

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI İTERKONNEKTÖR TASARIMI VE ÇALIŞMA  
SICAKLIKLARI İÇİN DÜZLEMSEL KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN  
SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Süleyman ALTINDAL**

**Danışman  
Doç. Dr. Barış GÜREL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA- 2023**



© 2023 [Süleyman ALTINDAL]

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Hücre ve Yığın Malzemeler .....	6
1.1.1. Elektrolit Malzemeler .....	6
1.1.2. Katot Malzemeleri .....	8
1.1.3. Anot Malzemeleri .....	8
1.1.4. Sızdırmazlık Malzemeleri.....	9
1.1.5. İnterkonnektör (Ara bağlantı) Malzemeleri .....	10
1.2. KOYH Tasarımı .....	10
1.2.1. Düzlemsel KOYH Tasarımı.....	10
1.2.2. Borulu KOYH Tasarımı.....	13
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	16
3. MATERYAL VE METHOD.....	24
3.1. Deneysel Doğrulama .....	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	32
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	42
KAYNAKLAR .....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	47

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **FARKLI İNTERKONNEKTÖR TASARIMI VE ÇALIŞMA SICAKLIKLARI İÇİN DÜZLEMSEL KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Süleyman ALTINDAL**

**Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Barış GÜREL**

Yakıt hücreleri, geleneksel kömürle çalışan enerji santralleri ve içten yanmalı motorlara dayalı elektrik jeneratörlerine kıyasla daha yüksek elektrik dönüşüm verimliliği sağlayabilir. Ek olarak, yüksek verimli katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), yüksek sıcaklıkta çalışmaları sonucunda diğer yakıt hücrelerine kıyasla iki özel avantaja sahiptir. Birincisi, KOYH'ler hidrojen CO ve hidrokarbonlara kadar geniş bir yakıt yelpazesinde çalışabilir. İkincisi, KOYH'ler, kombine ısı ve güç sistemlerinde değerlendirilebilecek önemli miktarda atık ısı üretirler. Ayrıca, KOYH'ler sessiz ve titreşimsiz bir işleyişe sahiptir, böylece enerji üretim sistemleriyle genellikle ilişkilendirilen gürültüyü ortadan kaldırır. Bu yakıt hücreleri ayrıca çok düşük ya da hiç SO<sub>2</sub> ve NO emisyonu üretmezler. Katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), geniş kapsamlı uygulama alanlarına sahiptir ve bu, onları sürdürülebilir enerji teknolojilerinin önemli bir bileşeni haline getirir. Bunlardan birisi KOYH-Biyokütle hibrit sistemidir. Çeşitli atıklardan elde edilen biyokütle, umut verici bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyogazın doğrudan KOYH'nin yakıtı olarak kullanılabilmesi, biyogazın hidrojen gazına arıtılma ihtiyacını ortadan kaldırır.

Bu araştırmada, çeşitli bağlantı elemanı tasarımlarıyla donatılmış bir planar KOYH'nin performansı, farklı işletme sıcaklıklarında sayısal olarak değerlendirilmiştir. Bağlantı geometrileri, anot ve katot malzemeleri, işletme sıcaklıkları ve akış hızları gibi çoklu parametreler göz önünde bulundurulmuştur.

KOYH'lerin sayısal modellemesi, hücre performansının iyileştirilmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Bu tür modellemeler, hücrenin şematik gösterimi ile birlikte, hava ve egzoz gazlarının hücre içerisindeki hareket dinamiklerini de kapsar. Sayısal analizlerde farklı anot ve katot akış kanalı geometrileri, akış debileri, anot ve katot malzemeleri ve farklı sıcaklıklar açısından yakıt hücresinin elektriksel performansı incelenmiştir. KOYH performansını değerlendirmek için Nernst denklemi kullanılmıştır. Ayrıca sayısal analizlerde doğruluğu arttırmak için sayısal ağ yapısı bağımsızlık analizi yapılmış ve en uygun sayısal ağ eleman sayısı belirlenmiştir. Sayısal analizler sonucunda ortalama akım yoğunluğu ve ortalama yakıt hücresi gücü voltaja bağlı olarak elde edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Sonuç olarak, yatay sinüzoidal akış kanalı geometrisi, 600 °C işletme sıcaklığı, 86.5 SCCM/dakika hidrojen gazı akış hızı ve 28.75 SCCM/dakika oksijen gazı akış hızı, NiO anot malzemesi ve LSCF katot malzemesi, enerji ve akım yoğunluğu açısından en yüksek performansı sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Katı oksit yakıt hücresi; Operasyon parametreleri; Hücre performansı; Sac İnterkonnektör; Akış Alanı

**2023, 48 sayfa**



## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF THE DIFFERENT INTERCONNECTOR DESIGN AND OPERATING TEMPERATURES ON A PLANAR SOLID OXIDE FUEL CELL**

**Süleyman ALTINDAL**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Barış GÜREL**

Fuel cells offer a higher electrical conversion efficiency compared to traditional coal-based power plants and generators reliant on internal combustion engines. Notably, high-efficiency solid oxide fuel cells (SOFCs) have two distinctive advantages due to their high-temperature operation compared to other fuel cells. Firstly, SOFCs can operate with a broad spectrum of fuels, ranging from hydrogen to CO and hydrocarbons. Secondly, they produce a significant amount of waste heat, which can be harnessed in combined heat and power systems. Additionally, SOFCs ensure a silent and vibration-free operation, eliminating the noise commonly associated with energy production systems. These cells also emit little to no SO<sub>2</sub> and NO emissions. SOFCs have extensive application potentials, marking them as a crucial component of sustainable energy technologies, one being the SOFC-Biomass hybrid system. Biomass derived from various wastes presents a promising renewable energy source. Using biogas directly as fuel for SOFCs eliminates the need for its purification to hydrogen gas.

In this study, the performance of a planar SOFC equipped with various interconnect designs was numerically assessed at different operating temperatures. Multiple parameters such as interconnect geometries, anode and cathode materials, operating temperatures, and flow rates were considered. The numerical modeling of SOFCs is vital for enhancing cell performance. Such modeling encompasses the schematic representation of the cell, along with the dynamics of air and exhaust gases movement within the cell. In the numerical analyses, the electrical performance of the fuel cell was examined in terms of different anode and cathode flow channel geometries, flow rates, anode and cathode materials, and varying temperatures. The Nernst equation was employed to assess the performance of SOFCs. Moreover, to increase the accuracy in numerical analyses, a mesh independence analysis was conducted to determine the optimal numerical grid element count. As a result of the numerical analyses, the average current density and the average fuel cell power relative to voltage were obtained, and the results were interpreted.

In conclusion, a horizontal sinusoidal flow channel geometry, operating temperature of 600 °C, hydrogen gas flow rate of 86.5 SCCM/min, oxygen gas flow rate of 28.75 SCCM/min, NiO anode material, and LSCF cathode material demonstrated the highest performance in terms of energy and current density.

**Keywords:** Cell performance, horizontal sinusoidal flow channel geometry, operating parameters, solid oxide fuel cell

**2023, 48 pages**



## TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Barış GÜREL'e teőekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımnda yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Yüksek Makine Mühendisi Eren Gürkan EROL'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Süleyman ALTINDAL  
ISPARTA, 2023



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Katı Oksit Yakıt Hücresi-Biyokütle Hibrit Sistemi.....	2
Şekil 1.2. Katı Oksit Yakıt Hücresi-Rüzgar Hibrit Sistemi.....	2
Şekil 1.3. Katı Oksit Yakıt Hücresi-Kömür Hibrit Sistemi.....	3
Şekil 1.4. Katı Oksit Yakıt Hücresi temelli çoklu üretim sistemi.....	4
Şekil 1.5. Katı oksit yakıt hücresinin çalışma prensibi.....	5
Şekil 1.6. İtiryumla stabilize edilmiş ZrO <sub>2</sub> (YSZ), gadolinyum katkı CeO <sub>2</sub> ve (La, Sr) (Mg, Ga)O <sub>3</sub> (LSMG) için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak iletkenlik.....	7
Şekil 1.7. Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi tasarımı.....	11
Şekil 1.8. 600, 700 ve 800 °C 'de ölçülen optimize edilmiş anot destekli tek hücre için elektrokimyasal performansı.....	12
Şekil 1.9. Borulu katı oksit yakıt hücresi tasarımı.....	14
Şekil 1.10. Siemens tarafından incelenen alternatif.....	15
Şekil 1.11. Boru şeklindeki bir KOYH'nin voltaj-akım yoğunluğu ve güç-akım yoğunluğu grafikleri.....	15
Şekil 3.1. (a) Dikey ve (b) Yatay sinüzoidal akış kanallarına sahip KOYH.....	24
Şekil 3.2. İncelenen KOYH modeli boyutları.....	24
Şekil 3.3. (a) Dikey ve (b) yatay sinüzoidal kanallara sahip KOYH'nin sayısal ağ yapısı görünümü.....	25
Şekil 3.4. Ortalama akım yoğunluğu değişimine göre V <sub>hücre</sub> 'nin sayısal ve deneysel sonuçları.....	31
Şekil 3.5. Ortalama Akım Yoğunluğu Değişimine Göre Ortalama Hücre Gücünün Sayısal ve Deneysel Sonuçları.....	31
Şekil 4.1. Farklı KOYH geometrileri için hidrojenin kütle fraksiyonu: (a) standart prizma, (b) dikey sinüzoidal, ve (c) yatay sinüzoidal.....	33
Şekil 4.2. Farklı KOYH geometrileri için oksijenin kütle fraksiyonu: (a) standart prizma, (b) dikey sinüzoidal, (c) yatay sinüzoidal.....	34
Şekil 4.3. Farklı KOYH geometrileri için H <sub>2</sub> O'nun kütle fraksiyonu: (a) standart prizma, (b) dikey sinüzoidal, (c) yatay sinüzoidal.....	35
Şekil 4.4. Farklı Geometriler için Polarizasyon Eğrileri.....	36
Şekil 4.5. Farklı Geometriler İçin Ortalama Hücre Gücü.....	36
Şekil 4.6. Farklı malzeme konfigürasyonları için elektrik güç yoğunluğu, 1.Malzeme (NiO/YSZ anot ve LSM/YSZ katot) 2.Malzeme (NiO anot ve LSCF katot).....	37
Şekil 4.7. Farklı malzeme konfigürasyonları için polarizasyon eğrileri, 1. Malzeme (NiO/YSZ anot ve LSM/YSZ katot) 2.Malzeme (NiO anot ve LSCF katot).....	38
Şekil 4.8. Farklı Gaz Akış Hızları için V <sub>hücre</sub> ile ortalama akım yoğunluğu.....	39
Şekil 4.9. Farklı Gaz Akış Hızları için Ortalama Hücre Gücü ile Ortalama Akım Yoğunluğu.....	39
Şekil 4.10. Farklı sıcaklıklarda KOYH'ler (yatay sinüzoidal akış kanalı geometrisi, ikinci malzeme konfigürasyonu ve %25 artırılmış kütle akış hızı) için polarizasyon eğrileri.....	40
Şekil 4.11. Farklı Sıcaklıklarda Elektriksel Güç Eğrileri.....	41

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Sayısal ağ eleman sayısı optimizasyonu .....	25
Çizelge 3.2. Analizlerde Kullanılan Malzeme ve Geometriler .....	29
Çizelge 3.3. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametreler ve Değerleri.....	30



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

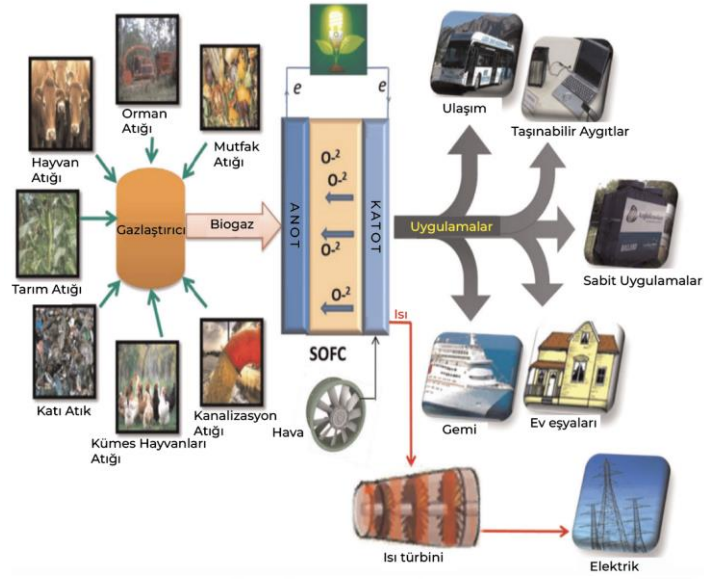
$C_p$	Özgül Isı
$E$	Enerji
$R$	Gaz sabiti
$F$	Faraday sabiti
$g$	Yerçekimi ivmesi
KOYH	Katı oksit yakıt hücresi
KOYH	Katı Oksit Yakıt Hücresi
$M$	Moleküler ağırlık
$n$	Reaksiyondaki Elektron Sayısı
PAA	Paralel akış alanları
PDMYH	Proton değişim membranlı yakıt hücresi
$Q$	Isı üretimi
$T$	Sıcaklık
TSDAK	Ters sinüzoidal dalga akış kanalları
$W$	İş
ZSDAA	Zıt sinüzoidal dalga akış alanları
$\epsilon$	İç enerji
$\zeta$	Geçirgenlik
$\lambda$	Termal iletkenlik
$\mu$	Viskozite
$\rho$	Yoğunluk
$U$	Hız vektörü
$\sigma$	İletkenlik
$\phi$	Elektrik potansiyeli

## 1. GİRİŞ

Yakıt hücreleri konusunda bilgi sahibi olmamız yaklaşık 150 yılı bulmuştur, ancak katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), bir oksit iyon iletici elektrolit üzerinde temellenir ve bu alandaki araştırmalar son 30 yıl içerisinde hızlanmıştır. Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH), yakıtlarda (örneğin hidrojen veya metan) saklı olan kimyasal enerjiyi, doğrudan yanma olmadan, bir dizi elektrokimyasal tepkime aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji dönüşüm aygıtıdır.

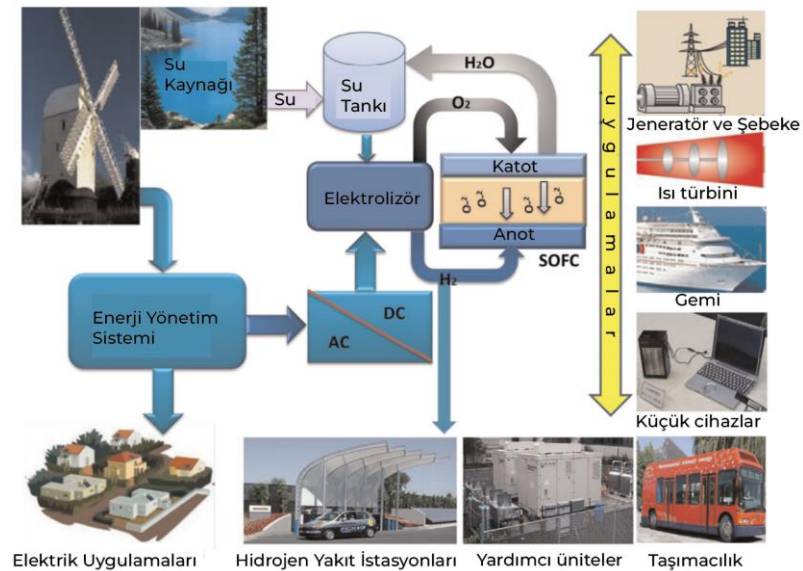
Yakıt hücrelerinin verimliliği, yakıtın elektrokimyasal oksidasyonundan kaynaklanan entalpiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme yeteneği sayesinde, teorik Carnot verimlilikleriyle sınırlı olmayıp daha üstün bir performans sunar. Bu özellikleri sayesinde, yakıt hücreleri, kömür bazlı elektrik santralleri veya içten yanmalı motorların temel alındığı elektrik üreticileri gibi geleneksel teknolojilere kıyasla daha fazla elektrik dönüşüm verimliliği sağlayabilirler. Bu çalışmanın amacı, farklı bağlantı elemanı tasarımlarıyla donatılmış bir planar Katı Oksit Yakıt Hücresi'nin (KOYH) performansını detaylı bir şekilde analiz ederek, enerji dönüşüm verimliliğini maksimize etmek için en uygun çalışma koşullarını belirlemektir. Bu doğrultuda, farklı işletme sıcaklıkları, bağlantı geometrileri, anot ve katot malzemeleri ile akış hızları gibi parametrelerin yakıt hücresi performansına olan etkisi derinlemesine incelenecektir.

Katı oksit yakıt hücreleri (KOYH), geniş kapsamlı uygulama alanlarına sahiptir ve bu, onları sürdürülebilir enerji teknolojilerinin önemli bir bileşeni haline getirir. Şekil 1.1'de gösterildiği üzere, bunlardan biri KOYH-Biyokütle hibrit sistemidir. Yenilenebilir enerji teknolojileri, hidrojen ve hidrokarbon bazlı yakıtların kullanıldığı, fosil yakıtlar ve çevreyi kirleten yakıtların alternatif enerji kaynaklarıdır. Çeşitli atıklardan elde edilen biyokütle, umut verici bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyogazın doğrudan KOYH'nin yakıtı olarak kullanılabilmesi, biyogazın hidrojen gazına arıtılma ihtiyacını ortadan kaldırır.



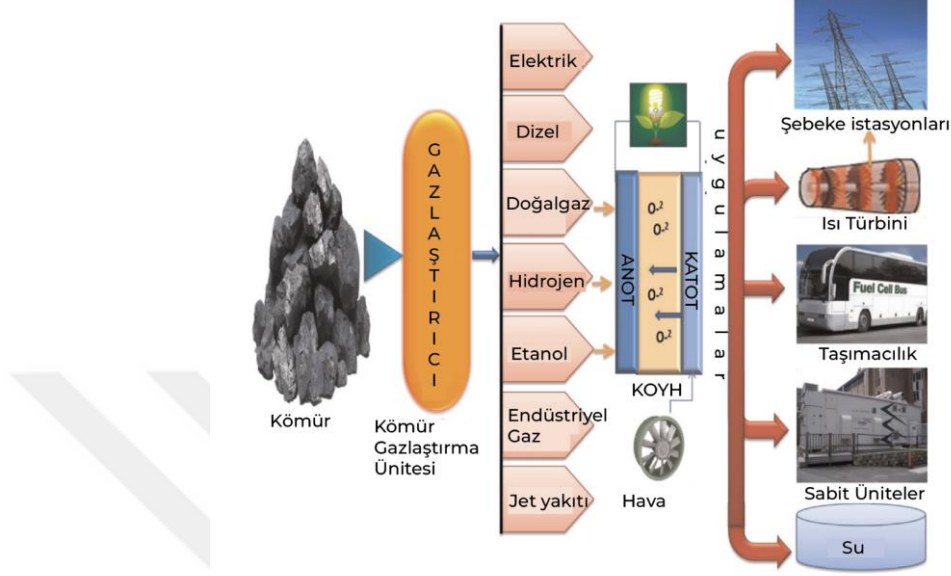
Şekil 1.1. Katı Oksit Yakıt Hücresi-Biyokütle Hibrit Sistemi

Bir diğer uygulama alanı, Şekil 1.2'de gösterildiği üzere, KOYH-Rüzgar hibrit sistemidir. Rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin sadece gündüz saatlerinde kullanılabilir olmasına karşın, 24 saat boyunca elektrik enerjisi üretmeye uygun bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi, bir rüzgar türbini aracılığıyla elektriğe dönüştürülür. Bu elektrik enerjisi, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen ve oksijen üretmek için kullanılabilir.



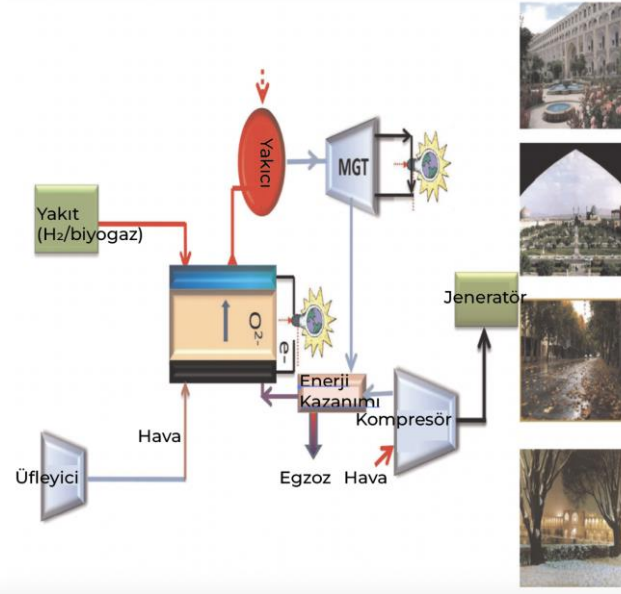
Şekil 1.2. Katı Oksit Yakıt Hücresi-Rüzgar Hibrit Sistemi

KOYH-Kömür hibrit sistemi, Şekil 1.3'te sunulmuştur. Hidrojen, çeşitli kaynaklardan üretilme yeteneği sayesinde gelecekteki enerji ve yakıt ihtiyaçlarını karşılama potansiyeline sahiptir. Kömür, bu kaynaklardan biridir ve kömürün gazlaştırılması yoluyla hidrojen üretilir.



Şekil 1.3. Katı Oksit Yakıt Hücresi-Kömür Hibrit Sistemi

Son olarak, KOYH temelli çoklu üretim sistemi, Şekil 1.4'te sunulmuştur. Çoklu üretim, tek bir yakıt kaynağından eş zamanlı olarak birden fazla ürün üreten bir süreçtir. Bu, toplam verimliliğin daha yüksek olmasını ve çevreye yapılan emisyonların azalmasını sağlar. Bu nedenle, çoklu üretim, enerji güvenliği ve küresel ısınmanın kontrolü konusundaki kullanıcı taleplerini karşılamak için umut vaat eden bir teknoloji olabilir.

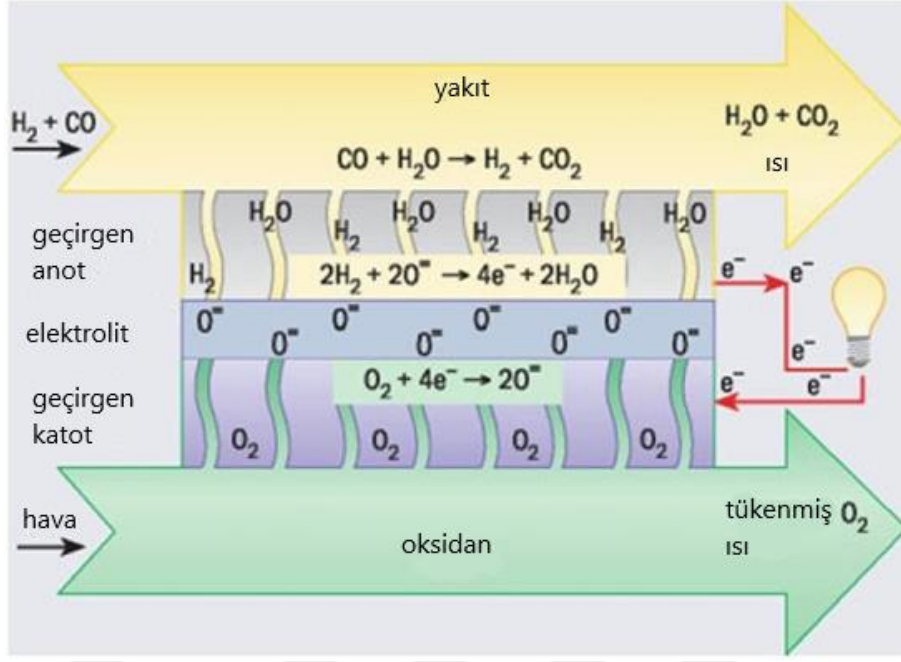


Şekil 1.4. Katı Oksit Yakıt Hücresi temelli çoklu üretim sistemi

Her bir uygulama alanı, katı oksit yakıt hücrelerinin çok yönlülüğünü ve geniş çaplı enerji dönüşüm teknolojilerinde potansiyelini göstermektedir. Bu teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması, sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru önemli bir adım olacaktır.

Şekil 1.5'te belirtildiği üzere, standart bir KOYH, iki gözenekli elektrodun, bir oksit iyon iletici elektrolit ile ayrıldığı bir yapıyı barındırır. Katot kısmında bulunan oksijen gazı molekülleri, dış devreden alınan elektronlarla etkileşime girerek oksijen iyonları oluşturur. Bu oksijen iyonları, oksit iyon iletici elektrolit yoluyla anoda geçiş yapar.

Anodda, oksit iyonları H<sub>2</sub> veya diğer yakıtlarla etkileşime girer ve H<sub>2</sub>O (ve/veya CO<sub>2</sub>) oluştururken, dış devre üzerinden katoda elektrik üretmek üzere elektronları serbest bırakır. Yakıt ve oksijenin sürekli sağlanması durumunda, elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla sürekli elektrik enerjisi üretilebilir.



Şekil 1.5. Katı oksit yakıt hücresinin çalışma prensibi (Singhal, 2013)

KOYH'lerin sayısal modellemesi, hücre performansının iyileştirilmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Bu tür modellemeler, hücrenin şematik gösterimi ile birlikte, hava ve egzoz gazlarının hücre içerisindeki hareket dinamiklerini de kapsar. Şekil 1.5, bu dinamikleri ve gazların hücre içerisindeki dağılımını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, önceki çalışmalar, KOYH'lerdeki elektrokimyasal reaksiyonları anlamak ve hücre tasarımını optimize etmek için sayısal modeller geliştirmeye odaklanmıştır. Bu çalışmalarda, özellikle interkonekt geometrileri (Guo, 2023) (I. Khazae, 2017) (Hesami, 2021) (Yasin Mehdizadeh Chellehbari, 2021) (Celik, 2018) (Önbilgin, 2019), anot ve katot malzemelerinin seçimi (N. Delibaş, 2022) (Serincan, Pasaogullari, & Singh, 2020) (Jeffrey W. Fergus, 2006) (Jacobson, 2009) (Wu, ve diğerleri, 2016) (Xiaoyan Wu, 2016) (Neelima Mahato, 2015) (Demirezen, 2016), işletme sıcaklıkları ve akış hızları (Mustafa Fazil Serincan, 2020) (Marius Dillig, 2018) (Yingtian Chi, 2023) (N. Alhazmi, 2021) (Mungmuang Promsen, 2020) (Tariq N. Chaudhary, 2019) (Chengyuan Gong, 2023) (Işık, 2019), gibi belirli değişkenlerin hücre performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir (Yasin Mehdizadeh Chellehbari, 2021) (Celik, 2018) (Jacobson, 2009) (Çimen, 2020) (Singhal, 2013) (Timurkutluk, 2019) (Tushar Choudhary, 2017). Söz konusu geometrilerin ve KOYH'nin operasyonel prensiplerinin derinlemesine kavranabilmesi adına Şekil 1.5'te şematik bir

gösterim sunulmuştur. Bu görselde, sıcak egzoz gazlarının ve hava alımının nasıl gerçekleştiği detaylandırılmıştır. Bu çalışmada, KOYH performansını etkileyen belirtilen değişkenlerin tümünün sayısal etkilerini detaylı bir şekilde araştırdık. Özellikle, farklı katot ve anot akış kanalı geometrilerini, farklı anot ve katot malzeme konfigürasyonlarını ve farklı gaz akış hızları ve işletme sıcaklıklarını değerlendirdik.

Sayısal analizi, literatürdeki bir tez çalışmasını kullanarak (Uçar, 2020) doğruladık. Bu analizle, ortalama akım yoğunluğu ve hücre güç yoğunluğu bazında en verimli tasarım ve işletme parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

### **1.1. Hücre ve Yiğın Malzemeler**

KOYH'leri için malzeme araştırmaları yapılmakta olup, bu araştırmaların amacı, KOYH kararlılığını artırmak ve çeşitli polarizasyon kayıplarını azaltmaktır. KOYH üniteleri, kalın bir elektrolitin neden olduğu omik direnci aşabilmesi için literatürde genellikle 900–1000°C sıcaklık aralığında işletilmek üzere geliştirilmiştir. Ancak, KOYH'nin işletme sıcaklığını 200°C ya da daha fazla düşürmek, kullanılabilir malzeme yelpazesini genişletir. Son birkaç yılda, 650-800 °C sıcaklık aralığında faaliyet gösteren KOYH teknolojilerine yönelik ilerlemeler dikkate değer bir hızla artmıştır. KOYH malzemeleri, beş ana sınıfa ayrılır: elektrolit malzemeler, anot malzemeleri, katot malzemeleri, sızdırmazlık malzemeleri ve ara bağlantı elemanları.

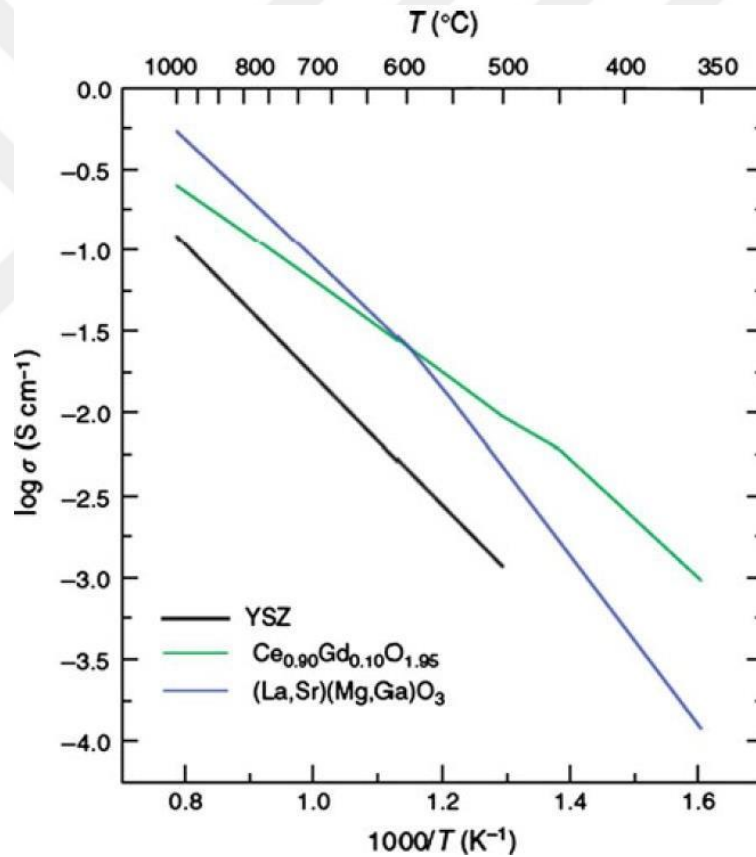
#### **1.1.1. Elektrolit Malzemeler**

Bir KOYH içerisinde, elektrolit, hem oksidatif özellik gösteren bileşenlere (hava tarafı) hem de redüktif özellik gösteren bileşenlere (yakıt tarafı) yüksek sıcaklıklarda maruz bırakılır. Bu bağlamda, elektrolitlerin yeterli iyonik iletkenliğe sahip olması imperatif bir gerekliliktir. Elektrolit matrisindeki elektronik iletkenliğin minimum olması, enerji dönüşüm etkinliğini maksimize

eder; ancak, omik kaybı minimize edebilmek için oksit iyon iletkenliği de optimum seviyede olmalıdır (Zhou & Singhal, 2009).

KOYH'lerde tipik olarak kullanılan elektrolit malzemeleri, alıcı katkı maddesi olarak adlandırılan, düşük değerlikli element tabanlı oksitlerdir. Oksijen boşluklarının oluşturulmasında, yük dengesinin sağlanması esastır. İtiryum ile stabilizasyon geçirmiş  $ZrO_2$  (YSZ), bu spesifikasyonları karşılayan en prevalan malzeme olarak tanımlanabilir. Bunun yanında, alıcı katkı ile modifiye edilmiş  $CeO_2$  ve perovskit morfolojik yapıya sahip oksitler, elektrolit materyali olarak literatürde araştırılmıştır.

Farklı KOYH elektrolit materyallerinin iyonik iletkenlik değerleri, sıcaklıkla olan ilişkisi üzerinden Şekil 1.6'da sunulmuştur.



Şekil 1.6. İtiryumla stabilize edilmiş  $ZrO_2$  (YSZ), gadolinyum katkılı  $CeO_2$  ve (La, Sr) (Mg, Ga) $O_3$ (LSMG) için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak iletkenlik (Singhal, 2014)

YSZ, Şekil 1.6'da en düşük iyonik iletkenliği göstermesine rağmen, literatürde uzun vadeli stabilite sağladığı belirtilen tek materyaldir. Hücre çalışma koşulları altında 1000 °C'de yaklaşık 80.000 saate kadar çalışma ömrü öngörülmektedir.

### 1.1.2. Katot Malzemeleri

Katot malzemesi, O<sub>2</sub>'nin elektrokimyasal indirgenmesi sürecinde temel reaksiyonları ve birden fazla elektron transferini içerdiği için büyük bir öneme sahiptir. Katot malzemesinin, hücre üretimi ve hücre çalışma aşamalarında karşılaşılan çeşitli koşullar altında yüksek elektron iletkenliğine, kimyasal ve boyutsal stabiliteye, diğer hücre bileşenleri ile termal genleşme uyumuna, elektrolit ile minimum reaktiviteye ve uyumluluğa sahip olması gerekmektedir. Ek olarak, katotun ara bağlantı ile olan etkileşiminde oksijen molekülü ayrıştırma, oksijen indirgeme işlemlerinde yüksek katalitik aktivite göstermesi beklenmektedir.

Gaz fazındaki oksijenin, katot boyunca katot/elektrolit arayüzüne efektif bir şekilde dağılmasını sağlamak için, katodun dengeli bir şekilde gözenekli bir mikro yapıya sahip olması istenmektedir. Bu belirlenen elektrokimyasal ve mekanik kriterler, potansiyel aday materyallerin seçimini önemli derecede daraltmaktadır (Singhal, 2014).

### 1.1.3. Anot Malzemeleri

Anot, yakıtın oksidasyonu için mükemmel bir katalizör olup, indirgeyici bir ortamda kararlı olmalı, elektronik olarak iletken olmalı ve gaz türlerinin elektrolit / anot arayüzünde gerçekleşen yakıt oksidasyon reaksiyonuna giriş ve çıkışına izin verecek yeterli gözeneklilikte olmalıdır. Diğer kritik özellikler arasında, termal genleşme katsayısının elektrolit ve ara bağlantı malzemesiyle eşleşmesi, elektrolit ve ara bağlantı ile kimyasal istikrar ve farklı yakıtlar ile uyumluluk bulunmaktadır.

Maliyet, KOYH'lerin ticarileştirilmesinde anahtar bir faktördür. İlk KOYH çalışmalarında, anot malzemeleri kıymetli metaller (örneğin Pt ve Au) ve bazı geçiş metalleri (örneğin Fe ve Ni) üzerine odaklanmıştır. Ancak, bu malzemeler KOYH anot ihtiyaçlarını tam anlamıyla karşılamamıştır. Örneğin, Ni mükemmel bir katalizördür; fakat yüksek bir termal genleşme katsayısına ( $13.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) sahiptir ve tane büyümesine bağlı metalik kümelenme sonucu mikro yapı

kalınlaşması gösterir. Ni-YSZ kompoziti, nikel parçacıklarının sinterlenmesini engelleyebilir, efektif termal genleşme katsayısını azaltabilir ve anodun elektrolit ile daha iyi yapışmasını sağlayabilir. Bu sebeplerle, Ni-YSZ en yaygın kullanılan anot malzemesi olmuştur.

Ni-YSZ (İtriyum ile stabil hale getirilmiş zirkonya) anodunda nikel, hem hidrojen oksidasyonu için bir katalizör rolü oynar hem de elektrik akımını toplar. Ancak, metan gibi bir yakıtın kullanıldığı durumlarda, karbon birikintisi oluşabilir. Bu durum, metanın karbon oluşturma potansiyeli ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşen hızlı metan ayrışmasından kaynaklanır.

Bununla birlikte, zararlı karbon birikimini engellemek için, yüksek buhar-karbon oranları kullanılabilir. Bu, anot üzerindeki karbon birikimini azaltabilir ve nikel katalizörünün oksijen ile yeniden oksitlenmesini önleyerek, anodun uzun vadeli stabilitesini ve performansını koruyabilir. Yüksek buhar-karbon oranı, genellikle su buharı veya karbondioksit ile metanın reforme edilmesiyle elde edilir. Bu, karbon birikiminin önlendiği ve anodun performans ve ömrünün uzatıldığı bir prosedürdür.

#### **1.1.4. Sızdırmazlık Malzemeleri**

Sızdırmazlık malzemeleri, KOYH hücrelerinde kritik bir bileşendir. Etkili bir sızdırmazlık sağlamak için, sızdırmazlık malzemesinin çeşitli zor gereksinimleri karşılaması gerekmektedir:

- Termokimyasal stabilite: Sızdırmazlık malzemesi, hücrenin çalışma koşulları altında stabil olmalıdır.
- Elektriksel izolasyon: Sızdırmazlık malzemesi, elektrik akımını taşımamalıdır.
- Termal genleşme: Sızdırmazlık malzemesinin termal genleşme katsayısı, yakıt hücresi bileşenlerine uygun olmalıdır.
- Uyumluluk: Sızdırmazlık malzemesi, diğer hücre bileşenleriyle uyumlu olmalı ve hücre bileşenlerine zarar vermekten kaçınılmalıdır.

- Termal döngü dayanıklılığı: Sızdırmazlık malzemesi, hücre çalışma sıcaklığı ile oda sıcaklığı arasındaki termal döngülere dayanmalıdır.

Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla, cam-seramikler, lehimler, viskoz camlar kullanılarak ve sıkıştırıcı contalar oluşturularak çeşitli sızdırmazlık yaklaşımları geliştirilmiştir.

### **1.1.5. İnterkonnektör (Ara bağlantı) Malzemeleri**

Ara bağlantılar, hücreler arasında elektrik bağlantısı sağlar ve hava ile yakıtı birbirinden ayırır. Ara bağlantı malzemesinin tipik gereksinimleri şunları içerir:

- Yüksek elektronik iletkenlik ve düşük iyonik iletkenlik
- Kimyasal kararlılık hem yakıtta hem de havada
- Diğer hücre bileşenlerine uygun bir termal genleşme
- Yüksek mekanik dayanım
- Diğer hücre bileşenlerine göre yüksek termal iletkenlik ve kimyasal kararlılık

Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla, 1000 °C'ye kadar hücrelerde katkı lantan kromit, ara bağlantı malzemesi olarak tercih edilmektedir. Daha düşük sıcaklıklarda (800°C), oksidasyona dirençli metalik malzemeler, daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Metal alaşımlar, lantan kromit seramik bağlantılara kıyasla gelişmiş üretilebilirlik, önemli ölçüde daha düşük hammadde ve imalat maliyetleri ve daha yüksek termal iletkenlik gibi avantajlar sunabilir.

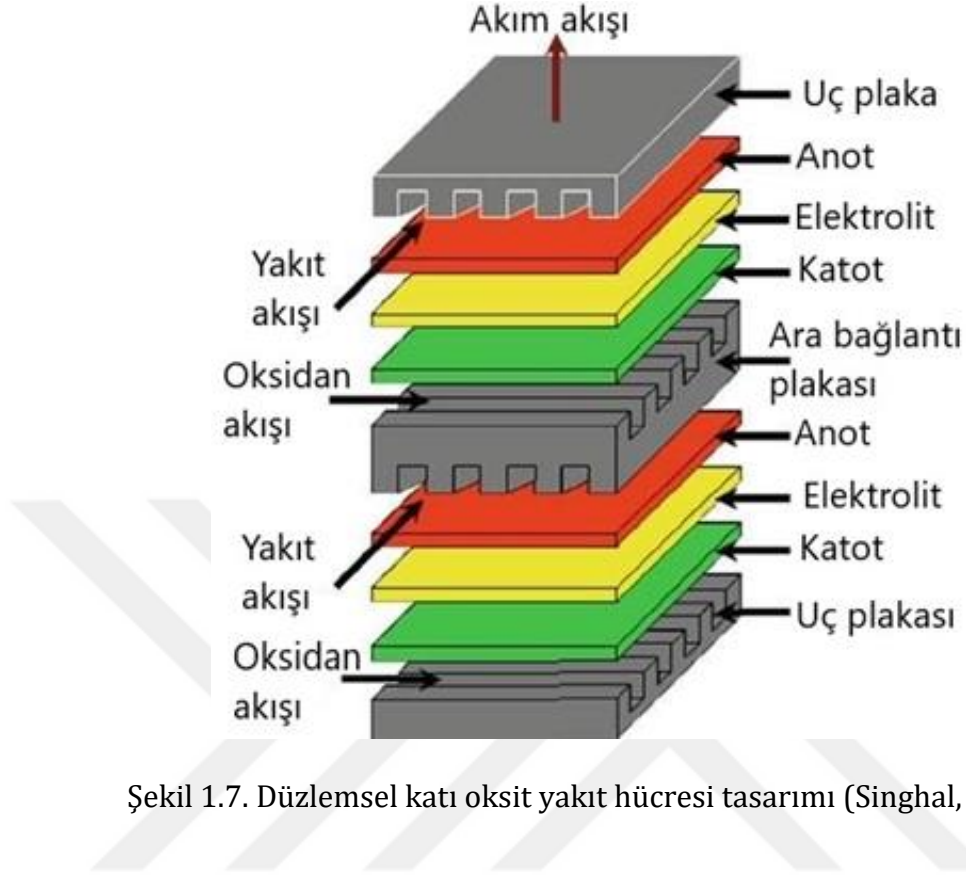
## **1.2. KOYH Tasarımı**

Katı oksit yakıt hücresi (KOYH) tasarımı genellikle düzlemsel veya boru şeklinde olabilir.

### **1.2.1. Düzlemsel KOYH Tasarımı**

Düzlemsel KOYH tasarımında, hücre bileşenleri ince, düz plakalar olarak yapılandırılır ve elektriksel olarak birbirine bağlanarak istenen elektrokimyasal

performansı oluşturur. Bu hücreler, elektrolit destekli, elektrot destekli veya metal destekli olabilir.



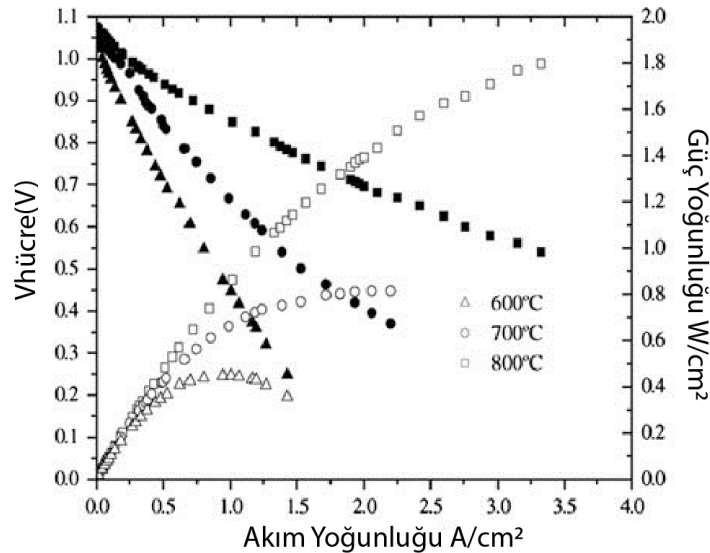
Şekil 1.7’de Düzlemsel katı oksit yakıt hücresi (KOYH) tasarımı, çeşitli varyasyonlara sahip olabilir. Örneğin, yakıtı merkezi eksenden alan dairesel bir disk şeklinde veya kenarlardan beslenen kare veya dikdörtgen bir plaka şeklinde olabilir. Bu tasarımlar genellikle daha basit ve daha ekonomiktir, ancak KOYH bileşenler arasında yüksek sıcaklıkta gaz sızdırmaz contalara ihtiyaç duyarlar; bu tür contalar boru şeklindeki hücreler için gerekli değildir.

Düzlemsel tasarımın bir diğer önemli özelliği, sızdırmazlık elemanlarının kullanımını en aza indirme, yakıt kullanımını iyileştirme, ısıl gerilmeleri azaltma ve akım dağılımını yönetme yeteneğidir. Bu, gaz akışı ve gaz manifoldu konfigürasyonu ile elde edilir ve ayrıca hücre kararlılığını iyileştirir. Düzlemsel tasarım genellikle her iki tarafta nervürlü olup, ara bağlantı, çapraz akış, ortak akış veya karşı akış konfigürasyonlarına izin verir (National Energy Technology Laboratory, 2005).

İlk düzlemsel KOYH tasarımları, genellikle 900°C'nin üzerinde bir çalışma sıcaklığı gerektiren kalın bir elektrolit kullanıyordu. Ancak, seramik işleme tekniklerindeki ilerlemeler sayesinde, bant dökümü, şerit kalenderleme, bulamaç sinterleme, serigrafi veya plazma püskürtme gibi düşük maliyetli yöntemlerle 10 mm veya daha ince elektrolitlerin üretilmesi mümkün hale geldi.

Sonuç olarak, anot destekli düzlemsel hücreler, uzun süreli operasyonlar için bir dizi geliştirici tarafından geniş çapta üretilmiş ve test edilmiştir. Anot destekli tek bir düzlemsel hücrenin elektrokimyasal performansı, 600°C, 700°C ve 800°C'de, 0.5 mm anot kalınlığı ve %57 gözeneklilik ile optimize edilmiştir. Anot ara katmanı yaklaşık 20 µm, elektrolit yaklaşık 8 µm ve katot ara katmanı yaklaşık 20 µm'dir. Nemlendirilmiş hidrojen ve hava akış hızları sırasıyla 300 ve 550 ml/dk idi.

Zhao ve Virkar (Zhao & Virkar, 2005), düzlemsel KOYH'lerin elektrokimyasal performansının, hücre malzemelerine, elektrot mikro yapılarına ve hücre geometrik parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu, 800°C'de 1,8 W/cm<sup>2</sup>'ye kadar yüksek güç yoğunluklarının mümkün olduğunu göstermiştir.



Şekil 1.8. 600, 700 ve 800 °C 'de ölçülen optimize edilmiş anot destekli tek hücre için elektrokimyasal performansı (Singhal, 2013)

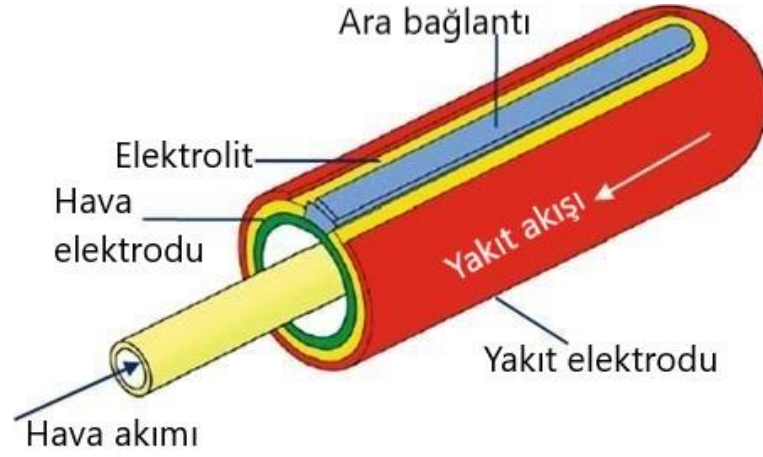
### 1.2.2. Borulu KOYH Tasarımı

Borulu KOYH'ler, büyük çaplı (15 mm üzeri) mikrotübüler hücreler ya da çok daha küçük çaplı (5 mm altı) hücreler olabilir. Bu tüpler, daha yüksek güç yoğunluğu sağlamak ve elektrot katmanlarının birikimini kolaylaştırmak amacıyla birbirine eklenir (Şekil 1.9).

Şekil 1.9' daki Siemens Westinghouse tasarımında gösterildiği üzere, tipik bir borulu KOYH'de, hücre tüpü, ekstrüzyon/sinterleme yöntemiyle üretilmiş gözenekli katkılı lantan manganittir ve bir ucu kapalıdır. Hücre bileşenleri; yoğun YSZ elektrolit, gözenekli Ni-YSZ anot ve katkılı lantan kromit ara bağlantısı, atmosferik plazma püskürtme ile ince tabakalar halinde biriktirilir.

Oksidan (hava veya oksijen) hücrenin çalışmasını sağlamak için alümina enjektör tüpünden hücreye verilir. Bu oksidan, hücrenin kapalı ucuna yakın bir alanda salınır ve hücre ile enjektör tüpü arasında oluşan dairesel boşlukta hareket eder. Yakıt, hücrenin dış kapalı ucundan içeri giriş yapar ve hücrenin elektrik üretim yapabilen açık ucuna ilerlerken elektrokimyasal olarak oksitlenir. Elektrokimyasal işlem sonrası hücrenin açık ucunda, oksijen seviyesi azalmış hava, hücreden dışarı atılır ve kısmen tükenmiş yakıtla birleşerek yanar.

Boru şeklindeki bir yakıt hücresinin (2,2 cm çap, 150 cm aktif uzunluk), %89 H<sub>2</sub> ile %11 H<sub>2</sub>O (%85 yakıt kullanımı) yakıtı ve oksidan olarak hava kullanıldığında 800, 900 ve 1000 °C'deki elektrokimyasal performansı Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu tür borulu hücreler, 1000 °C'de yaklaşık 0,2 W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğuna sahiptir.

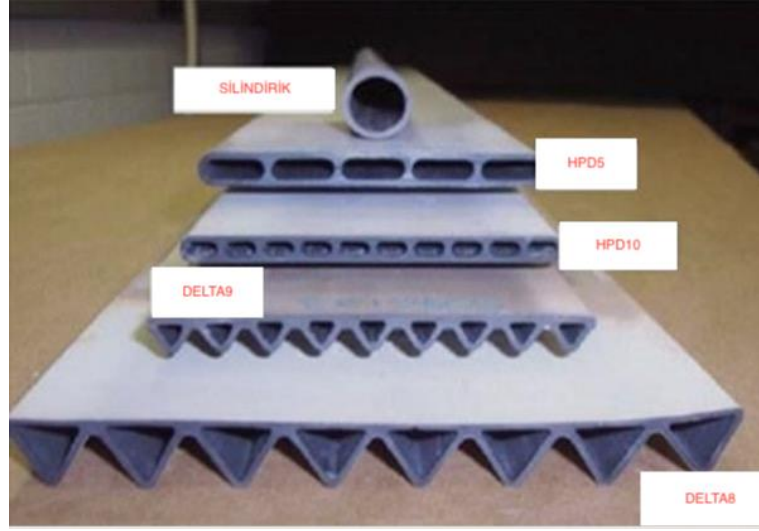


Şekil 1.9. Borulu katı oksit yakıt hücresi tasarımı (Singhal, 2013)

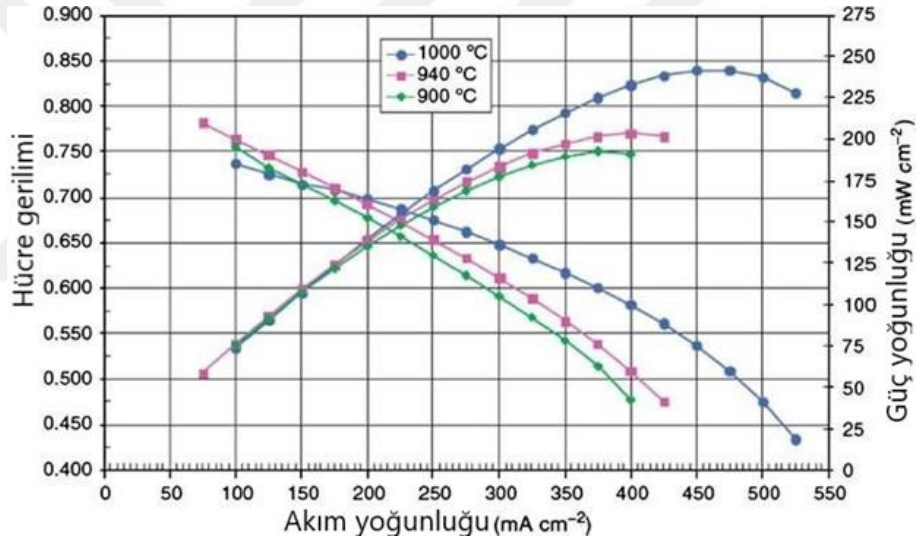
Borulu hücrelerin düzlemsel hücrelere karşı en büyük avantajı, oksidanı yakıttan izole etmek için yüksek sıcaklık contasına ihtiyaç duymamalarıdır. Bu özellik, boru şeklindeki hücre yığınlarının performansını uzun süreler boyunca (birkaç yıl) stabil hale getirir. Ancak, alan güç yoğunlukları düzlemsel hücrelere kıyasla çok daha düşük olup (yaklaşık  $0,2 \text{ W/cm}^2$ ), üretim maliyetleri daha yüksektir.

Güç yoğunluğunu artırmak ve boru şeklindeki KOYH yığınlarının fiziksel boyutunu ve maliyetini azaltmak için, alternatif boru şekilli geometri hücreler üzerinde çalışılmıştır. Şekil 1.10'da Siemens tarafından araştırılan bu tür tasarımların birkaçı gösterilmiştir.

KOYH'nin yapısal formuna bakılmaksızın, tek bir hücre genellikle 1 V'tan daha düşük bir voltaj üretir. Daha yüksek güç elde etmek için, tek hücreler seri bağlantı ile bir yığın oluşturur. Şekil 1.11'de boru şeklindeki bir KOYH'nin voltaj-akım yoğunluğu ve güç-akım yoğunluğu grafiği sunulmuştur.



Şekil 1.10. Siemens tarafından incelenen alternatif (Singhal, 2013)



Şekil 1.11. Boru şeklindeki bir KOYH'nin voltaj-akım yoğunluğu ve güç-akım yoğunluğu grafikleri (Singhal, 2014)

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde yakıt hücresi sayısal modellemesi ile ilgili çalışmalar aşağıda bahsedilmiştir.

Zhou vd. (2022), proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin (PDMYH) performansını artırmayı hedefleyen bir araştırma yapmışlar ve optimize edilmiş bir akış alanı yapısı tasarlamışlardır (Zhou Y. , ve diğerleri, 2022). Çalışmada, karşıt sinüzoidal dalga akış kanalı kullanmanın, hücrenin kütle transferi ve su giderme kapasitesini artırdığı gösterilmiştir. Bu yeni yaklaşımın, standart düz kanallardan önemli ölçüde daha yüksek bir net güç yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. İlginç bir şekilde, drenaj periyodu açısından da avantajlı olduğu tespit edilmiştir: sinüzoidal dalga kanalının drenaj süresi, düz kanala kıyasla yarıya indirilmiştir. Bu sonuçlar, yeni akış kanalı tasarımının önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Lu vd. (2022), yakıt hücrelerinin performansını iyileştirmek için katot giriş havasının nemlendirilmesinin rolünü araştırmışlar ve akış kanalı geometrisinin su taşıma kapasitesi ve basınç kaybı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışma, akış kanallarının farklı enine kesit şekillerinin - eşkenar üçgen, ikizkenar üçgen, kare, dikdörtgen ve yarım daire - su taşıma kapasitesine ve basınç kaybına olan etkilerini ortaya koymuştur. Bu çerçevede, ağırlık merkezi yüksekliği, çevre ve hidrolik çap gibi geometrik faktörler dikkate alınmıştır. Sonuçlar, akış kanalı kesitinin ağırlık merkezi yüksekliği ve su taşıma performansı arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir (Lu, ve diğerleri, 2022).

Zhou vd., akış kanallarının optimize edilmesinin, su-gaz taşıma yeteneğini artırarak proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin (PDMYH) performansını yükseltmede kritik bir faktör olduğunu vurgulamıştır. Bu bağlamda, ters sinüzoidal dalga akış kanalının (TSDAK) boyutsal oranı üzerinde iyileştirmeler yapılmış ve bu değişikliklerin etkisini değerlendirmek üzere üç boyutlu nümerik modeller kullanılmıştır.

Sonuçlarda, TSDAK' ların paralel akış kanalına kıyasla performans artışı elde ettiğini göstermektedir. 1:1 dalga kanalı, en sık akış bozukluğu nedeniyle kütle transfer kapasitesinde maksimum %19,53'lük bir iyileşmeye sahipken, yumuşak dalga yapısı sayesinde 1:3'lük su giderme performansında maksimum %37,5'lik bir artışa sahip olduğunu göstermişlerdir (Zhou, ve diğerleri, 2023).

Zhou vd. (2023), kütle transferi ve su giderme kapasitesini iyileştirerek PDMYH'nin performansını artırmak için katot akış alanını optimize etmişler ve performansını değerlendirmek için üç boyutlu, iki fazlı, izotermal sayısal bir model oluşturmuşlardır. Ek olarak, simülasyon sonuçlarını doğrulamak için görselleştirme deneyi yapmışlardır. Tek girişli, çift girişli ve bloğa sahip zıt sinüzoidal dalga akış alanlarının (ZSDAA'lar), paralel akış alanlarına (PAA'lar) kıyasla sırasıyla %6,86, %1,26 ve %2,31 performans artışı sağladığını göstermişlerdir. Bunlar arasında, bloklu çift girişli ZSDAA'nın, PAA'ya kıyasla 2,2 A cm<sup>-2</sup>'de %9,30'luk bir artışla performans artışı sağladığı için en iyi olduğunu belirtmişlerdir (Zhou, Zhou, Chen, Zhang, & Tu, 2023).

Yahya vd. (2023), bir katı oksit yakıt hücresinin (KOYH) performansını incelemek amacıyla nümerik bir model oluşturmuşlardır. Bu model, kısmi tıkanıklığa uğramış kanal içerisindeki gaz hareketini ve gözenekli elektrot içinde meydana gelen konsantrasyon polarizasyonunu kafes tabanlı Boltzmann yöntemi aracılığıyla incelenmektedir. Araştırmacılar, kanal blokajının, gaz ilerlemesini hızlandırdığını ve KOYH'nin performansını iyileştirdiğini bulmuşlardır. Özellikle, belirli bir blokaj düzeyinin (%90, beş blok) güç yoğunluğunu %14,4 oranında artırdığı gösterilmiştir (Yahya, Naji, & Dhahri, 2023).

Literatürde bulunan önceki çalışmalarda kare geometride katot ve anot akış kanallarına sahip KOYH'nin performansı sayısal ve deneysel olarak incelenirken bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yatay ve dikey sinusoidal geometride katot ve anot akış kanallarına sahip KOYH'nin performansı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın literatürden diğer bir farkı da literatürde

sinüzoidal akış kanalları kullanılarak performansının iyileştirildiği proton değişim membranlı yakıt hücresi (PDMYH) ile ilgili çalışmalara rastlanılmıştır. Katı oksit yakıt hücresinde sinüzoidal akış kanallarının kullanılarak yakıt hücresi performansının incelendiği çalışmalara literatürde rastlanılmamıştır. Ayrıca, kullanılan sayısal modelin deneysel doğrulaması referans alınan kare kanallara sahip KOYH'nin performansını inceleyen çalışmadan elde edilen datalarla yapılmıştır. İlave ten bu çalışmada, farklı anot ve katot malzeme konfigürasyonları, farklı gaz akış debileri ve yakıt hücresi çalışma sıcaklıkları için katı oksit yakıt hücresinin performansı sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ortalama akım yoğunluğu ve hücre güç yoğunluğu açısından en etkili dizayn ve çalışma parametreleri belirlenmiştir. Çalışmanın özgünlüğü özgün kanal geometrilerinde literatürde daha önce incelenmeyen anot ve katot malzeme konfigürasyonlarında, farklı gaz akış debileri ve çalışma sıcaklıkları için katı oksit yakıt hücresinin performansının incelenmesidir. Çalışmanın diğ er bir özgünlüğü de katı oksit yakıt hücresinin performansının bu kadar geniş kapsamlı bir deney matrisinde sayısal olarak incelenerek interkonnektör tasarım ve operasyon parametreleri açısından katı oksit yakıt hücresi performansının geliştirilmesidir.

Machaj vd. (2023), KOYH'lerin (Katı Oksit Yakıt Hücreleri) performansı üzerinde yakıt elektrodundaki mikroyapısal özelliklerin önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Makalenin amacı, anod fonksiyonel katmanı (AFL) ve anod destek katmanı (ASL) mikro yapısının, yakıt hücresinin performansına nasıl etki ettiğini belirlemektir. Yazarlar, anod katmanlarının gözeneklilik oranını %30 artırmanın, hücre verimliliğinde %15'e kadar bir artışa izin verdiğini tespit etmişlerdir. Bu çalışma, KOYH'lerin verimliliğini ve ömrünü artıracak potansiyel mikro yapısal değişiklikleri belirlemeye yardımcı olabilir (Machaj, ve diğ erleri, 2023).

Miura vd. (2023), otomotiv KOYH'lerin mekanik dayanıklılığını, düşük sıcaklıklarda enerji üretimini ve sistem kompaktlığını artırmaya yönelik bir girişimde bulunmuştur. Yazarlar, nikel/gadolinium-doteli ceria (Ni/GDC) nanopartiküllerini kullanarak, 600 °C'de 1.16 Wcm<sup>-2</sup>'ye kadar bir güç yoğunluğu elde etmişlerdir. Bu çalışma, metal destekli KOYH'lerin verimliliğini artırmada

katalizör sızdırmazlığının önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir (Miura, ve diğerleri, 2023).

Xia vd. (2023), bir KOYH'nin performansını ve dayanıklılığını iyileştirebilecek bir RTFF'nin (Üç Boyutlu Reticulated Trapezoidal Flow Field) karmaşıklığını ele almıştır. Yazarlar, net güç yoğunluğunu ve oksijen eşitliğini en üst düzeye çıkarmak için bir ANN (Artificial Neural Network) ve NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) kullanan bir optimizasyon çerçevesi geliştirmişlerdir. Bu çalışma, gelecek nesil KOYH akış alanının geliştirilmesi için verimli bir tasarım yöntemi sağlamaktadır (Xia, Khosravi, Han, & Sun, 2023).

Li vd. (2023), akış alanlarının tasarımının, KOYH'lerin iç dağıtım eşitliği ve genel güç çıktısı için hayati bir öneme sahip olduğunu belirtmektedir. Bu çalışma, düzlem KOYH'lerin performansını geliştirmek için potansiyel bir yol sunmaktadır (Li, ve diğerleri, 2022).

Ghorbani ve Vijayaraghavan (2022), yüksek sıcaklıkta çalışan KOYH'lerde hidrojen açılığının tahmin edilmesi için bir sanal hidrojen sensörü geliştirilmiştir. Bu çalışma, K-En Yakın Komşu (KNN) ve Yapay Sinir Ağı (ANN) ikili sınıflandırıcılarının hidrojen açılığını tahmin etmede Naive Bayes ve Lojistik Regresyon'dan daha üstün olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, gelecekteki hidrojen açılığı tahminlerini daha doğru hale getirmek için bu tür bir sınıflandırıcıların kullanılmasını teşvik eder (Ghorbani & Vijayaraghavan, 2020).

Kim vd. (2019), doğrudan alevli yakıt hücreleri (DFFC) için iki boyutlu bir sayısal model geliştirilmiştir. Model, DFFC'lerin çapları büyüdükçe sıcaklık, tür ve voltajın radyal dağılımlarının daha fazla önem kazandığını göstermiştir. Özellikle, büyük çaplı bir KOYH'deki (Katı Oksit Yakıt Hücresi) maksimum güç yoğunluğu, küçük çaplı bir KOYH'ye göre %25-30 daha düşük bulunmuştur (Kim, Tyagi, & Kim, 2019).

Kümük vd. (2022), hidrojen ve kömür gazı ile beslenen katı oksit yakıt hücrelerinin (KOYH) performansını etkileyen iyon geçişi tipi incelenmiştir.

Proton ileten bir KOYH'nin (KOYH-H) performansı, oksijen ileten bir KOYH'ye (KOYH-O) kıyasla 800 °C'de daha düşük bulunmuştur. Ancak, daha yüksek işletme sıcaklıklarında (1000 °C) KOYH-H, KOYH-O'ya göre daha avantajlı bulunmuştur (Kumuk, Alemu, & Ilbas, 2022).

İlbaş ve Kümük (2020), düşük kalorifer değerli kömür gazları ile çalışan bir katı oksit yakıt hücresi (KOYH) modelinin analizi yapılmıştır. Katot destekli KOYH'nin (CSKOYH) performansının, tüm incelenen yakıtlar için elektrolit destekli KOYH'den (ES-KOYH) daha yüksek olduğu bulunmuştur (İlbaş & Kümük, 2020).

Wang vd. (2022), gliserol ile beslenen bir KOYH'nin sayısal modeli geliştirilmiştir. Çalışmada, model, 1073 K'de %49 gliserol dönüşüm oranı ile 7827 A m<sup>-2</sup> performans göstermiştir (Wang, ve diğerleri, 2022).

Tan vd. (2023), elektrodun aktif kalınlığını temsil etmek için bir yük-transfer akım yoğunluğu modeli kullanan üç boyutlu KOYH modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, anodun kalınlığı arttıkça KOYH'nin performansının azaldığını göstermiştir (Tan, Lim, Rahman, Samat, & Oon, 2023).

Settar vd. (2018), katı oksit yakıt hücresi (KOYH) için hidrojen sağlamak amacıyla duvar buhar-metan reformeri (WCR) içindeki metanın (CH<sub>4</sub>) buhar reformu performansı incelenmiştir. Yapılan çeşitli tasarım denemelerinde, en verimsiz katalizör tasarımına kıyasla, CH<sub>4</sub> dönüşüm oranının %31 arttığı ve bu durumun H<sub>2</sub> üretiminde %95.8'lik bir artışa denk geldiği bulunmuştur (Settar, Lebaal, & Abboudi, 2018).

Kupecki vd. (2019), oksidant kaybıyla ilgili hata durumları altında 1000 W sınıfı bir KOYH yığınının sayısal analizi sunulmuştur. Çalışmada, hücrelerin pasifleşmesi ve oksidant akışındaki aniden azalma gibi durumlar ele alınmış ve hata önleme kontrol modülleri dahil ve dahil olmadan iki farklı senaryo analiz edilmiştir. Kontrol sisteminin aktif olduğu durumda, işletme parametrelerinin ayarlanması, yığın içindeki termal gradyanın hızla artmasını etkin bir şekilde sınırlayabilirken, kontrollerin devre dışı bırakıldığı durumda, bu durumların

yığın üzerindeki olumsuz etkileri daha belirgin hale gelmiştir (Kupecki, Motylinski, Zurawska, Kosiorek, & Ajdys, 2019).

Corigliano ve Fragiaco (2020), farklı bileşimlere sahip syngas ile doğrudan beslenen KOYH'nin teknik-enerji performansının kapsamlı bir analizi sunulmuştur. Modelleme, Hidrojen ve karbon monoksit'in bir arada elektrokimyasal süreçlerini ve dahili termokimyasal süreçlerin kinetiğini dikkate alır. Çalışma sonucunda, yüksek kaliteli syngaslar için elektrik verimliliğinin yaklaşık %45-50 arasında, daha düşük kaliteli olanlar için ise %30 civarında olduğu belirlenmiştir (Corigliano & Fragiaco, 2020).

Zhao vd. (2020), dış manifoldlu bir katı oksit yakıt hücresi (KOYH) yığınının manifold tasarımını ve akış homojenliğini sayısal modelleme ve deneysel ölçümlerle incelemiştir. Analiz sonuçları, kanalda gaz direncinin akış homojenliğini iyileştirebileceğini, ancak bu etkinin yüksek kütle akış hızında sınırlı olduğunu göstermiştir. Giriş tüpünün çapı arttıkça, akış homojenliği yavaşça iyileşirken, çıkış tüpünün daha büyük çapı, basınç düşüşünü etkin bir şekilde azaltır. Çalışma, geometrik parametrelerin gaz akışı üzerindeki önemini vurgular ve dış manifoldlu KOYH yığını için optimize stratejiler sağlar (Zhao, ve diğerleri, 2020).

Chaudhary vd. (2019), bir tekil katı oksit yakıt hücresi üzerinde elektrokimyasal reaksiyon akışlarının ısı transferi ve termal etkilerle nasıl etkileşime girdiğini incelemiştir. Modelleme sonucunda elde edilen veriler, yakıt hücresinin elektrokimyasal ve termal karakteristiklerinin sıcaklık değişimlerine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Akım yoğunluğu ve termal gerilme farklılıkları, elektrolit malzemenin iyonik iletkenliğinin sıcaklığa olan güçlü bağımlılığı nedeniyle %20 kadar daha büyüktür. Ayrıca, çalışmada yüksek işlem voltajının termal gerilime fayda sağladığı, hücrenin 0.5 V'den 0.7 V'a çalışırken %20 azaldığı belirlenmiştir (Chaudhary, Saleem, & Chen, 2019)

Chellehbari vd. (2021), KOYH'nin performansını incelemek amacıyla üç boyutlu nümerik bir model sunmuşlardır. Bu çalışma, değişken şekil ve engel sayısının yakıt hücresinin tepkileri üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu araştırmıştır. Yedi adet üçgen engel kullanıldığında ortalama akım yoğunluğunun (KOYH

performansı) %15 arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Yakıt hücresi gücü, direkt akış kanallarına sahip bir hücreye kıyasla yaklaşık %35 artmıştır (Chellehbari, Adavi, Amin, & Zendejboudi, 2021).

Cimen vd. (2023), düz tüp geometrisinde oluşturulan bir KOYH üzerinde elektrot ve elektrolit katmanlarının performansa etkisini parametrik olarak incelemiştir. Yapılan incelemelerde, elektrot katmanlarının 0.75 mm, 0.5 mm ve 0.25 mm olacak şekilde üç farklı kalınlığında; elektrolit katmanlarının ise 1.25 mm, 1 mm ve 0.75 mm olacak şekilde üç ayrı kalınlığında performans değerleri değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, en yüksek hücre gücü, anot katman kalınlığının 0.25 mm olduğu durumda elde edilmiştir. FT-KOYH'nin maksimum tahmin edilen ortalama hücre gücü, 1273 K işletme sıcaklığı için yaklaşık 68.2 mW/cm<sup>2</sup>'dir (Cimen, Ilbas, & Yalcin, 2023).

He vd.(2020), H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> yardımcılığıyla tüplü direkt karbon katı oksit yakıt hücresi (DC-KOYH) içindeki termal etkileri sayısal olarak incelemiştir. H<sub>2</sub>O'nun gazlaştırma ajanı olarak kullanıldığı yakıt hücresinin, CO<sub>2</sub>'nin gazlaştırma ajanı olarak kullanıldığı hücreden tüm durumlarda çok daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur (He, ve diğerleri, 2020).

Bakala vd. (2023), 10 kW KOYH kurulumunun sayısal modelini analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında doğal gaz, hidrojen ve amonyak kullanılan sistemler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, anod-off gaz geri dönüşünün, her bir yakıt çeşidi için sistemin elektriksel ve genel verimini yükselttiğini göstermiştir. Amonyakla çalışan birimler, hidrojen tabanlı sistemden (%47.6) daha yüksek elektrik verimliliği (%55) elde ederken, doğal gazla çalışan sistemlerden (%61.8) daha düşük verimlilik göstermiştir (Bakała, Martsinchyk, Motyliński, Kupecki, & Machaj, 2023).

Schluckner vd. (2019), özellikle KOYH hücrelerinin uzun süreli ve istikrarlı çalışmasını sağlamak için sıcaklık dağılımının homojenliğinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmaları, farklı akış konfigürasyonlarının ve elektriksel temas noktalarının yerleşiminin, KOYH hücrelerinin sıcaklık profili ve akım yoğunluğu

dağılımı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, karşı akış konfigürasyonu ve elektrotların giriş tarafına yerleştirilmiş elektriksel temasların, hücre boyunca en homojen akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımını sağladığını bulmuşlardır (Schluckner, Subotić, Preißl, & Hochenauer, 2019).

Ghorbani ve Vijayaraghavan (2019), hidrojenle çalışan KOYH'lerin çok fizyokimyasal fenomenleri incelemek için yazılım paketlerinin kullanımındaki artan talep nedeniyle, bu sistemlerin sayısal yazılım tabanlı modellenmesi üzerine kapsamlı bir inceleme sağlamışlardır. Yazılım setlerinin tanımlanmasında, her bir setin öncü tasarım ve modellemeleri, literatürde var olan eksikliklere dikkat çekmekte, sayısal model oluştururken göz önünde bulundurulması gereken hususlara değinmekte ve sektörde daha ileri adımlar atabilmek adına tavsiyeler sunmaktadırlar.

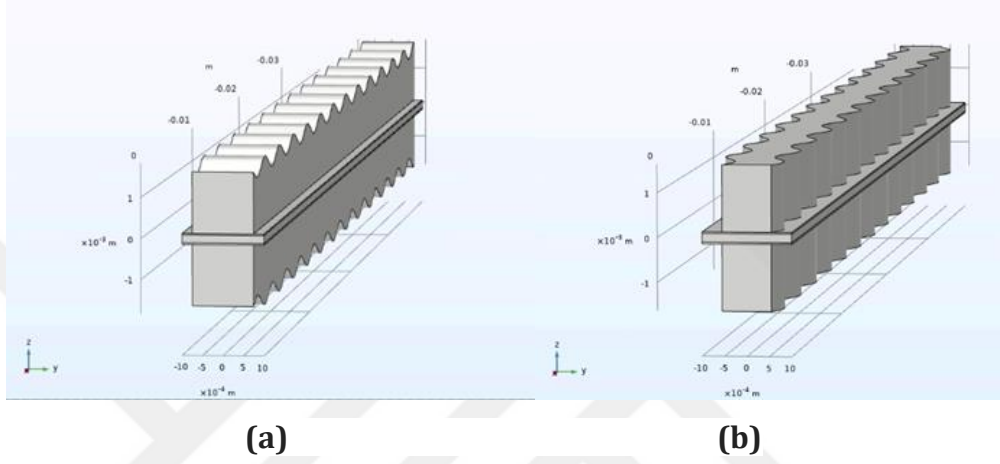
Kümük ve İlbash (2021), elektrolit destekli bir KOYH (ES-KOYH) mekanizmasında hidrojen, jeneratör gazı (12% H<sub>2</sub> kapsayan) ve su gazı (50% H<sub>2</sub> kapsayan) kullanarak yakıt hücresi performansını deneysel metotlarla değerlendirmişlerdir. Sıcaklık artışının reaksiyonlar üzerinde olumlu etkileri olduğu ve KOYH'nin performansını artırdığı sonucuna varmışlardır (Ghorbani & Vijayaraghavan, A review study on software-based modeling of hydrogen-fueled solid oxide fuel cells, 2019).

Chelmehsara ve Mahmoudimehr (2018), self-supported KOYH'ler (anod-destekli, katod-destekli ve elektrolit-destekli KOYH'ler) teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, anod-destekli KOYH'nin, iki hedef işlev arasında en iyi dengeyi sağladığı görülmüştür (Chelmehsara & Mahmoudimehr, 2018).

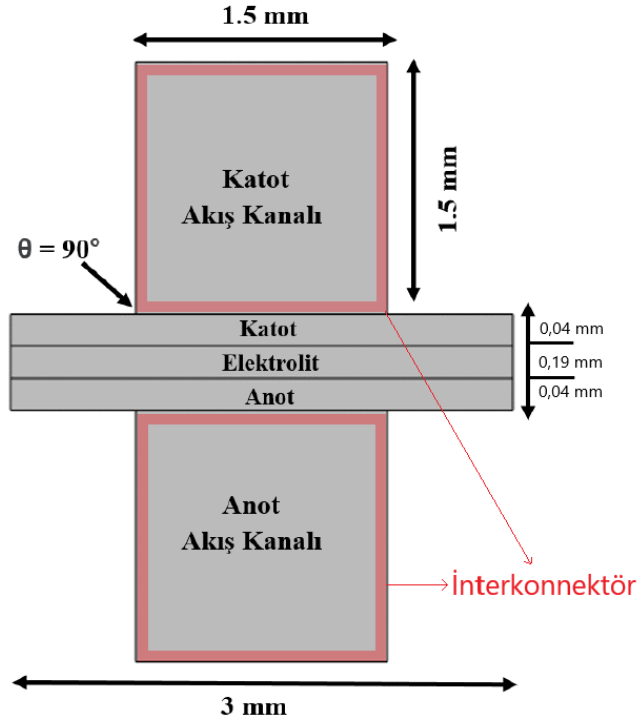
Yukarıdaki çalışmalardan elde edilen bilgiler, KOYH'lerin performansını ve verimliliğini artırmada farklı stratejilerin ve parametrelerin önemini vurgulamaktadır. Bu araştırmalar, KOYH teknolojisinin geliştirilmesi ve optimize edilmesi için değerli içgörüler sağlamaktadır.

### 3. MATERYAL VE METHOD

KOYH tasarımı, SOLIDWORKS 3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 3.1). İnterkonektör akış kanalının boyutları  $1.5 \times 1.5$  mm olarak seçildi. Elektrot ve elektrolit kalınlıkları için boyutlar sırasıyla 0.04 ve 0.19 mm olarak seçildi (Şekil 3.2).

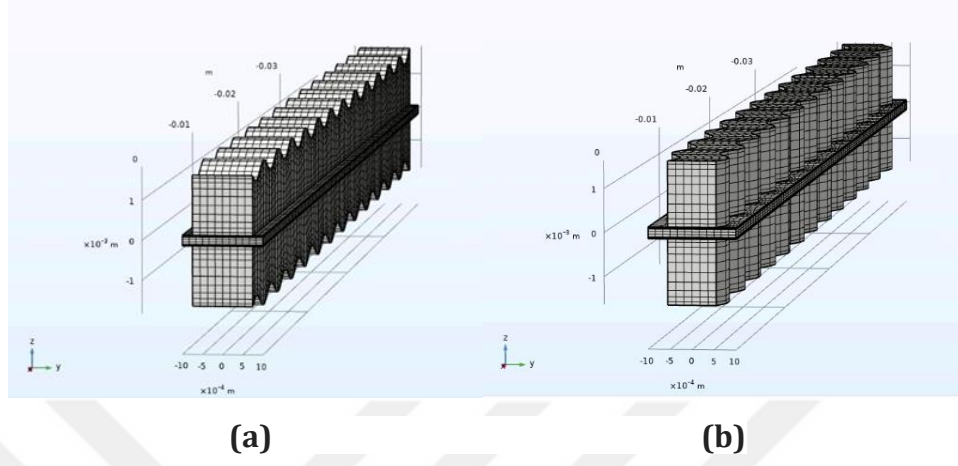


Şekil 3.1. (a) Dikey ve (b) Yatay sinüzoidal akış kanallarına sahip KOYH.



Şekil 3.2. İncelenen KOYH modeli boyutları

Yakıt hücresinin sayısal mesh yapısı, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, iki elektrot, bir elektrolit ve yakıt ve oksidan gazları sağlamak için iki akış kanalından oluşmaktadır.



Şekil 3.3. (a) Dikey ve (b) yatay sinüzoidal kanallara sahip KOYH'nin sayısal ağ yapısı görünümü

Sayısal modelleme, farklı mesh yoğunlukları kullanılarak gerçekleştirildi. Ancak, sonuçlar önemli ölçüde değişmedi. Tüm analizler için mesh elemanı sayısı, standart formül olan maksimum eleman sayısı = gaz akış kanalı genişliği / 8, kullanılarak belirlendi. Analiz, 33,277 mesh elemanı sayısı ile gerçekleştirildi ve farklı mesh elemanı sayıları kullanılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ortalama akım yoğunluğu, birim alandaki toplam elektron akışını ifade eder.

Çizelge 3.1. Sayısal ağ eleman sayısı optimizasyonu

Analiz No	Maksimum Eleman Sayısı	Sınır Eleman Sayısı	Kenar Eleman Sayısı	Ortalama Akım Yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )
1	21,760	10,304	1,524	1,736.83
2	33,277	14,318	1,968	1,733.87
3	51,992	19,804	2,428	1,738.79
4	88,440	26,244	2,516	1,739.50

Reaktif gaz karışımındaki herhangi bir maddenin kütledeki değişim Denklem (3.1)' deki denklem ile bulunabilir:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{U}) = K_m \quad (3.1)$$

Burada,  $\partial(\varepsilon\rho)/\partial t$  terimi, iç enerji ( $\varepsilon$ ) ve yoğunluğun ( $\rho$ ) çarpımındaki zamanla değişim hızını belirtir. Bu, maddenin birim hacmindaki enerji varyasyonunun iç enerjiye göre anlaşılmasını sağlar.  $\nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{U})$  terimi, yoğunluk, iç enerji ve hız vektörünün ( $\vec{U}$ ), çarpımının mekansal dağılımını ifade eder, bu da iç enerji ve yoğunluk tarafından birim alana taşınan enerji miktarını gösterir.  $K_m$  terimi, mekanik enerji kaynağını veya enerji transferinin diğer biçimlerini temsil eder, enerjinin aktarıldığı mekanizmaları açıklar. Bu denklemler bir sistemin iç enerji işlevi ve değişim yöntemi hakkında kapsamlı bir bakış sağlar.

Sistemdeki konsantrasyon, karışım yoğunluğunu etkilemektedir. Bu, aşağıda detaylandırılmıştır:

$$\rho = \sum \rho_i c_i = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2 + \dots + \rho_n c_n \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de,  $c_i$  konsantrasyonu gösterir. İdeal bir gaz için, yoğunluk şu şekilde hesaplanabilir:

$$\rho_i = \frac{P_i}{R_i T} \quad (3.3)$$

Burada,  $P_i$ ,  $R_i$ , ve  $T$  sırasıyla statik basınç, evrensel gaz sabiti ve sıcaklığı temsil eder.

Malzeme dengesi, difüzyon ve konsantrasyon tarafından etkilenir ve bu nedenle süreklilik denkleminde ek olarak difüzyon eklenir. Bu, Denklem (3.4) ile ifade edilebilir:

$$\frac{\partial(\rho_i \varepsilon c_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \varepsilon \vec{U} c_i) = -\nabla \cdot \varepsilon \vec{J}_i + K_{t,i} \quad (3.4)$$

Burada,  $\vec{J}_i$  ve  $K_{t,i}$  sırasıyla ilgili türlerin difüzyonunu ve mevcut yoğunluğa orantılı ek kaynakları temsil eder. Bu nedenle,  $K_{t,i}$  aşağıdaki gibi verilebilir:

$$K_{t,i} = i \frac{M_i}{nF} \quad (3.5)$$

Burada,  $i$  mevcut yoğunluğu temsil eder, bu da moleküler ağırlık ( $M_i$ ), reaksiyondaki elektron sayısı ( $n$ ) ve Faraday sabiti ( $F$ ) ile ilişkilidir.

Eğer akış modeli önceden bilinmiyorsa, momentum denklemi kütle korunumu ile birlikte kullanılır ve hız ve konsantrasyon profilleri oluşturulur. Bu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon\vec{U}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\vec{U}\vec{U}_k) = \rho\varepsilon\vec{g}_k - \frac{\partial(\varepsilon P)}{\partial x_k} + \frac{\varepsilon^2\mu\vec{U}_k}{\zeta} \quad (3.6)$$

Burada,  $\vec{g}_k$ ,  $\mu$ , ve  $\zeta$  sırasıyla yerçekimi ivmesi, viskozite ve geçirgenliği temsil eder. Şarj dengesi denklemleri Ohm Kanunu ile ifade edilir:

$$J = \sigma \nabla \phi \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = K_y \quad (3.8)$$

Burada,  $\sigma$  iletkenliği,  $\phi$  ise elektrik potansiyelini temsil etmektedir. Denklem (3.8),  $\rho_e$ 'nin iyonik veya elektronik yük yoğunluğunu göstermektedir;  $K_y$  ise ek yük kaynaklarına karşılık gelmektedir.  $K_y$  terimi, sadece üç fazlı sınırlar dahilindeki belirli bölgede tanımlanan mevcut yoğunluğu ifade eder. Elektrotlarda iki tür iletkenlik bulunmaktadır: iyonik ve elektronik. Şarj dengesi aşağıda sunulmuştur:

$$\vec{J}_{ion} = \vec{J}_{elec} \quad (3.9)$$

Enerji dengesi denklemi, sıcaklık dağılımı ve yerel ısı akışının belirlenmesi amacıyla Denklem (3.10)'da gösterildiği üzere kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon C_p T \vec{U}) = \nabla \cdot \varepsilon(\lambda \nabla T) + Q + \frac{\partial P}{\partial t} + Q_{vis} + W^v + E^k \quad (3.10)$$

Burada,  $C_p$ ,  $\lambda$ ,  $Q$ ,  $Q_{vis}$ ,  $W^v$ , ve  $E^k$  sırasıyla özgül ısı, termal iletkenlik, viskoz olmayan hacimsel ısı üretimi, viskoz hacimsel ısı üretimi, viskoz iş ve türbülanslı kinetik enerjiyi gösterir.

Elektrokimyasal model aşağıda verilmiştir:



Nernst denklemi, Denklem (3.13) olarak gösterilmiştir ve KOYH performansının değerlendirilmesini, elektrotların termodinamik özelliklerinin belirlenmesini ve hücrenin teorik maksimum voltajının tanımlanmasını kolaylaştırır. Bu voltajın hesaplanması, hücre içindeki belirli bileşenlerin kısmi basınçlarına, örneğin oksijen, hidrojen ve buharın kısmi basınçlarına dayandırılmıştır. Nernst denklemlerinin dahil edilmesiyle, modelin doğruluğu ve güvenilirliği önemli ölçüde artırılmış olup, elektrot tepkimelerinin tahmin edilmesi ve genel hücre performansının optimize edilmesi yeteneği güçlendirilmiştir.

$$E = E^{\circ} - \left(\frac{RT}{nF}\right) \cdot \ln(Q) \quad (3.13)$$

Denklem (3.13), termodinamik denge durumunda bir elektrokimyasal hücrenin potansiyelini (E) hesaplamak için kullanılır. Bu denklem, standart elektromotor kuvveti ( $E^{\circ}$ ), gaz katsayısı (R), termal sıcaklık (T), geçen elektron miktarı (n), Faraday katsayısı (F) ve reaksiyon oranı (K) göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

Bu çalışmada, farklı parametreler kullanılarak 18 farklı sayısal analiz senaryosu gerçekleştirildi. Senaryoların detayları Çizelge 3.2'de listelenmiştir.

Çizelge 3.2. Analizlerde Kullanılan Malzeme ve Geometriler

	Anot Malzeme	Katot Malzeme	Elektrolit Malzeme	İnterkonnektör Malzeme	Anot Bölgesi Hidrojen Akış Hızı (SCCM) santimetre-küp/dakika	Katot Bölgesi Oksijen Akış Hızı (SCCM) santimetre-küp/dakika
1	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Standart Prizma	69	23
2	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Yatay Sinüzoidal	69	23
3	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Dikey Sinüzoidal	69	23
4	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Standart Prizma	86.5	28.75
5	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Yatay Sinüzoidal	86.5	28.75
6	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Dikey Sinüzoidal	86.5	28.75
7	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Standart Prizma	51.75	17.25
8	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Yatay Sinüzoidal	51.75	17.25
9	NiO/YSZ	LSM/YSZ	YSZ	Dikey Sinüzoidal	51.75	17.25
10	NiO	LSCF	YSZ	Standart Prizma	69	23
11	NiO	LSCF	YSZ	Yatay Sinüzoidal	69	23
12	NiO	LSCF	YSZ	Dikey Sinüzoidal	69	23
13	NiO	LSCF	YSZ	Standart Prizma	86.5	28.75
14	NiO	LSCF	YSZ	Yatay Sinüzoidal	86.5	28.75
15	NiO	LSCF	YSZ	Dikey Sinüzoidal	86.5	28.75
16	NiO	LSCF	YSZ	Standart Prizma	51.75	17.25
17	NiO	LSCF	YSZ	Yatay Sinüzoidal	51.75	17.25
18	NiO	LSCF	YSZ	Dikey Sinüzoidal	51.75	17.25

SCCM, Standart santimetre-küp/dakika; LSCF, lanthanum strontium cobalt ferrite; YSZ, yttria-stabilized zirconia; LSM, Lanthanum Strontium Manganite

Her durum, bu üç işletme sıcaklığı (600-800-1000 °C) kullanılarak değerlendirildi.

Bu çalışmada, sayısal analizler COMSOL yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Sayısal analizler için kullanılan parametreler, özelliklerdeki aralığı göstermek için iki referans çalışmada kullanılan parametrelerle birlikte Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sayısal Analizlerde Kullanılan Parametreler ve Değerleri

Parametreler	Bu Çalışma	Ranasinghe (Ranasinghe & Middleton, 2017)	Uçar (Uçar, 2020)
Çalışma Basıncı (Pa)	$1.013 \times 10^5$	$1.013 \times 10^5$	$1.0133 \times 10^5$
Çalışma Sıcaklığı (°C)	600, 800, 1000	700	800
Havanın Viskozitesi (Pa s)	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
Anotta Basınç Düşüşü (Pa)	2	2	2
Katotta Basınç Düşüşü (Pa)	6	6	6
Molar Kütle H <sub>2</sub> (g/mol)	2	2	2
Molar Kütle O <sub>2</sub> (g/mol)	32	32	32
Molar Kütle N <sub>2</sub> (g/mol)	28	14	28
Molar Kütle H <sub>2</sub> O (g/mol)	18	18	18
J <sub>0,katot</sub> (A/m <sup>2</sup> )	0.008	0.01	0.008
J <sub>0,anot</sub> (A/m <sup>2</sup> )	0.25	0.1	0.25
Anot Yüzey Alanı (1/m)	$1 \times 10^9$	200	$1 \times 10^9$
Katot Yüzey Alanı (1/m)	$1 \times 10^9$	200	$1 \times 10^9$
Çalışma Voltajı (V)	0.05	0.05	0.05
Gözeneklilik	0.35	0.4	0.35
Anot geçirgenliği (m <sup>2</sup> )	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$
Katot geçirgenliği (m <sup>2</sup> )	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$
Anot Denge Voltajı (V)	0.05	0	0.05
Katot Dengel Voltajı (V)	1.2	1	1.2
Hücre Voltajı (V)	1.1	0.95	1.1
Gaz Akış Kanalı Genişliği (mm)	0.0015	0.0005	0.0015
Gaz Akış Kanalı Elektrot Kalınlığı (mm)	$0.04 \times 10^{-3}$	0.001	$4 \times 10^5$
Gaz Akış Kanalı Yüksekliği (mm)	$1.5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$
Gaz Akış Kanalı Kalınlığı (mm)	0.04	0.01	0.04
Anot İyonik İletkenlik (S/m)	1	1	1
Anot Elektronik İletkenlik (S/m)	1000	1000	1000
Katot İyonik İletkenlik (S/m)	1	1	1
Katot Elektronik İletkenlik (S/m)	1000	1000	1000
Elektrolit İyonik İletkenlik (S/m)	5	25	5
İnterkonnektör İletkenlik (S/m)	5000	5000	5000
Elektrolit Kalınlığı (mm)	$1.9 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$1.9 \times 10^{-4}$
Anot Malzeme	NiO/YSZ	NiO	NiO/YSZ
Katot Malzeme	LSM/YSZ LSCF	LSCF	LSM/YSZ
Elektrolit Malzeme	YSZ	YSZ	YSZ

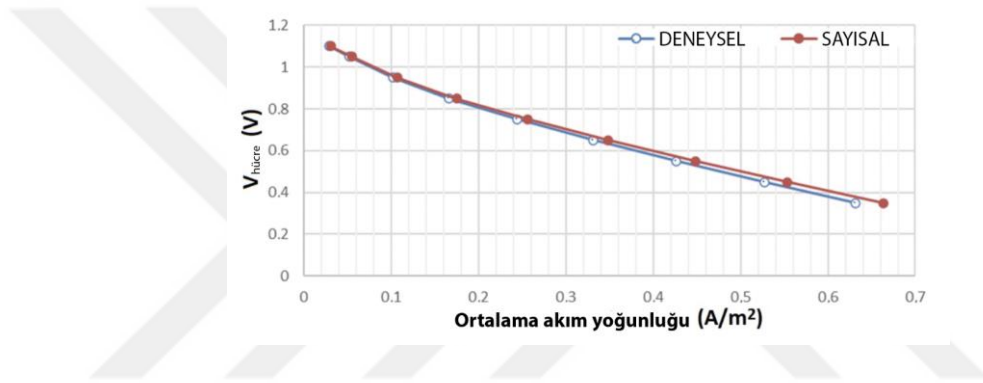
LSCF, lanthanum strontium cobalt ferrite; YSZ, yttria-stabilized zirconia; LSM, Lanthanum Strontium Manganite

### 3.1. Deneysel Doğrulama

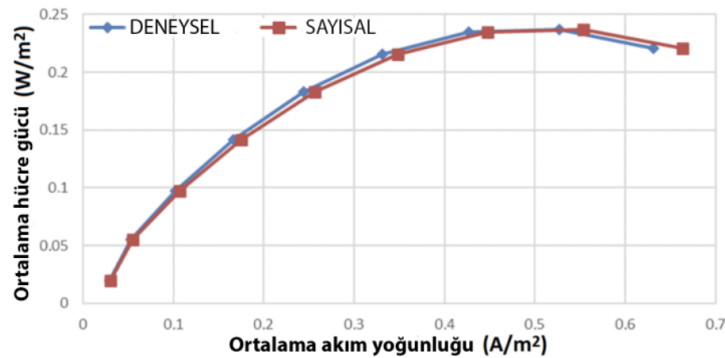
Sayısal analizin doğruluğunu test etmek için, literatürde yapılmış olan deneysel çalışmada (Uçar, 2020) yer alan geometri ve sınır koşulları dikkate alındı ve burada elde edilen sonuçlar aynı çalışmadan alınan deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı. Deneysel doğrulama sırasında, standart geometri başarılı bir şekilde doğrulandı. Kullanılan malzemeler anot, katot ve elektrolit için sırasıyla

NiO, lantan stronsiyum kobalt ferrit (LSCF) ve itriya stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) olarak seçildi.

Şekil 3.4, hücre voltajı ile ortalama akım yoğunluğu arasındaki ilişki gösterilmiştir ve deneysel ile sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hücre voltajı arttıkça, akım yoğunluğu da azalır. Bu, enerji dönüşüm verimliliğinin hücre voltajına bağlı olarak değiştiği anlamına gelir. Ek olarak, sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla tutarlıdır. Ortalama hücre gücü ile ortalama akım yoğunluğu arasındaki ilişki Şekil 3.5'te sunulmuştur. Bu deneysel ve sayısal sonuçlar da birbiriyle tutarlıdır. Ortalama hücre gücü, akım yoğunluğunun artmasıyla artar. Bu, daha yüksek akım yoğunluğu değerlerinin daha yüksek enerji üretimi sağladığını gösterir.



Şekil 3.4. Ortalama akım yoğunluğu değişimine göre  $V_{hücre}$ 'nin sayısal ve deneysel sonuçları

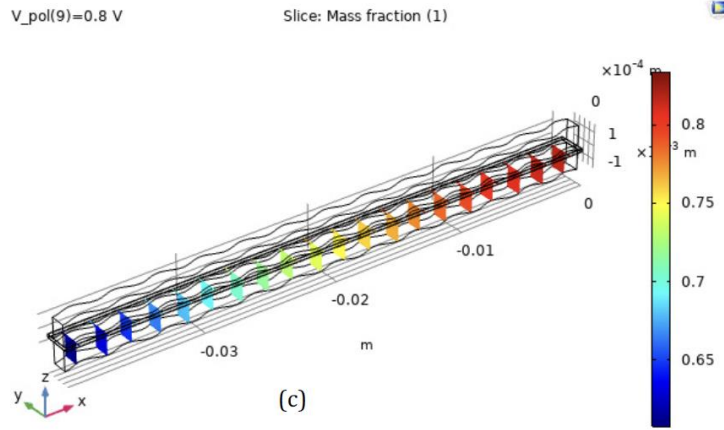
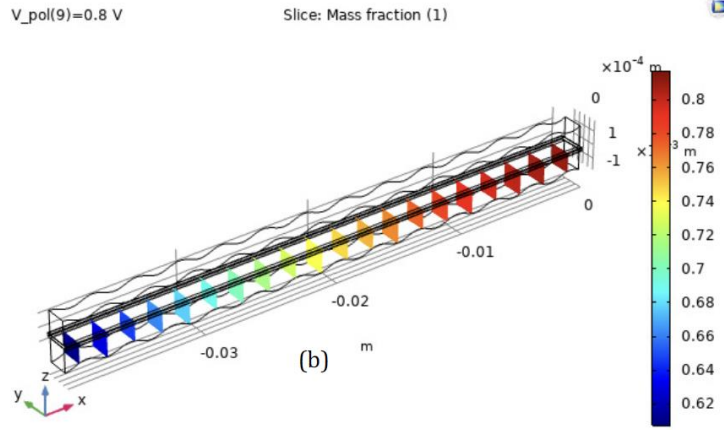
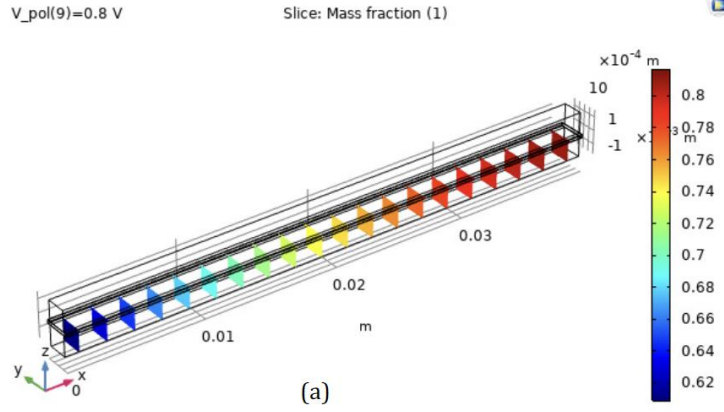


Şekil 3.5. Ortalama Akım Yoğunluğu Değişimine Göre Ortalama Hücre Gücünün Sayısal ve Deneysel Sonuçları

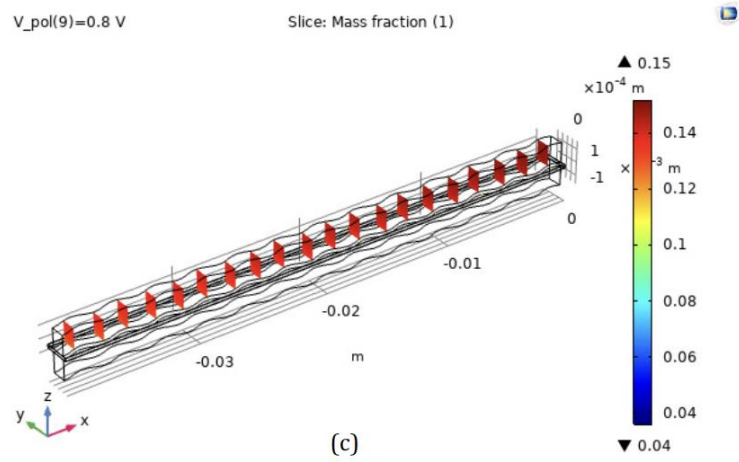
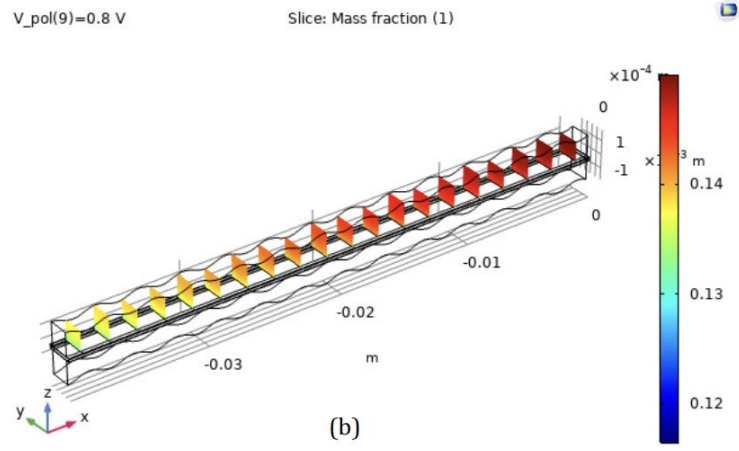
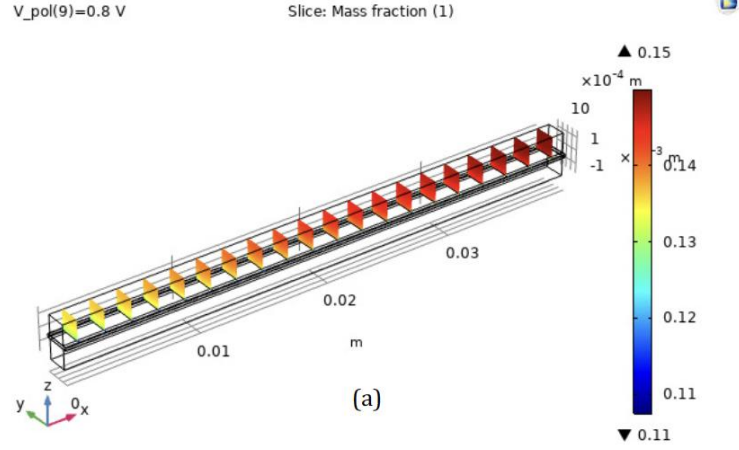
Şekil 3.4 ve Şekil 3.5, mevcut çalışmanın sayısal modellemesinin doğruluğunu ve güvenilirliğini deneysel verilere (Uçar, 2020) dayanarak göstermektedir. Sonuçlar ayrıca, seçilen malzemenin ve işletme koşullarının KOYH'nin enerji ve akım yoğunluğu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

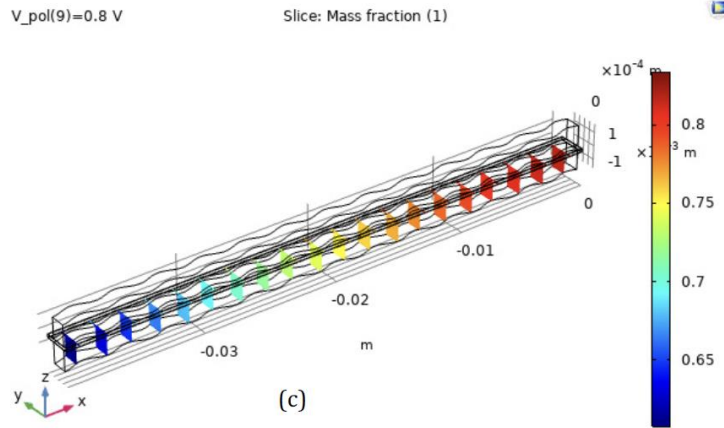
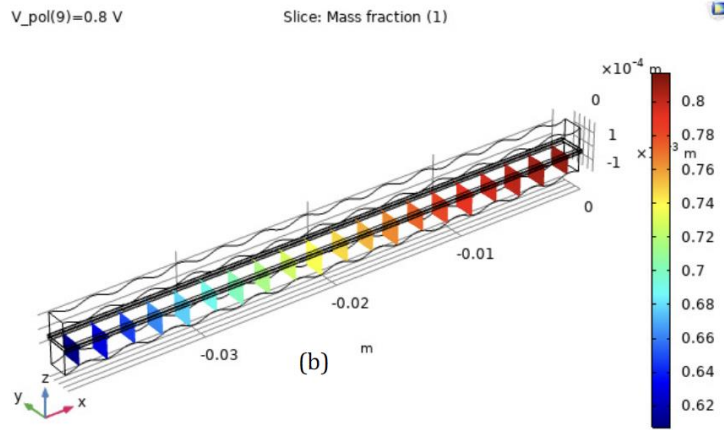
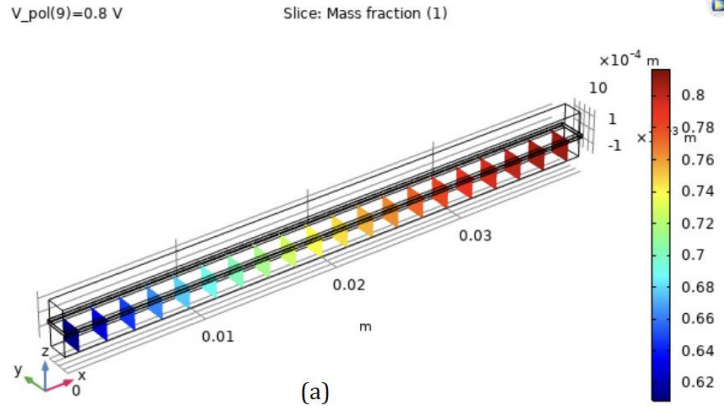
Bu çalışmada, düzlemsel KOYH'lerin farklı bağlantı tasarımları ile anot ve katot için farklı işletme sıcaklıkları ve hidrojen ile oksijen akış hızları bazında sayısal incelemesi yapılmıştır. Analizler COMSOL yazılımı ile 800°C sabit sıcaklıkta yürütülmüştür. İşletme koşulları ve tasarımların KOYH'lerin performansı üzerindeki etkileri aşağıda detaylı olarak tartışılmaktadır. Üç farklı geometri için (standart prizma, dikey sinüzoidal ve yatay sinüzoidal) anot içindeki hidrojenin kütle fraksiyonunun kontur grafikleri Şekil 4.1'de sunulmuştur. Üç geometri için de anottaki hidrojen kütle fraksiyonu girişten (0.38) çıkışa (0.2) doğru azalır. Şekil 4.2, üç farklı geometri için oksijenin kütle fraksiyonunun kontur grafiklerini gösterir. Standart prizma ve dikey sinüzoidal geometrilerde katottaki oksijenin kütle dağılımı girişten (0.15) çıkışa (0.11) doğru azalırken, yatay sinüzoidal geometride 0.15'ten 0.14'e azalır. Katot malzemesi yeterince iletken veya reaktif değilse veya yeterli yüzey alanına sahip değilse, oksijen tüketimi artar ve yakıt hücresinin performansı azalır. Üç farklı geometri için anottaki suyun kütle fraksiyonunun kontur grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Standart prizma, dikey sinüzoidal ve yatay sinüzoidal geometrilerde suyun kütle dağılımları girişten (0.80) çıkışa (0.62-0.65) doğru azalır. Anottaki su tüketimi, KOYH'deki kimyasal reaksiyonların verimliliği ve etkililiği ile ilişkilidir. Su kütle dağılım oranının tasarım ve sınır koşullarından etkilenmediği gözlemlendi.



Şekil 4.1. Farklı KOYH geometrileri için hidrojenin kütle fraksiyonu: (a) standart prizma, (b) dikey sinüzoidal, ve (c) yatay sinüzoidal



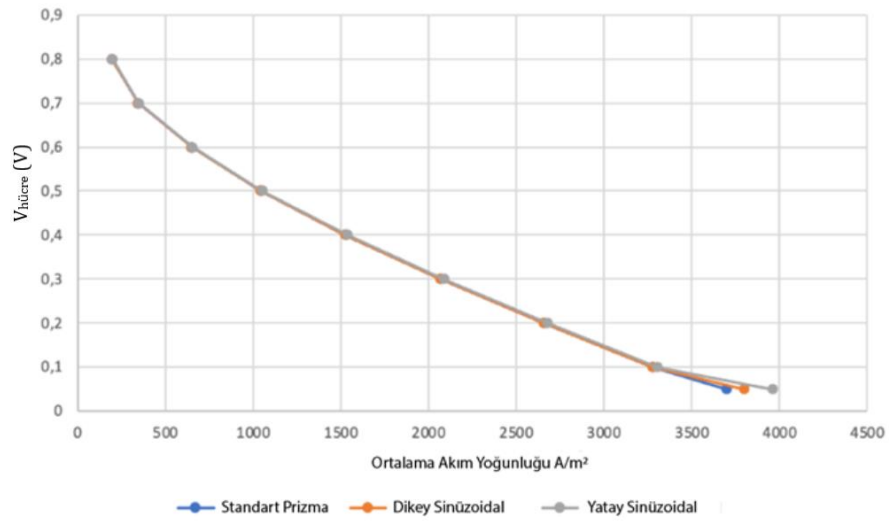
Şekil 4.2. Farklı KOYH geometrileri için oksijenin kütle fraksiyonu: (a) standart prizma, (b) dikey sinüzoidal, (c) yatay sinüzoidal



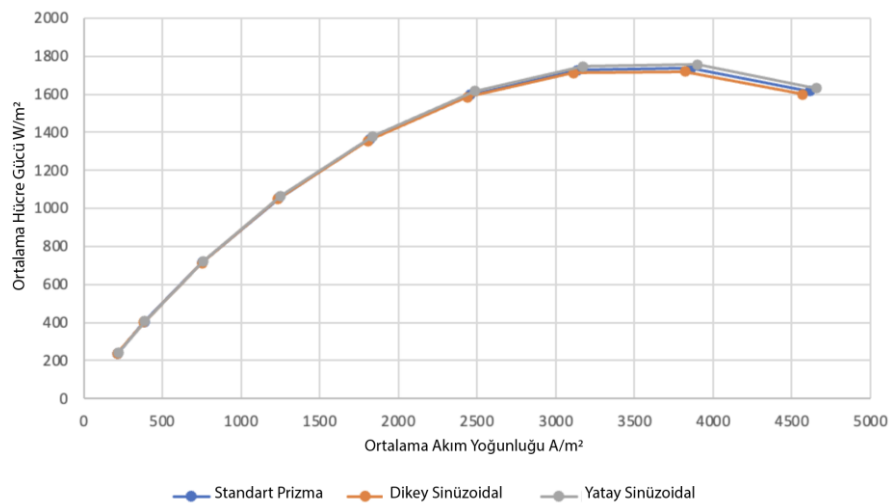
Şekil 4.3. Farklı KOYH geometrileri için H<sub>2</sub>O'nun kütle fraksiyonu: (a) standart prizma, (b) dikey sinüzoidal, (c) yatay sinüzoidal.

Bu çalışmada, standart prizma, yatay sinüzoidal ve dikey sinüzoidal geometrilerin KOYH performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akım yoğunluğu, KOYH'nin performansının değerlendirilmesi için önemli bir kriterdir. Daha yüksek akım yoğunluğu, daha yüksek elektrik üretimi anlamına gelir. Bu nedenle, hücre voltajı ile akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi anlamak, KOYH'lerin

tasarımını ve performansını optimize etmek için hayati önem taşır. Şekil 4.4, KOYH'nin geometrisine bağlı olarak 800 °C'deki akım yoğunluğunun nasıl değiştiğini gösterir. Analizlerde kullanılan geometrilerin farklı anot ve katot yüzey alanları ve hacimleri bulunmaktadır. Standart prizma geometrinin yüzey alanı 244.5 mm<sup>2</sup> ve hacmi 90.05 mm<sup>3</sup>, dikey sinüzoidal geometrinin yüzey alanı 216.36 mm<sup>2</sup> ve hacmi 66.30 mm<sup>3</sup> ve yatay sinüzoidal geometrinin yüzey alanı 246.77 mm<sup>2</sup> ve hacmi 89.74 mm<sup>3</sup>'tür. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, 0-0.8 V<sub>hücre</sub> (Voltaj) değerlerinde üç geometrinin akım yoğunluğu neredeyse aynıdır, yalnızca 0.8 V'deki yatay sinüzoidal geometri akım yoğunluğu diğer geometrilere göre %1 daha yüksektir. V<sub>hücre</sub> (V)



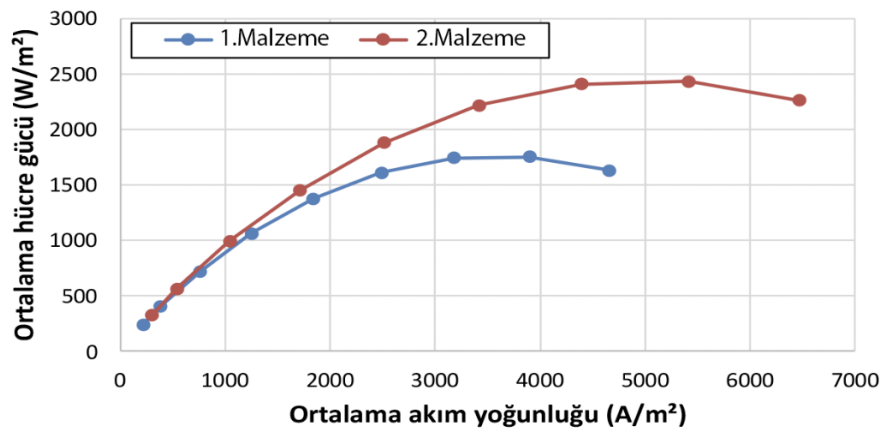
Şekil 4.4. Farklı Geometriler için Polarizasyon Eğrileri



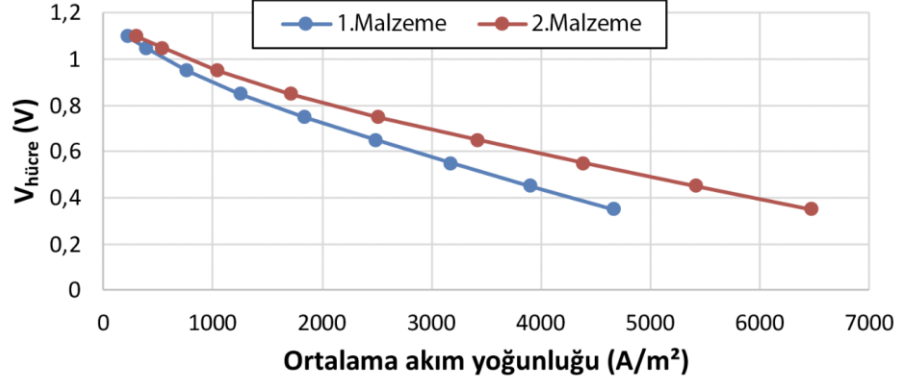
Şekil 4.5. Farklı Geometriler için Ortalama Hücre Gücü

Yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijen gibi gazları kullanarak elektrik enerjisi üretir ve performansları doğrudan anot ve katot malzemelerinin özelliklerine bağlıdır, çünkü bu malzemeler hücredeki kimyasal reaksiyonların ve elektron akışının hızını etkiler (Talebi vd. 2010). Bu yüzden malzeme seçimi hayati önem taşır. Bu çalışmada, iki farklı malzeme konfigürasyonu kullanıldı. KOYH malzemeleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirildi ve bu malzemelerin elektriksel ve termal iletkenlik değerleri sunuldu. İlk konfigürasyonda, NiO/YSZ anot malzemesi ve LSM (lantan stronsiyum manganit)/YSZ katot malzemesinin elektriksel iletkenlik katsayıları yaklaşık olarak 10 ve 100 S/m'dir (Ranasinghe ve Middleton 2017), ve termal iletkenlik katsayıları ise yaklaşık olarak 5 ve 10 W/mK'dir. İkinci konfigürasyonda (Agbede, Hellgardt, & Kelsall, 2020), NiO anot malzemesi ve LSCF katot malzemesinin elektriksel iletkenlik katsayıları yaklaşık olarak 100 ve 1000 S/m'dir (Farhana vd. 2022). Termal iletkenlik katsayıları yaklaşık olarak 5 ve 10 W/mK'dir (Chen vd. 2022).

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 sırasıyla, farklı anot ve katot malzeme kombinasyonlarının elektrik enerjisi performansını ve polarizasyon eğrilerini gösterir. Sonuçlara göre, ilk konfigürasyon için maksimum güç yoğunluğu ve karşılık gelen akım yoğunluğu ve voltaj değerleri sırasıyla 1750 W/m<sup>2</sup>, 3200 A/m<sup>2</sup> ve 0.55 V'dir. İkinci konfigürasyon için bu değerler sırasıyla 2450 W/m<sup>2</sup>, 5000 A/m<sup>2</sup> ve 0.45 V'dir.



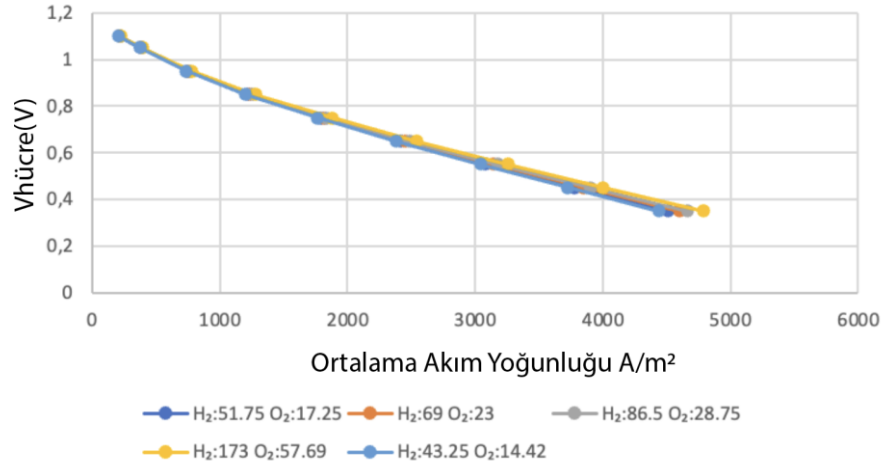
Şekil 4.6. Farklı malzeme konfigürasyonları için elektrik güç yoğunluğu, 1.Malzeme (NiO/YSZ anot ve LSM/YSZ katot) 2.Malzeme (NiO anot ve LSCF katot).



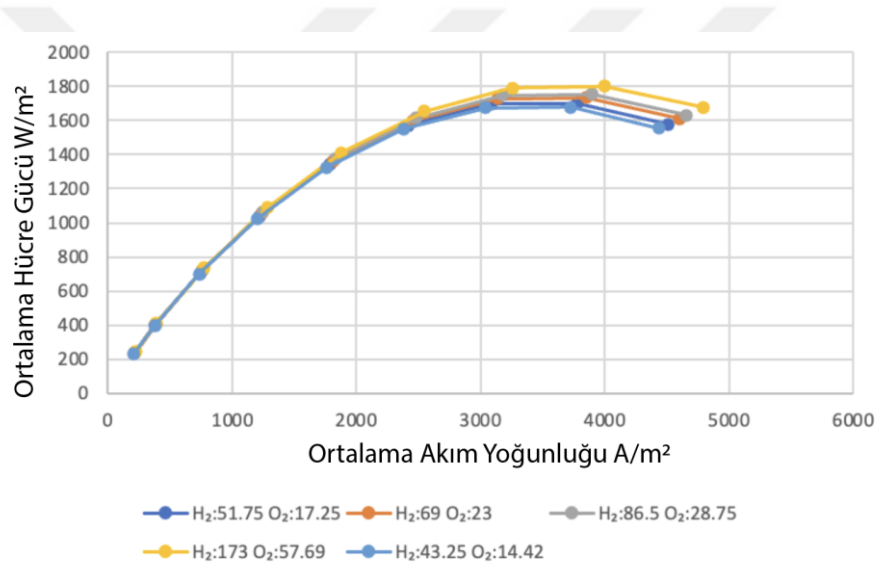
Şekil 4.7. Farklı malzeme konfigürasyonları için polarizasyon eğrileri, 1. Malzeme (NiO/YSZ anot ve LSM/YSZ katot) 2.Malzeme (NiO anot ve LSCF katot)

İkinci malzeme konfigürasyonu (NiO anot ve LSCF katot) ile yapılan analizlerde, maksimum güç yoğunluğu daha yüksektir ve maksimum güç yoğunluğuna daha yüksek akım yoğunluklarında ulaşılmaktadır. Böylece, elektriksel ve termal iletkenlik katsayıları hücre performansını doğrudan etkiler.

Analizde, anot ve katot için üç farklı gaz akış hızı kullanıldı, özellikle 51.75, 69, 86.5, 173, ve 43.25 SCCM ve 17.25, 23, 28.75, 57.69, ve 14.42 SCCM. Farklı gaz akış hızlarında  $V_{hücre}$  (hücre voltajı) ile ortalama akım yoğunluğu arasındaki grafik Şekil 4.8'de verilmiştir. Gaz akış hızları arttıkça eğriler hafifçe yukarı kayar. Belirlenen  $V_{hücre}$  değerinde, 51.75 SCCM H<sub>2</sub> gaz akış hızı ve 17.25 SCCM O<sub>2</sub> gaz akış hızı için ortalama akım yoğunluğu yaklaşık 4500 A/m<sup>2</sup>'dir. 69 SCCM H<sub>2</sub> gaz akış hızı ve 23 SCCM O<sub>2</sub> gaz akış hızı için ortalama akım yoğunluğu yaklaşık 4600 A/m<sup>2</sup>'dir. 86.5 SCCM H<sub>2</sub> gaz akış hızı ve 28.75 SCCM O<sub>2</sub> gaz akış hızı için değer yaklaşık 4700 A/m<sup>2</sup>'dir.



Şekil 4.8. Farklı Gaz Akış Hızları için  $V_{hücre}$  ile ortalama akım yoğunluğu

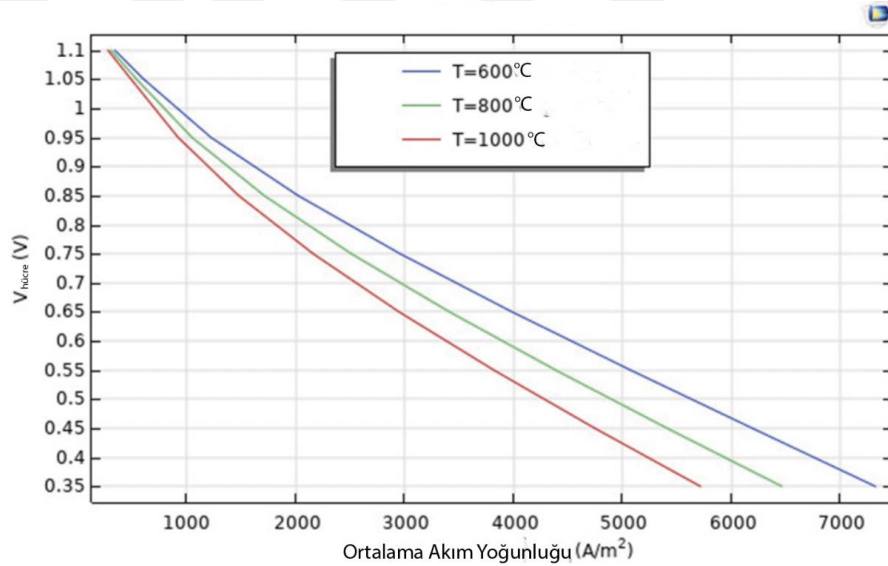


Şekil 4.9. Farklı Gaz Akış Hızları için Ortalama Hücre Gücü ile Ortalama Akım Yoğunluğu

Şekil 4.9s göre, maksimum ortalama hücre gücü, 4000 A/m<sup>2</sup>'lik ortalama akım yoğunluğunda ~1800 W/m<sup>2</sup>'dir. 51.75 ve 17.25 SCCM H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gaz akış hızları için ortalama hücre gücü ~1650 W/m<sup>2</sup>, 69 ve 23 SCCM H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gaz akış hızları için ~1725 W/m<sup>2</sup>, 86.5 ve 28.75 SCCM H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gaz akış hızları için ~1775 W/m<sup>2</sup>, 173 ve 57.69 SCCM H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gaz akış hızları için ~1800 W/m<sup>2</sup>, ve 43.25 ve 14.42 SCCM H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> gaz akış hızları için ~1625 W/m<sup>2</sup>'dir.

Polarizasyon eğrileri ve elektrik gücü grafikleri, KOYH'lerin performansını analiz etmek için önemli araçlardır. Bu grafikler, yakıt hücresi akım yoğunluğu ile çıkış

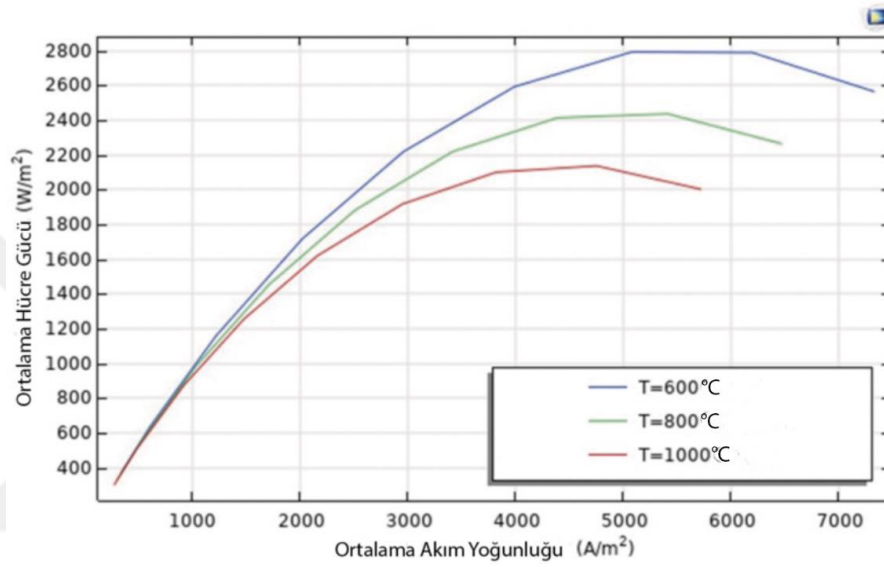
voltajı ve akım yoğunluğu ile elektrik gücü arasındaki ilişkileri gösterir. Bu çalışmada, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklarda yatay sinüzoidal KOYH performansı incelenmiştir. Şekil 4.10'daki polarizasyon eğrisi grafiğinde gösterildiği gibi, çıkış voltajı, yakıt hücresinin uygulanan voltajına ve akım yoğunluğuna bağlı olarak değişir. 600 °C'de, KOYH'nin polarizasyon eğrisi, 800 ve 1000 °C'ye göre daha yüksek çıkış akım yoğunluğu gösterir. 0.35 V'da, 600 °C çalışma sıcaklığında yaklaşık 7800 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu elde edilirken, 800 °C'de yaklaşık 6500 A/m<sup>2</sup> ve 1000 °C'de yaklaşık 5700 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu elde edilir, tümü aynı voltajda. Tüm eğriler için benzer bir trend gözlemlendi. Ayrıca, voltaj 1.1 V'ye doğru arttıkça, farklı çalışma sıcaklıklarındaki akım yoğunlukları birbirine yaklaşıyor. Sonuçlara göre, 600 °C çalışma sıcaklığı KOYH performansı için daha verimlidir.



Şekil 4.10. Farklı sıcaklıklarda KOYH'ler (yatay sinüzoidal akış kanalı geometrisi, ikinci malzeme konfigürasyonu ve %25 artırılmış kütle akış hızı) için polarizasyon eğrileri

Şekil 4.11'deki elektrik gücü grafiğinde gösterildiği gibi, KOYH'nin elektrik gücü çıkışı akım yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Sonuçlar, KOYH'nin 600 °C'de daha yüksek bir elektrik gücü çıkışı ürettiğini göstermektedir. Akım yoğunluğu yaklaşık 5000 A/m<sup>2</sup> civarında olduğunda, üç işletme sıcaklığının tümünde bir maksimum güç yoğunluğu vardır. Bu akım yoğunluğunda, güç yoğunluğu 600 °C'de 2800 W/m<sup>2</sup>, 800 °C'de 2400 W/m<sup>2</sup> ve 1000 °C'de 2100 W/m<sup>2</sup>'dir. Bu

sonuçlar, 600  C'nin karşılaştirmalı olarak KOYH performansı için en verimli işletme sıcaklığı olduğunu teyit etmektedir. Genel olarak, sonuçlar, KOYH performansının bağlantı elemanı tasarımı, işletme sıcaklığı ve gaz akış modelleri tarafından önemli  lude etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bu alışma, bu faktörler arasındaki ilişkileri vurgular ve enerji yoğunluğu açısından en verimli bağlantı elemanı geometrisi ve sınır koşullarını elde etmek için onların optimizasyonuna dair i g r  sağlar.



Şekil 4.11. Farklı Sıcaklıklarda Elektriksel Güç Eğrileri

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve akım yoğunluğu sağlayan optimum malzeme ve işletme koşullarını belirleme konusunda önemli bir katkı sağlar. Bu içgörüler, KOYH teknolojisinin geliştirilmesini destekler. Bu çalışma, 600 ila 1000 °C arasında değişen işletme sıcaklıklarında farklı bağlayıcı tasarımlar ve farklı anot ve katot malzemeleri ile düzlemsel KOYH'lerin sayısal analizini ve performans değerlendirmesini sunmaktadır. 18 farklı senaryo için COMSOL yazılımı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirildi. Model, tahmin edilen sonuçların bir deneysel çalışmayla karşılaştırılmasıyla doğrulandı. Ana bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Yatay sinüzoidal geometrinin oksijen tüketimi, standart prizma ve dikey sinüzoidal geometrilere kıyasla daha düşük görünmektedir. Oksijenin kütle dağılımı, yüzey alanındaki değişikliklerden etkilenir.
- Daha yüksek su tüketimi genellikle bir yakıt hücresindeki elektrokimyasal reaksiyonların ilerlemesini teşvik eder ve daha fazla elektrik üretir. Bu nedenle, KOYH'nin performansını değerlendirirken anot su tüketimi göz önünde bulundurulmalıdır ancak tek başına yeterli bir gösterge değildir.
- Yatay sinüzoidal tasarıma sahip KOYH, diğer tasarımlara kıyasla daha yüksek bir akım yoğunluğuna sahiptir.
- Yüksek gaz akış hızları için ortalama güç yoğunluğu, düşük akış hızlarına kıyasla yaklaşık olarak %10.7 daha yüksektir. Anotta H<sub>2</sub> ve katotta O<sub>2</sub>'nin gaz akış hızları arttıkça, yakıt hücresinin üretim performansı da artar.
- 600 °C daha düşük çalışma sıcaklığı, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara kıyasla KOYH performansı için daha yararlıdır. Ancak, enerji yoğunluğu açısından en verimli bağlantı geometrisini ve sınır koşullarını sağlamak için, gelecekteki çalışmalarda deneysel bir sistem kurarak KOYH'leri deneysel olarak incelemek gereklidir.

Bu çalışma, mevcut ve gelecek KOYH uygulamalarında yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve akım yoğunluğu sağlayan optimum malzeme ve çalışma koşullarının belirlenmesine önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu iç görüler, KOYH teknolojisinin geliştirilmesini desteklemektedir.

## KAYNAKLAR

- Agbede, O., Hellgardt, K., & Kelsall, G. 2020. Electrical conductivities and microstructures of LSM, LSM-YSZ and LSM-YSZ/LSM cathodes fabricated on YSZ electrolyte hollow fibres by dip-coating . *materialstoday chemistry*, 16.
- Bąkała, M., Martsinchyk, K., Motyliński, K., Kupecki, J., & Machaj, K. 2023. Maciej Bąkała, Katsiaryna Martsinchyk, Konrad Motyliński, Jakub Kupecki, Krystian Machaj, . *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Celik, A. 2018. Three-dimensional multiphysics model of a planar solid oxide fuel cell using computational fluid dynamics approach. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Chaudhary, T. N., Saleem, U., & Chen, B. 2019. Reacting flow coupling with thermal impacts in a single solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Chellehbari, Y. M., Adavi, K., Amin, J. S., & Zendejboudi, S. 2021. A numerical simulation to effectively assess impacts of flow channels characteristics on solid oxide fuel cell performance. *Energy Conversion and Management*.
- Chelmehsara, M. E., & Mahmoudimehr, J. 2018. Techno-economic comparison of anode-supported, cathode-supported, and electrolyte-supported SOFCs, . *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Chen, Y., Romo-De-La-Cruz, C. O., Paredes-Navia, S. A., Liang, L., Hinerman, A., Prucz, J., . . . Song, X. 2022. Electrocatalytic surface nanoionics with strained interfaced and colossal conductivity for enhancing durability and performance of solid oxide fuel cell . *Journal of Power Sources*, 517(1).
- Chengyuan Gong, Z. T. 2023. A novel flow field design with flow re-distribution for advanced thermal management in Solid oxide fuel cell. *Applied Energy*.
- Cimen, F. M., Ilbas, M., & Yalcin, S. 2023. Effects of physical properties and operating parameters on numerically developed flat-tube solid oxide fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Corigliano, O., & Fragiaco, P. 2020. Extensive analysis of SOFC fed by direct syngas at different anodic compositions by using two numerical approaches. *Energy Conversion and Management*.
- Çimen, F. M. 2020. Model Bir Yassı Tüp Katı Oksit Yakıt Pilinin Sayısal Simülasyonu.
- Demirezen, G. 2016. State-space modeling of a planar solid oxide fuel cell . *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

- Farhana, N., Rahman, A., Yusop, U. A., Lowrance, Y. N., Rahman, H. A., Azmi, M. A., . . . Ismail, A. 2022. FORMULATION AND CHARACTERISATION OF LSCF/YSZ-SDC AND LSCF/YSZ-SDCC DUAL COMPOSITE CATHODES FOR INTERMEDIATE TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELL. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28.
- Ghorbani, B., & Vijayaraghavan, K. 2019. A review study on software-based modeling of hydrogen-fueled solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Ghorbani, B., & Vijayaraghavan, K. 2020. Developing a virtual hydrogen sensor for detecting fuel starvation in solid oxide fuel cells using different machine learning algorithms. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Guo, Z. 2023. *Journal of Enhanced Heat Transfer*.
- He, Q., Yu, J., Xu, H., Zhao, D., Zhao, T., & Ni, M. 2020. Thermal effects in H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> assisted direct carbon solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Hesami, H. B. 2021. Three-dimensional numerical investigation on the effect of interconnect design on the performance of internal reforming planar solid oxide fuel cell. *Korean J. Chem. Eng.*
- I. Khazaee, A. R. 2017. Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries. *Energy*.
- İlbaş, M., & Kümüük, B. 2020. Modeling and analysis of a model solid oxide fuel cell running on low calorific value coal gases. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Işık, R. 2019. Numerical and experimental investigation of the effect of flow type on performance and temperature distribution in solid oxide fuel cell. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Jacobson, A. J. 2009. Materials for Solid Oxide Fuel Cells. *Chemistry of Materials*.
- Jeffrey W. Fergus. 2006. Electrolytes for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 162(1), 30-40.
- Kim, J., Tyagi, A., & Kim, Y. 2019. Two-dimensional modeling for physical processes in direct flame fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Kümüük, B., Alemu, M. A., & İlbaş, M. 2022. Investigation of the effect of ion transition type on performance in solid oxide fuel cells fueled hydrogen and coal gas. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Kupecki, J., Motylinski, K., Zurawska, A., Kosiorek, M., & Ajdys, L. 2019. Numerical analysis of an SOFC stack under loss of oxidant related fault conditions

using a dynamic non-adiabatic model. *International Journal of Hydrogen Energy*.

- Li, G., Wu, M., Zeng, D., Wu, M., Zhang, Y., Tao, Y., & Shao, J. 2022. Mass and current uniformity for planar solid oxide fuel cells with discrete landing structured flow fields: A three-dimensional numerical analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Lu, C., Li, Y., Liu, Z., Zhou, H., Zheng, H., & Chen, B. 2022. Influence mechanisms of flow channel geometry on water transfer and pressure loss in planar membrane humidifiers for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47.
- Machaj, K., Kupecki, J., Niemczyk, A., Malecha, Z., Brouwer, J., & Porwisiak, D. 2023. Numerical analysis of the relation between the porosity of the fuel electrode support and functional layer, and performance of solid oxide fuel cells using computational fluid dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Marius Dillig, T. P. 2018. Thermal effects of planar high temperature heat pipes in solid oxide cell stacks operated with internal methane reforming, . *Journal of Power Sources*, , 373(139-149).
- Miura, Y., Takemiya, S., Fukuyama, Y., Kato, T., Taniguchi, S., & Sasaki, K. 2023. Improvement of the internal reforming of metal-supported SOFC at low temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Mungmuang Promsen, Y. K. 2020. Feasibility study on saturated water cooled solid oxide fuel cell stack, . *Applied Energy*, , 279.
- Mustafa Fazil Serincan, U. P. 2020. Controlling reformation rate for a more uniform temperature distribution in an internal methane steam reforming solid oxide fuel cell, . *Journal of Power Sources*,
- N. Alhazmi, G. A. 2021. Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of button solid oxide fuel cell, . *Electrochimica Acta*, .
- N. Delibaş, S. B. 2022. Reduction of operation temperature in SOFCs utilizing perovskites: Review. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 6(1), 56-57.
- National Energy Technology Laboratory. 2005. Fuel Cell Handbook. *U.S. Department of Energy*.
- Neelima Mahato, A. B. 2015. Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review,. *Progress in Materials Science*,, 72(141-337).
- Önbilgin, S. 2019. Katı Oksit Yakıt Pilleri için Pres Yöntemiyle Interkonnektör Geliştirilmesi.

- Ranasinghe, S. N., & Middleton, P. H. 2017. Modeling of Single Cell Solid Oxide Fuel Cells Using COMSOL Multiphysics. *IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering*.
- Schluckner, C., Subotić, V., Preißl, S., & Hochenauer, C. 2019. Numerical analysis of flow configurations and electrical contact positions in SOFC single cells and their impact on local effects. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Serincan, M. F., Pasaogullari, U., & Singh, P. 2020. Controlling reformation rate for a more uniform temperature distribution in an internal methane steam reforming solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 468.
- Settar, A., Lebaal, N., & Abboudi, S. 2018. Numerical analysis of catalytic-coated walls of an indirect internal reforming solid oxide fuel cell: Influence of catalyst coating distribution on the reformer efficiency. *Energy Conversion and Management*.
- Singhal, S. C. 2013. *Solid Oxide Fuels Cells: Facts and Figures: Past Present and Future Perspectives for SOFC Technologies* (Cilt Green Energy and Technology). Springer.
- Singhal, S. C. 2014. *Solid oxide fuel cells for power generation*. WIRESENERGY AND ENVIRONMENT.
- Talebi, T., Sarrafi, M. H., Haji, M., Raissi, B., & Maghsoudipour, A. 2010. Investigation on microstructures of NiO-YSZ composite and Ni-YSZ cermet for SOFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9440-9447.
- Tan, W. C., Lim, E. A., Rahman, H. A., Samat, A. A., & Oon, C. S. 2023. Numerical analysis on the anode active thickness using quasi-three-dimensional solid oxide fuel cell model. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Tariq N. Chaudhary, U. S. 2019. Reacting flow coupling with thermal impacts in a single solid oxide fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44.
- Timurkutluk, Ç. 2019. Development of micro-tubular solid oxide fuel cell membrane electrode assembly for mobile applications. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Tushar Choudhary, M. k. 2017. CFD Modeling of SOFC Cogeneration System for Building Application. *Energy Procedia*.
- Uçar, E. 2020. Katı oksit yakıt pilleri için ince sac interkonnektörlerle akış alanı geliştirilmesi. *Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Wang, C., He, Q., Li, Z., Xu, Q., Han, M., & Ni, M. 2022. Modelling of solid oxide fuel cells with internal glycerol steam reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*.

- Wu, X., Tian, Y., Zhang, J., Zuo, W., Kong, X., Wang, J., . . . Zhou, X. 2016. Enhanced electrochemical performance and carbon anti-coking ability of solid oxide fuel cells with silver modified nickel-yttrium stabilized zirconia anode by electroless plating. *Journal of Power Sources*.
- Xia, L., Khosravi, A., Han, M., & Sun, L. 2023. Artificial intelligence based structural optimization of solid oxide fuel cell with three-dimensional reticulated trapezoidal flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Xiaoyan Wu, Y. T. 2016. Enhanced electrochemical performance and carbon anti-coking ability of solid oxide fuel cells with silver modified nickel-yttrium stabilized zirconia anode by electroless plating. *Journal of Power Sources*.
- Yahya, A., Naji, H., & Dhahri, H. 2023. A lattice Boltzmann analysis of the performance and mass transport of a solid oxide fuel cell with a partially obstructed anode flow channel. *Fuel*, 334.
- Yasin Mehdizadeh Chellehbari, K. A. 2021. A numerical simulation to effectively assess impacts of flow channels characteristics on solid oxide fuel cell performance. *Energy Conversion and Management*.
- Yingtian Chi, Q. H. 2023. Numerical simulation acceleration of flat-chip solid oxide cell stacks by data-driven surrogate cell submodels, *Journal of Power Sources*, 553.
- Zhao, C., Yang, J., Zhang, T., Yan, D., Pu, J., Chi, B., & Li, J. 2020. Numerical modeling of manifold design and flow uniformity analysis of an external manifold solid oxide fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Zhao, F., & Virkar, A. 2005. Dependence of Polarization in Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells on Various Cell Parameters. *Journal of Power Sources*.
- Zhou, X.-D., & Singhal, S. 2009. FUEL CELLS – SOLID OXIDE FUEL CELLS | Overview. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 1-16.
- Zhou, Y. C., Zhou, H., Chen, W., Zhang, N., & Tu, Z. 2023. Optimal design of a cathode flow field for performance enhancement of PEM fuel cell. *Applied Energy*, 343.
- Zhou, Y., Chen, B., Chen, W., Deng, Q., Shen, J., & Tu, Z. 2022. A novel opposite sinusoidal wave flow channel for performance enhancement of proton exchange membrane fuel cell. *Energy*, 261.
- Zhou, Y., Chen, B., Meng, K., Zhou, H., Chen, W., Zhang, N., & Tu, Z. 2023. Optimization and evaluation criteria of water-gas transport performance in wave flow channel for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*.