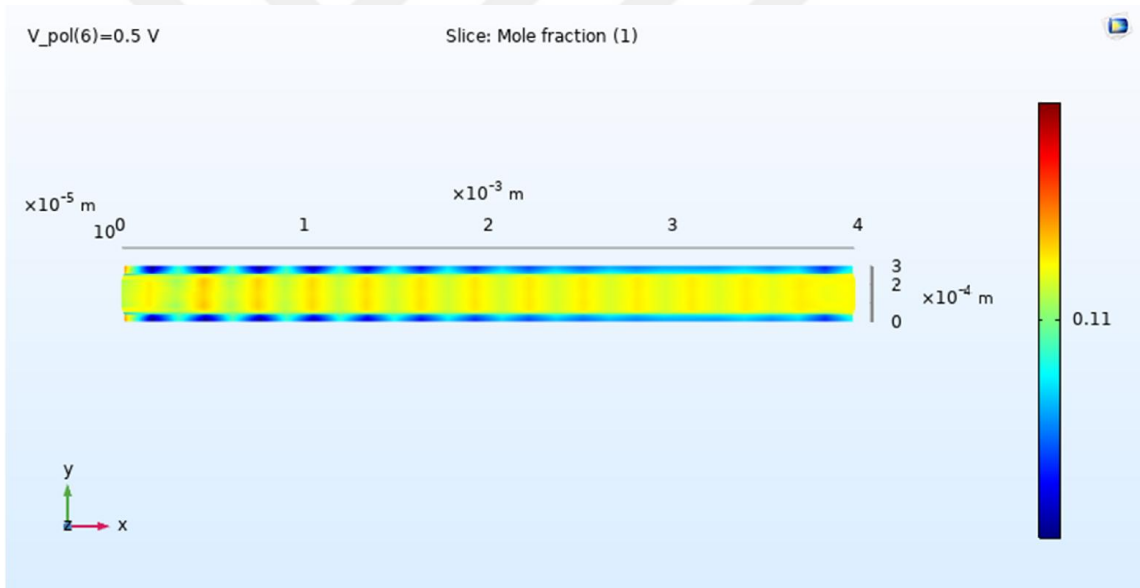
Şekil 4.6. Standart tasarım karşı akış tipi hidrojen tüketimi



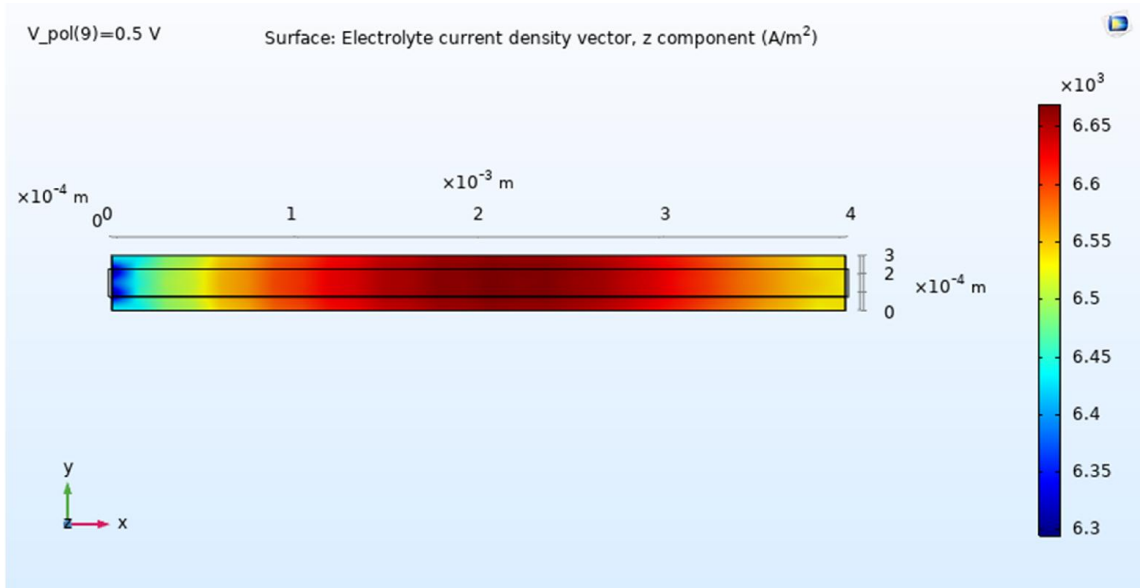
Şekil 4.7. İkincil tasarım karşı akış tipi hidrojen tüketimi



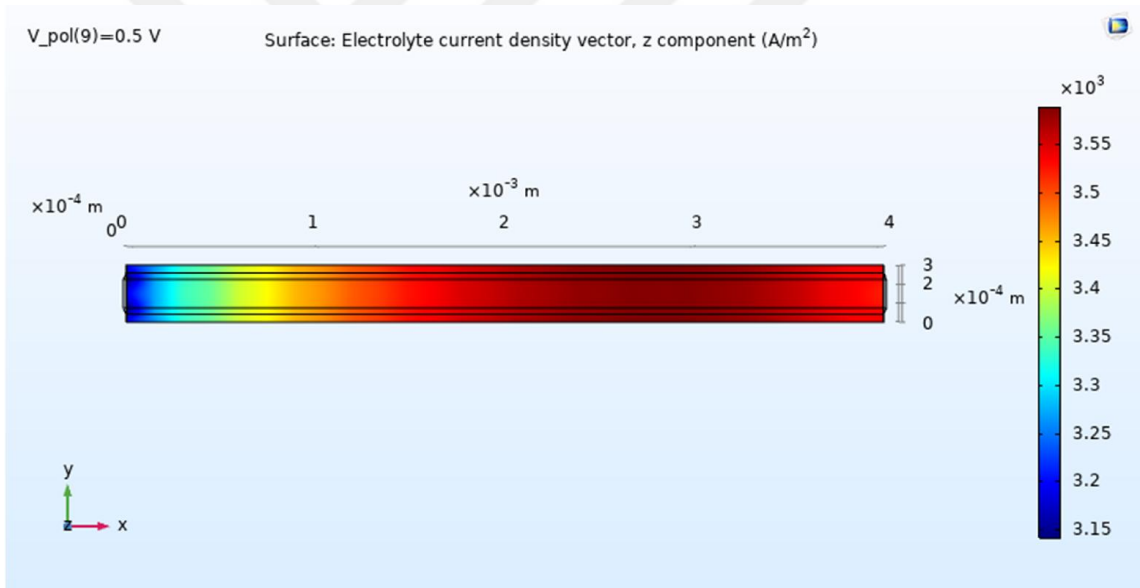
Şekil 4.8. Standart tasarım karşı akış tipi hidrojen tüketimi



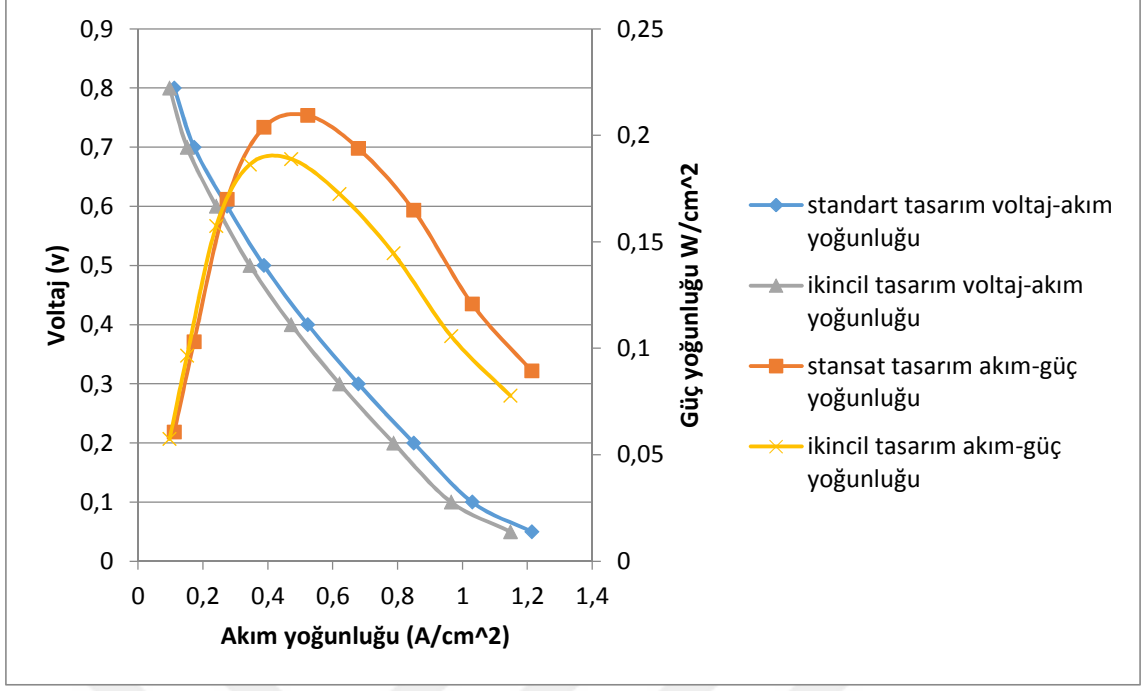
Şekil 4.9. İkincil tasarım karşı akış tipi oksijen tüketimi



Şekil 4.10. Standart tasarım karşı akış tipi elektrolit akım yoğunluğu

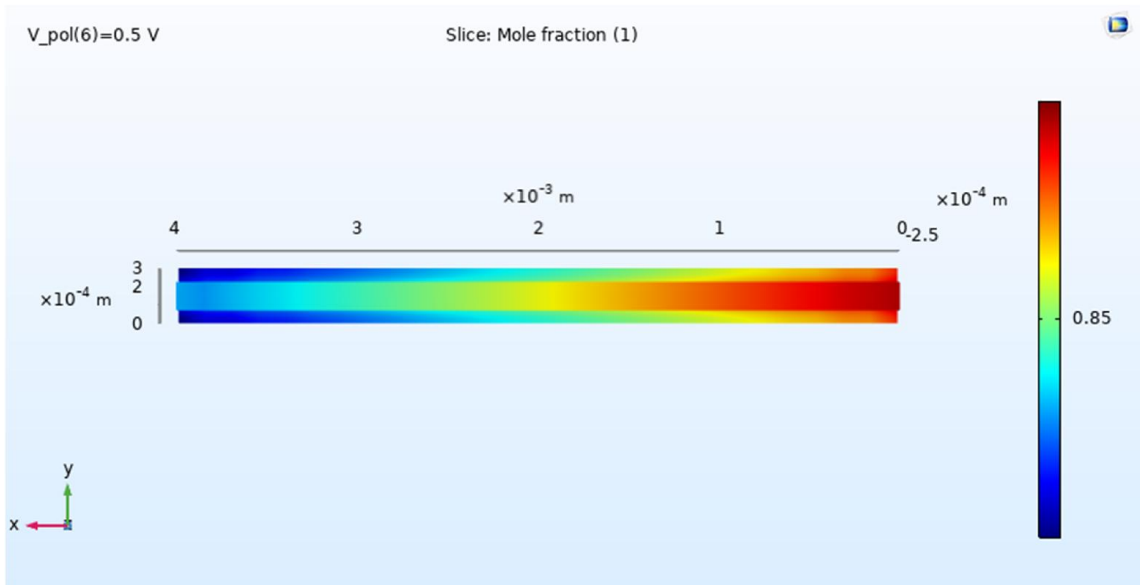


Şekil 4.11. İkincil tasarım karşı akış tipi elektrolit akım yoğunluğu

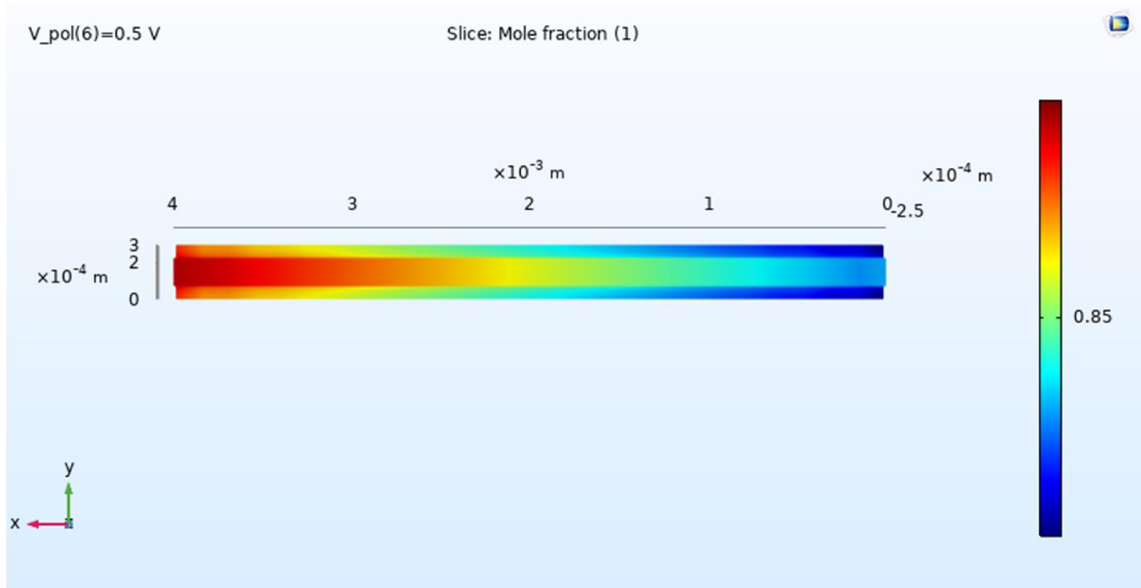


Şekil 4.12. Standart ve ikincil tasarımın performans sonuçları

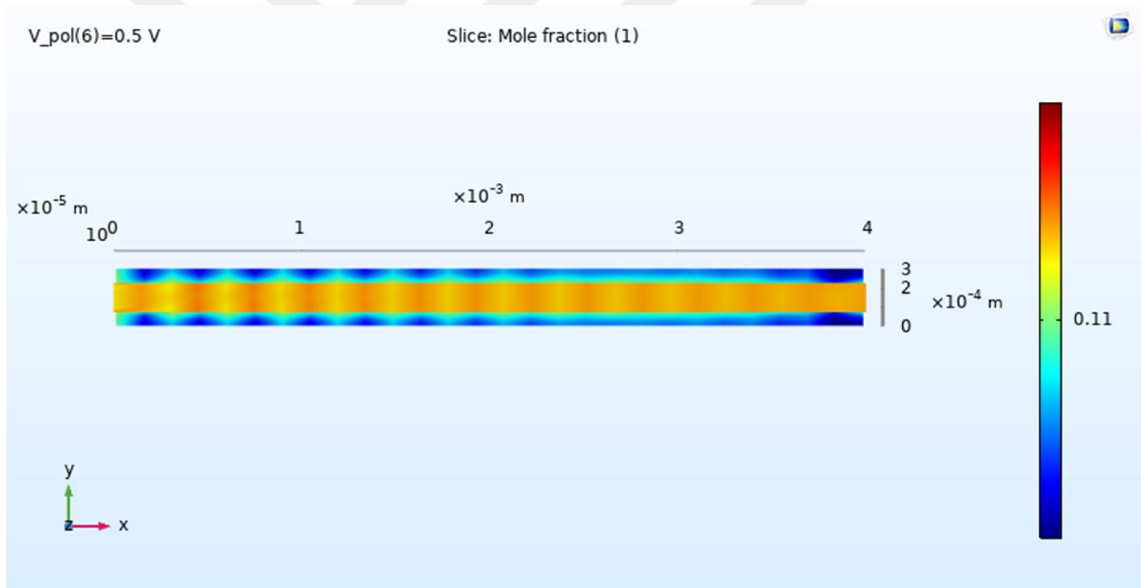
Şekil 4.12'deki grafikte görüldüğü üzere karşı akış tipi kullanılan standart ve ikincil tasarım karşılaştırıldığında; standart tasarım, ikincil tasarıma göre daha iyi performans sonuçları verdiği görülmektedir.



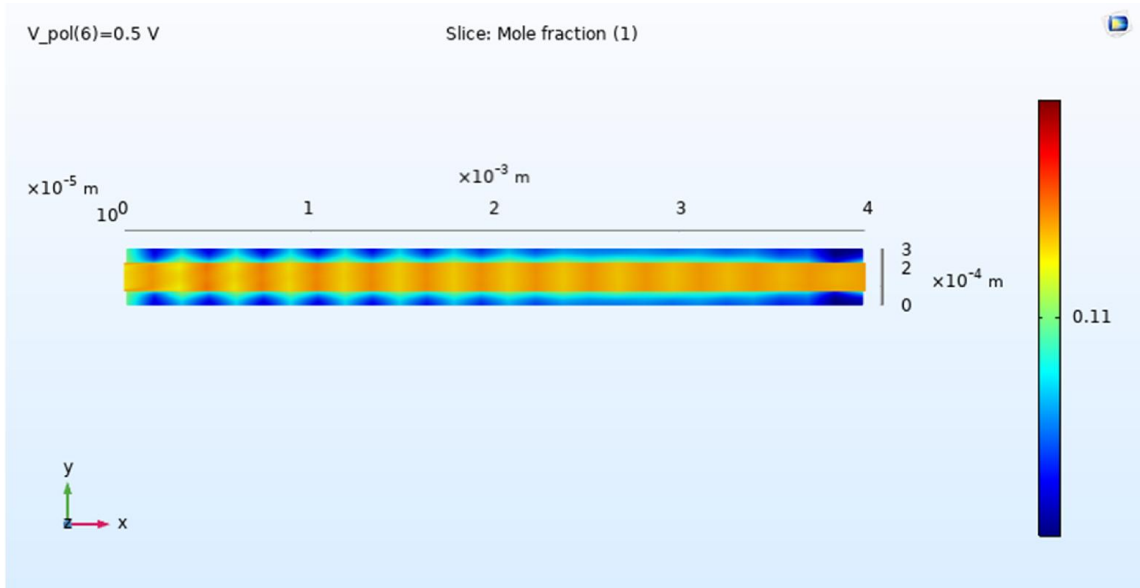
Şekil 4.13. Karşı akış hidrojen tüketimi



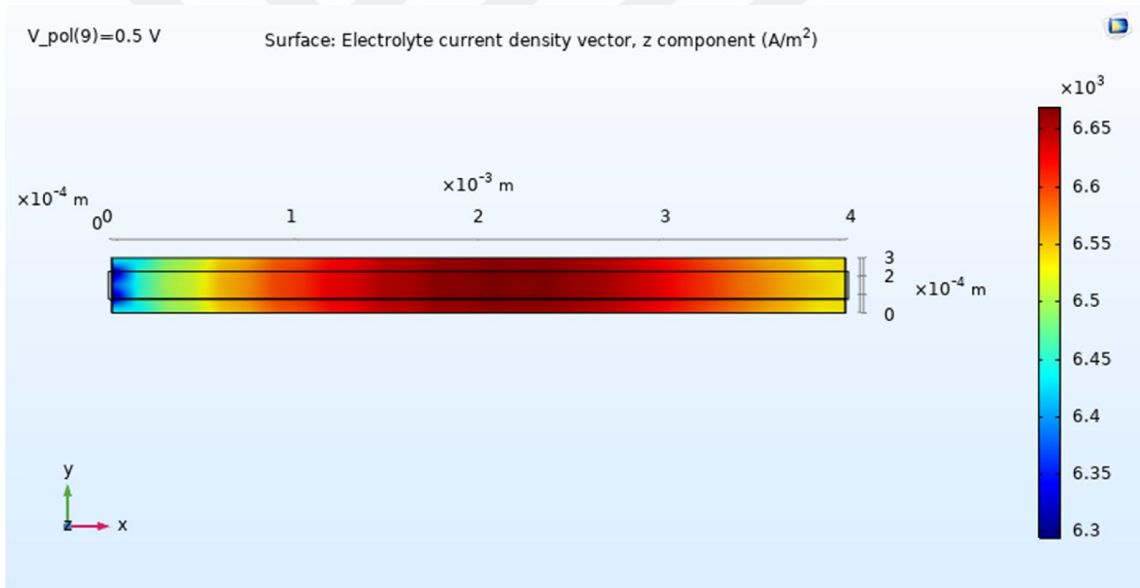
Şekil 4.14. Paralel akış hidrojen tüketimi



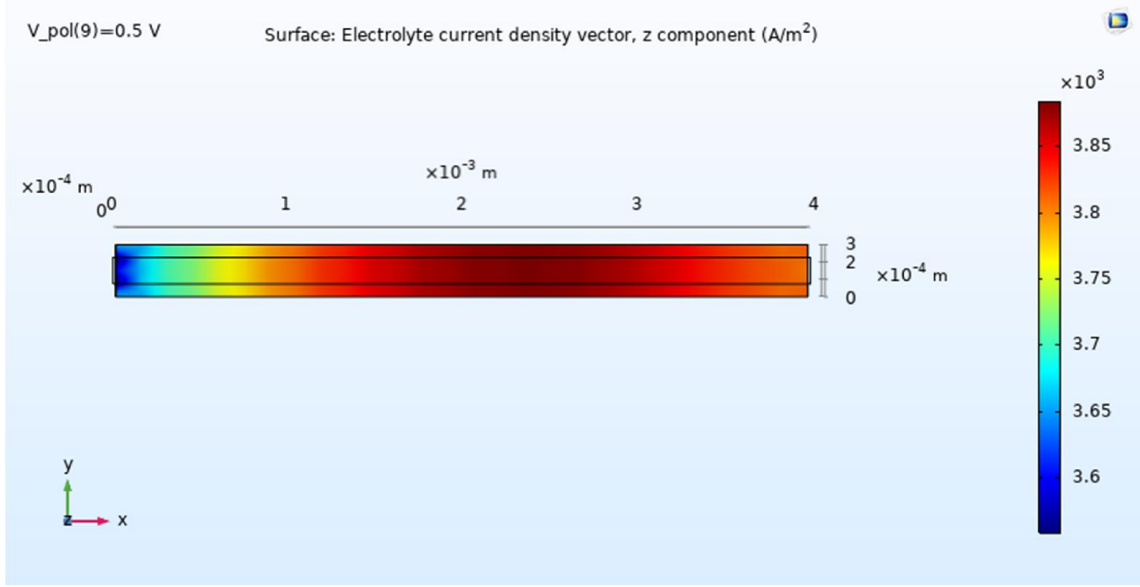
Şekil 4.15. Karşı akış oksijen tüketimi



Şekil 4.16. Paralel akış oksijen tüketimi



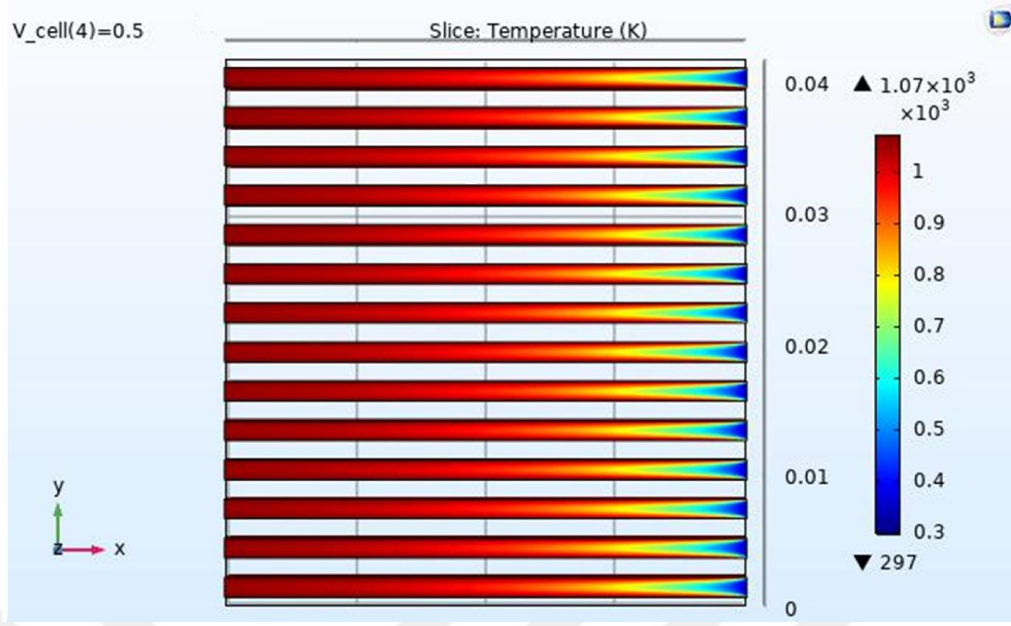
Şekil 4.17. Karşı akış elektrolit akım yoğunluğu



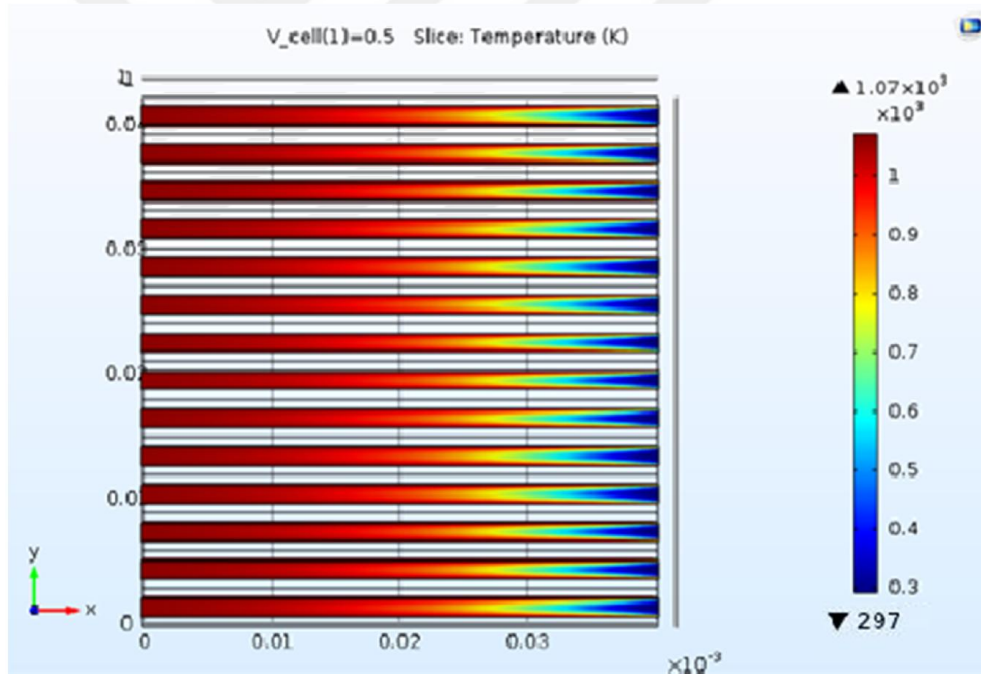
Şekil 4.18. Paralel akış elektrolit akım yoğunluğu

Analiz sonuçları arasında ise karşı akış bir miktar daha iyi performansa sahiptir. Bu durum, karşı akışta her iki kanal boyunca taze yakıt veya havanın sağlanabilmesi ile açıklanabilir. Paralel akışta ise giriş kısmında taze yakıt ve hava oranı yüksek olmasına rağmen hücre çıkışına doğru her iki gazın konsantrasyonu azalmakta reaksiyon kinetiği bundan olumsuz yönde etkilenmektedir. Karşı akışta ise kanal boyunca gazlardan birinin konsantrasyonu azalırken diğerinin artmaktadır ve paralel akışa göre daha homojen bir reaksiyon kinetiği sağlanarak biraz daha yüksek toplam performans alınmaktadır.

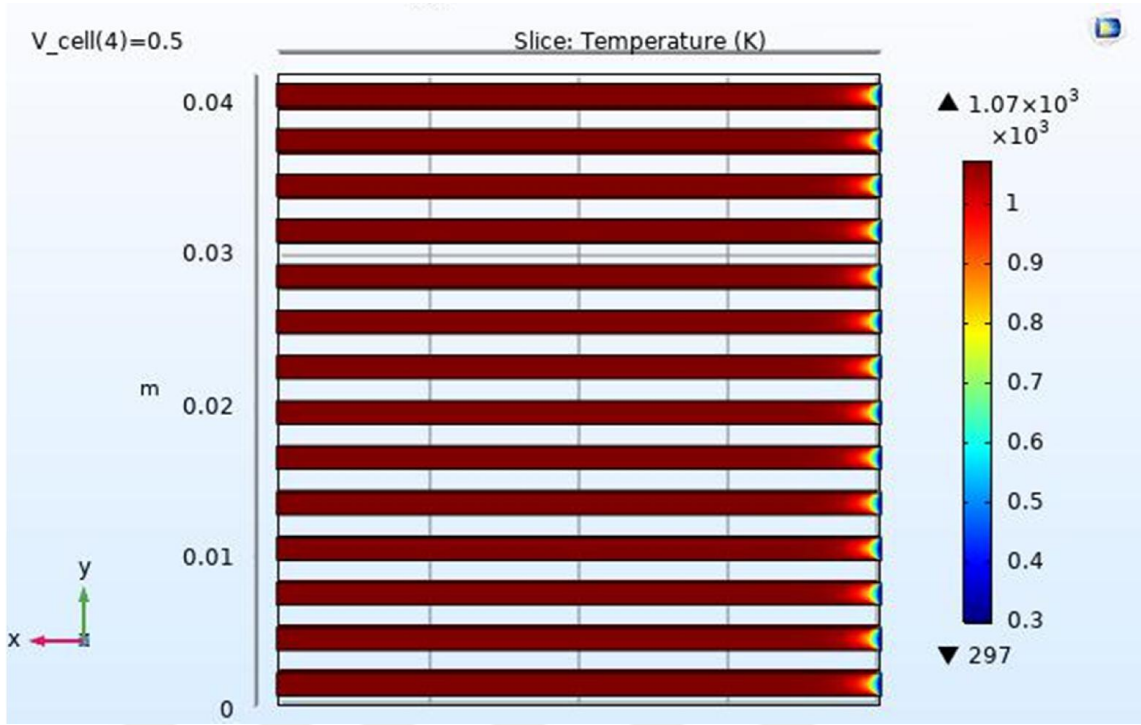
Standart tasarımın performans sonuçları ikincil tasarıma göre daha fazladır ve yine performans sonuçlarını doğrulayan veriler elde edilmiştir. Standart tasarımın daha fazla oksijen tükettiği görülmektedir. Bu durum membran ile temas eden kanal bölgesinin dolayısıyla oksijen miktarının daha fazla olması ile açıklanabilir.



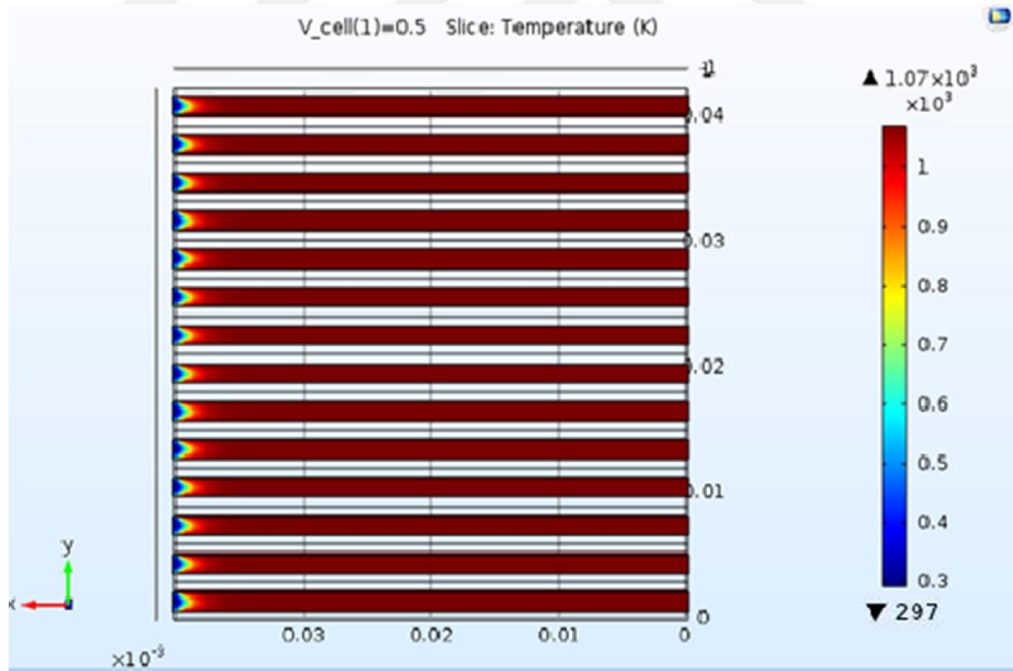
Şekil 4.19. Karşı akış tipinde katot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil 4.20. Paralel akış tipinde katot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil 4.21. Karşı akış tipinde anot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı



Şekil 4.22. Paralel akış tipinde anot kanalı boyunca sıcaklık dağılımı

Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil4.19, Şekil 4.20 ile her iki akış tipi için anot ve katot kısmında bulunan kanallarda meydana gelen sıcaklık dağılımları verilmiştir. Özellikle katot kısmında paralel akış sıcaklık değişimi daha geniş bir alana yayılmıştır. Böylece

keskin sıcaklık değişimleri ve buna bağlı oluşan termal gerilmelerin daha k olacağı veya daha geniş alana yayılacağı düşünülebilir. Paralel sıcaklık farklarının daha homojen dağılması termal gerilmelere bağlı mikro veya makro ölçekli gerilmeleri önleyeceğinden hücre ömrü açısından bu akış tipi daha avantajlı olacaktır. Özellikle giriş kısımlarında oda sıcaklığında giren gazların hızlı biçimde çalışma sıcaklığına ulaştığı görülmektedir. Karşı akışta oda sıcaklığında giren bir reaktanta karşılık, çalışma sıcaklığında bir egzoz çıkışının çok kısa bir mesafe içinde gerçekleşmesi büyük termal gerilmelere sebep olurken, paralel akışta aynı sıcaklıkta gaz girişlerinin ve egzoz çıkışlarının olması termal gerilmelerin oluşumunu azaltacaktır. Bu durum hücre ömrü bakımından paralel akışın tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.



BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında KOYP karşı ve paralel akış tiplerinin sıcaklık dağılımına ve performansa etkisi incelenmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar; 16 cm² aktif alana sahip elektrolit destekli hücreler için elde edilmiştir. KOYP çalışma şartlarını temsil eden sayısal çalışmanın karşı akış tipine sahip bir tekli stak ile doğrulaması yapılmıştır. Standart tasarım ile ikincil tasarım ele alındığında standart tasarımda daha fazla hidrojen ve oksijen tüketildiği ve bunun sonucu olarak daha fazla su oluşumu gözlenmiştir. Hidrojen ve oksijen tüketimleri ile su oluşumu sonuçları, performans sonuçlarını desteklemektedir. Karşı akış tipinde daha fazla hidrojen ve oksijen tüketilirken daha fazla su üretilmiştir. Kanallar içinde oluşan sıcaklık dağılımları bakımından ise paralel akış daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum karşı akışta soğuk giren reaktanta karşılık çalışma sıcaklığında egzoz çıkıyorken paralel akışta ise birbirine yakın sıcaklıktaki reaktantın hücreye girmesi veya egzozun dışarı atılmasıyla açıklanabilir. Yakın sıcaklığa sahip gazlar termal gerilmeleri önleyerek mikro veya makro ölçekli çatlakların oluşumunu engelleyeceğinden hücre ömrü bakımından paralel akış önemli bir avantaja sahiptir. Performansta meydana gelen bir miktar kayba rağmen paralel akış tipinin KOYP sistemlerinde uygulanması bu teknolojinin yaygınlaşmasındaki en büyük engellerden biri olan ömür problemini çözmede etkin rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

Alman, D. and Jablonski, P., "Effect of minor elements and a Ce surface treatment on the oxidation behavior of an Fe–22Cr–0.5 Mn (Crofer 22 APU) ferritic stainless steel", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(16), 3743-3753, 2007.

Barbir, F., Mini-micro fuel cells, *Springer*, 2008.

Barelli, L., Barluzzi, E. and Bidini, G., "Diagnosis methodology and technique for solid oxide fuel cells: A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 5060-5074, 2013.

Blomen, L. J. and Mugerwa, M. N., Fuel cell systems, *Springer Science & Business Media*, 2013.

Bove, R. and Ubertini, S., "Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results", *Journal of Power Sources*, 159(1), 543-559, 2006.

Chen, L., Sun, E. Y., Yamanis, J. and Magdefrau, N., "Oxidation kinetics of Mn_{1.5}Co_{1.5}O₄-coated Haynes 230 and Crofer 22 APU for solid oxide fuel cell interconnects", *Journal of the Electrochemical Society*, 157(6), B931-B942, 2010.

Chu, C.-L., Lee, J., Lee, T.-H. and Cheng, Y.-N., "Oxidation behavior of metallic interconnect coated with La–Sr–Mn film by screen painting and plasma sputtering", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1), 422-434, 2009.

Čížek, J., Melikhova, O., Kuriplach, J., Prochazka, I., Konstantinova, T. and Danilenko, I., "Sintering of yttria-stabilized zirconia nanopowders studied by positron annihilation spectroscopy", *physica status solidi c*, 6(11), 2582-2584, 2009.

Drabek, A., "Renewable Energy--Its Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics and Planning", *Journal of Environmental Quality*, 30(3), 1098, 2001.

Faes, A., Nakajo, A., Hessler-Wyser, A., Dubois, D., Brisse, A., Modena, S. and Van herle, J., "RedOx study of anode-supported solid oxide fuel cell", *Journal of Power Sources*, 193(1), 55-64, 2009.

Faes, A., Willemin, Z., Tanasini, P., Accardo, N. and Van Herle, J., "Redox stable Ni-YSZ anode support in solid oxide fuel cell stack configuration", *Journal of Power Sources*, 196(7), 3553-3558, 2011.

Fang, J., Guo, X., Harada, S., Watari, T., Tanaka, K., Kita, H. and Okamoto, K.-i., "Novel sulfonated polyimides as polyelectrolytes for fuel cell application. 1. Synthesis, proton conductivity, and water stability of polyimides from 4, 4 '-diaminodiphenyl ether-2, 2 '-disulfonic acid", *Macromolecules*, 35(24), 9022-9028, 2002.

Farhad, S., Fung, A. S. and Hamdullahpur, F., "Effect of composite electrode microstructure on temperature distribution in solid oxide fuel cells", *Electrochimica Acta*, 99(9-14), 2013.

Fergus, J. W., "Electrolytes for solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 162(1), 30-40, 2006.

Fontana, S., Amendola, R., Chevalier, S., Piccardo, P., Caboche, G., Viviani, M., Molins, R. and Sennour, M., "Metallic interconnects for SOFC: Characterisation of corrosion resistance and conductivity evaluation at operating temperature of differently coated alloys", *Journal of Power Sources*, 171(2), 652-662, 2007.

Hattori, M., Takeda, Y., Sakaki, Y., Nakanishi, A., Ohara, S., Mukai, K., Lee, J.-H. and Fukui, T., "Effect of aging on conductivity of yttria stabilized zirconia", *Journal of Power Sources*, 126(1-2), 23-27, 2004.

Hoogers, G., Fuel cell technology handbook, *CRC press*, 2002.

Hottinen, T., Performance limitations and improvements of small-scale free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cells, *Helsinki University of Technology*, 2004.

Kaarsberg, T., Fiskum, R., Deppe, A., Kumar, S., Rosenfeld, A., Romm, J. and Gielen, L., Combined Heat and Power for Saving Energy and Carbon in Residential Buildings, *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US)* 2000.

Kakac, S., Pramuanjaroenkij, A. and Zhou, X. Y., "A review of numerical modeling of solid oxide fuel cells", *International journal of hydrogen energy*, 32(7), 761-786, 2007.

Karaoğlu, M. U. and Kuralay, N., "Pem Yakıt Hücresi Modeli", *Engineer & the Machinery Magazine*, 657), 2014.

Larminie, J., Dicks, A. and McDonald, M. S., Fuel cell systems explained, *J. Wiley Chichester, UK*, 2003.

Laurencin, J., Delette, G., Sicardy, O., Rosini, S. and Lefebvre-Joud, F., "Impact of 'redox' cycles on performances of solid oxide fuel cells: Case of the electrolyte supported cells", *Journal of Power Sources*, 195(9), 2747-2753, 2010.

Leng, Y. J., Chan, S. H., Khor, K. A., Jiang, S. P. and Cheang, P., "Effect of characteristics of Y₂O₃/ZrO₂ powders on fabrication of anode-supported solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 117(1–2), 26-34, 2003.

Li, H., Tang, Y., Wang, Z., Shi, Z., Wu, S., Song, D., Zhang, J., Fatih, K., Zhang, J. and Wang, H., "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell", *Journal of Power Sources*, 178(1), 103-117, 2008.

Ma, J., Zhang, T. S., Kong, L. B., Hing, P. and Chan, S. H., "Ce_{0.8}Gd_{0.2}O_{2-δ} ceramics derived from commercial submicron-sized CeO₂ and Gd₂O₃ powders for use as electrolytes in solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 132(1–2), 71-76, 2004.

Ormerod, R. M., "Solid oxide fuel cells", *Chemical Society Reviews*, 32(1), 17-28, 2003.

Öz, E. S., Özbaş, E. and Deniz, E., "Üstten Ve Alt Yandan Beslemeli Kömür Sobalarının Hava Kirliliğine Etkilerinin Karşılaştırılması", *Teknoloji*, Cilt 8, Sayı 2 2005

Pasaogullari, U. and Wang, C.-Y., "Computational fluid dynamics modeling of solid oxide fuel cells", *ECS Proceedings Volumes*, 2003(1403-1412, 2003.

Penchini, D., Cinti, G., Discepoli, G., Sisani, E. and Desideri, U., "Characterization of a 100 W SOFC stack fed by carbon monoxide rich fuels", *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 525-531, 2013.

Pettersson, L. J. and Westerholm, R., "State of the art of multi-fuel reformers for fuel cell vehicles: problem identification and research needs", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(3), 243-264, 2001.

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

Recknagle, K. P., Williford, R. E., Chick, L. A., Rector, D. R. and Khaleel, M. A., "Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks", *Journal of Power Sources*, 113(1), 109-114, 2003.

Sammes, N., Fuel cell technology: reaching towards commercialization, *Springer Science & Business Media*, 2006.

Sarat, S., Sammes, N. and Smirnova, A., "Bismuth oxide doped scandia-stabilized zirconia electrolyte for the intermediate temperature solid oxide fuel cells", *Journal of Power Sources*, 160(2), 892-896, 2006.

Sevim, C., "Enerji Teknolojilerindeki Anlayış Model Değişimi Ve Hızlı İklim Değişikliği", *Journal of Yasar University*, 21(6), 3515-3522, 2011.

Singhal, S. C., "Advances in solid oxide fuel cell technology", *Solid state ionics*, 135(1-4), 305-313, 2000.

Smeacetto, F., Salvo, M., Ferraris, M., Cho, J. and Boccaccini, A., "Glass–ceramic seal to join Crofer 22 APU alloy to YSZ ceramic in planar SOFCs", *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 61-68, 2008.

Stambouli, A. B. and Traversa, E., "Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy", *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5), 433-455, 2002.

Steele, B., "Materials for IT-SOFC stacks: 35 years R&D: the inevitability of gradualness?", *Solid state ionics*, 134(1-2), 3-20, 2000.

Steele, B. C. and Heinzel, A., Materials For Sustainable Energy: *A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group*, 2011.

Stoeckl, B., Subotić, V., Preininger, M., Schwaiger, M., Evic, N., Schroettner, H. and Hochenauer, C., "Characterization and performance evaluation of ammonia as fuel for solid oxide fuel cells with Ni/YSZ anodes", *Electrochimica acta*, 298(874-883), 2019.

Sumi, H., Kishida, R., Kim, J.-Y., Muroyama, H., Matsui, T. and Eguchi, K., "Correlation Between Microstructural and Electrochemical Characteristics during Redox Cycles for Ni–YSZ Anode of SOFCs", *Journal of The Electrochemical Society*, 157(12), B1747-B1752, 2010.

Timurkutluk, B., Altan, T., Celik, S., Timurkutluk, C. and Palacı, Y., "Glass fiber reinforced sealants for solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019.

Ural, Z. and Gencoglu, M. T., "Mathematical models of PEM fuel cells", **5th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-5)**, s. 2010.

Vedasari, V., Young, J. L. and Birss, V. I., "A possible solution to the mechanical degradation of Ni–yttria stabilized zirconia anode-supported solid oxide fuel cells due to redox cycling", **Journal of Power Sources**, 195(17), 5534-5542, 2010.

Wachsman, E. D. and Lee, K. T., "Lowering the temperature of solid oxide fuel cells", **Science**, 334(6058), 935-939, 2011.

Wang, Y., Yoshiba, F., Watanabe, T. and Weng, S., "Numerical analysis of electrochemical characteristics and heat/species transport for planar porous-electrode-supported SOFC", **Journal of Power Sources**, 170(1), 101-110, 2007.

Xin, X., Lü, Z., Huang, X., Sha, X., Zhang, Y. and Su, W., "Anode-supported solid oxide fuel cell based on dense electrolyte membrane fabricated by filter-coating", **Journal of Power Sources**, 159(2), 1158-1161, 2006.

Xu, Y.-w., Wu, X.-l., You, H., Xue, T., Zhao, D.-q., Jiang, J.-h., Deng, Z.-h., Fu, X.-w. and Xi, L., "Modeling and simulation of temperature distribution for planar cross-flow solid oxide fuel cell", **Energy Procedia**, 158(1585-1590, 2019.

Yahya, A., Rabhi, R., Dhahri, H. and Slimi, K., "Numerical simulation of temperature distribution in a planar solid oxide fuel cell using lattice Boltzmann method", **Powder technology**, 338(402-415, 2018.

Yakabe, H., Hishinuma, M., Uratani, M., Matsuzaki, Y. and Yasuda, I., "Evaluation and modeling of performance of anode-supported solid oxide fuel cell", **Journal of Power Sources**, 86(1-2), 423-431, 2000.

Yamamoto, O., "Solid oxide fuel cells: fundamental aspects and prospects", **Electrochimica Acta**, 45(15-16), 2423-2435, 2000.

Yang, Z., Xia, G.-G., Walker, M. S., Wang, C.-M., Stevenson, J. W. and Singh, P., "High temperature oxidation/corrosion behavior of metals and alloys under a hydrogen gradient", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(16), 3770-3777, 2007.

Zhang, Y., Huang, X., Lu, Z., Liu, Z., Ge, X., Xu, J., Xin, X., Sha, X. and Su, W., "A screen-printed $\text{Ce}_{0.8}\text{Sm}_{0.2}\text{O}_{1.9}$ film solid oxide fuel cell with a $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ cathode", *Journal of Power Sources*, 160(2), 1217-1220, 2006.



ÖZ GEÇMİŞ

Rıdvan Işık, 15.02.1992 tarihinde Bolu'nun Gerede ilçesinde dünyaya geldim. İlk ve orta öğrenimimi Gerede 100. Yıl İlköğretim Okulunda tamamladım. Lise eğitimimi Gerede Lisesi'nde 2010 yılında tamamladım. 2011 yılında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde üniversite kariyerime başladım. 2014 ve 2015 yılları arasında İnşaat mühendisliği bölümünde çift anadal yaptım. 2016 yılında Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldum. Yine 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladım.



