



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

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN İNCE SAC İTERKONNEKTÖRLERLE AKIŞ
ALANI GELİŞTİRİLMESİ

EMRE UÇAR

Temmuz 2020

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

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN İNCE SAC İTERKONNEKTÖRLERLE AKIŞ
ALANI GELİŞTİRİLMESİ

EMRE UÇAR

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

Temmuz 2020

Emre UÇAR tarafından **Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK** danışmanlığında hazırlanan “**Katı Oksit Yakıt Pilleri İçin İnce Sac İnterkonnektörlerle Akış Alanı Geliştirilmesi**” 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. Mustafa İLBAŞ, Gazi Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Selahattin ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

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....

Prof. 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.



Emre UÇAR

ÖZET

KATI OKSİT YAKIT PİLLERİ İÇİN İNCE SAC İTERKONNEKTÖRLERLE AKIŞ ALANI GELİŞTİRİLMESİ

UÇAR, Emre

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

Temmuz 2020, 103 sayfa

Bu tez kapsamında katı oksit yakıt pili (KOYP) membran elektrot grubu (MEG) tarafından üretilen akımın toplanmasının yanı sıra gerekli yakıt ve oksitleyicinin sisteme homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan ve üzerlerinde akış kanallarını barındıran metalik interkonnektörlere odaklanılmıştır. Bu akış alanlarının geometrisi ısı, madde ve momentum aktarımını önemli ölçüde etkilediği için, KOYP performansı diğer elemanların özelliklerinin yanı sıra interkonnektör tasarımı ile de değişmektedir. Bu çalışmada kütük malzemeden talaşlı imalat ile akış alanları işlenen ve bu yüzden ağır ve yüksek hacimli geleneksel interkonnektör tasarımı yerine, pres ile ince sac malzemeden üretilmiş ve farklı akış kanallarına sahip interkonnektör tasarımları sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda MEG ve iki akış kanalından oluşan farklı KOYP hücreleri sayısal olarak analiz edilerek madde ve akım dağılımlarının yanı sıra hücre performansları da belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda optimum kanal derinlik ve genişliğinin 0,5 mm, kanal açısının ise 90° olduğu belirlenmiştir. Literatürde yer alan benzer bir deneysel çalışma ile de doğrulanan model, optimize edilen akış alanının kullanılması durumunda performansta %7,6'lık bir artış sağlamanın mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Sözcükler: Katı oksit yakıt pili, ince sac interkonnektör, akış alanı

SUMMARY

IMPROVEMENT OF FLOW AREA WITH THIN SHEET INTERCONNECTORS FOR SOLID OXIDE FUEL CELLS

UÇAR, Emre

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Bora TİMURKUTLUK

July 2020, 103 pages

In this thesis, solid oxide fuel cells (SOFC) metallic interconnectors, which provide homogeneous distribution of the required fuel and oxidant to the system as well as the collection of the current produced by membran electrode assembly (MEA) and contain flow channels, are considered. Since the geometry of these flow fields significantly affects the transfer of heat, species and momentum, the performance of the SOFC varies with the interconnector design, beside the other system elements. In this study, as an alternative to traditional SOFC interconnectors, whose flow channels are fabricated by machining of bulk material and thus are heavy and large, interconnectors having various flow filed geometry and manufactured by pressing are investigated numerially. In this respect, different SOFC cells with single MEA and two flow channels are numerically analyzed and the cell performances as well as species and current distributions are determined. The results indicate that the optimum channel depth and width are 0.5 mm while the optimum channel angle is 90°. The model, which was also verified with a similar experimental study in the literature, revealed that it is possible to achieve a 7.6% increase in performance if the optimized flow-field geometry is used.

Keywords: Solid oxide fuel cell, sheet interconnector, flow field

ÖN SÖZ

Yüksek lisans çalışmamda katı oksit yakıt pilleri için ince sac formundaki interkonnektörün farklı akış alanı geometrilerinin tasarımı yapılarak önemli geometrik parametrelerin optimizasyonu sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda çalışmada belirlenen optimum kanal geometrisinin yeni nesil katı oksit yakıt pili stakları için ileride yapılacak çalışmalara yol gösterici olması beklenmektedir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği ve sabrı gösteren saygıdeğer danışman hocam, Doç. Dr. Sayın Bora TİMURKUTLUK'a sonsuz teşekkür ederim. Yine bir diğer kıymetli ve saygıdeğer hocalarım olan, Doç. Dr. Sayın Serkan TOROS ve Doç. Dr. Sayın Selahattin ÇELİK'e de yardımları ve yol göstericiliği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmalarımda bana yardımcı olan meslektaşım Arş. Gör. Sezer ÖNBİLGİN'e de teşekkür ederim. Son olarak, laboratuvar altyapısı ve malzeme desteklerinden dolayı Vestel Savunma Sanayi A.Ş. ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkürlerimi bildiririm.

Bu tezi, öğrenim hayatım boyunca maddi, manevi her türlü desteği veren babam Ali Şahin UÇAR'a, annem Fadıma UÇAR'a, abim Mehmet UÇAR'a ve kızkardeşim İrem UÇAR'a yani biricik aileme ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ	xv
SİMGE VE KISALTMALAR	xvi
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler	1
1.2 Yakıt Pilleri	2
1.3 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)	5
1.3.1 Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi	6
1.3.2 Katı oksit yakıt pili sistemini oluşturan elemanlar	7
1.3.3 Katı oksit yakıt pili çeşitleri	14
1.4 Tezin Amacı	17
1.5 Tezin İçeriği	18
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI	19
2.1 Farklı Akış Alanları Üzerine Yapılan Çalışmalar	19
2.2 Kanaldaki Akışın Yönü Üzerine Yapılan Çalışmalar	24
2.3 Akışı Dağıtan Ana Kanallar Üzerine Yapılan Çalışmalar	30
2.4 Akış Kanalı Geometrisi Üzerine Yapılan Çalışmalar	36
BÖLÜM III KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN TEMELLERİ	42
3.1 Elektrokimyasal Reaksiyon	42
3.2 Açık Devre Potansiyeli	43
3.3 Polarizasyon Eğrisindeki Voltaj Kayıpları	47
3.3.1 Aktivasyon kayıpları	48
3.3.2 Ohmik kayıplar	49
3.3.3 Konsantrasyon kayıpları	50
3.4 Gerçek Pil Potansiyeli	50

3.5 Yakıt Pili Verimleri	51
BÖLÜM IV MATEMATİKSEL MODELLEME VE SAYISAL ANALİZ	67
4.1 Genel Denklemler	54
4.1.1 Kütlelerin korunumu	54
4.1.2 Madde dengesi.....	55
4.1.3 Momentum denklemi	56
4.1.4 Yük dengesi.....	56
4.1.5 Enerji dengesi.....	57
4.1.6 Elektrokimyasal model.....	57
4.1.7 Elektrokimyasal reaksiyonlar	58
4.1.8 Sınır şartları ve kabuller	58
4.2 Modelin Doğrulanması	58
4.3 Sistemin Ağ Yapısı	60
4.4 Sayısal Çözüm Metodu ve Modelde Kullanılan Parametreler.....	61
BÖLÜM V SAYISAL SONUÇLAR.....	64
5.1 Türlerin Dağılımı	64
5.1.1 Oksijenin kütleli dağılımı.....	64
5.1.2 Hidrojenin kütleli dağılımı	68
5.1.3 Suyun kütleli dağılımı	71
5.2 Akım Yoğunluğu Dağılımı	75
5.3 Hız Dağılımı	77
5.4 Basınç Dağılımı	78
5.5 Parametrik Çalışma ve Sonuçları.....	79
5.5.1 Kanal genişliğinin performansa etkisi.....	80
5.5.2 Kanal derinliğinin performansa etkisi	81
5.5.3 Rib Açısının performansa etkisi	82
5.5.4 Optimizasyon neticesinde türlerin kütleli dağılımında meydana gelen değişimler.....	83
5.5.4.1 Katotta oksijenin kütleli dağılımındaki değişim.....	83
5.5.4.2 Anotta hidrojenin kütleli dağılımındaki değişim.....	84
5.5.4.3 Anotta suyun kütleli dağılımındaki değişim.....	85
5.5.5 Optimizasyon neticesinde akım yoğunluğunda meydana gelen değişimler	87
5.5.6 Optimizasyon neticesinde basınç dağılımında meydana gelen	

değişimler	88
BÖLÜM VI SONUÇ VE TARTIŞMA	91
6.1 Crofer 22 APU’nun Şekillendirilebilirliği	91
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	103



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve karşılaştırması	4
Çizelge 1.2. Yakıt pillerinin anot ve katotunda gerçekleşen reaksiyonlar.....	4
Çizelge 1.3. Yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları.....	5
Çizelge 1.4. MEG’de kullanılan malzemeler.....	10
Çizelge 2.1. Kanal ve rib genişliği toplamının üç farklı durumu	39
Çizelge 4.1. Model parametreleri	62
Çizelge 4.2. Optimize edilmiş model parametreleri	63
Çizelge 5.1. İncelenen interkonnektör tasarım parametreleri	79
Çizelge 5.2. Optimizasyon sonuçları	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yakıt pilinin temel çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)	3
Şekil 1.2. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)	6
Şekil 1.3. Katı oksit yakıt pili membran elektrot grubunun mikro şematik gösterimi (Çelik, 2013)	10
Şekil 1.4. Monolitik KOYP tasarımı (Sciacovelli ve Verda, 2009)	14
Şekil 1.5. Tüp KOYP tasarımı (Singhal, 2000)	15
Şekil 1.6. Düz KOYP tasarımı (Kim ve Lee, 2017)	15
Şekil 1.7. Radyal KOYP tasarımı (Stambouli ve Traversa, 2002)	16
Şekil 1.8. KOYP’de MEG tasarımları; katot destekli (a), anot destekli (b), elektrolit destekli (c) ve gözenekli alt tabaka destekli (d) tasarımlar	16
Şekil 2.1. Farklı akış kanalı tasarımları (Saied vd., 2018)	19
Şekil 2.2. Farklı akış alanı tasarımları (Huang vd., 2008)	20
Şekil 2.3. Farklı anot akış alanı tasarımları (Danilov ve Tade, 2009)	21
Şekil 2.4. Geleneksel interkonnektör tasarımı (a), X tipi interkonnektör tasarımı (b), geleneksel interkonnektörün çözüm bölgesi (c), X tipi interkonnektörün çözüm bölgesi (d), geleneksel interkonnektörün boyutları (e) ve X tipi interkonnektörün boyutları (f) (Kong vd., 2019)	23
Şekil 2.5. Üç farklı akış tipi; paralel akış (a), zıt akış (b) ve çapraz akış (c) (Kim ve Lee, 2019)	24
Şekil 2.6. Voltaj kayıplarının oranları (Kim ve Lee, 2019)	25
Şekil 2.7. Geometrik modelin detayı (Schluckner vd., 2019)	26
Şekil 2.8. Paralel akış (a), ters akış (b) ve çapraz akış (c) için pil içerisindeki sıcaklık dağılımı (Zhang vd., 2015)	27
Şekil 2.9. Farklı akış konfigürasyonlarına sahip stak tasarımları; paralel akış (a), ters akış (b), çapraz akış (c), yönü değişken yakıt akışına paralel hava akışı (d) ve yönü değişken yakıt akışına dik hava akışı (e) (Tan vd., 2018)	29
Şekil 2.10. Çatallanma sonrası 90 derecelik kanal dönüşü için akış kanalı çatallanmaları ve yapıları; keskin köşeli dönüş (a), yuvarlak köşeli dönüş (b) ve dairesel dönüş (c) (Liu vd., 2010)	30

Şekil 2.11. Akış kanallarının farklı yapılarıdaki 90 derecelik dönüşü ile meydana gelen çatallanmaların genel görünümü (Liu vd., 2010)	30
Şekil 2.12. KOYP stağı dış dağıtım borularının şematik gösterimi; girişi üstte (a), girişi merkezde (b) ve üstten çoklu giriş (c) (Zhao vd., 2017).....	32
Şekil 2.13. Farklı manifold derinliğine sahip KOYP stağının şematik gösterimi; 15 mm (a), 20 mm (b) ve 25 mm (c) (Zhao vd., 2017).....	33
Şekil 2.14. Dış manifolda sahip KOYP stağı tasarımı (Yan vd., 2013)	34
Şekil 2.15. Katot tarafında kullanılan oluklu akım toplayıcısı (Yan vd., 2013).....	34
Şekil 2.16. İnterkonnektörün katot tarafındaki akış hızı dağılımı; üstteki interkonnektör kanalına karşı dik hava akışı, alttaki interkonnektör kanalı boyunca hava akışı (Yan vd., 2013).....	35
Şekil 2.17. Giriş manifoldu odasının akış hızı dağılımı (Yan vd., 2013)	35
Şekil 2.18. Farklı akış kanalı geometrileri; dikdörtgen kanal (a), üçgen kanal (b) ve ikizkenar yamuk kanal (c) (Khazaei ve Rava, 2017)	36
Şekil 2.19. Üç farklı akış kanalı geometrisinin performans eğrileri (Khazaei ve Rava, 2017).....	37
Şekil 3.1. Yakıt pilinde tipik bir polarizasyon eğrisi (Mench, 2008)	47
Şekil 4.1. KOYP sisteminin enine-kesit (a) ve 3 boyutlu (b) görünümü.....	54
Şekil 4.2. İncelenen KOYP modelinin boyutları	54
Şekil 4.3. Deneysel ve sayısal performans eğrilerinin karşılaştırması	60
Şekil 4.4. KOYP sisteminin enine-kesit (a) ve üç boyutlu (b) ağ yapısı görünümü.....	61
Şekil 5.1. Farklı polarizasyon potansiyellerindeki oksijen tüketimi: 0,1 V (a), 0,3 V (b), 0,5 V (c) ve 0,7 V (d).....	66
Şekil 5.2. Farklı polarizasyon potansiyellerinde katot akış kanalı içerisindeki oksijen tüketimleri.....	67
Şekil 5.3. Farklı polarizasyon potansiyellerinde katot akış kanalı ile elektrotu arasındaki oksijen tüketimleri	67
Şekil 5.4. Farklı polarizasyon potansiyellerinde katot elektrotu ile elektrolit arasındaki oksijen tüketimleri	68
Şekil 5.5. Farklı polarizasyon potansiyellerindeki hidrojen tüketimi: 0,1 V (a), 0,3 V (b), 0,5 V (c) ve 0,7 V (d).....	69
Şekil 5.6. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı içerisindeki hidrojen tüketimleri.....	70
Şekil 5.7. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı ile elektrotu arasındaki	

hidrojen tüketimleri.....	71
Şekil 5.8. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot elektrotu ile elektrolit arasındaki hidrojen tüketimleri.....	71
Şekil 5.9. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot bölgesindeki su dağılımı: 0,1 V (a), 0,3 V (b), 0,5 V (c) ve 0,7 V (d)	73
Şekil 5.10. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı içerisindeki su üretimi.....	74
Şekil 5.11. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı ile elektrotu arasındaki su üretimi	74
Şekil 5.12. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot elektrotu ile elektrolit arasındaki su üretimi	75
Şekil 5.13. 0,6 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı.....	76
Şekil 5.14. 0,8 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı.....	76
Şekil 5.15. Katot (a) ve anot (b) bölgelerinde 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki hız dağılımı	77
Şekil 5.16. Katot (a) ve anot (b) bölgelerinde 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki basınç dağılımı.....	78
Şekil 5.17. Farklı rib açılarında kanal geometrisinin değişimi; 90° (a), 100° (b), 110° (c) ve 120° (d)	80
Şekil 5.18. Kanal genişliğinin pil performansına olan etkisi	81
Şekil 5.19. Kanal derinliğinin pil performansına olan etkisi	82
Şekil 5.20. Rib açısının pil performansına olan etkisi	83
Şekil 5.21. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde oksijenin kütlelesel dağılımı; doğrulanmış modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) oksijen dağılımı	84
Şekil 5.22. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde hidrojenin kütlelesel dağılımı; doğrulanmış modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) hidrojen dağılımı	85
Şekil 5.23. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde suyun kütlelesel dağılımı; doğrulanmış modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) su dağılımı	86
Şekil 5.24. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit	

arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı; doğrulanan modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) akım yoğunluğu dağılımı ... 88

Şekil 5.25. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde basınç dağılımları; doğrulanan modelde katot bölgesinde elde edilen (a), doğrulanan modelde anot bölgesinde elde edilen (b), optimizasyon sonucunda katot bölgesinde elde edilen (c) ve optimizasyon sonucunda anot bölgesinde elde edilen (d) basınç dağılımı ... 90



FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Membran elektrot grubunun görünümü; elektrolit (a), anot (b) ve katot (c)	7
Fotoğraf 1.2. Farklı kanal tasarımlarına ve boyutlarına sahip interkonnektörler	12
Fotoğraf 1.3. Cam-seramik (a) ve mika (b) sızdırmazlık elemanları.....	13
Fotoğraf 1.4. KOYP’de farklı boyutlarda ve şekillerde MEG tasarımları.....	17
Fotoğraf 4.1. Deneyde kullanılan cihazların görünümü	59
Fotoğraf 6.1. Kalıp yüzeyi	92
Fotoğraf 6.2. Hidrolik pres	93
Fotoğraf 6.3. Sac malzemeden pres yöntemiyle üretilen interkonnektör	93

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

Simgeler	Açıklama
Ag	Gümüş
Au	Altın
CeO ₂	Seryum (IV) oksit
CH ₃ OH	Metanol
CO ₂	Karbondiyoksit
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
LaCrO ₃	Lantanyum kromit
NiO	Nikel oksit
O ₂	Oksijen
Pt	Platinyum
Re	Reynold sayısı
SCCM	Dakika başına standart kübik santimetre
SLM	Dakikada standart litre

Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
3D	Üç Boyutlu
AYP	Alkali Yakıt Pili
DMYP	Direk Metanol Yakıt Pili
EKYP	Eriyik Karbonat Yakıt Pili
EMK	Elektromotor Kuvveti
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
GDC	Gadolinyum Dop Edilmiş Seryum Oksit
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
LSCF	Lantanyum Stronsiyum Kobalt Demir Oksit
LSF	Lantanyum Stronsiyum Demir Oksit
LSGM	Lantanyum Stronsiyum Galyum Magnezyum Oksit
LSM	Lantanyum Stronsiyum Manganat

MEG	Membran Elektrot Grubu
PEYP	Polimer Elektrolit Yakıt Pili
ScSZ	Skandiyum Oksit İle Stabilize Edilmiş Zirkonyum Oksit
YSZ	İtiryum Oksit İle Stabilize Edilmiş Zirkonyum Oksit



BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Yakıt pilleri, hidrojenin veya başka bir hidrokarbon yakıtın kimyasal enerjisini kullanarak elektrokimyasal yolla verimli bir şekilde çevre dostu elektrik üreten cihazlardır. Hidrojen burada bir yakıt olarak kullanılırken elektrik, ısı ve sadece su ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Yakıt pilleri potansiyel uygulamalarının çeşitliliği açısından oldukça zengindir. Elektrik santralleri gibi sabit güç sistemlerinde, cep telefonu ve dizüstü bilgisayarlarda, elektrikli araçlarda, taşınabilir ve acil durum yedek güç ünitesi olarak birçok sivil ve askeri uygulama alanında kendini göstermektedir. Yakıt pillerinin şu anda birçok enerji santralinde ve binek araçlarda kullanılan geleneksel yanma tabanlı teknolojilere göre birçok avantajı bulunmaktadır. Yakıt pilleri, içten yanmalı motorlara göre daha yüksek verimde çalışabilmekte ve yakıttaki kimyasal enerjiyi %60'a varan verimlilikte ve çok düşük emisyon ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Hidrojen yakıt pilleri atık olarak sadece su açığa çıkarmakta, bu nedenle çalışma noktasında duman oluşturan ve sağlık sorunlarına neden olan karbondioksit emisyonları ve hava kirleticiler bulunmamaktadır. Ayrıca, yakıt pili sistemleri hareketli bir parça olmamasından dolayı çalışma sırasında oldukça sessizdir. Yakıt pilleri, pil gibi çalışmakta olmakla birlikte yeniden şarj edilmeleri gerekmemektedir. Yakıt sağlandığı sürece kesintisiz ve sürekli elektrik ve ısı üretmektedir.

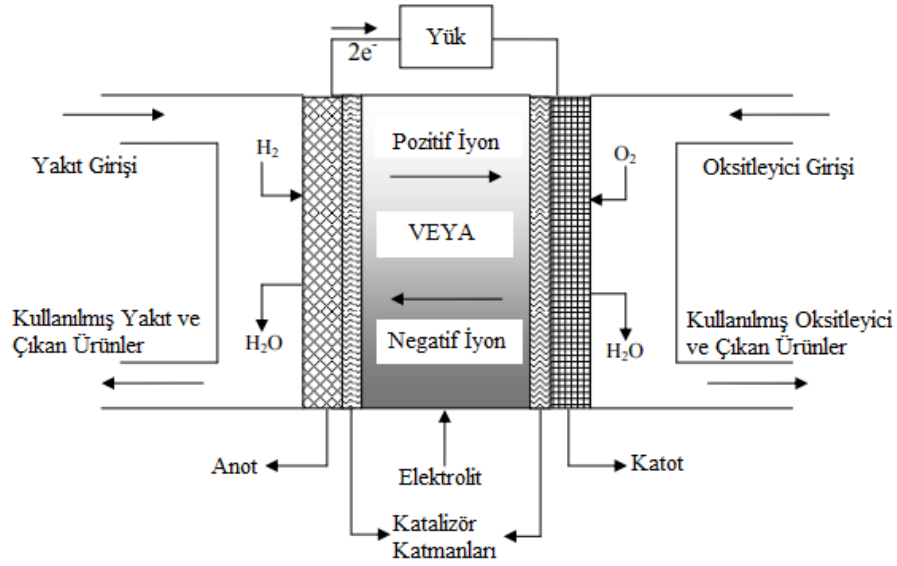
Yakıt pili bir elektrolitin her iki yüzeyine kaplanan iki elektrottan meydana gelmektedir. Bu elektrotlardan biri negatif elektrot (veya anot) ve diğeri ise pozitif elektrottur (veya katot). İki elektrot ve bir elektrolitten oluşan ve elektrik enerjisinin üretildiği bu yapı membran elektrot grubu (MEG) olarak adlandırılmaktadır. Anot tarafından bir yakıt, katot tarafından ise oksijen veya hava verildiğinde MEG, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik ve ısı enerjisi üretmektedir. Aynı zamanda MEG'i gazlarla en etkili şekilde besleyen ve üretilen elektriğin toplanmasını sağlayan özel iletken seramiklerden veya metallere oluşan ve içerisinde akış kanallarına sahip interkonnektörler bulunmaktadır. Yakıt pillerinde interkonnektör olarak genellikle metaller tercih edilmektedir. Bunun sebebi olarak ise metallerin kolay işlenebilmeleri ve yüksek

mukavemetlerinin oluşu en büyük etkidir. Fakat KOYP gibi yüksek sıcaklık yakıt pillerinde kullanılan bu metal alaşımlar (Crofer, Inconel, Haynes vb.) oldukça pahalıdır. Kısacası bir yakıt pili hücresi membran elektrot grubu, anot ile katot tarafında bulunan interkonnektörler ve ilgili sızdırmazlık ve akım toplayıcı elemanlardan oluşmaktadır.

1.2 Yakıt Pilleri

1.2.1 Temel çalışma prensipleri

Elektrokimyasal reaksiyonlar, elektronik iletkenliğe sahip gözenekli elektrot ile iyonik iletkenliğe sahip gözeneksiz elektrolit arasındaki yüzeyde gerçekleşmektedir. Yakıt pillerinde ise iki gözenekli elektrot bulunmaktadır (anot ve katot). Anot oksidasyonun meydana geldiği elektrot iken; katot ise indirgemenin gerçekleştiği elektrot olarak tanımlanmaktadır. Elektrotlar; metaller, yarı iletkenler, grafit ve hatta iletken polimerler gibi yeterince iletken herhangi bir malzemeden yapılabilmektedir. Bu elektrotlar arasında, serbestçe hareket edebilen iyonlar içeren elektrolit bulunmaktadır. Tipik bir yakıt pilinde, yakıt anot tarafından oksitleyici katot tarafından sürekli olarak verilirken, elektrokimyasal reaksiyonlar anot/elektrolit ve katot/elektrolit arayüzeylerindeki katalizör katmanlarındaki üçlü faz bölgelerinde gerçekleşmektedir. Yani aslında anottaki bir katalizör hidrojen molekülünü katota farklı yollardan gidecek olan pozitif iyon ve elektrona ayırmaktadır. Elektronlar harici bir devreden geçerek elektrik akışını sağlamaktadır. Pozitif iyon ise elektrolitten katota geçer ve burada oksijen ve dış devreden dolanarak gelen elektronlarla birleşmektedir. Sonuç olarak elektrik, su ve ısı açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyon tamamen elektrokimyasal bir reaksiyon olup yanma olayı gerçekleşmemektedir. Şekil 1.1’de de yakıt pilinin temel çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.1. Yakıt pilinin temel çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)

1.2.2 Yakıt pili çeşitleri

Yakıt pilleri, esas olarak kullandıkları elektrolit türüne göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, pilde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların türünü, gereken katalizör türünü, pilin çalıştığı sıcaklık aralığını, gereken yakıtı ve diğer faktörleri belirlemektedir. Yukarıda bahsedilen her bir faktör yakıt pilleri çeşitlerinin en uygun olduğu uygulamaları da etkilemektedir. Şu anda geliştirilmekte olan her bir yakıt pilinin kendine göre avantajları, sınırlamaları ve potansiyel uygulama alanları bulunmaktadır. Yakıt pili çeşitlerinden Polimer Elektrolit Yakıt Pili (PEYP), Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP) ve Alkalın Yakıt Pili (AYP) ulaşım uygulamalarında, askeri ve kamu tesislerinde uygulanması muhtemel düşük sıcaklıklı yakıt pilleri olarak sınıflandırılırken; Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP), Eriyik Karbonat Yakıt Pili (EKYP) ve Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP) ise enerji üretimi ve hibrid güç uygulamalarında, yüksek çalışma sıcaklığına ve verimliliğe sahip olan yakıt pilleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bilim insanları yakıt pillerinin performansını arttırmak ve maliyetlerini düşürmek için farklı katalizör ve elektrolit malzemelerini, interkonnektör olarak kullanılabilecek malzemeleri ve akış kanalı tasarımlarını, sızdırmazlık elemanlarını araştırmaya devam etmektedir.

Çizelge 1.1. Yakıt pili çeşitleri ve karşılaştırması

Çeşit	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Yakıt	Oksitleyici	Verim
AYP	Potasyum Hidroksit	<100	Saf Hidrojen	Oksijen veya Hava	%40-50
PEYP	Polimer	30-100	Hidrojen	Oksijen veya Hava	%40-50
DMYP	Polimer	30-100	Sıvı Metanol	Oksijen veya Hava	~%40
FAYP	Fosforik Asit	160-220	Hidrojen	Oksijen veya Hava	%36-42
EKYP	Eriyik Nitrat, Sülfat ve Karbonat Tuzları	600-800	Hidrojen, Karbonmonoksit, Doğalgaz, Propan	Karbondioksit, Oksijen veya Hava	%40-50
KOYP	Seramik	600-1000	Hidrojen, Doğalgaz, Propan	Oksijen veya Hava	%50-60

Yakıt pillerinin karşılaştırması Çizelge 1.1’de verilmiş olup her bir yakıt pilinin anot ve katotunda gerçekleşen reaksiyonlar ise aşağıda Çizelge 1.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 1.2. Yakıt pillerinin anot ve katotunda gerçekleşen reaksiyonlar

	Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu	Yük Geçişi
AYP	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	OH^-
PEYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	H^+
DMYP	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$	H^+
FAYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	H^+
EKYP	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	CO_3^{2-}
KOYP	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	O^{2-}

Yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları da Çizelge 1.3’de verilmiştir (Sharaf ve Orhan, 2014).

Çizelge 1.3. Yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Çok az emisyon veya yok	Olgunlaşmamış hidrojen altyapısı
Yüksek termodinamik verimlilik	Kirleticilere duyarlılık
Yüksek kısmi yük verimliliği	Pahalı katalizörler
Modülerlik ve ölçeklenebilirlik	Hassas sıcaklık ve su yönetimi
Mükemmel yük tepkisi	Hidrokarbon reformuna bağımlılık
Daha az enerji dönüşüm basamağı	Uzun vadeli dayanıklılık ve kararlılık sorunları
Sessiz ve statik	Hidrojen güvenliği endişeleri
Su ve kojenerasyon uygulamaları	kW başına yüksek yatırım maliyeti
Yakıt esnekliği	Nispeten büyük sistem boyutu ve ağırlığı
Geniş uygulama alanları	Sızdırmazlık sorunları

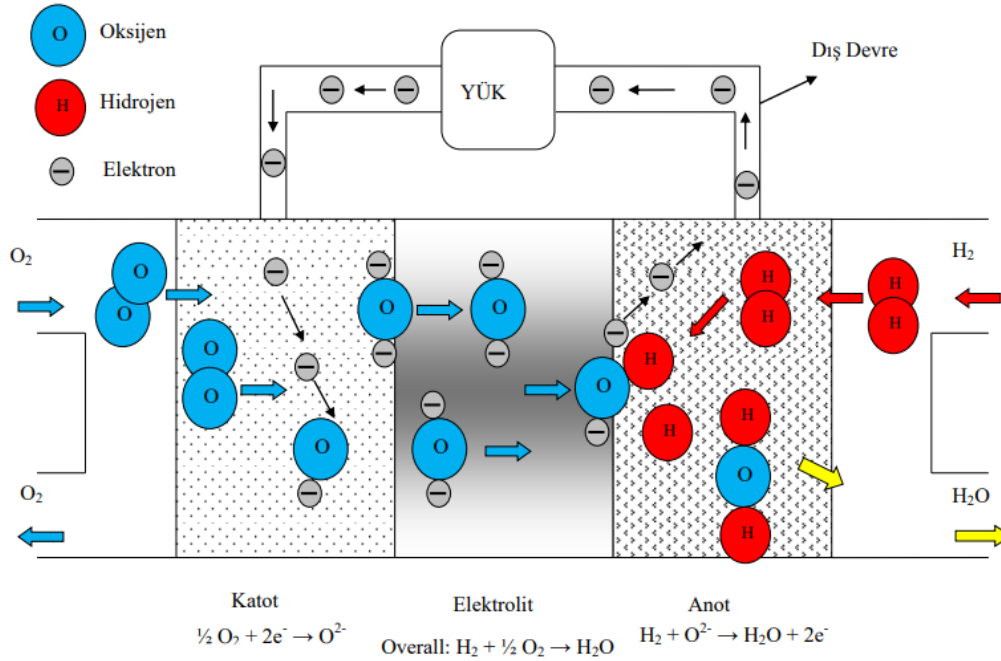
1.3 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

Katı oksit yakıt pili teknolojisi, hidrojen ve oksijen arasındaki elektrokimyasal reaksiyondan direk olarak elektrik üreten ve askeri, ulaşım ve evsel uygulamalar için maksimum elektrik verimliliği ve optimum güç üretim özellikleri sayesinde modern çağı değiştiren itici bir güç olabilecek teknolojilerden birisi olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu teknoloji, geleneksel motorların güvenilirliğini etkileyen yağlama, aşınma, sızıntı ve ısı kaybı sorunlarından önemli ölçüde etkilenmediği için esneklik ve modülerlik de sunmaktadır. Tipik olarak bir KOYP ise üç ana bileşenden oluşmaktadır: anot, katot ve elektrolit. Elektrolit malzemesi olarak genellikle itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ) kullanılırken, anot olarak nikel alaşımları ve katot olarak ise lantanyum stronsiyum manganat (LSM) kullanılmaktadır. Katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri grubundan olup kullanılan elektrolit malzemesine göre çalışma sıcaklığı da 600-1000 °C arasındadır. KOYP’nin elektrik verimliliği ise %50-60 arasında değişmektedir, ancak yüksek sıcaklık nedeniyle kojenerasyon sistemleri kullanılarak toplam verimlilik %80-85’lere çıkmaktadır. Aynı zamanda KOYP, Pt gibi

PEYP’de kullanılan pahalı katalizörlere de ihtiyaç duymamaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı hidrokarbonların bir yakıt olarak kullanılmasına da olanak vermektedir. Bu nedenle KOYP yakıt esnekliği de sunmaktadır. Öte yandan, PEYP için karbonmonoksit zehirleyici bir etkiye sahipken, KOYP’de karbonmonoksit yakıt olarak kullanılabilir. Fakat KOYP’nin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Oksitleme ve indirgeme koşullarındaki stabilite, kullanılan çeşitli seramiklerle kimyasal uyumluluk, çeşitli bileşenlerin geniş sıcaklık aralığında ısıl genleşme uyumluluğu, membranın yeterli iyonik iletkenliği ve yatırım maliyeti gibi aşılması gereken bir dizi zorluklar bulunmaktadır.

1.3.1 Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi

Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 1.2’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1.2. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi (Timurkutluk, 2007)

Katod bölgesinden oksijen veya hava verilerek oksijen, oksijen iyonuna indirgenmektedir:



Elektrolit, anot ve katot arasında gözeneksiz bir yapı olup gazları geçirmeyen fakat sadece iyon geçirgenliğine sahip olan tabakadır. İndirgenen oksijen iyonları bu tabakadan geçerek anota ulaşmaktadır. Anot bölgesinde ise hidrojen, katottan gelen oksijen iyonu ile oksitlenmektedir:

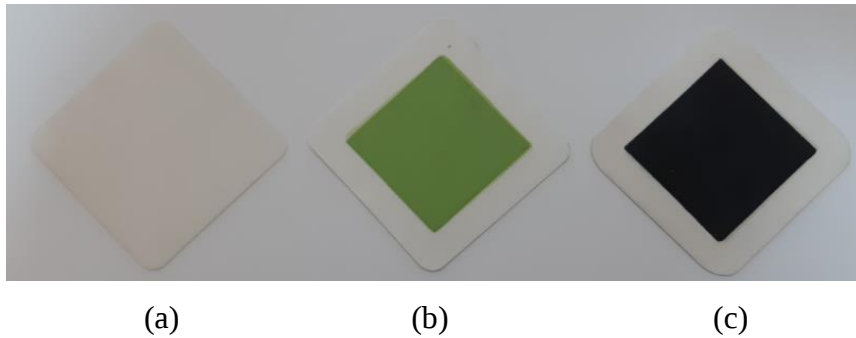


Anotta meydana gelen oksitlenme sonucunda su ve elektronlar açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan su dışarı atılırken elektronlar dış bir devre aracılığı ile katot bölgesine gönderilerek yeniden oksijenin indirgenmesine yol açmaktadır. Dış devreden dolanan elektronlar sayesinde de elektrik enerjisi elde edilmektedir. Toplam reaksiyon ise şu şekilde gerçekleşmektedir:



1.3.2 Katı oksit yakıt pili sistemini oluşturan elemanlar

Tipik bir KOYP hücresi; anot, katot ve elektrolitin birleşiminden meydana gelen membran elektrot grubu (MEG), interkonnektör plakalar, sızdırmazlık ve akım toplayıcı elemanlardan oluşmaktadır. Membran elektrot grubu Fotoğraf 1.1’de görsel olarak verilmiştir.



Fotoğraf 1.1. Membran elektrot grubunun görünümü; elektrolit (a), anot (b) ve katot (c)

Membran elektrot grupları ise daha yüksek güç elde etmek için bir araya getirilebilmektedir. Katı elektrolit, gaz geçirgenliği olmayan ve katot ile anot arasında sadece oksijen iyonu taşıyarak aradaki boşluğu doldurmaktadır. İki elektrottan biri olan

anotta yakıtın oksitlenmesi gerçekleşirken, katotta oksijenin indirgenmesi meydana gelmektedir. Bu tepkimeler elektrolit ile elektrotların ara yüzeylerinde oluşmaktadır. Tipik bir KOYP MEG; YSZ elektrolit, NiO-YSZ anot ve LSM-YSZ katottan oluşmaktadır.

Elektrolit

İki elektrot arasında yer alan katı ve yoğun elektrolit esas olarak iyon geçirgenliğine sahip seramik bir malzemedir. Bu iyon geçirgenliği, oksijen iyonu veya protonik olabilmektedir. Katı elektrolit kimyasal kararlılığın yanı sıra aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Dwivedi, 2020):

- ❖ Elektrolit, yüksek iyon iletkenliğine sahip olmalıdır. 1-100 μm katı elektrolit kalınlığı için 0,01-0,1 S/cm iletkenlik arzu edilmektedir. Elektrolitin iyon iletkenliği düşük olursa, daha yüksek ohmik kayıplara neden olacağından, bu durum düşük hücre performansı ile sonuçlanmaktadır.
- ❖ Elektrolit, düşük elektronik iletkenliğine sahip olmalıdır. Yüksek elektronik iletkenliği voltaj kaybına neden olacaktır.
- ❖ Elektrolitin mekanik mukavemeti yeterince yüksek olmalıdır.
- ❖ Elektrolitin termal kararlılığı, termal stresleri dengeli dağıtabilmesi için iyi olmalıdır. Ayrıca, oksijen altında stabil olmalıdır.
- ❖ Hammaddeler maliyetli olmamalı ve işleme yöntemi de uygun maliyetli olmalıdır.

Anot

Anot, en iyi elektrokimyasal performansı verebilecek mikro yapıya bağlı olarak katı oksit yakıt pili teknolojisinde önemli bir bileşendir. Anotta bilindiği gibi yakıt oksidasyon reaksiyonu gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar yakıt (gözenek), iyon iletken faz ve elektronik iletken fazın bir arada bulunduğu ve anot üçlü faz bölgesi olarak adlandırılan bölgelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle pil performansı doğrudan üçlü faz bölgelerinin sayısı ve uzunluğuna bağlı olmaktadır. Bu kapsamda gerek KOYP anot gerekse de KOYP katot malzemeleri, elektronik iletken katalizör malzemesinin yanı sıra iyon iletken (genellikle elektrolit) bir faz da içeren kompozit bir yapıya sahip olmaktadır. Bu sayede

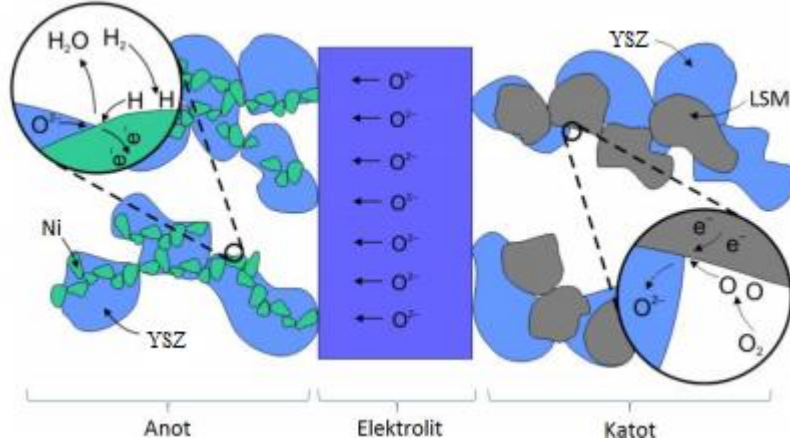
elektrotlarda meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar bütün elektrot hacminde gerçekleşebilmekte ve artan elektrokimyasal reaksiyon bölgeleri nedeni ile pil performansında önemli iyileşmeler elde edilebilmektedir. Kullanılacak anot malzemesi yüksek derecede elektronik iletkenliğe, iyi kimyasal stabiliteye, diğer sistem bileşenleriyle termal uyumluluğa sahip olmalıdır. Aynı zamanda anot malzemesinin yakıtı etkili bir şekilde iletebilmesi için yeterli gözenekliliğe ve oksidasyon reaksiyonları için yüksek elektrokatalitik verimliliğe sahip olması gerekmektedir. Bütün bu faktörler birleştirildiğinde anotta gerçekleşen oksidasyon reaksiyonunun polarizasyon kayıplarını en aza indirerek yüksek performanslı KOYP'leri oluşturacağı görülmektedir.

Katot

Katot, içerisinde oksijen geçişine izin veren gözenekliliğe sahip olan ve oksijeni indirgeyerek iyonla dönüştüren katı oksit yakıt pilinin önemli bir bileşenidir. Anota benzer şekilde bu indirgeme reaksiyonu; oksijen iyonlarının, elektronların ve oksijen moleküllerinin bulunduğu belirli bölgelerde gelişmektedir. Bu bölgeler katot üçlü faz bölgesi olarak adlandırılmaktadır ve anoda benzer şekilde bu bölgelerin sayısı ve uzunluğu pil performansını doğrudan etkilemektedir. Tipik bir KOYP katot malzemesinde olması gereken özellikler ise aşağıda sıralanmıştır (Kaur ve Singh, 2019):

- ❖ Hem iyonik hem de elektronik iletkenliğe sahip olması
- ❖ Isıl genleşme katsayısının KOYP'lerin çalışması sırasında kırılma ve delaminasyondan kaçınmak için elektrolit, sızdırmazlık elemanı ve interkonnektör gibi diğer sistem bileşenleri ile uyumlu olması
- ❖ Oksijenin katota difüzyonuna izin vermek için yeterli gözenekliliğin olması
- ❖ Yüksek katalitik aktiviteye sahip olması
- ❖ Diğer sistem bileşenleri ile kimyasal reaksiyona girmemesi gerekmektedir.

Anot ve katot üçlü faz bölgelerinin detaylandırıldığı katı oksit yakıt pili membran elektrot grubunun mikro şematik gösterimi Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Katı oksit yakıt pili membran elektrot grubunun mikro şematik gösterimi (Çelik, 2013)

Anot, katot ve elektrolitte olması gereken özelliklerden bahsedildikten sonra son olarak KOYP MEG’de yaygın olarak kullanılan malzemeler Çizelge 1.4’te karşılaştırılmıştır (Sreedhar vd., 2019).

Çizelge 1.4. MEG’de kullanılan malzemeler

Kısaltması	Bileşeni	Kritik Özellikleri	Avantajı	Dezavantajı	Dikkat Edilmesi Gerekenler
YSZ	Elektrolit	Yüksek mekanik dayanım + Yüksek iyonik iletkenlik	Uzun Çalışma Süresi (>40000 saat)	Yüksek çalışma sıcaklığı (1000 °C)	Bazı katot malzemeleri ile uyumsuzluk
ScSZ	Elektrolit	Yüksek mekanik dayanım + Yüksek iyonik iletkenlik	Sc ³⁺ /Zr ⁴⁺ ’nin küçük boyut uyumsuzluğu	5000 saatte yüksek yaşlanmanın gözlenmesi	Sc nadir ve pahalı
GDC	Elektrolit	Düşük sıcaklıkta yüksek iyonik iletkenlik	Düşük polarizasyon kayıpları	Düşük oksijen kısmi basınçlarında elektronik iletkenlik	Tane boyutundaki küçülme
LSGM	Elektrolit	Düşük sıcaklıkta iyi oksit-iyon iletkenliği	Düşük P(O ₂)’de katkılı seryumdan daha yüksek performans	Düşük mekanik stabilite	NiO anot ile uyumsuzluk
NiO/YSZ	Anot	Yüksek elektrokimyasal aktivite + Yüksek mekanik stabilite	Yüksek H ₂ dönüşümü	Hidrokarbon yakıt altında karbonlaşma	Yalnızca yüksek sıcaklıkta çalışması + Ni parçacıklarının kümelenmesi +

					Üstün uzun vadeli kararlılık
NiO/GDC	Anot	Yüksek iletkenlik	-	Karbonlaşma	-
Cu/YSZ	Anot	Düşük elektrokimyasal aktivite	Hidrokarbon yakıt altında karbon birikiminin olmaması	-	Düşük ve orta sıcaklık KOYP'ler için uygun
Cu/CeO₂/YSZ	Anot	Yeterli elektrokimyasal aktivite	Hidrokarbon yakıt altında karbon birikiminin olmaması	-	Düşük ve orta sıcaklık KOYP'ler için uygun
LSM	Katot	YSZ ile mükemmel ısı genleşme katsayısı uyumu + 800 °C ve üzerinde iyi performans	-	Düşük iyonik iletkenlik ve reaksiyon üçlü faz sınırı yakını ile sınırlı	1000 °C'de minimum difüzyon
LSF	Katot	İyi iyonik ve elektronik iletkenlik	-	Düşük ısı genleşme katsayısı uyumu	Oksijenin elektrokimyasal olarak indirgenmesi için yüksek aktivasyon enerjisi
LSCF	Katot	GDC ve ScSZ ile iyi stabilite + Yüksek iyonik iletkenlik	GDC ile iyi ısı genleşme katsayısı uyumu	Gereken aktivasyon enerjisi yüksek	Oksijen iyonlarının elektrot/elektrolit arayüzüne transferi için çoklu yollar

İnterkonnektör

İnterkonnektör, MEG'de üretilen akımın toplanmasının yanı sıra gerekli yakıt ve oksitleyicinin sisteme homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan ve üzerinde akış kanalları bulunan seramik veya metalik elemanlardır. Bu akış alanlarının geometrisi madde, ısı ve momentum aktarımını önemli ölçüde etkilediği için, KOYP performansı interkonnektör tasarımı ile değişmektedir. Hem indirgemenin hem de oksitlenmenin olduğu koşullarda ve yüksek çalışma sıcaklığında çalışan interkonnektörler katı oksit yakıt pili bileşenleri arasında seçimi en zorlu malzemedir. Bu nedenle bir interkonnektörün sahip olması gereken temel özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- ❖ Elektronik iletkenliğinin iyi olması
- ❖ Yüksek çalışma sıcaklığında iyi bir kimyasal ve termal kararlılığının olması

- ❖ Yakıt ve oksijen geçirgenliğinin çok düşük olması
- ❖ Isıl genleşme katsayısının MEG ile uyumlu olması gerekmektedir.

İnterkonnektör olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı Lantanyum Kromit (LaCrO_3) gibi seramik veya Crofer, Haynes, Hastelloy gibi metalik alaşımlar ile ferritik ve östenitik paslanmaz çelikler kullanılmaktadır. Farklı kanal tasarımlarına ve boyutlarına sahip interkonnektörler Fotoğraf 1.2’de verilmektedir.



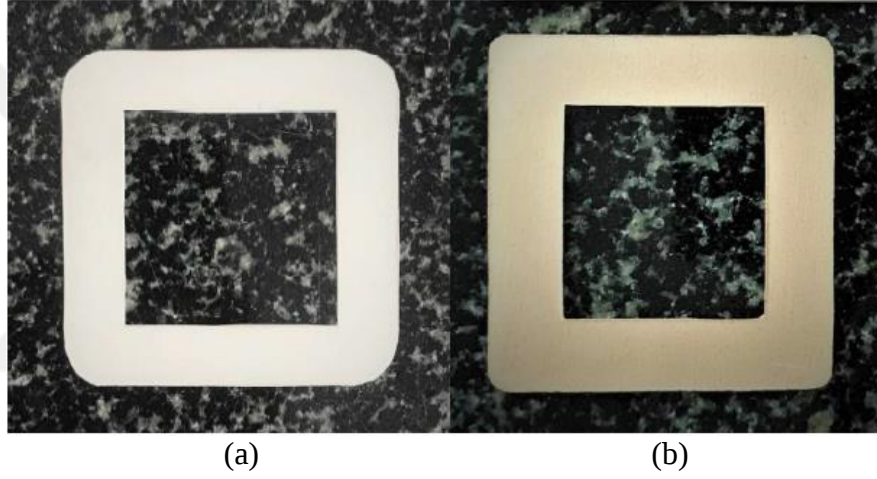
Fotoğraf 1.2. Farklı kanal tasarımlarına ve boyutlarına sahip interkonnektörler

Sızdırmazlık Elemanları

Yüksek sıcaklıkta ve zorlu koşullarda çalışan KOYP için uygun sızdırmazlık elemanlarının geliştirilmesi oldukça zorlu bir süreçtir. Çünkü KOYP’de meydana gelen indirgeme ve oksitleme işlemleri esnasında sızdırmazlık elemanının kimyasal ve mekanik yönden kararlı bir şekilde kalması önemlidir. Bu kapsamda KOYP sızdırmazlık elemanında olması gereken özellikler aşağıda sıralanmaktadır:

- ❖ İyi sızdırmazlık yeteneği sergileyerek gaz kaçaklarını engellemelidir.
- ❖ Isıl genleşme katsayıları, interkonnektör ve MEG malzemelerinin ısı genleşme katsayılarına eşit veya yakın olmalıdır.
- ❖ Yüksek çalışma sıcaklıkları (600-1000 °C) göz önüne alındığında, bu sıcaklıklarda hem mekanik hem de kimyasal ve termal olarak kararlı olmalıdırlar.
- ❖ Elektriksel özellikler açısından yalıtkan olmalıdır.

KOYP’de kullanılan sızdırmazlık elemanlarından birisi mika contalardır. Fakat bu contalar yüksek sıcaklıkta oldukça gevrekleşmektedir. Bu da mekanik yönden birtakım problemler ortaya çıkartarak gaz kaçaklarına sebep olabilmektedir. Bu yüzden bir diğer sızdırmazlık elemanı olan ve literatürde üzerine çokça çalışma yapılan cam-seramik contalar KOYP’de sıkça kullanılmaktadır. Son zamanlarda fiber ve metal katkılı cam-seramik sızdırmazlık çalışmaları da yapılmaktadır (Wei vd., 2015; Timurkutluk vd., 2019a). Aynı zamanda cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının mekanik dayanımı üzerine de çalışmalar bulunmaktadır (Lin vd., 2012; Celik, 2015; Wang vd., 2017; Timurkutluk vd., 2019b). Mika ve cam-seramik sızdırmazlık elemanlarının görselleri Fotoğraf 1.3’de verilmiştir.



Fotoğraf 1.3. Cam-seramik (a) ve mika (b) sızdırmazlık elemanları

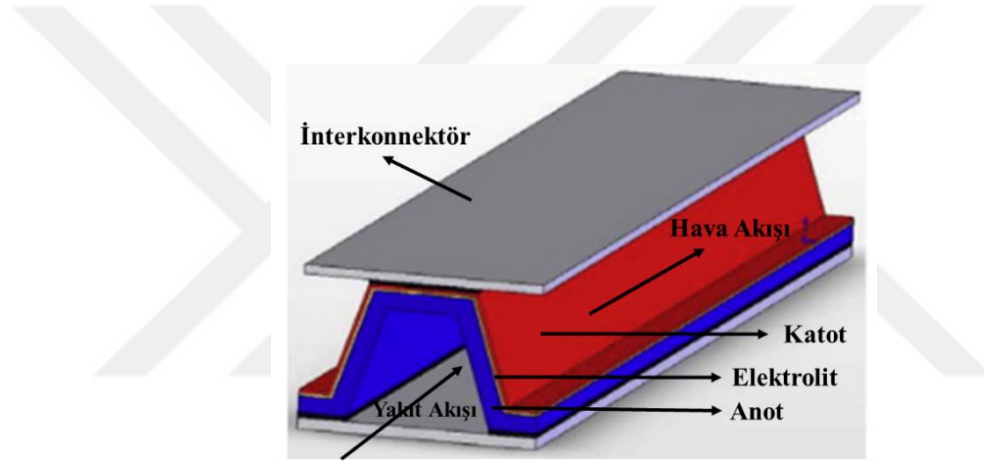
MEG, interkonnektör ve sızdırmazlık elemanlarının yanı sıra etkin bir akım toplama için KOYP’de akım toplayıcı elek ve pastalar da kullanılmaktadır. Bu kapsamda anot bölgesi için nikel, katot bölgesi için Crofer elekler sıklıkla tercih edilmektedir. Akım toplayıcı pastalar ise genel olarak anot ve katot katalizör malzemelerinden üretilmekle birlikte, çalışma sıcaklığına bağlı olarak Pt, Au ve Ag de KOYP’de akım toplayıcı pasta olarak kullanılmaktadır.

1.3.3 Katı oksit yakıt pili çeşitleri

Katı oksit yakıt pillerinde üç ana geometrik tasarım bulunmaktadır:

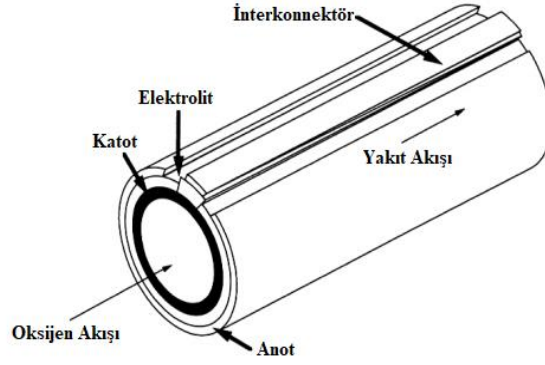
- Monolitik
- Tüp
- Düzlemsel

Monolitik KOYP tasarımı Şekil 1.4’de verilmiştir. Üretimi oldukça zor olan monolitik KOYP’nin en büyük dezavantajı da bu durumdur. Bu yüzden günümüzde araştırmanın ötesine geçememiştir.



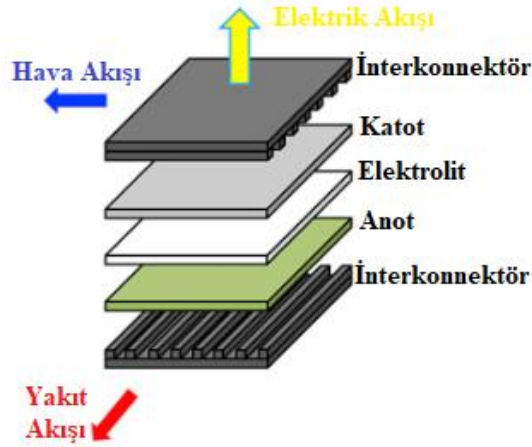
Şekil 1.4. Monolitik KOYP tasarımı (Sciacovelli ve Verda, 2009)

Tüp şeklindeki KOYP tasarımı ise Şekil 1.5’de verilmektedir. Diğer tasarım çeşitlerine göre üretimi zordur ve daha düşük güç yoğunluklarına sahiptir. Aynı zamanda verimli bir şekilde akımı toplamada da bir takım sıkıntılar oluşabilmektedir. En önemli avantajları arasında kolay gaz sızdırmazlığı ve silindirik doğası gereği hızlı bir şekilde yüksek çalışma sıcaklığına çıkarılabildiği için devreye alma süresinin kısa olması sayılabilir.

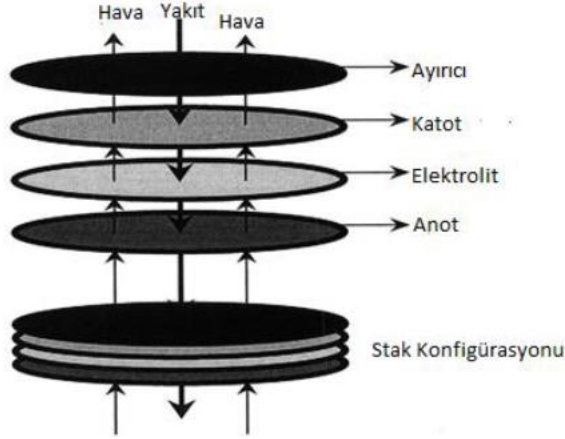


Şekil 1.5. Tüp KOYP tasarımı (Singhal, 2000)

Düzlemsel KOYP, diğer tasarımlar arasında en yüksek güç yoğunluğunu veren tasarım olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle üzerinde en çok çalışılan KOYP tasarımı olarak dikkat çekmektedir. Üretimi ve akım toplaması oldukça kolay olan bu tasarımın dezavantajı ise interkonnektör maliyetinin yüksek olması ve devreye alma süresinin uzun olması görülmektedir. Düzlemsel tasarım, düz ve radyal tasarım olarak ikiye ayrılmakta olup bu tasarımlar sırası ile Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de gösterilmiştir.

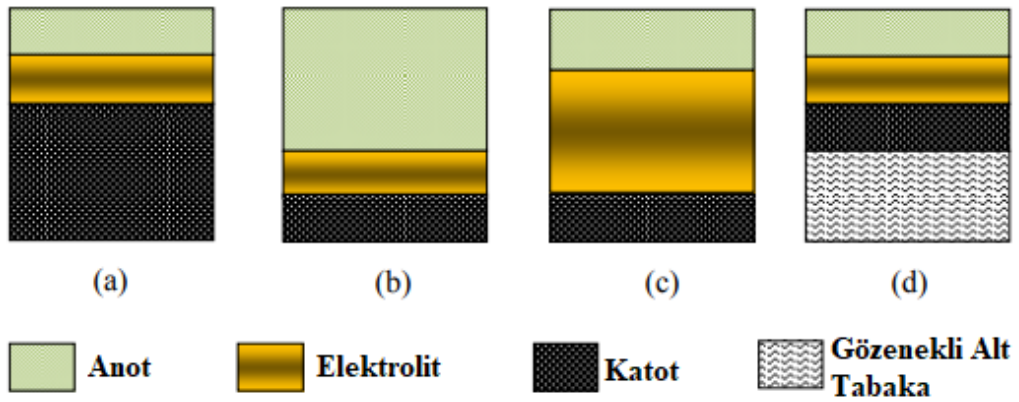


Şekil 1.6. Düz KOYP tasarımı (Kim ve Lee, 2017)



Şekil 1.7. Radyal KOYP tasarımı (Stambouli ve Traversa, 2002)

Katı oksit yakıt pilleri aynı zamanda MEG tasarımlarına göre de çeşitlendirilmektedir. Bu tasarımlar Şekil 1.8’de şematik olarak verilirken, görsel olarak da farklı boyutlarda ve şekillerde Fotoğraf 1.4’de görülmektedir. Elektrolit destekli tasarım, anot ve katot destekli tasarımlara göre mekanik olarak daha dayanıklıdır. Fakat güç yoğunluğu mekanik dayanım açısından kalın elektrolit kullanımını gerektirdiğinden anot ve katot destekli tasarımlara göre daha düşük olmaktadır. Çünkü elektrot destekli tasarımlar çok daha ince elektrolit tabakası içermektedir. Membran elektrot grubunun mekanik dayanımını arttırmak ve çok daha ince MEG tabakaları üretebilmek için MEG’in gözenekli bir iletken destek üzerine inşa edildiği tasarımlar da literatürde bulunmaktadır. Fakat bu tasarımlar üretim karmaşıklığı ve zorluğu problemlerini beraberinde getirmektedir.



Şekil 1.8. KOYP’de MEG tasarımları; katot destekli (a), anot destekli (b), elektrolit destekli (c) ve gözenekli alt tabaka destekli (d) tasarımlar



Fotoğraf 1.4. KOYP’de farklı boyutlarda ve şekillerde MEG tasarımları

Son olarak, tek hücreli bir KOYP’den elde edilebilecek voltaj ve akım dolayısı ile güç sınırlı olabilmektedir. Bu yüzden hücreler seri veya paralel bağlanarak stakları oluşturmaktadır. KOYP’nin modüler yapısı sayesinde stakta kullanılacak hücre sayısı istenilen güç gereksinimlerine göre ayarlanabilmektedir.

1.4 Tezin Amacı

Katı oksit yakıt pillerinde akım toplamada ve gazların homojen bir şekilde dağıtımında önemli bir görev üstlenen interkonnektörlerin pil performansı üzerinde önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır. Aynı zamanda üretim maliyetinin yüksekliği ve zorlayıcı üretim aşamaların oluşu ile yüksek çalışma sıcaklığından dolayı korozyona uğraması interkonnektörler üzerine yoğunlaşılmasının bir diğer sebepleri arasındadır. Bu yüzden bilim insanları pil performansını arttırmak için interkonnektörlerdeki farklı akış kanalı tasarım çalışmaları (Saied vd., 2018; Kong vd., 2019), interkonnektör üzerine korozyonu önleyici birtakım kaplama çalışmaları (Stanislawski vd., 2007; Tan vd., 2019), farklı metal alaşımları içeren interkonnektör çalışmaları (Hsu vd., 2016) ve zorlayıcı üretim aşamaları üzerine yoğunlaşarak maliyeti düşürücü çalışmalar (Timurkutluk vd., 2018; Timurkutluk ve Onbilgin,2020) yapmışlardır. Bu tezin amacı yaygın olarak kütük bir malzemeden talaşlı imalat ile üzerine kanal açılmasıyla üretilen interkonnektörler yerine sac malzemeden pres yöntemiyle üretilen interkonnektörün performans açısından incelenen parametreler içerisinde optimum olabilecek kanal tasarımını sayısal analiz ile

belirlemek olacaktır. Bu yeni tasarım geleneksel ağır ve iri interkonnektör kullanımını ortadan kaldırarak önemli bir avantaj sağlayacağından dolayı KOYP staklarının kütleli (W/kg) ve hacimsel (W/m³) güç yoğunluklarının da önemli bir artışına sebep olacaktır. Aynı zamanda uzun zaman alan ve pahalı olan talaşlı imalat ile üretim yerine tek seferde pres yöntemiyle üretilen interkonnektörler sayesinde üretim maliyetinde azalma meydana gelmesine de yardımcı olacaktır.

1.5 Tezin İçeriği

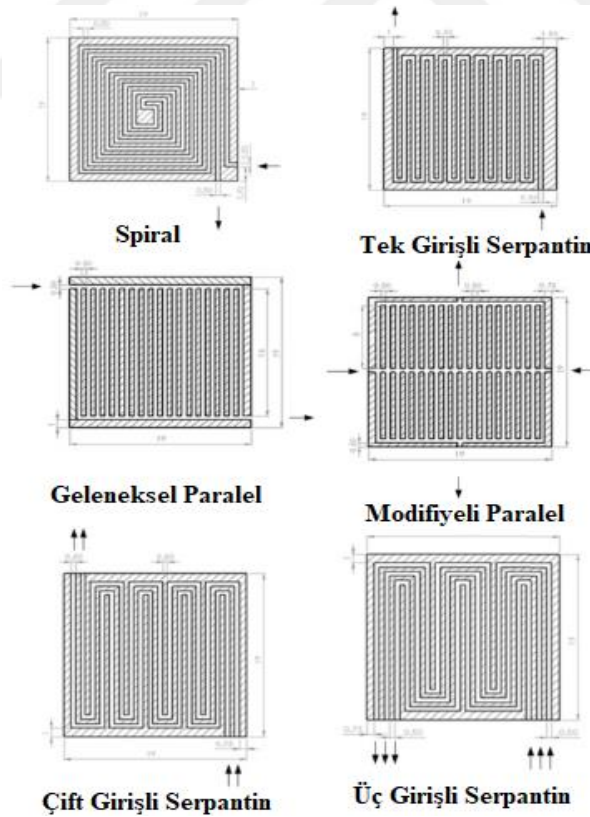
Bölüm I'de yakıt pilleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve KOYP üzerinde ağırlıklı olarak durulmuştur. Bölüm II'de ise tez konusu hakkında literatür taraması yapılmıştır. Bölüm III'de katı oksit yakıt pillerinin temelleri tanıtılmıştır. Bölüm IV'de ise yapılan sayısal modelleme ve analiz hakkında bilgiler verilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları ise Bölüm V'de sunulmuştur. Son bölüm olan sonuç ve tartışma kısmı ile tez çalışması bitirilmiştir.

BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Farklı Akış Alanları Üzerine Yapılan Çalışmalar

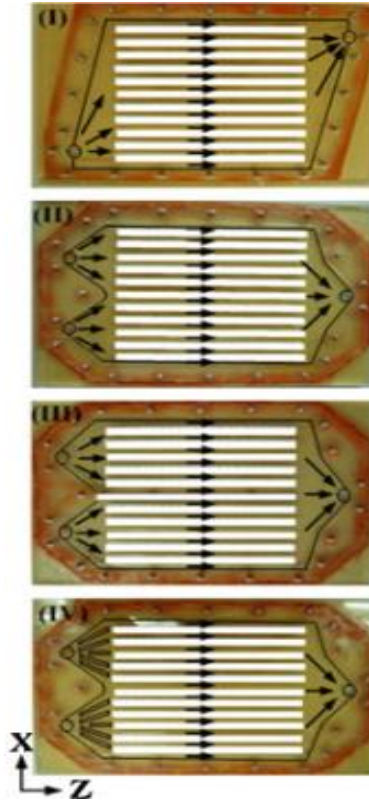
Saied vd. (2018), farklı akış kanalı tasarımlarına sahip düzlemsel anot destekli KOYP performansını incelemek için kapsamlı bir 3D matematiksel model geliştirmişlerdir. Model elektron ve iyon transferini, kütle, momentum ve enerji korunumunu içermektedir. Geliştirilen model ise sayısal olarak modellenmiş ve daha önce araştırmacılar tarafından ortaya konulmuş deneysel verilerle gerilimi 0,6 V'de %5,3 hata ile doğrulamışlardır. Bu hatanın muhtemelen hesaplamalardaki hatalardan ve KOYP modellemesi için kabul edilen varsayımlardan kaynaklandığını savunmuşlardır. Spiral; geleneksel ve modifiye edilmiş paralel; tek girişli, çift girişli ve üç girişli serpantin şeklinde akış kanalı tasarımlarını belirleyerek performans açısından karşılaştırmışlardır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Farklı akış kanalı tasarımları (Saied vd., 2018)

Elde edilen sonuçlara göre tek girişe sahip spiral ve serpantin tasarımın hızlı bir şekilde yakıtı tüketmesinden dolayı katot tarafının çıkışında gazın geri akışa maruz kaldığı gözlenmiştir. Saied vd. bu durumu engellemek için girişte kütle akış hızını arttırmaya yarayacak şekilde giriş ve çıkıştaki port sayılarını arttırarak performansını iyileştirmeye çalışmışlardır. Tüm bu çabalar sonucunda üç girişli serpantin tasarımın aktif yüzey alanı boyunca hem yakıtı hem de oksijeni homojen bir şekilde dağıttığını ve düşük voltajlarda diğer tasarımlara göre % 5,18’lik bir artışla yaklaşık olarak 23,3 A’lık yüksek bir akım topladığını elde etmişlerdir. Yani sıkça kullanılan geleneksel ve modifiye edilmiş paralel tasarıma göre üç girişli serpantin tasarımın daha iyi performans verdiğini göstermişlerdir.

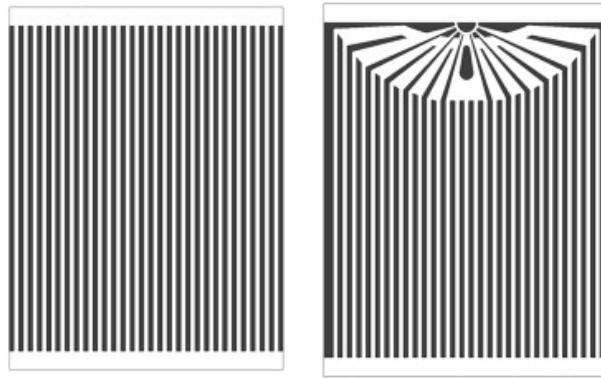
Huang vd. (2008), çeşitli interkonnektör tasarımlarıyla akış homojenliğini ve bunun düzlemsel KOYP üzerindeki performans etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Tasarımların hepsi 11 ribe ve aynı geometriye sahip 12 dikdörtgen akış kanalını içermektedir. Tasarımlar sırasıyla (I) tek girişli/tek çıkışlı, (II) çift girişli/tek çıkışlı, (III) yine 12 akış kanallı (II)’ye benzer fakat simetrik olacak şekilde bir tane kaburga ile ortadan bölünmüş ve (IV) çift ve eşit aralıklarla 10 adet kılavuz girişli/tek çıkışlı (II)’ye benzer olan tasarımlardır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Farklı akış alanı tasarımları (Huang vd., 2008)

Aynı zamanda dört farklı akış alanı tasarımında Reynold sayısının akış homojenliği üzerindeki etkisini de hesaplamışlardır. Mevcut kurulumda Reynold değeri sıfır ile birkaç bine kadar değişmesine rağmen, odak noktası olarak gerçek test ve çalışma koşullarında kullanılabilecek şekilde Reynold değerini 0 ile 350 arasında incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre kılavuz içeren tasarım (IV) için akım yoğunluğu $0,55 \text{ A/cm}^2$ 'de maksimum güç yoğunluğu $0,38 \text{ W/cm}^2$ bulunurken, tasarım (II) için bu değer $0,342 \text{ W/cm}^2$ olarak bulunmuştur. Tasarım (IV) ile güç yoğunluğu değerinde % 11,1'lik bir artış sağlamışlardır. Sayısal sonuçlar aynı zamanda $Re_{\text{yakıt}}$ ve Re_{hava} 'nın hücre performansı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu da göstermiştir. Belirli bir $Re_{\text{yakıt}}$ değerinde, elektrokimyasal reaksiyonlar için mevcut yakıtı tamamen tüketmek için çok daha büyük Re_{hava} değerleri gerekmektedir. Çünkü katot üzerindeki oksijenin indirgenme oranı anot üzerindeki hidrojenin oksitlenme oranından çok daha yavaştır. Bu yüzden Huang vd. makul derecede iyi bir güç yoğunluğu elde etmek için Reynold sayısının anot üzerinde 20 ile 50, katot üzerinde ise 200 ile 300 arasında olması gerektiğini savunmuşlardır.

Danilov ve Tade (2009), düzlemsel anot akış alanı tasarımını üzerine yoğunlaşarak 3D bir model geliştirmişlerdir (Şekil 2.3). Geliştirdikleri izotermal olmayan modelde kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği dahil olmak üzere çeşitli faktörlerin pil performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar düzlemsel KOYP için anot akış alanı tasarımının önemli olduğunu göstermiştir.



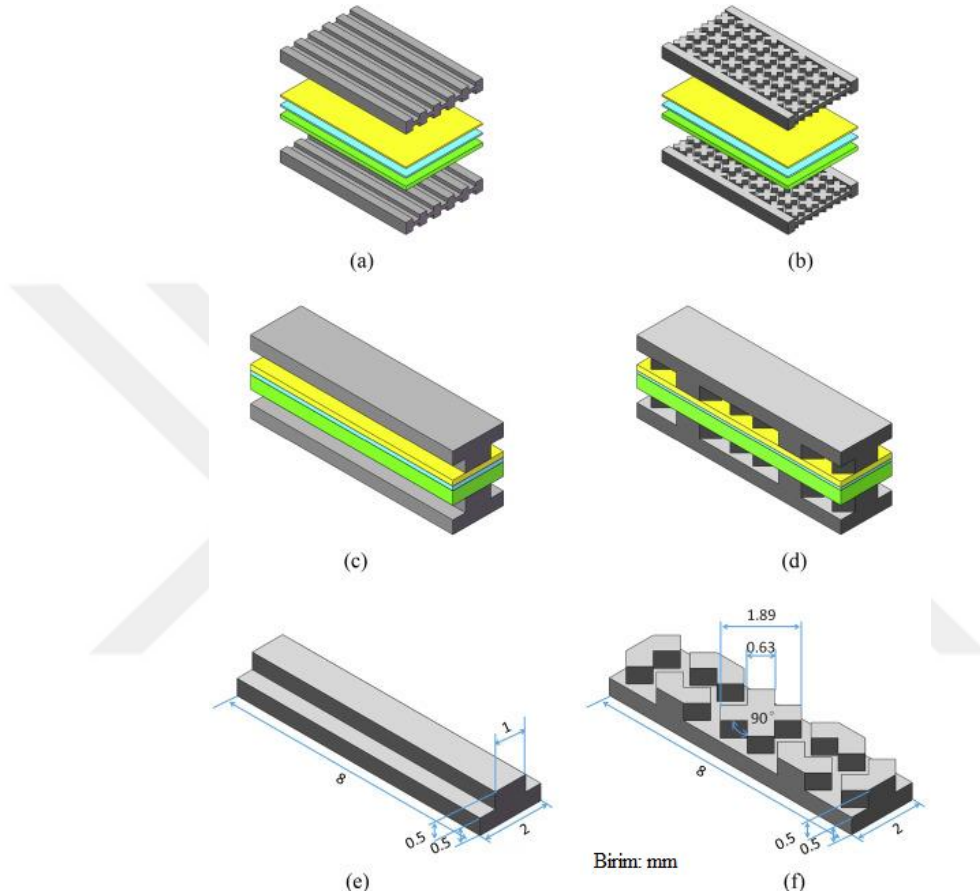
Şekil 2.3. Farklı anot akış alanı tasarımları (Danilov ve Tade, 2009)

Danilov ve Tade önerdikleri yeni tasarım ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların performansı arttırarak momentum, kütle ve enerji transfer süreçlerini kuvvetlendirmeyi

amaçlamışlardır. Simülasyon sonuçlarında, geleneksel anot akış alanı tasarımında düzgün olmayan hız, sıcaklık ve yerel akım yoğunluğu dağılımı ile birlikte gazın giriş kısmında da geriye akışın olduğunu göstermişler ve bu durumun performansa olumsuz etkisini ortaya koymuşlardır. Yeni anot akış alanı tasarımında ise giriş konfigürasyonunun değiştirilmesi ile hem geri akışı engellemenin hem de transfer sürecini kuvvetlendirmenin performansta iyileşme sağlayacağını göstermişlerdir. Yaptıkları çalışma ile interkonnektör tasarımının ve çalışma koşullarının optimizasyonu için yeni tasarımın kullanışlı ve yararlı olduğunu savunmuşlardır.

Bhattacharya vd. (2018), düzlemsel anot destekli KOYP’de paralel ve serpantin akış kanalı tasarımı için oksijen ve hidrojen debilerinin performans üzerindeki etkilerini 3D bir modelle detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Hidrojen için debi aralığını 25-300 SCCM seçerken, oksijen için bu aralığı 100-500 SCCM olarak seçmişlerdir. Sonuç olarak; seçilen hidrojen debisi aralığında paralel akış kanalı için iyonik akım yoğunluğu 6700 ile 12200 A/m² arasında değişirken, serpantin akış kanalı için ise 7500 ile 13500 A/m² arasında değişerek daha yüksek bir değere ulaştığı ve seçilen oksijen debisi aralığında ise paralel akış kanalı için bu değer 6700 ile 10600 A/m² arasında değişirken, serpantin akış kanalı için ise 6000 ile 12200 A/m² arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucunda 125 SCCM’den (paralel için) ve 150 SCCM’den (serpantin için) daha yüksek hidrojen debilerinde akıma karşılık gelen artış pratikte anlamlı olamayacak kadar düşük olduğundan dolayı hidrojen debisi aralığının paralel akış kanalı için 75 ile 125 SCCM; serpantin akış kanalı için ise 75-150 SCCM arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Daha sonra oksijen debisinin hücre performansı üzerindeki etkisini analiz edebilmek için 75 SCCM hidrojen debisini sabit tutarak gerçekleştirdikleri çözümlemelerde paralel için 225 SCCM’den ve serpantin için 200 SCCM’den daha yüksek oksijen debilerinde akım yoğunluğundaki artışın göz ardı edilebileceğini bulmuşlardır. Bu yüzden ideal olan oksijen debi aralığının paralel akış kanalı için 175- 225 SCCM, serpantin akış kanalı için ise 175-200 SCCM olması gerektiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak modeli her iki tasarım için 75 SCCM hidrojen debisi ve 175 SCCM oksijen debisinde çalıştırarak performansı karşılaştırmışlardır. Elde edilen tüm verileri incelediklerinde serpantin kanal tasarımının güç üretimi ve yakıt kullanımı açısından geleneksel paralel kanal tasarımı üzerindeki üstünlüğünü açıkça ortaya koyduğunu rapor etmişlerdir.

Kong vd. (2019), çalışmalarında daha önce literatürde rastlanmayan X tipi akış alanına sahip yeni bir interkonnektör tasarımı önermişlerdir (Şekil 2.4). KOYP modellerini hem geleneksel hem de X tipi interkonnektör için oluşturarak oksijen mol oranını, basınç, iletkenlik ve gözeneklilik açısından elde edilen verileri inceleyerek performans açısından karşılaştırmışlardır.



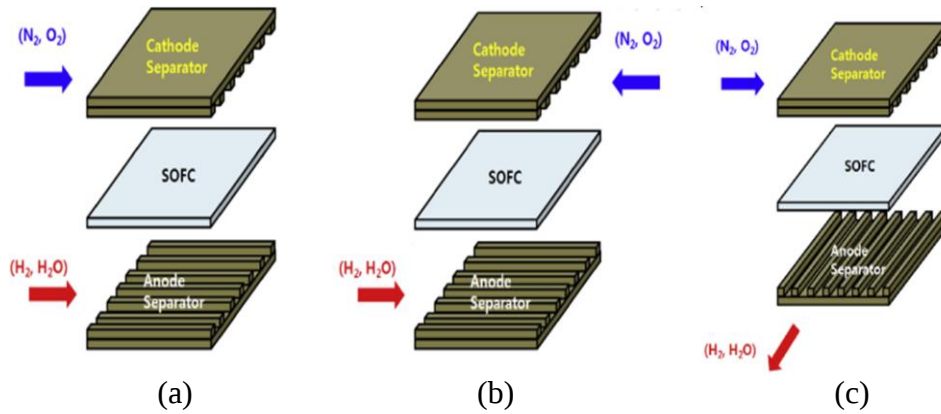
Şekil 2.4. Geleneksel interkonnektör tasarımı (a), X tipi interkonnektör tasarımı (b), geleneksel interkonnektörün çözüm bölgesi (c), X tipi interkonnektörün çözüm bölgesi (d), geleneksel interkonnektörün boyutları (e) ve X tipi interkonnektörün boyutları (f) (Kong vd., 2019)

Elde edilen sonuçlara göre her iki interkonnektör tasarımı için maksimum ve minimum oksijen mol oranı aynı olsa da geleneksel interkonnektör ile karşılaştırıldığında X tipi interkonnektörün gaz taşıma açısından daha üstün olduğunu savunmuşlardır. İletkenlik ve gözeneklilik açısından, anot ve katotun herhangi bir gözenekliliği ve iletkenliği için X tipi interkonnektörün geleneksel interkonnektörden üstün olduğu görülmüş ve katot iletkenliği daha küçük olduğunda X tipi interkonnektörün avantajının daha dikkate değer olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda büyük anot iletkenliğine bağlı olarak anot

iletkenliğini daha da arttırmanın bir anlamı olmadığını savunmuşlardır. Basınç düşüşü yönünden ise X tipi interkonnektörün yakıt ve hava basıncı düşüşünün geleneksel interkonnektöre göre daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Yakıt basıncının düşüşü her iki tasarım için oldukça düşük iken, hava basıncının düşüşü X tipi için 2940 Pascal olarak hesaplamışlardır. Bu düşüşün nedeni olarak havanın hacimsel debisinin yakıtın hacimsel debisinden çok daha büyük olması öne sürülmüştür. Bu düşüş, çıkış gücü açısından bakıldığında, X tipi yeni interkonnektörün güç yoğunluğunu %14,3 arttırarak geleneksel interkonnektörün $0,4 \text{ W/cm}^2$ olan değerini $0,457 \text{ W/cm}^2$ yapmıştır. Yani güç artışı $0,00912 \text{ W}$ kadarken, hava basıncı düşüşünün neden olduğu güç kaybı $0,0058 \text{ W}$ 'dır. Fakat geleneksel interkonnektör tarafından üretilen güce kıyasla hala $0,00332 \text{ W}$ fazla güç bulunmaktadır. Sonuç olarak X tipi yeni interkonnektörün performans açısından geleneksel interkonnektöre göre daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

2.2 Kanaldaki Akış Yönü Üzerine Yapılan Çalışmalar

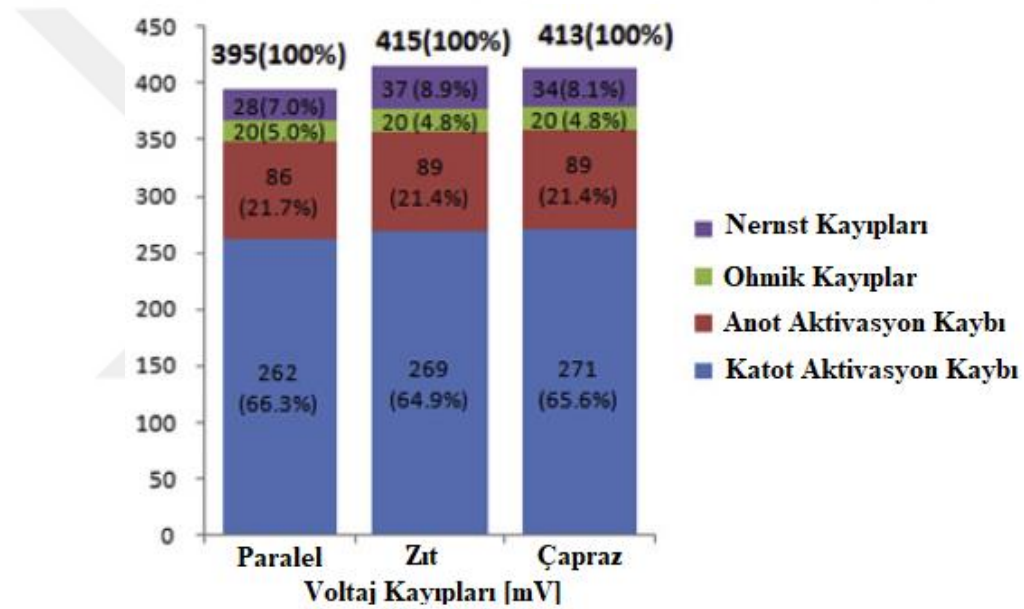
Kim ve Lee (2019), çalışmalarında üç farklı akış tipine sahip katı oksit yakıt pilini modelleyerek sıcaklık ve akım yoğunluğu dağılımını, voltaj kayıplarını ve akış homojenliğini incelemişlerdir.



Şekil 2.5. Üç farklı akış tipi; paralel akış (a), zıt akış (b) ve çapraz akış (c) (Kim ve Lee, 2019)

Sıcaklık dağılımına göre paralel, ters ve çapraz akışın her birinin maksimum sıcaklığını sırasıyla 851°C , 850°C ve 855°C olarak bulmuşlar ve standart sapmalarının sırasıyla 12°C , 15°C ve 14°C olduğunu belirtmişlerdir. Bu yüzden paralel akış tipinin diğer akış tiplerine göre daha homojen bir sıcaklık dağılımına sahip olduğunu savunmuşlardır.

Akım yoğunluğu yönünden paralel, ters ve çapraz akışın, maksimum akım yoğunluklarını sırasıyla 0,3152 A/cm², 0,4349 A/cm² ve 0,4236 A/cm² olarak bulmuşlardır. Fakat akım yoğunluğu dağılımında, paralel akışın maksimum akım yoğunluğu düşük olmasına rağmen daha homojen bir dağılım gösterdiğini belirtmişlerdir. Denklemlerindeki gerilim-akım ilişkisini kullanarak da maksimum pil voltajlarını sırasıyla 0,584 V, 0,566 V ve 0,567 V olarak hesaplamışlardır. Voltajdaki bu farklılığın her akış tipi için meydana gelen farklı sıcaklık ve madde dağılımlarının ortaya çıkardığı voltaj kayıplarının farklılık göstermesi olarak ifade etmişlerdir. Bu voltaj kayıplarını Nernst, ohmik ve anot ile katottaki aktivasyon kayıpları olarak sınıflandırarak sütun grafiğinde göstermişlerdir (Şekil 2.6).

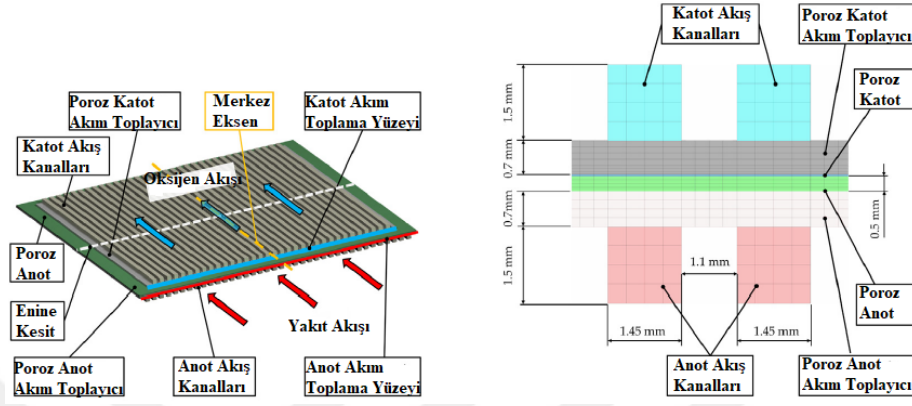


Şekil 2.6. Voltaj kayıplarının oranları (Kim ve Lee, 2019)

Gazların her bir reaksiyon bölgesine eşit olarak verilmesi de performansı korumak için oldukça önemli olduğundan akış homojenliğini incelemek için aynı zamanda akış analizi de yapmışlardır. Bu analizde her kanal için 0,336 m/s ortalama hız tanımlamışlar ve akış homojenliğinin uygun olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak paralel akış tipinin daha homojen akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımı sağladığını, voltaj kaybı yönünden de en az olması dolayısıyla uygun olduğunu bulmuşlardır.

Benzer bir çalışmada Schluckner vd. (2019), pil içerisindeki akım yoğunluğu dağılımını ve sıcaklık gelişimini analiz etmek için paralel, ters ve çapraz akış konfigürasyonlarının

yanısıra çeşitli elektriksel kontakların konumlarının da etkilerini araştırmışlardır. Bu yüzden farklı akış konfigürasyonlarında ve elektriksel kontak düzenlemelerinde sıcaklık dağılımını belirlemek için 3D bir KOYP modeli geliştirerek daha önce yapılan deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır.

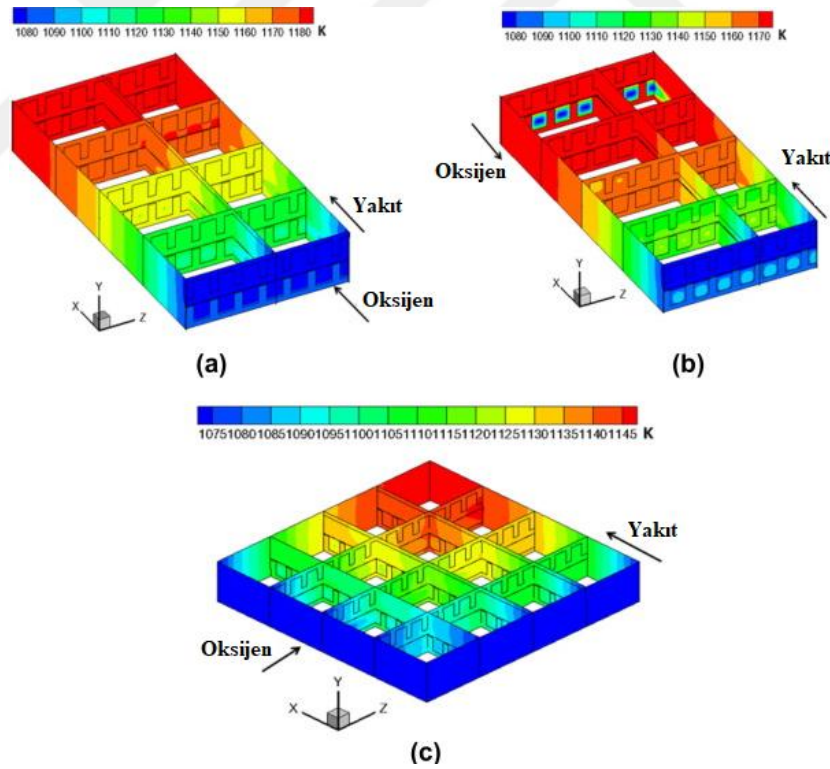


Şekil 2.7. Geometrik modelin detayı (Schluckner vd., 2019)

Yaptıkları çalışma ile pil geometrisinin en dışındaki katot akış kanallarında yüksek oksijen kullanımı olduğunu bulmuşlardır. Bu yüzden bir KOYP stağı tasarlanırken, aşırı yüksek oksijen kullanımından kaçınmak ve konsantrasyon kayıpları nedeniyle pil performansında ani düşüşleri önlemek için bu bölgelere özellikle dikkat edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir. Yaptıkları araştırmalar neticesinde aynı zamanda elektriksel kontakların konumunun akım yoğunluğu dağılımını ve dolayısıyla sıcaklık dağılımını da etkilediğini görmüşlerdir. Paralel akış konfigürasyonunda elektriksel kontakların çıkışlara yerleştirilmesiyle, akım yoğunluğu dağılımı homojen hale gelirken maksimum sıcaklığın ise pil merkezinden uzaklaştığını bildirmişlerdir. Bu sebeple, maksimum sıcaklık pil merkezinden aşağıya doğru yani çıkışın yakınında meydana gelmiştir. Ters akış konfigürasyonunda ise maksimum sıcaklığın anot girişine veya daha çok katot çıkışına doğru kaymakta olduğu görülmüştür. Dolayısıyla maksimum sıcaklığın konumu ve büyüklüğü katottaki oksijenin akış oranından etkilenmektedir. Çapraz akış konfigürasyonu kullanımı ise sıcaklık dağılımını çarpıtarak maksimum sıcaklığın katot ve anot çıkış tarafında oluşmasına neden olmuştur. Bu akış konfigürasyonunun kullanımının KOYP'lerin uzun süre çalışmasını göz önünde bulundurulduğunda sıcaklık dağılımı yönünden uygun olmadığını bildirmişlerdir. Sonuç olarak ters akış konfigürasyonu kullanmanın ve elektriksel kontakların katotun giriş tarafına yerleştirilmesinin hem akım yoğunluğunu elektrolit boyunca homojenize ettiğini hem de

pilin merkezine yakın bir yerde maksimum sıcaklığın meydana gelmesini sağlayacağını bildirmişlerdir. Dolayısıyla bu konfigürasyon, hem KOYP'lerin uzun vadeli ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlamak hem de ömürlerini uzatmak için Schluckner vd. tarafından önerilmiştir.

Yine akış konfigürasyonunun incelendiği bir çalışmada Zhang vd. (2015), anot destekli 3D düzlemsel KOYP modeli için üç farklı akış konfigürasyonunda (paralel, ters ve çapraz akış) meydana gelen sıcaklık, akım yoğunluğu ve gaz konsantrasyonlarını karşılaştırarak pilin genel performansı üzerinde durmuşlardır. Geliştirdikleri modelde çalışma voltajı olarak 0,7 V seçmişler ve kanal başına yakıt debisini 2×10^{-8} kg/s ve oksijen debisini 8×10^{-7} kg/s olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda paralel akış konfigürasyonu için anot ve katot girişinde sıcaklığın en düşük seviyede olduğunu (800 °C), çıkışa doğru elektrokimyasal reaksiyonların ısı artışı tetiklemesiyle 907 °C'ye çıktığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.8).

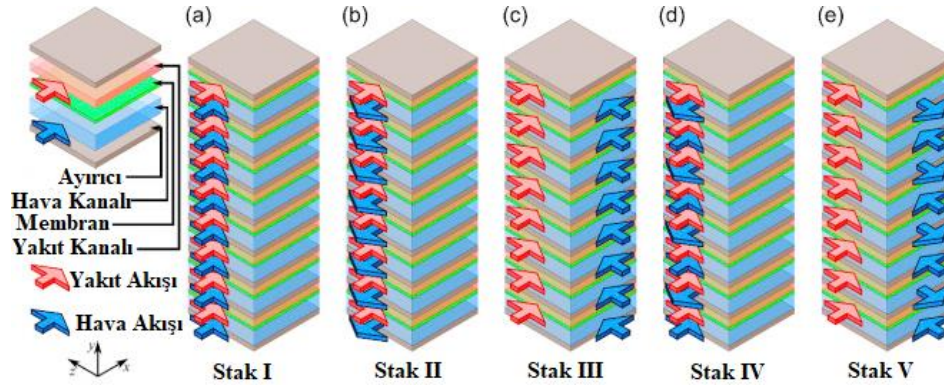


Şekil 2.8. Paralel akış (a), ters akış (b) ve çapraz akış (c) için pil içerisindeki sıcaklık dağılımı (Zhang vd., 2015)

Ters akış konfigürasyonunda ise maksimum sıcaklık paralelden 10 °C daha düşük, çaprazdan ise 25 °C daha fazla olmuştur. Başka bir deyişle en yüksek sıcaklığa sahip akış

konfigürasyonu paraleldir. Bunun nedeni olarak paralel akışta yakıtın aynı yönünde akan katottaki oksijenin üçlü faz sınırlarında üretilen ısıyı almasıyla sıcaklığın artması olduğunu ifade etmişlerdir. Ters akışta ise yakıt girişinden çıkışına kadar sıcaklık artarken, yakıt çıkışında pile giren soğuk oksijenin etkisi ile maksimum sıcaklıkta düşüş meydana geldiğini söylemişlerdir. Çapraz akıştaki durumda elektrokimyasal reaksiyon sırasında daha az yakıt ve oksijenin bulunması nedeniyle daha az ısı üretimi söz konusu olduğundan sıcaklık düşmektedir. Gaz konsantrasyonlarına bakılacak olursa, hidrojen mol oranı ters akışta paralel akışa göre daha yüksek fakat çapraz akışa göre daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Su için ise tam tersi bir durum meydana gelmektedir. Oksijen mol oranının ise hidrojen ile aynı dağılıma sahip olduğunu bulmuşlar ancak katot elektrot/elektrolit arayüzeyindeki oksijen mol oranının hidrojen mol oranından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sebebinin katotun anottan çok daha ince olması olduğu ifade edilmiştir. Akım yoğunluğu dağılımının oksijen akış yönü boyunca elektrotlarda çok düzensiz olduğunu ve maksimum değerin rib ile katot elektrotunun arayüzeyinde meydana geldiğini, minimum değerin ise anot elektrotunun akış kanalının merkezinde oluştuğunu rapor etmişlerdir. Tüm elde edilen veriler ışığında paralel ve ters akış konfigürasyonlarının, aynı çalışma koşulundaki çapraz akış konfigürasyonundan daha iyi bir performansa sahip olduğunu bulmuşlardır.

Tan vd. (2018), katı oksit yakıt pili stağındaki farklı akış konfigürasyonlarının etkilerini kısmen 3D sayısal bir model kullanarak incelemişlerdir. Yönü değişken yakıt akışına paralel ve dik şekilde hava akışlarına sahip akış konfigürasyonlarının (d ve e) yanısıra geleneksel olan paralel, zıt ve çapraz akış konfigürasyonlarını (a, b ve c) incelemişlerdir. Her bir stak 4900 mm^2 'lik aktif alana sahip sekiz adet membrandan oluşmaktadır. Galvanostatik kontrol için ise ortalama akım yoğunlukları 1500, 3000, 4500 ve 6000 A/m^2 olan staklara sırasıyla 0,193, 0,386, 0,579, 0,772 yakıt kullanımı ve 0,0308, 0,0615, 0,0923, 0,123 hava kullanımı uygulamışlardır. Hem havayı hem de yakıtı girişten $650 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık ile beslemişlerdir. Elde edilen verileri aynı zamanda deneysel sonuçlarla da doğrulamışlardır. İnceledikleri akış konfigürasyonları Şekil 2.9'da şematik olarak verilmiştir.

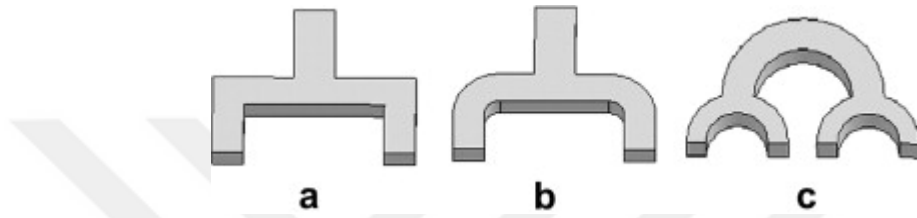


Şekil 2.9. Farklı akış konfigürasyonlarına sahip stak tasarımları; paralel akış (a), ters akış (b), çapraz akış (c), yönü değişken yakıt akışına paralel hava akışı (d) ve yönü değişken yakıt akışına dik hava akışı (e) (Tan vd., 2018)

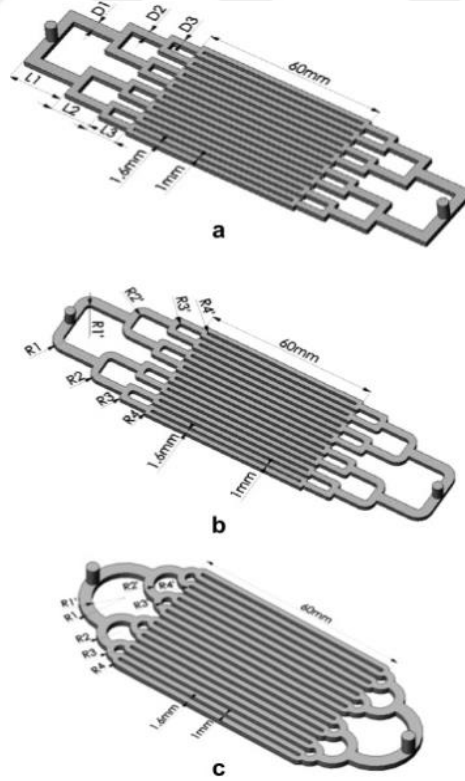
Tan vd. bu çalışmada sekiz membrana sahip bir KOYP stağındaki akış konfigürasyonlarının stak performansına, akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımına etkilerini istatistiksel tarzda sayısal olarak araştırmışlardır. Stağın ortasındaki dağılımları incelemek için en alttan dördüncü membranı incelemişlerdir. İnceleme sonucunda maksimum yerel akım yoğunluğunu I-V arasında sırasıyla 8707 A/m^2 , 10143 A/m^2 , 11826 A/m^2 , 7694 A/m^2 ve 8157 A/m^2 olduğunu bildirmişlerdir. Aynı şekilde maksimum sıcaklık değerlerini ise 819°C , 802°C , 832°C , 867°C ve 843°C bulmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre geleneksel olmayan yani yeni IV ile V tasarımları akım yoğunluğu yönünden negatif etki yaparken, sıcaklık yönünden pozitif etki yapmıştır. Farklı yakıt kullanımı ve ortalama akım yoğunluklarında istatistiksel incelemeye baktıklarında 1500 A/m^2 ortalama akım yoğunluğunda beş stak tasarımı arasında en düzensiz akım yoğunluğunu tasarım II olarak belirlemişlerdir. 6000 A/m^2 ortalama akım yoğunluğunda yani 0,772 yakıt kullanımında V stağının makul bir şekilde akım yoğunluğunun simetrik dağılımını görmüşlerdir. Öte yandan I,II ve III staklarında akım dağılımları pozitif olarak değişirken, stak IV'te akım dağılımı negatif değişmektedir. En iyi sıcaklık değerini de 6000 A/m^2 'de stak IV'te elde etmişlerdir. Yakıt akışına paralel hava akışlarının, 0,772 yakıt kullanımında 0,797 ile en yüksek voltaj verimliliğine ulaştığı ve yakıt akışına dik hava akışı, çapraz akış stağına kıyasla yerel yakıt tükenmesi riskini azalttığını bulmuşlardır.

2.3 Akışı Dağıtan Ana Kanallar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Liu vd. (2010), çalışmalarında yakıt pillerinin genel uygulamaları, kimyasal reaktörlerde yakıtın işlenmesi ve diğer endüstriyel cihazlar için akışın homojen dağılımı konusunu incelemişlerdir. Homojen akış dağılımını incelemek için akışı n kere dağıttıktan sonra son aşamada 2ⁿ akış kanalına sahip olacak şekilde çoklu seviyelerde akış kanalı çatallanmalarını içeren yeni bir tasarım önermişlerdir. Çatallanmaların tipi Şekil 2.10'da, genel görünümü ise Şekil 2.11'de verilmiştir.



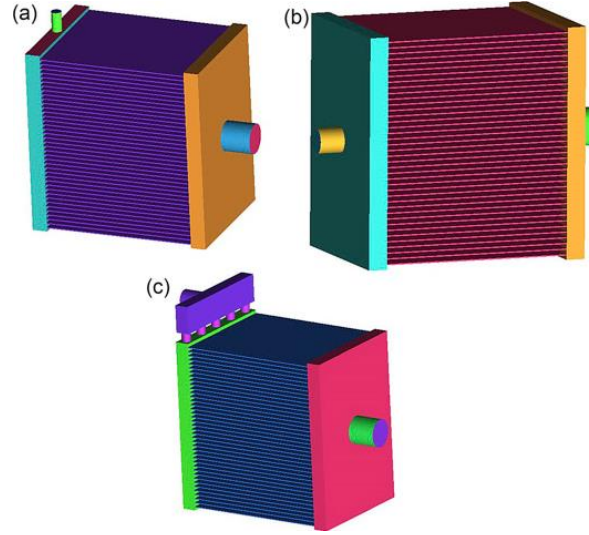
Şekil 2.10. Çatallanma sonrası 90 derecelik kanal dönüşü için akış kanalı çatallanmaları ve yapıları; keskin köşeli dönüş (a), yuvarlak köşeli dönüş (b) ve dairesel dönüş (c) (Liu vd., 2010)



Şekil 2.11. Akış kanallarının farklı yapılarıdaki 90 derecelik dönüşü ile meydana gelen çatallanmaların genel görünümü (Liu vd., 2010)

Aynı zamanda çatallanmanın yapısı ve boyutlarının da akışın homojen dağılımı üzerindeki etkisinin oldukça önemli olduğunu bildirmişlerdir. Özellikle de akış kanalının uzunluğu ve genişliği ile dönme alanının şekli gibi parametreleri incelemişlerdir. En iyi akış dağıtıcısını, homojen akış dağılımına ve düşük basınç kaybına bağlı olarak seçmişlerdir. Akış rejimini ise laminar akış ile sınırlandırmışlar ve kanaldaki laminar akışların dönüşten çatallanmaya kadar olan Reynold sayılarını, ortalama hıza göre değerlendirmişlerdir. Deneysel olarak da doğrulama yapmışlardır. İnceledikleri tüm akış dağıtıcıları için, son aşamadaki paralel akış kanalları aynı uzunluk (60 mm), genişlik (1,6 mm) ve derinliğe (2 mm) sahiptir. Bir akış dağıtıcısındaki tüm kanalların da 2 mm derinliğe sahip olduğunu ve çatallanma öncesi ve sonrası için kanal genişlikleri oranının 1:0,77 olduğunu söylemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre yuvarlak köşeli dönüşe sahip dağıtıcının keskin köşeli dönüşe sahip dağıtıcıdan daha iyi bir akış homojenliğine sahip olduğunu bildirmişlerdir. Çünkü yuvarlak dönüşün hız profiline yardımcı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu sebeple hız profilinin geliştirilmesi için hidrodinamik uzunluğun incelenmesi gerektiğini de savunmuşlardır. Bunun için $L1/D1$, $L2/D2$ ve $L3/D3$ oranlarının akış dağılımına etkilerini incelemişlerdir. Sırasıyla 5,5,5 olan birinci durumu, 5,4,3 olan ikinci durumu ve 4,3,2 olan üçüncü durumu incelemişlerdir. İnceleme sonucunda hem keskin köşeli hem de yuvarlak köşeli dönüşe sahip dağıtıcıların üçüncü durumunun birinci duruma göre daha az akış homojenliğine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak yine yuvarlak köşeli dönüşe sahip olan dağıtıcının daha homojen bir dağılım gösterdiğini onaylamışlardır. Üç farklı yapı için dağıtıcılarda ve tam akış alanındaki akış homojenliğinin karşılaştırılmasında ise Reynold sayısının 600 olduğu ve birinci durumda yuvarlak köşeli dönüşe sahip dağıtıcının daha iyi dağılım gösterdiğini bulmuşlardır. Hatta yine bu şartlar altında dairesel kanal çatallanma yapısına sahip dağıtıcının çok daha kötü bir akış dağılımına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Basınç kaybı yönünden ise keskin köşeli dönüşe sahip dağıtıcının beklenildiği gibi nispeten daha yüksek bir basınç kaybına sahip olduğu bulunurken, yuvarlak köşeli olanın basınç kaybı nispeten daha düşük olmuştur. Sonuç olarak çalışmalarında yuvarlak köşeli dönüşlü dağıtıcının birinci durumda (5,5,5) yüksek homojenlikte akış dağılımı sağladığını rapor etmişlerdir.

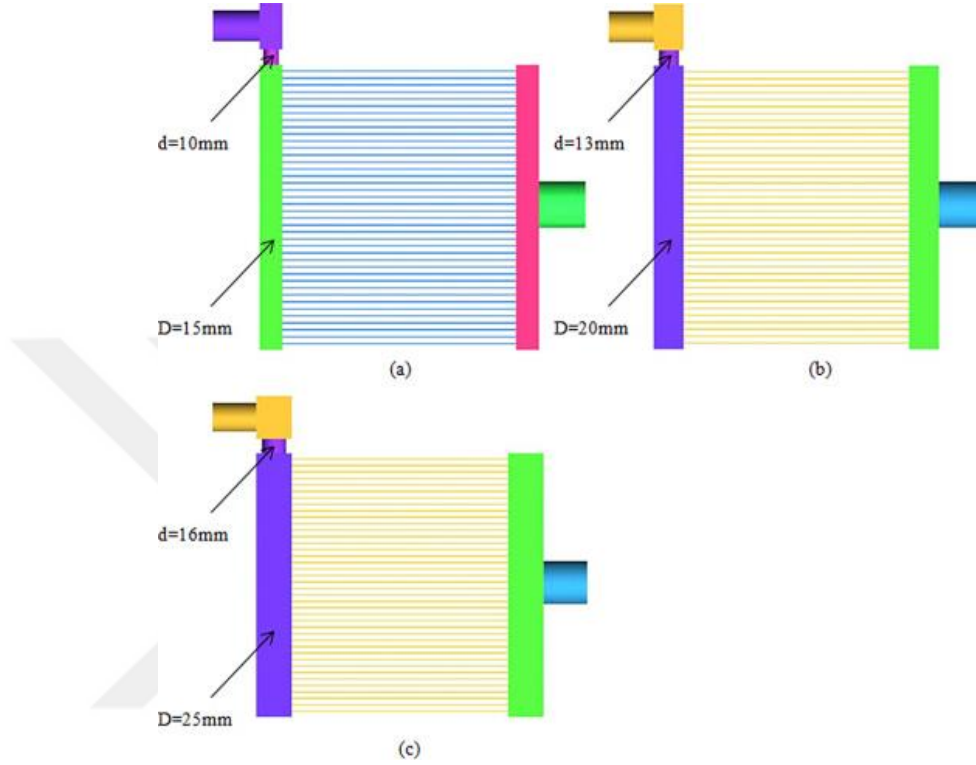
Zhao vd. (2017), 40 membrana sahip bir KOYP'nin farklı konumlardaki ve yapıdaki dış dağıtım borularını içeren stağını akış dağılımı ve basınç kaybı yönünden incelemek üzere 3D bir model geliştirmişlerdir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. KOYP stağı dış dağıtım borularının şematik gösterimi; girişi üstte (a), girişi merkezde (b) ve üstten çoklu giriş (c) (Zhao vd., 2017)

40 membranlı bir stak için 80 L/dak debide hava göndermişlerdir. Bu da sırasıyla 4,2 m/s ve 17,6 m/s ile 20 mm (b) ve 10 mm (a) giriş borularına karşılık gelmektedir. Tek bir membranın 150x130 mm’lik reaksiyon alanı için, 80 L/dak debi ile stağın beslenmesi sonucunda ölçülen basınç düşüşünü yaklaşık olarak 380 Pa belirlemişlerdir. Durum (a) için kanallardaki akış dağılımının, dış dağıtım borusunda yüksek gaz hızı nedeniyle çok düzgün olmadığını fakat durum (b)’de akışın dağılımının iyi bir şekilde gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Durum (c) için ise 1. kanaldan 10. kanala kadar akış oranının arttığını ve 10. kanaldan sonra sabit bir değerde kademeli olarak stabil kaldığını belirtmişlerdir. Basınç yönünden ise her üç durumun da benzer eğilimlere sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Her üç durum için de girişten çıkışa kadar yani akış alanı boyunca beklenildiği gibi basınç kademeli olarak azalmaktadır. Fakat durum (a)’nın basınç aralığının diğer iki durumdan daha geniş olduğunu ve bu durumun düzgün olmayan akış dağılımına sebep olduğunu söylemişlerdir. Simülasyon sonuçlarına dayanarak ana basınç düşüşünün stağın akış kanallarında meydana geldiğini fakat gazın giriş borusunun basınç değişimlerine ve akış dağılımlarına önemli bir etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir. Yakıt ve hava taraflarından gelen basınç, yüksek gaz akış hızı altında contalardan sızıntıya sebep olabilmektedir. Bunun için akış dağılımı durum (b) ve (c)’de daha homojen olduğundan, iki durum için akış hızı dağılımlarını karşılaştırmışlar ve (c)’deki giriş borularının yapılarını optimize etmişlerdir. Contaların yakınındaki maksimum akış hızının sırasıyla yaklaşık 0,47 m/s ve 0,31 m/s olduğu durum (b) ve (c) için görülmüştür. (b)’nin akış hızı (c)’den daha büyüktür. Bu nedenle (c)’nin sızdırmazlık pozisyonunda

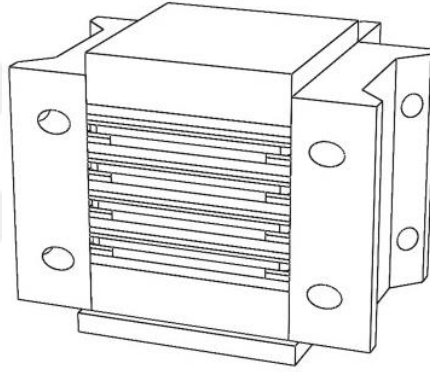
daha düzgün akış dağılımı ve daha düşük akış hızı gösterdiğini görmüşlerdir. Bu yüzden de son olarak (c) üzerine yoğunlaşmışlardır. (c)'deki akış homojenliğinin manifoldun derinliğine bağlı olduğu düşüncesinden yola çıkarak üç çeşit manifold derinliğini (15 mm, 20 mm ve 25 mm) belirlemişlerdir (Şekil 2.13).



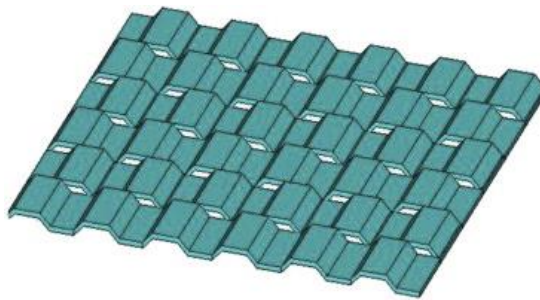
Şekil 2.13. Farklı manifold derinliğine sahip KOYP stağının şematik gösterimi; 15 mm (a), 20 mm (b) ve 25 mm (c) (Zhao vd., 2017)

Üç derinlikle makul bir şekilde karşılaştırma yapmak için manifolda bağlanan borunun çaplarını sırasıyla 10 mm, 13 mm ve 16 mm olarak seçmişlerdir. Elde ettikleri sonuca göre her üç durumda da 1. ve 9. kanallar arasında homojen olmayan bir akış dağılımı söz konusu olmuştur. Fakat daha sonraki kanallarda ise dağılımın daha düzgün hale geldiğini görmüşlerdir. Bu yüzden daha büyük manifold hacmi ve boru çapının, giriş manifoldu uzunluğu boyunca akış dağılımını ve basınç düşüşünü iyileştirmek için faydalı olacağını savunmuşlardır. Tüm bunların yanında boru sayısının etkisini de araştırmışlardır. Bunun için sırasıyla boru çapı 10 mm ve 15 mm olan 3,5 ve 8 boru oluşturmuşlardır. Akış hızı analizine baktıklarında boruların sayısının belirli eşik değerine yükseltildiğinde manifold haznesindeki akışta daha küçük girdapların oluştuğunu gözlemleyerek akışın daha homojen hale geldiğini savunmuşlardır.

Yan vd. (2013), katı oksit yakıt pilinde dış manifoldun uygulanabilirliğini değerlendirmek için 3 membranlı anot destekli düzlemsel KOYP stağını oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışma daha çok deneysel olmasına rağmen birtakım sayısal sonuçlar da barındırmaktadır. Stağı 750 °C’de ve yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak da hava göndererek çalıştırmışlar ve 100 cm²’lik aktif alana sahip membran kullanmışlardır. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre stağın açık devre voltajı 3,36 V iken 0,94 A/cm² akım yoğunluğunda 107 W’lık bir güç elde etmişlerdir. Katot tarafı için paslanmaz çelikten yapılmış oluklu akım toplayıcısı (Şekil 2.15) kullanılırken, anot tarafında akım toplayıcı olarak nikel köpük kullanmışlardır. Akış konfigürasyonu olarak ise çapraz akışı tercih etmişlerdir. Dış manifolda sahip KOYP stağının şematik gösterimi Şekil 2.14’te verilmiştir.

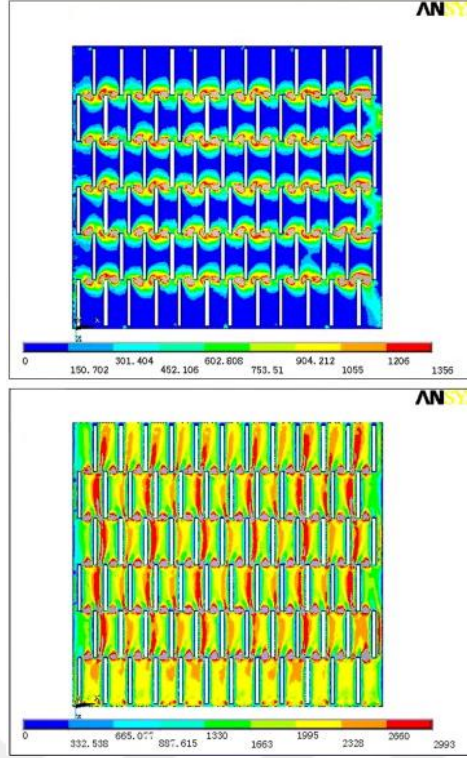


Şekil 2.14. Dış manifolda sahip KOYP stağı tasarımı (Yan vd., 2013)



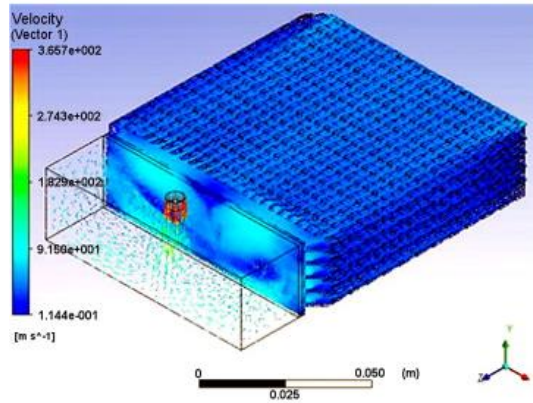
Şekil 2.15. Katot tarafında kullanılan oluklu akım toplayıcısı (Yan vd., 2013)

Bu tasarıma göre elde ettikleri sayısal sonuçlarda interkonnektörün akış alanı simülasyonunda akışın Şekil 2.16’da gösterildiği gibi akış alanı boyunca göreceli olarak homojen ve oldukça turbülanslı bir akış sağlayabildiğini bulmuşlardır.



Şekil 2.16. İnterkonnektörün katot tarafındaki akış hızı dağılımı; üstteki interkonnektör kanalına karşı dik hava akışı, alttaki interkonnektör kanalı boyunca hava akışı (Yan vd., 2013)

Aynı zamanda manifoldun gaz dağıtım etkinliğini de araştırmışlardır. Bunun için oluklu dağıtıcı 5 membranlı bir stağı giriş manifoldu odası olacak şekilde tasarlamışlardır. Her ne kadar akış, manifoldun tek girişinde oldukça yüksek bir hıza sahip olsa da bu giriş manifoldu odasının akışı yavaşlatacak kadar büyük olduğunu belirtmişlerdir. Oluklar arasındaki hız farklılıklarının da performansı etkileyecek kadar önemli olmadığını gözlemlemişlerdir (Şekil 2.17).

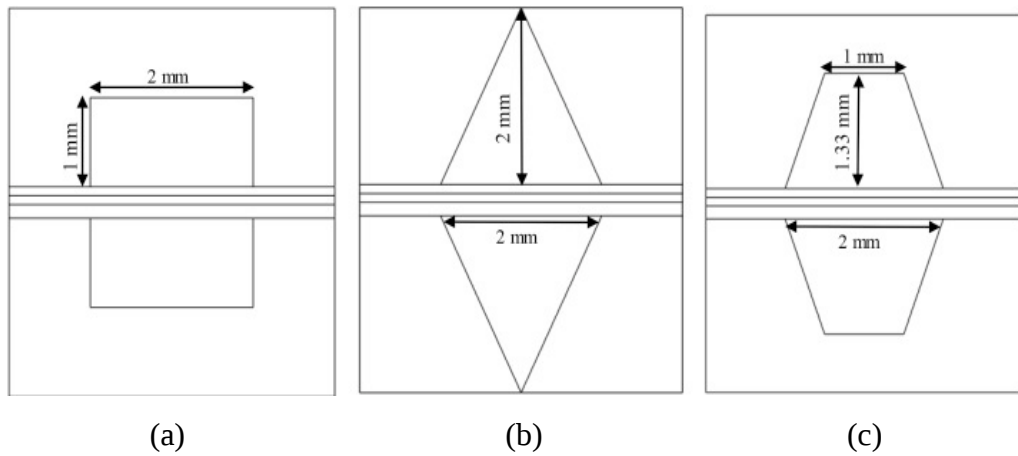


Şekil 2.17. Giriş manifoldu odasının akış hızı dağılımı (Yan vd., 2013)

Sıcaklık dağılımı açısından ise ortadaki pilin sıcaklığının, diğer ikisinden 10 °C daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Sonuç olarak, yüksek performans ve düşük bozunma ile stağın başarılı bir şekilde çalıştırılması sonucunda gelecekte dış manifoldlu KOYP staklarının uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Yaptıkları hesaplama sonucunda, dış manifoldlu KOYP stağının, kısa bir stak için bütün olarak gazları eşit dağıtabildiğini, ancak staktaki eşit olmayan sıcaklık dağılımının, her bir membranda performans farkına neden olabileceğini de rapor etmişlerdir.

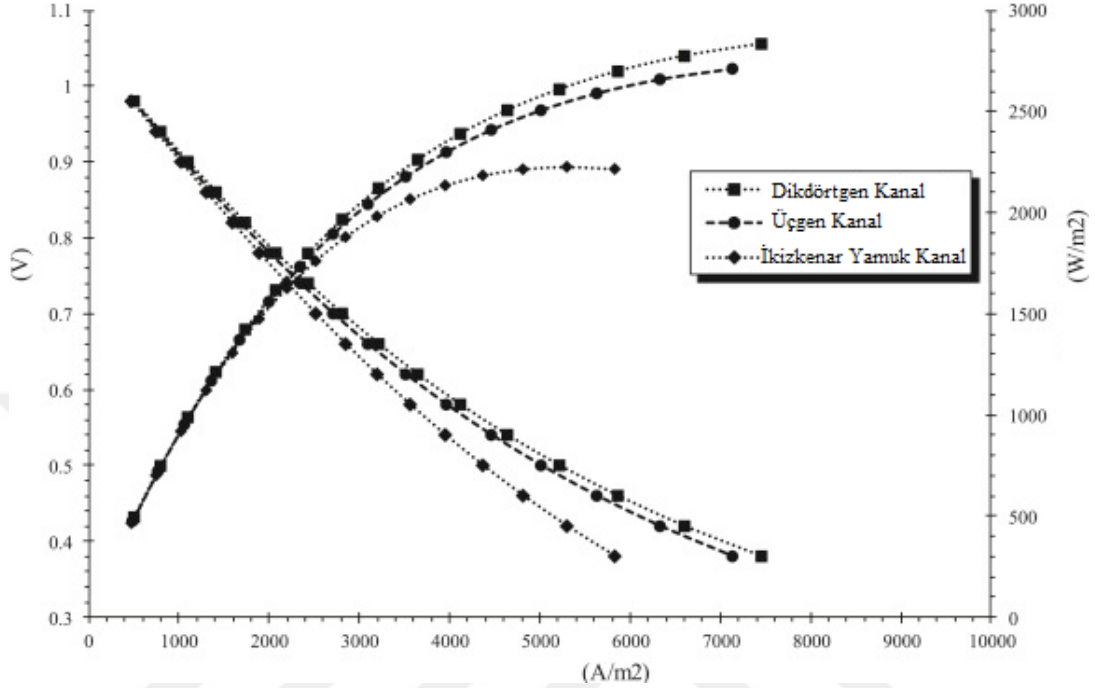
2.4 Akış Kanalı Geometrisi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Khazae ve Rava (2017), çalışmalarında üç farklı akış kanalı geometrisine sahip KOYP'yi 3D olarak Comsol programında modelleyerek pil performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Şekil 2.18). KOYP'de akış kanalı geometrisinin, gazların üçlü faz sınırlarında düzgün şekilde dağıtılmasında önemli bir etkiye sahip olduğu ve bu durumun da performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Bundan dolayı düzlemsel KOYP'yi daha iyi tasarlayabilmek için ayrıntılı olarak kütle ve ısı taşınimleri ile elektrokimyasal reaksiyonları aynı anda göz önünde bulundurmışlardır. Elde ettikleri simülasyon sonuçlarının özellikle düşük akım yoğunluklarında veya yüksek çalışma voltajında deneysel verilerle çok iyi uyduğunu belirtmişlerdir. Deneysel veriler, daha yüksek akım yoğunluklarında uyumluluk açısından simülasyondan biraz daha düşük olmuştur. Bunun sebebinin de deneylerde ohmik ısınmanın meydana getirdiği sıcaklık farkından oluştuğunu savunmuşlardır.



Şekil 2.18. Farklı akış kanalı geometrileri; dikdörtgen kanal (a), üçgen kanal (b) ve ikizkenar yamuk kanal (c) (Khazae ve Rava, 2017)

Esas olarak yaptıkları çalışmanın amacı ise, akış kanalı içerisindeki akış alanı ile akım yoğunluğu dağılımı arasındaki ilişkiyi incelemektir. Bu kapsamda üç farklı akış kanalı geometrisinden elde edilen performans eğrileri Şekil 2.19’da verilmektedir.



Şekil 2.19. Üç farklı akış kanalı geometrisinin performans eğrileri (Khazae ve Rava, 2017)

Elde ettikleri performans eğrilerine göre, voltajın 0,8 voltun altında olduğu değerlerde akım yoğunluğu açısından eğriler arasındaki farkın daha belirgin hale geldiğine dikkat çekmişlerdir. Yani daha yüksek çalışma voltajı koşullarında (düşük akım yoğunluğu) iç akış modifikasyonunun performans üzerindeki etkisinin küçük olduğunu fakat düşük çalışma voltajlarında (yüksek akım yoğunluğu) iç akış modifikasyonunun etkisinin büyük olduğunu ifade etmişlerdir. Performans açısından da en iyisinin dikdörtgen kanal olduğunu ve kanal şeklinin üçgen ve ikizkenar yamuk olmasıyla performansın düştüğünü bildirmişlerdir. Bunun sebebinin de yakıtın daha verimli olarak taşınamaması ve elektrokimyasal reaksiyonun gözle görülür şekilde yerel akım yoğunluklarını düşürmesi olarak görmüşlerdir. Aynı zamanda hidrojen mol oranı açısından da incelediklerinde dikdörtgen kanalın yakıtı daha fazla tükettiğini ve bunun da yakıtı daha iyi ilettiğini ve bu sayede daha çok elektrokimyasal reaksiyon olduğunu ve performansı artırdığını rapor etmişlerdir. İkizkenar yamuk kanalın ise yakıtı daha az tükettiğini ve performans açısından en düşük olduğunu göstermişlerdir. Ek olarak havanın ve yakıtın akış hızlarının

hidrojen dağılımı üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. Havanın hızını 2 m/s, 3 m/s ve 4 m/s olarak değiştirirken, yakıtın hızını 0,3 m/s, 0,4 m/s ve 0,5 m/s olarak değiştirmişlerdir. Havanın hızının arttırılmasının hidrojenin oksijen ile reaksiyonunda azalma meydana getireceğini yani katot gözeneklerinden oksijenin yeterli oranda geçmeden ve bir elektrokimyasal reaksiyon yapmadan kanaldan çıkabileceğini bildirmişlerdir. Bu durumun da hidrojen kullanımını azaltacağından mol oranında artışa sebep olacağını belirtmişlerdir. Diğer yandan da, hava hızının arttırılması pilin soğumasına katkı sunacağından dolayı düşük sıcaklıkların akım yoğunluğunu azaltıcı bir etkisi olacağını savunmaktadırlar. Yakıtın hızının arttırılması ile de kullanılmamış hidrojen oranının artacağını düşünmektedirler. Sonuç olarak tüm veriler ışığında incelenen geometriler arasında en iyi kanal tasarımının dikdörtgen kanal tasarımı olduğunu rapor etmişlerdir.

Li vd. (2018), çalışmalarında kütle taşınımını, elektron transferini ve elektrokimyasal reaksiyonları içeren 3D bir KOYP modeli sunmaktadırlar. İnceledikleri modelde amaçlarının, elektrotlardaki gazların dağılımlarına etkisi olan kanal genişliğini incelemek ve çeşitli temas koşulları altında kanal genişliğini optimize etmek olduğunu bildirmişlerdir. Deneylerinde 132,25 cm² toplam alana 100 cm²'de aktif alana sahip membran kullanmışlar ve interkonnektörde her bir gaz kanalının boyutları da 1,5 mm x 2 mm olarak verilmiştir. Akış konfigürasyonu çapraz akışlı olup membran 800 °C ve 0,7 V'da çalışmaktadır. Yakıt ve havayı sırasıyla 1 L/dak ile 3 L/dak şeklinde göndermişlerdir. Elde ettikleri simülasyon sonuçlarının ölçülen verilerden %3'ten fazla sapma göstermediğini belirterek doğrulama yapmışlardır. Beklenildiği gibi, oksijen mol oranının kanal boyunca azaldığını ve indirgeme reaksiyonundaki tüketim nedeniyle çıkışta minimum seviyeye ulaştığını bildirmişlerdir. Gerilim ne kadar düşük olursa oksijen dağılımının da o kadar farklı olacağı belirtilmiştir. Esasen, kanalın altındaki bölgelerde oksijen konsantrasyonunda ciddi bir azalma meydana gelirken, riblerde bu azalmanın daha az olduğunu belirtmişlerdir. Hidrojen konsantrasyonunun ise, çıkışa doğru oksidasyon reaksiyonu nedeniyle hidrojen tüketimi artacağından molar fraksiyonunun minimum seviyeye düşeceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak hidrojen ve oksijen dağılımındaki fark, gazların difüzyonundan kaynaklanmaktadır. Çünkü hidrojenin nüfuz etmesi oksijenden 10 kat daha hızlı olmaktadır. Akım yoğunluğu açısından ise, kanal çıkıntılarının gazların özellikle oksijen için kütle taşınımını sınırlandırdığını ve bu durumun pilin performansını düşürdüğünü ve aynı zamanda mevcut akım yoğunluğu farkını da arttırdığını bildirmişlerdir. Akım yoğunluğu dağılımı kanal ile

riblerde açıkça farklılık göstermektedir. Akım yoğunluğu dağılımının kanalın altında daha fazla olduğunu çünkü temas ve reaksiyonun bu bölgelerde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Fakat anottaki akım yoğunluğunun akış yönü boyunca her zaman azalmadığını her 0,004 m’de bir düzenli olarak azalıp arttığını göstermişler ve kanalın altında bu farkın çok yokken, riblerde bu farkın çok olduğunu bildirmişlerdir. Esasen akım yoğunluğu dağılımının oksijen dağılımından etkilendiğini de belirtmişlerdir. Öte yandan, kanal genişliğinin elektron transferi için ve temas direncinin neden olduğu voltaj kayıplarını önlemek için yeterli genişlikte olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu yüzden kanal genişliği ve rib genişliği toplamının 2,4 ve 6 mm olacak şekilde üç farklı durumu temas dirençleri ve akım yoğunluğu açısından karşılaştırmışlardır. Temas dirençlerini de literatüre uygun olarak 10, 20, 30, 40 ve 50 mΩ/cm² olarak seçmişlerdir. Bu analizlerde önce katot tarafı değiştirilirken anot tarafı sabit tutulmuş daha sonra tam tersi analizler de gerçekleştirmişlerdir.

Çizelge 2.1. Kanal ve rib genişliği toplamının üç farklı durumu

	Kanal Genişliği (mm)	Rib Genişliği (mm)	Toplam Genişlik (mm)
Durum I	0,5	1,5	2
	1	1	
	1,5	0,5	
Durum II	1	3	4
	1,5	2,5	
	2	2	
	2,5	1,5	
	3	1	
Durum III	1	5	6
	2	4	
	3	3	
	4	2	
	5	1	

Yaptıkları optimizasyona göre, temas direnci arttıkça katottaki akım yoğunluğunun azaldığını ve elektron transferi faktörünün daha geniş kanallarda daha fazla katkısının olduğunu belirtmişlerdir. Böylece temas direncindeki küçük bir değişikliğin mevcut akım yoğunluğunda belirgin bir farklılığa yol açtığını savunmuşlardır. Bu nedenle üç durumu

katotta temas direncini $30 \text{ m}\Omega/\text{cm}^{-2}$ olarak seçerek incelemişlerdir. İnceleme sonucunda katot/elektrolit ara yüzeyindeki oksijen konsantrasyonunun, kanal genişliği oranı arttıkça doğrusal olarak arttığını görmüşlerdir. Ayrıca, katottaki voltaj kayıplarının 0,5 kanal genişliği oranından sonra akım yoğunluğunu etkilemeye başladığını gözlemlemişlerdir. Toplam genişliğin 6 mm olduğu durumda ise voltaj kaybı çok fazla olmuştur. 2 mm ile 4 mm ise oldukça uyumlu bir voltaj kaybına sahiptir. Fakat akım yoğunluğu yönünden en ideal olanın 2 mm genişlikte olduğunu belirlemişlerdir. Yani kısacası daha dar kanallara ve çıkıntılara karşılık gelen toplam genişliğin akım yoğunluğunu arttırdığını rapor etmişlerdir. Çünkü dar kanallar elektrotlara kütle taşınım yolunu kısaltmaktadır. Anot için ise kanal genişliğinin artmasıyla akım yoğunluğunda ciddi bir fark oluşmadığını ve anotun katota göre daha az duyarlı olduğunu savunmuşlardır. Tüm elde edilen veriler ışığında, katot için toplam genişliğin 2 mm kanal genişliğinin 1 mm olduğu, 4 mm için 2 mm ve 6 mm için 4 mm'nin olduğu şartlar en ideal olarak gözüktürken, anot için 2 mm'de 1 mm, 4 mm'de 2 mm ve 6 mm'de 3 mm ideal olarak belirlenmiştir ve optimum kanal genişliği oranının 0,5 olması gerektiğini savunmuşlardır. Son olarak çalışmalarında kanal genişliği aralığının sınırlı olmasından dolayı daha yüksek doğruluk için daha fazla çalışmaya da ihtiyaç olduğunu rapor etmişlerdir.

Zeng vd. (2018), çalışmalarında optimize edilmiş interkonnektör tasarımları ile temas eden KOYP'ni incelemek için 3D bir model geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile akım yoğunluğu ve termal stresin, interkonnektörlerin rib şekli ve katot içindeki temas derinliği ile yakından ilişkili olduğunu göstermişlerdir. İnceledikleri rib şekilleri üçgen, dikdörtgen ve ikizkenar yamuk şeklinde olup, temas derinliği ise 1 ile $10 \mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Elde ettikleri sonuçlara göre, standart olan durumda anot tarafında maksimum akım yoğunluğu değerinin $4541,7 \text{ A/m}^2$ iken, katot tarafında ise bu değerin $4482,1 \text{ A/m}^2$ olduğunu bildirmişlerdir. İkisi arasında oluşan farkın nedeninin oksijenin indirgenmesinin hidrojenin oksitlenmesinden daha zor olması olarak belirtmişlerdir. Standart olan durumun ise herhangi bir interkonnektör ribinin, şeklinin ve temasının olmadığı durum olarak ifade etmişlerdir. Daha sonra farklı interkonnektör rib şekilleri ve temas derinliklerini karşılaştırarak üçgen şeklindeki ribin en mükemmel akım yoğunluğunu sağladığını görmüşlerdir. Üçgen ribin en düşük temas derinliğinde ($1 \mu\text{m}$) bile standart duruma göre % 11,4 artışla 5060 A/m^2 akım yoğunluğuna ulaştığını belirtmişlerdir. Dahası temas derinliğini arttırdıkça üçgen ribin akım yoğunluğunun da doğrusal olarak arttığını ve maksimum temas derinliğinde ($10 \mu\text{m}$) akım yoğunluğunun

5080 A/m² değerine çıktığını ifade etmişlerdir. Dikdörtgen rib şekline sahip interkonnektör, temas derinliği arttıkça akım yoğunluğu açısından grafikte dış bükey bir eğilim gösterirken, ikizkenar yamuk rib şeklindeki interkonnektörün iç bükey bir eğilim gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, üçgen ribin performans açısından en iyisi olduğunu ve elektronların aktarımı ile toplanması için gerekli olan etkili alanı arttırdığını ve bu sayede de minimum aktif özgül direnç neden olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca dikdörtgen ribin de performansı iyileştirmek için kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Manglik ve Magar (2015), çalışmalarında düzlemsel anot destekli KOYP'deki farklı şekillere sahip interkonnektör akış kanallarını 3D olarak modelleyerek ısı ve kütle transferi açısından incelemişlerdir. Elektrokimyasal olarak, hidrojen ve oksijenin elektrolit yüzeyine dikdörtgen, ikizkenar yamuk ve üçgen şeklinde enine kesitine sahip akış kanalları vasıtasıyla sabit reaksiyon oranıyla eşit şekilde beslenmesi ile modellemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, dikdörtgen kanalın KOYP için sıcaklık dağılımında nispeten daha homojen olduğunu ve ayrıca pilin stak halinin soğutulmasında da daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dikdörtgen kanal içerisindeki hidrojen ve oksijen akışının, diğerlerine göre daha yüksek ısı transferi katsayısına ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Ek olarak interkonnektördeki dikdörtgen akış kanallarının sayısını ve boyutunu optimize ederek KOYP stakları için genel ısıl yönetimin daha uygun hale gelebileceğini önermektedirler. Bunun yanında üçgen kanal geometrisinin sabit bir Reynold değerinde daha yüksek hidrojen tüketimini desteklediğini ve stakta daha iyi bir destek sağladığını da belirtmişlerdir. KOYP stak tasarımında elektrokimyasal performansın optimize edilmesinin yanı sıra konvektif soğutma ile yapısal bütünlük ve ısıl yönetiminin de göz önünde bulundurulmasının önemini rapor etmişlerdir. Sonuç olarak ise, dikdörtgen kanal tasarımının ısı ve kütle transferi açısından diğerlerine göre daha iyi bir performans gösterdiğini belirtmişlerdir.

BÖLÜM III

KATI OKSİT YAKIT PİLİNİN TEMELLERİ

Güç üretiminde, genellikle bir elektrokimyasal reaksiyon veya tamamen kimyasal bir reaksiyonla istenen bir sonucu elde etmek mümkündür. Bu sonuçlardan biri de elektrik üretimidir. Konvansiyonel termik santrallerde, bir yakıt ve oksitleyicinin tamamen kimyasal olarak yanması sonucunda ortaya çıkan ısı enerjisi kullanılarak elektrik üretilmektedir. Fakat oksitleyici ve yakıtın elektrokimyasal reaksiyonu yoluyla doğrudan elektrik enerjisi elde edilmesi yakıt pilleri gibi teknolojiler ile mümkün olmaktadır. Pratikte hangisinin seçileceği kolaylık, kalite, güvenlik ve maliyet gibi birçok nedene bağlı olmaktadır. Hem elektrokimyasal hem de kimyasal reaksiyonlarda reaktantların bağlarında depolanan kimyasal enerjiyi serbest bırakması ile başlamakta ve mol başına aynı kimyasal enerji serbest bırakılmaktadır. Aralarındaki fark ise, salınan kimyasal enerjinin biçiminde yatmaktadır. Mesela yakıt pili gibi elektrokimyasal reaksiyonla çalışanlar, atomlar arasındaki bağlarda depolanan kimyasal enerjinin elektrik enerjisine (yani akım ve voltaja) doğrudan dönüştürülmesini sağlarken, kimyasal reaksiyon bu kimyasal enerjiyi ısı enerjisine dönüştürmektedir. Dolayısıyla, Carnot çevrimi ile çalışan bir ısı makinesinin ısı verimi iki sıcaklık arasında sınırlandırılmıştır. Fakat elektrokimyasal bir reaksiyonda verim için bu sınırlama yoktur. Aynı zamanda elektrokimyasal reaksiyonun kimyasal reaksiyona göre her zaman daha fazla termodinamik verimliliği söz konusudur. Fakat unutulmamalıdır ki çalışma koşullarına bağlı olarak kimyasal esaslı bir döngü elektrokimyasal esaslı bir döngüden daha verimli olabilmektedir. Ancak birçok elektrokimyasal reaksiyon, kimyasal reaksiyona kıyasla çok daha verimli olma ve daha düşük sıcaklıklarda çalışma potansiyeline sahiptir. Örnek vermek gerekirse, birçok kimyasalın ve malzemenin üretiminde (alüminyum, titanyum, klor, hidrojen ve oksijen gibi), bataryalarda, metal kaplama işlemlerinde ve sensörler ile ölçüm aletlerinde (sıcaklıkölçer, potansiyometre gibi) elektrokimyasal reaksiyondan faydalanılmaktadır.

3.1. Elektrokimyasal Reaksiyon

Elektrokimyasal reaksiyonlar, elektronik iletkenliğe sahip elektrotlar ile iyonik iletkenliğe sahip elektrolit arasındaki yüzeylerde gerçekleşmektedir. Bu yüzden

elektrokimyasal bir reaksiyonun gerçekleşmesi için üç temel eleman gerekmektedir. Bunlar; anot ile katot elektrotları, elektrolit ve gerekli yakıt ve oksitleyicinin sağlanmasıdır. Katı oksit yakıt pilinde anot elektrotunda oksidasyon gerçekleşirken, katot elektrotunda indirgeme işlemleri gerçekleşmektedir. Reaksiyon ilk olarak oksitleyicinin indirgenmesi yani elektronu üzerine alması sonucu negatif yüklenmesiyle başlamaktadır. Daha sonra negatif yüklenen oksitleyici sadece iyon geçirgenliğine sahip elektrolit tabakasından geçerek anot bölgesinde yakıt ile birlikte oksitlenmektedir. Oksitlenme işlemi sırasında elektronlar açığa çıkmakta ve bu elektronlar harici bağlantıyla katota geri beslenmektedir. Bu şekilde bir elektrik akışının da sürekli üretilmesi söz konusudur. Yakıt ve oksitleyicinin birbirine dolaylı yoldan elektron alıp verdiği bu tip tepkimelere redoks tepkimeleri veya indirgenme-yükseltgenme tepkimeleri de denmektedir. Redoks tepkimeleri istemli ve istemsiz olmak üzere ikiye ayrılabilir. İstemli tepkimeler, reaksiyon şartları oluştuğu anda (uygun sıcaklık ve basınç) kendiliğinden gerçekleşmekte yani yakıt pillerinde olduğu gibi başladıktan sonra da devam etmek için dış bir etkiye ihtiyaç duymamaktadır. İstemsiz tepkimelerde ise reaksiyonun başlayabilmesi için dışarıdan sisteme bir enerji verilmesi gerekmektedir. Elektroliz işlemi buna bir örnektir. Katı oksit yakıt pilinde elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan elektrot ve elektroliti membran elektrot grubu (MEG) karşılar, interkonnektörler ise elektrotlar arasında harici bağlantı ile yakıt ve oksitleyicinin sağlanması için yardımcı olan elemanlar olarak görev yapmaktadır. Giriş bölümünde katı oksit yakıt pilinin temel çalışma prensibinden bahsedilmiştir. Bu yüzden ileriki kısımlarda KOYP'nin açık devre potansiyelinden, polarizasyon eğrisindeki voltaj kayıplarından, gerçek hücre potansiyelinden ve veriminden bahsedilecektir.

3.2. Açık Devre Potansiyeli

Bu kısımda, meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonun nasıl gerçekleşeceğini matematiksel ifadeler ile açıklanmasına ve yakıt piline uyarlanmasına yer verilecektir. İlk olarak reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmeyeceğinin belirlenmesi için kimyasal denge kistasının incelenmesi gerekmektedir. İnceleme yapılabilmesi için de sistemin çalışma şartlarının sabit sıcaklık ve basınçta gerçekleştiğini göz önünde bulundurmanız gerekmektedir. Reaksiyon içeren veya içermeyen herhangi bir sistemin entropi artışı ilkesi,

$$dS_{\text{sistem}} \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (3.1)$$

şeklinde formülize edilmektedir. Yakıt pili sistemi ise çevresiyle ısı alışverişi yaptığından dolayı yukarıdaki formülün tek başına kullanılması kolay değildir, çünkü ısı alışverişinin de incelenmesi gerekmektedir. Bunun için belirli T sıcaklığında ve P basıncında içinde reaksiyon gerçekleşen bir sistemi ele alalım. Bu sistem için birinci ve ikinci yasa bağıntılarını birleştirirsek,

$$\left. \begin{array}{l} \delta Q - PdV = dU \\ dS \geq \frac{\delta Q}{T} \end{array} \right\} dU + PdV - TdS \leq 0 \quad (3.2)$$

denklemini elde edilmektedir. Reaksiyonunun gerçekleşip gerçekleşmeyeceği,

$$G = H - TS \quad (3.3)$$

şeklindeki Gibbs fonksiyonunun incelenmesi ile belirlenmektedir. Burada H entalpiyi, T Kelvin cinsinden sıcaklığı, S ise entropiyi ifade etmektedir. Gibbs fonksiyonunun sabit sıcaklık ve basınçta diferansiyel formu,

$$(dG)_{T,P} = dH - TdS - SdT = (dU + PdV + VdP) - TdS - SdT \quad (3.4)$$

şeklinde formülize edilmektedir. Fakat basınç ve sıcaklık sabit olduğundan formül,

$$(dG)_{T,P} = dU + PdV - TdS \quad (3.5)$$

halini almaktadır. Denklem (3.2) ile (3.5) birleştirilirse,

$$(dG)_{T,P} \leq 0 \quad (3.6)$$

sonucuna varılmaktadır. Bu nedenle, belirli sıcaklık ve basınçta, elektrokimyasal reaksiyon Gibbs fonksiyonunun azaldığı yönde gelişmektedir. Yani bu fonksiyon eksiye geçtiği anda reaksiyon kendiliğinden oluşmaya başlayacak ve ekside kaldığı sürece

devam edecektir. Sıfır olduğu durumda ise reaksiyon bitecektir. Yakıt pilinde de yakıt ve oksitleyicinin beslenmesi ve uygun sıcaklık ve basıncın oluşmasından sonra elektrokimyasal reaksiyon kendiliğinden bu şekilde başlayacaktır. Reaksiyon başladıktan sonra 2 elektron açığa çıkacak ve dış devreden bu elektronlar geçiş yapacaktır. Bu elektron geçişi, akım ve voltaja sebep olarak elektrik gücünün üretilmesini sağlamaktadır. Yani kimyasal enerji konvansiyonel sistemlerin aksine hiçbir ara dönüşüm basamağı içermeden doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmüş olmaktadır. İşte bu elektrik gücünün maksimum değeri Gibbs fonksiyonunun değişimine eşit olmaktadır ve

$$P = \Delta G = \Delta H - T\Delta S = IV \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada P maksimum elektrik gücünü (watt), V voltajı (volt) ve I dış devreden geçen akımı (amper) ifade etmektedir. Elektronların akmasıyla beraber oluşan yük aynı zamanda,

$$I = -nF \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. F, burada 1 mol elektron için faraday sabitini ifade etmekte ve deneysel olarak 96485,3 coulomb/mol olarak ölçülmektedir. n ise, oluşan elektron sayısı olup KOYP reaksiyonları için iki olmaktadır. Denklem (3.8) ve Denklem (3.9) birleştirilse,

$$V = \frac{-\Delta G}{2F} \quad (3.9)$$

şeklindeki elektromotor kuvveti (EMK) veya tersinir açık devre potansiyeli olarak adlandırılan, maksimum voltaj elde edilmektedir. Yani başka bir deyişle V, pilin ulaşılabilceği maksimum potansiyel farktır. Bu değer hidrojen yakıtı için alt ısı değeri kullanıldığında teorik olarak 1,23 V'dir. Denklem (3.5) ile Denklem (3.10)'dan anlaşılacağı üzere voltaj aynı zamanda sıcaklık, basınç ve gazların konsantrasyonlarından da etkilenmektedir. Bu etkinin incelenmesi için herhangi bir elektrokimyasal reaksiyonun incelenmesi gerekmektedir:



a ve b değerleri, X ve Y maddelerinden kaç mol tüketildiğini gösterirken, c değeri Z maddesinden kaç mol üretildiğini temsil etmektedir. Bu denkleme göre Gibbs enerjisindeki değişim,

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left(\frac{\alpha_X^a \alpha_Y^b}{\alpha_Z^c} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Denklemdaki ΔG^0 ve R sırasıyla standart şartlardaki Gibbs enerjisinin değişimini ve evrensel gaz sabitini ifade etmektedir. α değeri ise, maddenin kısmi basıncının 1 atm olan standart referans basınca oranıdır:

$$\alpha = \frac{P}{P_0} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12) ile Denklem (3.13) birleştirilse,

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left(\frac{P_X^a P_Y^b}{P_Z^c} \right) \quad (3.13)$$

denklemini elde edilmektedir. Hidrojen yakıtlı katı oksit yakıt pili toplam reaksiyonu (1.3) ve denklem (3.14) entegre edilirse katı oksit yakıt pili için denklem,

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.14)$$

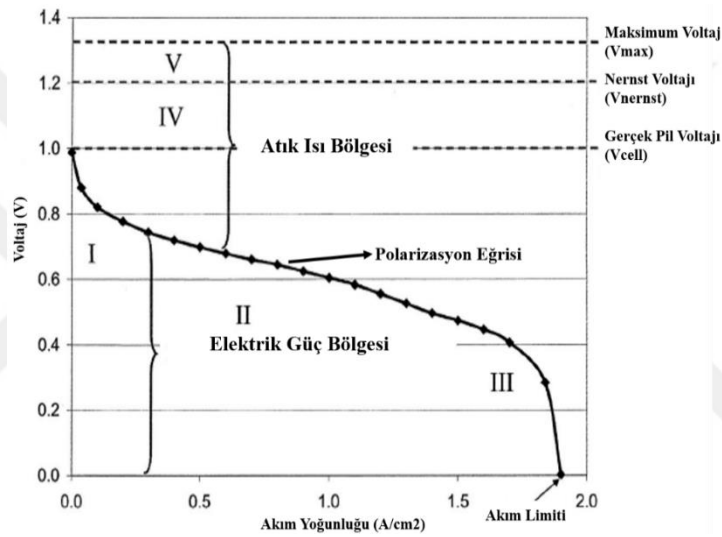
şeklini almaktadır. Denklem (3.10) ile Denklem (3.15) birleştirilir ve düzenlenirse,

$$V = - \frac{\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_{O_2} P_{H_2}^2}{P_{H_2O}^2} \right) \quad (3.15)$$

denklemini ile maksimum voltaj son halini almaktadır. Denklemin sağ tarafındaki terim yani toplama işleminden sonraki kısım V^0 olarak ifade edilmekte ve standart şartlardaki elektromotor kuvvet olarak adlandırılmaktadır. Aynı zamanda denklemin tümü Nernst denklemini olarak da bilinmekte ve Nernst voltajını (V_{nernst}) vermektedir.

3.3. Polarizasyon Eğrisindeki Voltaj Kayıpları

Katı oksit yakıt pilinde yakıt ve oksitleyicinin sağlanması ile elektrokimyasal reaksiyonlar oluşarak akım ve voltaj üretimi başlayacaktır. Akım harici devreden akmaya başladığında ise maksimum voltajda (açık devre potansiyeli) bir takım geri dönüşü olmayan kayıplar başlayacak ve pil gerçek voltaj değerine (gerçek pil potansiyeli) inecektir. Pilin gerçek voltaj değeri her zaman Nernst voltaj değerinden daha düşük bir değerdir. Esas voltaj kayıpları ise bundan sonra başlamaktadır. Aşağıda bölgesel olarak Şekil 3.1'deki polarizasyon eğrisinde tüm voltaj kayıpları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yakıt pilinde tipik bir polarizasyon eğrisi (Mench, 2008)

Polarizasyon eğrisi, yakıt pilinin voltaj ile akım ilişkisini gösteren bir eğridir. Voltaj kayıplarının incelenmesi için bu eğriden faydalanılmaktadır ve bu eğride beş farklı önemli bölge bulunmaktadır.

- Bölge I'deki kayıplar elektrotlardaki aktivasyon kayıplarını temsil etmektedir.
- Bölge II'deki kayıplar yakıt pilindeki ohmik kayıpları ifade etmektedir. Bu kayıplar; elektrolitteki, katalizör katmanlarındaki, pil ara bağlantılarındaki ve kontaklardaki tüm elektriksel ve iyonik iletim kayıplarını içermektedir.
- Bölge III'deki kayıplar ise reaktanların elektrotlara taşınımındaki sınırlandırılmalardan kaynaklanan konsantrasyon kayıplarını içermektedir.

- Bölge IV'deki kayıplar ise Nernst kayıpları olarak isimlendirilir. Bu kaybın miktarı bazen ciddi olabilmektedir ve genellikle istenmeyen türlerin elektrolitten geçmesi, elektrolitten elektronların sızması sonucu oluşan iç akımlar, kirlenme ve safsızlıktan kaynaklanabilmektedir.
- Bölge V'deki kayıplar ise entropide meydana gelen değişimlerden kaynaklanan ve mühendislik açısından müdahale edemediğimiz kayıplardır.

3.3.1. Aktivasyon kayıpları

Düşük akım yoğunluklarında etkili olan aktivasyon kayıpları, elektrotlardaki katalitik yüzey üzerindeki elektrokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisinin üstesinden gelmek için gereken voltajdan kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar Şekil 3.1'de de görüldüğü gibi düşük akım yoğunluklarında keskin, hızlı ama küçük bir düşüş ile ortaya çıkmaktadır. Bu kayıp yüksek çalışma sıcaklığından dolayı KOYP'de PEYP'ye göre çok daha küçük olmaktadır. Bu kayıpları tetikleyecek etkenler arasında reaksiyon kinetiği, katalizörün tipi, katalizör katmanının morfolojisi, çalışma parametreleri, safsızlıklar ve kirlenmeler, türlerin konsantrasyonları ve çalışma ömrü gibi birçok parametre mevcuttur. Tüm bu aktivasyon kaybı bağımlılıklarının olumlu tarafı ise, bilim insanları tarafından kayıpların azaltılması ve verimliliğin artırılması için bir dereceye kadar tasarlanabilmesi ve müdahale edilebilmesidir. Aktivasyon kayıpları matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta V_a = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (3.16)$$

Burada i , akım yoğunluğunu ifade ederken, i_0 ise değişim akım yoğunluğunu ifade etmektedir ve anot ile katot için farklı değerler almaktadır. A ise denklem sabiti olarak ifade edilirken şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$A = \frac{RT}{n\alpha F} \quad (3.17)$$

n , transfer edilen elektron sayısını ifade ederken, α ise yük aktarım katsayısını ifade etmektedir ve anot ile katot için yine bu değer farklı olmaktadır. Bu nedenle anot ile

katotta meydana gelen aktivasyon kayıplarının toplamı tüm aktivasyon kayıplarını temsil edeceğinden Denklem (3.17) ile Denklem (3.18) düzenlenirse,

$$\Delta V_a = \Delta V_{a,a} + \Delta V_{a,c} = \frac{RT}{2\alpha_a F} \ln \left(\frac{i}{i_0^a} \right) + \frac{RT}{2\alpha_c F} \ln \left(\frac{i}{i_0^c} \right) \quad (3.18)$$

şeklinde son formunu almaktadır. Denklem son halinde görüldüğü gibi anot ile katottaki akım yoğunluğundaki değişimler ile α_a ve α_c değerlerinin aktivasyon kayıplarına etkisi oldukça önemlidir. Her iki parametre de elektrotta kullanılan malzemelere ve ilgili elektrokimyasal reaksiyonlara bağlı olmaktadır. Genellikle α_a ve α_c değerleri 0,5 olarak alınmaktadır (Bard ve Faulkner, 2001). i_0 değerleri ise elektrokimyasal reaksiyonların oranını yansıtan akım yoğunluklarıdır. Bu yüzden bilim insanları değerlerini olabildiğince yükseltmeye çalışmaktadırlar. Ek olarak, katı oksit yakıt pilleri için anotun aktivasyon kayıpları katotunkine kıyasla daha önemsiz olmaktadır (Larminie vd., 2003).

3.3.2. Ohmik kayıplar

Orta akım yoğunluklarında Şekil 3.1’de görüldüğü gibi ohmik kayıplar baskın olmakta ve voltaj doğrusal bir azalış göstermektedir. Bölge II’de daha çok ohmik kayıplar etkiliyken, aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları da hala mevcuttur. Çalışma ömrünün başlangıcındaki çoğu yakıt pili için ohmik kayıplar, elektrolitteki ve katalitik tabakalardaki iyonik iletkenliğe bağlıdır. Aynı zamanda membranın diğer bileşenlerle teması da ohmik kayıpları tetiklemektedir. Kısacası ohmik kayıpları tetikleyecek etkenler arasında özellikle malzemenin iletkenliği ve kalınlığı ile kontak dirençleri önemlidir. Ohmik kayıpları inceleyebilmek için Ohm Kanunu’na bakmak yeterlidir:

$$\Delta V_{ohm} = IR = iAR = iA \frac{l}{\sigma A} = ipl \quad (3.19)$$

Denklemden, I akımı, R direnci temsil etmektedir. i akım yoğunluğunu ifade ederken, A ise iyon transferinin gerçekleştiği kesit alanını ve l ise iyonların kat ettiği uzunluğu temsil etmektedir. σ iletkenliği (S/m) ifade ederken, ρ ise öz direnci (Ωm) ifade etmektedir.

3.3.3. Konsantrasyon kayıpları

Konsantrasyon kayıpları ise yüksek akım yoğunluklarında etkili olan ve reaktantların elektrotlara taşınımındaki ve geçişindeki sınırlamalardan (akış kanalı ve gözeneklilik gibi) kaynaklanan kayıplardır. Bu yüzden reaktantların interkonnektör kanalları vasıtasıyla elektrotlara taşınımı oldukça önemlidir. Elektrotlara aktarılan bu reaktantlar elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda kademeli olarak tüketilmeye başlanmaktadır. Kademeli olarak tüketilmeleri nedeniyle reaktantların konsantrasyonunda akış kanalı boyunca bir azalma meydana gelmektedir. Sonuç olarak gaz akışı boyunca ortaya çıkan bu farklılık anotta ve katotta reaktantların kısmi basınç düşüşlerine yol açmaktadır. Özellikle yüksek akım yoğunluklarında, bu akım yoğunluklarının elde edilmesi için reaksiyon sayısında artış ve bunun sonucunda hızlı reaktant tüketiminin neticesindeki reaktant basınç düşüşleri, voltajın hızlı bir şekilde azalmasına sebep olmaktadır. Konsantrasyon kayıpları matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\Delta V_k = -\frac{RT}{nF} \left[\frac{1}{2} \ln \left(1 - \frac{i}{i_c} \right) + \ln \left(1 - \frac{i}{i_a} \right) - \ln \left(1 + \frac{P_{H_2} i}{P_{H_2O} i_a} \right) \right] \quad (3.20)$$

Denklemden i_c ve i_a ifadeleri sırasıyla katotta oksitleyicinin ve anotta yakıtın tamamen tüketildiği varsayımı anındaki akım yoğunluklarını ifade etmektedir. Bu yüzden bu tür kayıplar anot ve katotun mikroyapılarına da oldukça bağlı olmaktadır.

3.4. Gerçek Pil Potansiyeli

Tüm bu voltaj kayıpları bir araya getirilerek Nernst voltajından çıkarıldığında pilin gerçek potansiyeli elde edilmektedir:

$$V_{pil} = V_{nernst} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_a - \Delta V_k \quad (3.21)$$

Denklemin sağdan ikinci terimi ohmik kayıpları, üçüncü terimi aktivasyon kayıplarını ve sonuncu terimi konsantrasyon kayıplarını temsil etmektedir.

3.5. Yakıt Pili Verimleri

Termodinamik Verim

Yukarıda daha önce bahsedildiği gibi elektrokimyasal olarak çalışan yakıt pillerinin mümkün olan maksimum tersinir voltajı (teorik voltajı) Gibbs serbest enerjisi ile değişmektedir:

$$V_{\max} = \frac{-\Delta G}{2F} \quad (3.22)$$

Eğer sistem aynı zamanda adyabatik olursa maksimum tersinir voltajın sadece entalpi değişimine bağlı olduğu görülecektir:

$$V_{\max}^0 = \frac{-\Delta H}{nF} \quad (3.23)$$

$V_{\max}^0$ ifadesi aynı zamanda termal voltaj veya pilin yapabileceği maksimum elektrik işi olarak da bilinmektedir. Maksimum termodinamik verim ise, maksimum tersinir voltajın (maksimum elektrik işinin) termal voltaja (maksimum yapılabilir elektrik işine) bölünmesi ile bulunmaktadır:

$$\eta_{t,\max} = \frac{\text{Maksimum elektrik işi}}{\text{Maksimum yapılabilir elektrik işi}} = \frac{V_{\max}}{V_{\max}^0} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (3.24)$$

Sonuç olarak, yakıt pilinin termodinamik verimi elektrokimyasal reaksiyonun entropi ve entalpi değişimine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Aynı zamanda yakıt pilinin verimini voltaj cinsinden de ifade edilmektedir:

$$\eta_{\text{pil}} = \frac{V_{\text{pil}}}{V_{\max}^0} \quad (3.25)$$

Voltaj verimi olarak adlandırılan bu verim eşitlikten anlaşılacağı üzere pilin gerçek potansiyelinin termal voltaja bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

Yakıt Kullanım Verimi

Yakıt kullanım verimi, tepkimeye girenlerin yüzde olarak kullanımının bir ölçüsü olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_f = \frac{\text{Teorik olarak gereken yakıt miktarı}}{\text{Gerçek olarak kullanılan yakıt miktarı}} \quad (3.26)$$

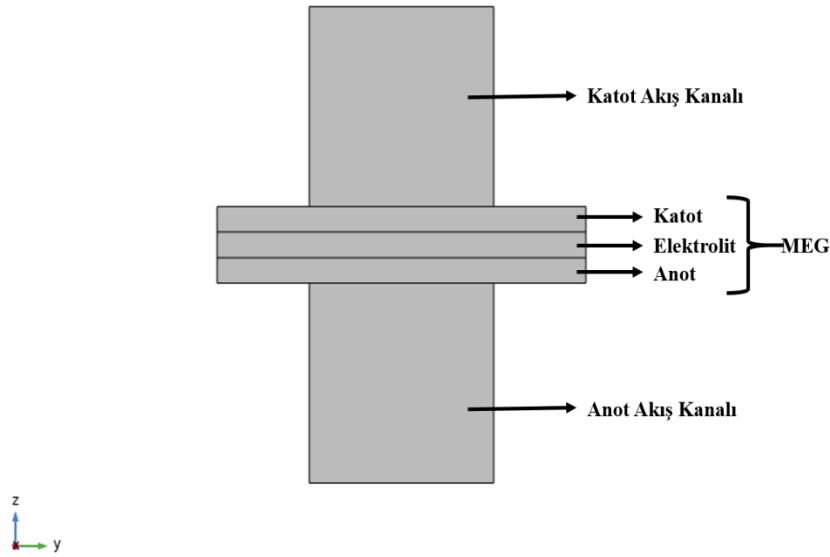
Yakıt kullanım verimi aynı zamanda Faraday verimi olarak da bilinmektedir. Bu verim göz önüne alınarak tanımlanan yakıt pili verim ifadesi ise aşağıda verilmiştir:

$$\eta_{pil} = \frac{V_{pil}}{V_{max}^0} \cdot \varepsilon_f \quad (3.27)$$

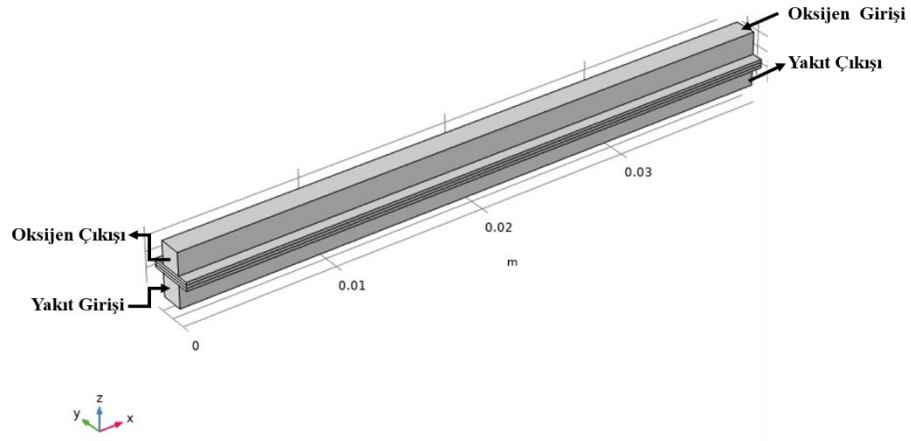
BÖLÜM IV

MATEMATİKSEL MODELLEME VE SAYISAL ANALİZ

Matematiksel modellenmesi ve sayısal analizi COMSOL Multiphysics® programında gerçekleştirilen KOYP geometrisi Şekil 4.1’de şematik olarak verilmektedir. Model; anot, katot ve elektrolit ile birlikte anot ve katot akış kanallarını içermektedir. Tek akış kanalının seçilmesinin sebebi ise homojen bir dağıtım sağlanması durumunda diğer kanallarda da aynı etkilerin gözlemlenmesidir. Bu durum aynı zamanda çözüm süresini de kısaltmaktadır. KOYP MEG’in anot tabakası NiO/YSZ (kütlece %50-%50) karışımından oluşurken, katot tabakası LSM/YSZ (kütlece %50-%50) karışımından oluşmaktadır. Elektrolit ise YSZ’den meydana gelmektedir. Modelin boyutları Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu kısımda kısaca COMSOL programının arka planda çözdüğü genel ana denklemlerden, modelin doğrulanması ile sistemin ağ yapısından, sayısal çözüm metodu ile parametrelerin kurulumundan bahsedilecektir. Bu çalışmadaki temel amacımız ise, kütük bir malzemeden talaşlı imalat ile üretilen geleneksel interkonnektörler yerine pres yöntemiyle tek seferde sac malzemeden üretilen ince interkonnektörlerin içerisindeki akış kanalının geometrisindeki rib açısı, kanal genişliği ve kanal derinliği gibi parametrelerin pil performansına olan etkilerini incelemek ve performans açısından en iyi olanı bulmaktır.

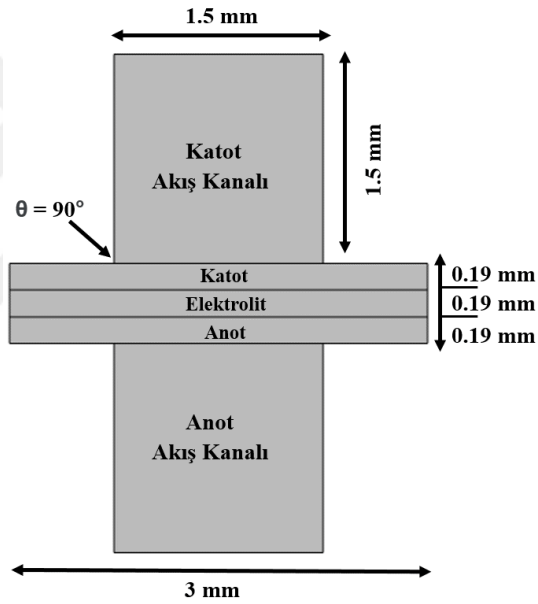


(a)



(b)

Şekil 4.1. KOYP sisteminin enine-kesit (a) ve 3 boyutlu (b) görünümü



Şekil 4.2. İncelenen KOYP modelinin boyutları

4.1 Genel Denklemler

4.1.1 Kütlenin korunumu

Reaksiyon halindeki bir gaz karışımı içerisindeki herhangi bir türün kütlesindeki değişim, süreklilik denkleminin incelenmesi ile tespit edilebilir:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\epsilon\vec{U}) = K_m \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de ρ gaz karışımının yoğunluğunu ifade ederken, $\vec{U}$ ifadesi hız vektörünü temsil etmektedir. K_m ise ekstra kütle kaynaklarını ifade ederken, ε gözenekliliği belirtmektedir. Fakat Denklem (4.1) sadece anot, katot ve akış kanallarında geçerli iken, elektrolit ve interkonnektörler için uygun olmamaktadır. Karışımın yoğunluğu ise esasen sistemdeki her bir türün konsantrasyonuna bağlıdır:

$$\rho = \sum \rho_i c_i = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2 + \dots + \rho_n c_n \quad (4.2)$$

Denklemde ρ_i herhangi bir türün yoğunluğunu ifade ederken, c_i ise yine söz konusu türün konsantrasyonunu ifade etmektedir. n alt indisi ise türlerin sayısını belirtmektedir. Herhangi bir türün yoğunluğu ise ideal gaz denkleminde bulunabilmektedir:

$$P_i = \rho_i R_i T \quad (4.3)$$

4.1.2 Madde dengesi

Herhangi bir maddenin dengesi esasen o türün difüzyonundan ve konsantrasyonundan etkilenmektedir. Bunun için yine süreklilik denklemi, denkleme ek olarak difüzyon terimi eklenmesi ile kullanılabilir:

$$\frac{\partial(\rho_i \varepsilon c_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \varepsilon \vec{U} c_i) = - \nabla \cdot \varepsilon \vec{J}_i + K_{t,i} \quad (4.4)$$

Denklemdaki $\vec{J}_i$ ifadesi herhangi bir türün difüzyonunu ifade ederken, $K_{t,i}$ ifadesi akım yoğunluğuna bağlı olan ekstra tür kaynaklarını temsil etmektedir ve şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$K_{t,i} = i \frac{M_i}{nF} \quad (4.5)$$

i , akım yoğunluğunu ifade ederken, M_i herhangi bir türün moleküler ağırlığını temsil etmektedir. n ise elektrokimyasal reaksiyona giren elektron sayısını belirtmektedir. F ise faraday sabitini simgelemektedir. Denklem (4.5) aynı zamanda akım yoğunluğunun türlerin dengesini etkilediğini göstermektedir.

4.1.3 Momentum denklemi

Yakıt pilinin herhangi bir noktasındaki tür konsantrasyonları ile akış davranışını inceleyebilmek için akış modelleri ile kütle korunumu birlikte kullanılmaktadır. Eğer akış modeli önceden bilinmiyor ise, hız ve konsantrasyon profillerini oluşturmak için kütle korunumu ile birlikte momentum denklemi kullanılmaktadır. Gazlar için momentumun korunumu, k 'nın koordinat sistemindeki üç yönden birini (x, y, z) temsil ettiği aşağıdaki denklemle (Navier-Stokes denklemleri) ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon \vec{U}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \vec{U} \vec{U}_k) = \rho \epsilon \vec{g}_k - \frac{\partial(\epsilon P)}{\partial x_k} + \frac{\epsilon^2 \mu \vec{U}_k}{\zeta} \quad (4.6)$$

Denklemde P statik basıncı ifade ederken, $\vec{g}$ ise yerçekimi ivmesini temsil etmektedir. M viskoziteyi ifade ederken, ζ ise geçirgenliği ifade etmektedir. Denklemin sağındaki üçüncü terim aynı zamanda geçirgenlik ile gözenekliliğe bağlı olan ve gözenekli yapıya sahip olan maddelerin içerisindeki gaz akışını temsil eden Darcy terimidir.

4.1.4 Yük dengesi

Yük dengesi Ohm Kanunu ile ifade edilmektedir:

$$\vec{J} = \sigma \nabla \Phi \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = K_y \quad (4.8)$$

$\vec{J}$ iyonik veya elektronik akım yoğunluğunu ifade ederken, σ iletkenliği ve Φ ise elektriksel potansiyeli temsil etmektedir. Diğer taraftan Denklem (4.8)'de ρ_e ifadesi iyonik veya elektronik yük yoğunluğunu ifade ederken K_y ekstra yük kaynaklarını temsil etmektedir. K_y ifadesi esasen sadece üçlü faz sınırları içerisindeki ilgili alanda geçerli olan akım yoğunluğuna eşit olmaktadır. Aksi takdirde bu değer sıfır olmaktadır. Yani, anot ve katot için Butler-Volmer denkleminde (Denklem 4.12) hesaplanan akım yoğunlukları bu değere eşitken, elektrolit ve interkonnektörler için bu değer sıfır

olmaktadır. Sonuç olarak elektrotlar hem iyonik hem de elektronik iletkenliğe sahiptir. Bu yüzden, yük dengesi denklemi aşağıdaki duruma dönüşmektedir:

$$\vec{J}_{iy} = -\vec{J}_{el} \quad (4.9)$$

4.1.5 Enerji dengesi

Sıcaklık dağılımını ve yerel ısı akılarını belirleyebilmek için enerji dengesinden faydalanılmaktadır:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon C_p T \vec{U}) = \nabla \cdot (\epsilon \lambda \nabla T) + Q + \frac{\partial P}{\partial t} + Q_{vis} + W^v + E^k \quad (4.10)$$

Denklemden C_p özgül ısıyı ifade ederken, λ termal iletkenliği temsil etmektedir. Q ise viskoz olmayan hacimsel ısı üretimi terimi iken, Q_{vis} viskoz olan hacimsel ısı üretimidir. W^v viskoz işi temsil ederken, E^k türbülanslı kinetik enerjiyi temsil etmektedir. Yakıt pillerinde ise önemli olan Q ifadesidir. Çünkü viskoz olmayan hacimsel ısı üretimine elektrokimyasal reaksiyonlar ile elektrolit ve elektrotlarda meydana gelen ohmik dirençler neden olmaktadır. Denklemden son dört terim çıkarılırsa denklem yakıt pillerinin bileşenleri için geçerli hale gelmektedir. Bu bileşenler, pozitif elektrot, negatif elektrot, elektrolit, interkonnektör ve bipolar plakalardır. Reaksiyondan kaynaklanan toplam enerji değişimi ise, teorik olarak elektriğe dönüştürülen entalpi değişimi ile Gibbs serbest enerjisi arasındaki farktır ve geri kalanı da ısıya dönüştürülmektedir. Son olarak daimi rejim söz konusu ise zamana bağlı terimler silinerek denklem sadeleştirilmektedir.

4.1.6 Elektrokimyasal model

Katı oksit yakıt pilinin gerçek potansiyeli, daha önce Bölüm 3’de de anlatıldığı gibi açık devre potansiyelinden geri dönüşü olmayan kayıplar nedeniyle daha düşük olmaktadır:

$$V_{pil} = V_{nernst} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_a - \Delta V_k \quad (4.11)$$

$$V_{pol} = \Delta V_k - \Delta V_a - V_{pil} \quad (4.12)$$

Voltaj farkı sonucu oluşan akım yoğunluğunu veren denklem ise Butler-Volmer denklemidir (Singhal ve Kendall, 2003):

$$i = J_0 \left[\exp \left(\alpha \frac{nF\eta_a}{RT} \right) - \exp \left(-\alpha \frac{nF\eta_a}{RT} \right) \right] \quad (4.13)$$

Denklemden J_0 denge halinde akım yoğunluğunda meydana gelen değişimi ifade ederken, α yük aktarım katsayısını temsil etmektedir. η_a ise aktivasyon kayıplarını temsil ederken, n ise reaksiyona giren elektron sayısını belirtmektedir.

4.1.7 Elektrokimyasal reaksiyonlar

Anot ve katot tabakalarında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar ise aşağıda verilmektedir:



4.1.8 Sınır şartları ve kabuller

Anot ve katot girişlerinde kütle oranları sabit bir değer olarak girilmiş ve çıkışlarda ise atmosferik basınca ayarlanmıştır. Gazlar, ideal gaz olarak ele alınmıştır. Sayısal analiz 800 °C izotermal çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Tüm yan duvarlar ise yalıtılmıştır. Ayrıca akış sırasında duvarlarda kaymama koşulu da söz konusudur. Son olarak analizler zamandan bağımsız (yani daimi rejim durumunda) bir şekilde çözümlenmiştir.

4.2 Modelin Doğrulaması

Öncelikli olarak doğruladığımız sayısal modelin deneysel çalışmasında 16 cm² aktif alana sahip elektrolit destekli membran kullanılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmada 16 cm² membrana uygun olarak kullanılan anot ve katot interkonnektörlerin her birinin ise

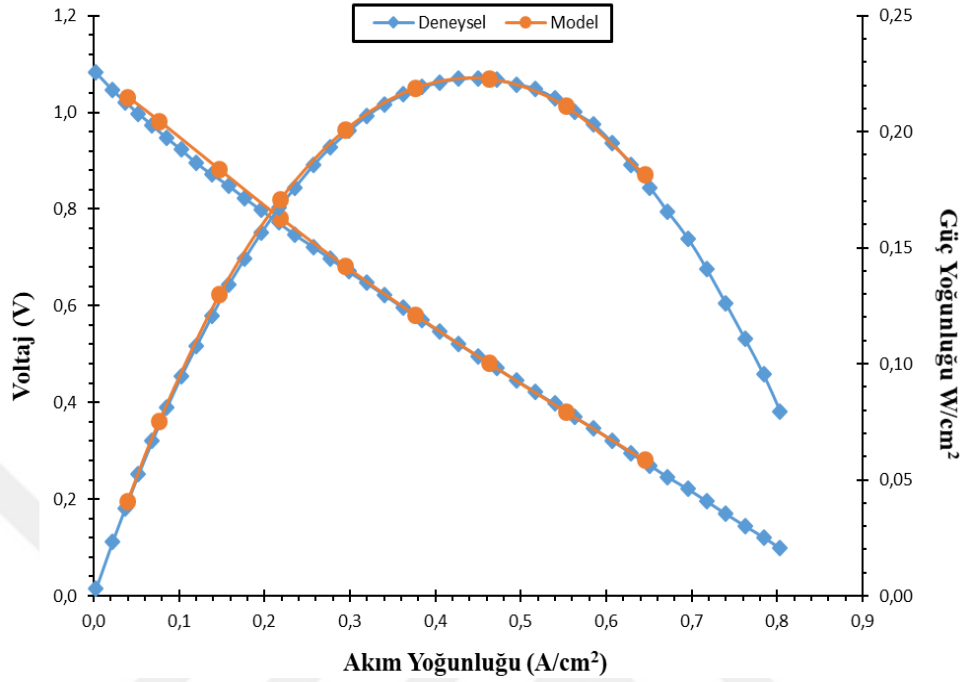
toplamda 13 adet akış kanalı mevcuttur. Anot bölgesine bu akış kanalları vasıtasıyla 300 SCCM hidrojen sağlanırken, katot bölgesine ise 900 SCCM oksijen sağlanmıştır. Fakat sayısal modelimizde tek akış kanalı incelendiğinden dolayı beslenen gazların miktarı 13'e bölünerek tek akış kanalı için sabit bir değer olarak girilmiştir. Deneyde gazların akış konfigürasyonu ise sayısal modelde olduğu gibi zıt akışlıdır. Ek olarak, sayısal modelimizde görüldüğü gibi akım toplamaya yardımcı olan elekler modellenmemiştir. Aynı şekilde deneysel çalışmada da bu yardımcı elekler anot ve katot bölgelerine yerleştirilmemiştir. Sayısal modellemede çalışma sıcaklığı 800 °C olarak belirlenmiş ve deneysel çalışmada da bu sıcaklık değerinde veriler elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ve Vestel Savunma Sanayi A.Ş.'nin sağlamış olduğu altyapı sayesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullandığımız cihazlar Fotoğraf 4.1'de görsel olarak da verilmiştir. Bu cihazlar genel olarak test istasyonu, elektronik fırın, empedans ölçüm cihazı, gaz tankları, hava kompresörü ve bilgisayardan oluşmaktadır.



Fotoğraf 4.1. Deneyde kullanılan cihazların görünümü

İncelenen KOYP modelinin enine-kesit ve üç boyutlu görünümü Şekil 4.1'de verilirken, boyutları Şekil 4.2'de sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen deneysel veriler ile modele uygulanan parametre değerleri sonucunda deneysel ve sayısal sonuçların birbirine çok

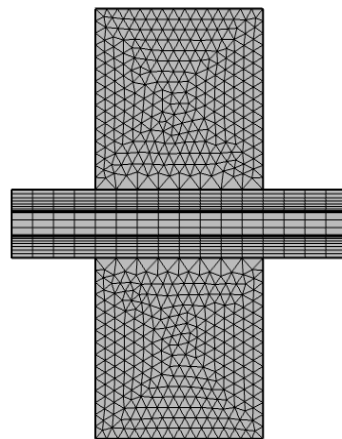
yakın olduğu görülmüştür (Şekil 4.3). Modelimiz yaklaşık olarak 0,482 V çalışma voltajında 0,2229 W/cm² maksimum güç yoğunluğuna ulaşmıştır.



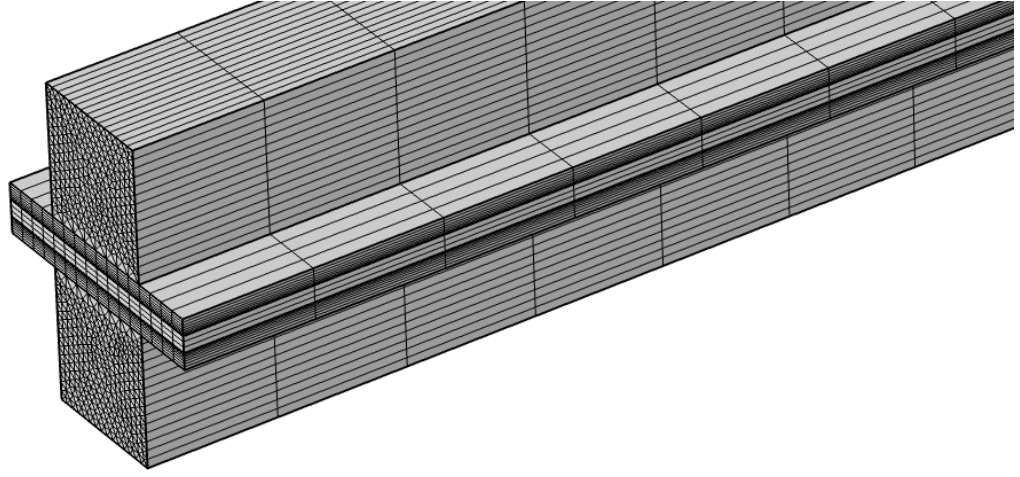
Şekil 4.3. Deneysel ve sayısal performans eğrilerinin karşılaştırması

4.3 Sistemin Ağ Yapısı

Zıt akışlı olarak modellediğimiz KOYP sistemi Şekil 4.1'de görülmektedir. Boyutları ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Sistemimiz ise iki adet elektrot, bir adet elektrolit ve yakıt ile oksitleyiciyi sağladığımız iki adet akış kanalından meydana gelmektedir. Sistemin ağ yapısı ise Şekil 4.4'de sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.4. KOYP sisteminin enine-kesit (a) ve üç boyutlu (b) ağ yapısı görünümü

Görüldüğü gibi akış kanallarına üçgen mesh tanımlanırken, diğer kısımlara yapısal mesh tanımlanmıştır. Buradaki önemli kısım ise elektrotların elektrolite yakın olan kısımlarına daha sık mesh uygulanmasıdır. Bunun sebebi ise elektrokimyasal reaksiyonların elektrot ile elektrolit arayüzeyinde daha çok yoğun bir şekilde gerçekleşmesidir. Son olarak süpürme komutu ile yapılan ağ yapısı tüm geometriye yayılmıştır. Sonuç olarak ağ yapısı toplam 37152 elemandan oluşmaktadır.

4.4 Sayısal Çözüm Metodu ve Modelde Kullanılan Parametreler

Geliştirilen sayısal model sonlu elemanlar metodunu kullanan COMSOL Multiphysics® programı içerisindeki Batteries&Fuel Cells modülü yardımı ile çözülmüştür. Analizlerde akım, konsantrasyon, akış hızı ve basıncı incelenmiştir. Akım, sadece membran elektrot grubu elemanları için tanımlanarak verilen voltaj değerine göre akım dağılımları ve pil performansının analizinde kullanılmıştır. Konsantrasyonun incelenmesi ise gerek elektrotlar gerekse de akış kanalları içerisindeki maddelerin dağılımlarını belirlemek içindir. Akış analizinde de amaç benzer şekilde elektrot ve akış kanallarındaki hız ve basınç dağılımlarını incelemektir. Daimi rejim durumunda gerçekleştirilen analizler, Dell marka iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelimiz 0,05-0,8 V arasında değişen voltaj değerleri için çözülmüştür. Modelde kullanılan parametreler Çizelge 4.1’de verilirken, deneysel sonuçlara göre optimize edilen parametreler ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Model parametreleri

Parametre	Değer
Çalışma Sıcaklığı (°C)	800
Çalışma Basıncı (atm)	1
Havanın Viskozitesi (Pa s)	3×10^{-5}
Anot Geçirgenliği (m ²)	10^{-10}
Katot Geçirgenliği (m ²)	10^{-10}
Anot Yüzey Alanı (1/m)	10^9
Katot Yüzey Alanı (1/m)	10^9
Anot İyonik İletkenlik (S/m)	1
Anot Elektronik İletkenlik (S/m)	1000
Katot İyonik İletkenlik (S/m)	1
Katot Elektronik İletkenlik (S/m)	1000
Elektrolit İyonik İletkenlik (S/m)	5
İnterkonnektör İletkenlik (S/m)	5000
Referans Difüzivite	$3,16 \times 10^{-8}$
Kinetik Hacim (Hidrojen)	6×10^{-6}
Kinetik Hacim (Oksijen)	$16,6 \times 10^{-6}$
Kinetik Hacim (Azot)	$17,9 \times 10^{-6}$
Kinetik Hacim (Su)	$12,7 \times 10^{-6}$
Gözeneklilik	0,35
Çalışma Voltajı (V)	0,05-0,8
Gaz Akış Kanalı Genişliği (mm)	1,5
Gaz Akış Kanalı Yüksekliği (mm)	1,5
Anot Kalınlığı (mm)	0,04
Katot Kalınlığı (mm)	0,04
Elektrolit Kalınlığı (mm)	0,19
Rib Açısı (°)	90
Akış Kanalının Uzunluğu (mm)	40

Çizelge 4.2. Optimize edilmiş model parametreleri

Parametre	Değer
$J_{0,\text{anot}} \text{ (A/m}^2\text{)}$	0,25
$\alpha_{\text{a,anot}}$	0,47
$\alpha_{\text{c,anot}}$	1,38
$J_{0,\text{katot}} \text{ (A/m}^2\text{)}$	0,008
$\alpha_{\text{a,katot}}$	3,52
$\alpha_{\text{c,katot}}$	0,94

BÖLÜM V

SAYISAL SONUÇLAR

Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibini iyi bir şekilde anlayabilmek için çalışma esnasında içerisinde meydana gelen birçok olayın anlaşılması önemlidir. Bu yüzden yük dengesindeki değişimin (Ohm Kanunu) meydana getirdiği akım yoğunluğundaki gelişimi (Butler-Volmer Denklemi) anlamak önemlidir. Aynı zamanda yakıt ve oksitleyicinin gaz kanallarında (Navier-Stokes Denklemi) ve gözenekli elektrotlar içerisinde nasıl bir akış davranışı (Brinkman Denklemi) sergilediğinin incelenmesi de değerlidir. Bu akış sonucu ortaya çıkan elektrokimyasal reaksiyonları etkileyen kütle (süreklilik denklemi) ve tür (süreklilik denklemi ve difüzyon terimi) dengesinin incelenmesi de yine bir o kadar önemlidir. Bu nedenle sayısal analiz sonuçları; akım yoğunluğundaki dağılım, hız ile basınç dağılımı ve türlerin konsantrasyon dağılımları şeklinde belirli voltaj değerlerinde incelenirse katı oksit yakıt pili daha iyi bir şekilde anlaşılacaktır.

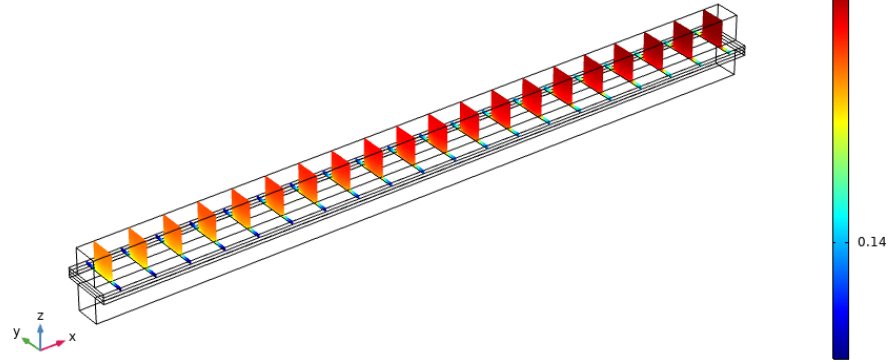
5.1 Türlerin Dağılımı

5.1.1 Oksijenin kütleli dağılımı

Doğrulan modelde katot ve akış kanalı içerisindeki oksijen kütle oranının 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,7 V polarizasyon potansiyellerindeki değişimi Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu polarizasyonlara denk gelen çalışma voltajları ise sırasıyla 1, 0,8, 0,6 ve 0,4 V şeklindedir. Şekilde de görülebileceği gibi katot bölgesinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar (indirgenme) nedeniyle oksijenin tüketilmesi sonucunda katot akış kanalının girişinden çıkışına ve katottan elektrolite doğru oksijen konsantrasyonunun giderek azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda çalışma voltajı değerlerindeki düşüş sonucunda üretilen akımın artışına bağlı olarak artan elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle düşük çalışma voltajlarında oksijen tüketiminde artış olduğu görülmektedir.

$V_{pol}(2)=0.1$ V

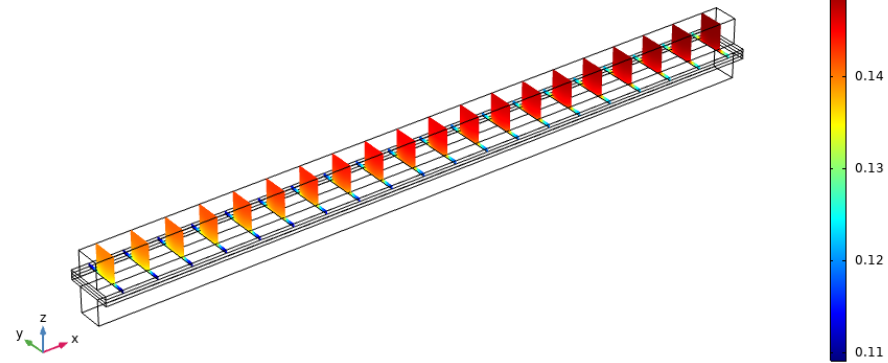
Slice: Mass fraction (1)



(a)

$V_{pol}(4)=0.3$ V

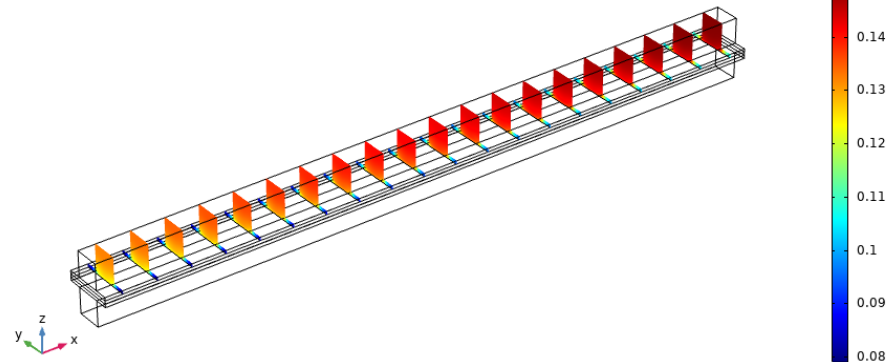
Slice: Mass fraction (1)



(b)

$V_{pol}(6)=0.5$ V

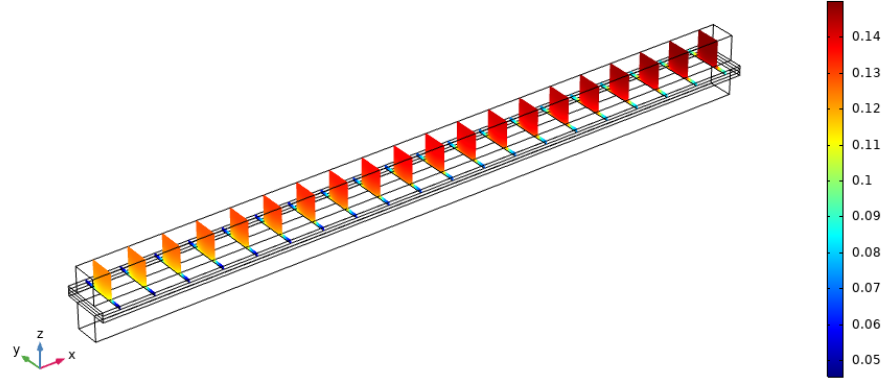
Slice: Mass fraction (1)



(c)

V_{pol}(8)=0.7 V

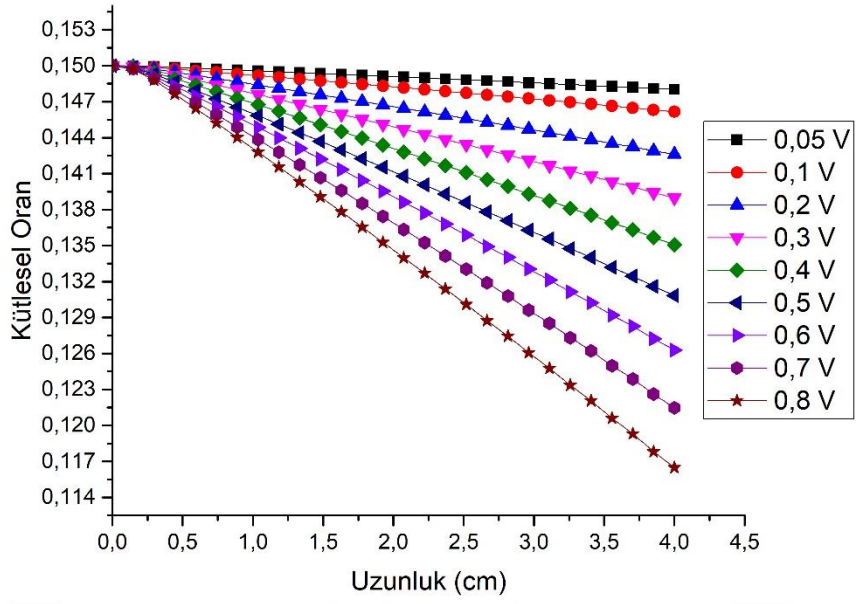
Slice: Mass fraction (1)



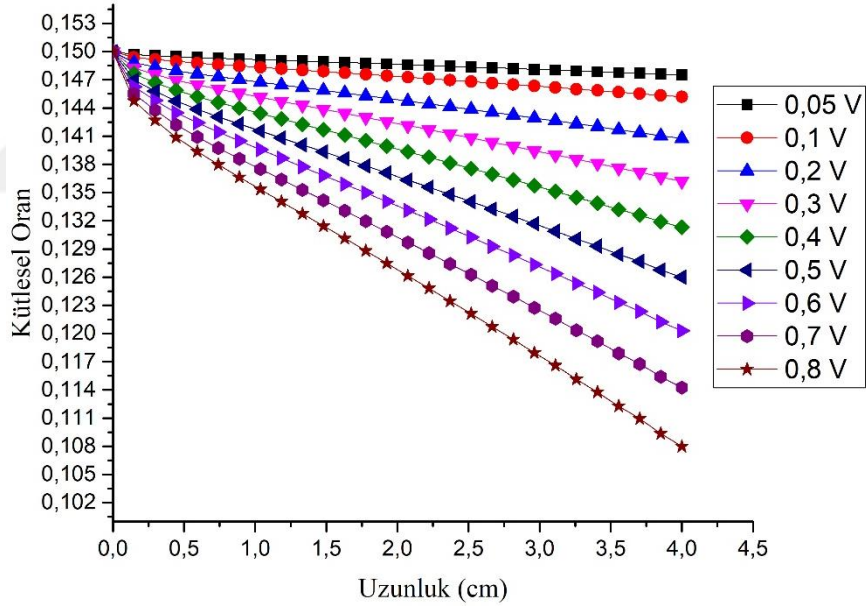
(d)

Şekil 5.1. Farklı polarizasyon potansiyellerindeki oksijen tüketimi: 0,1 V (a), 0,3 V (b), 0,5 V (c) ve 0,7 V (d)

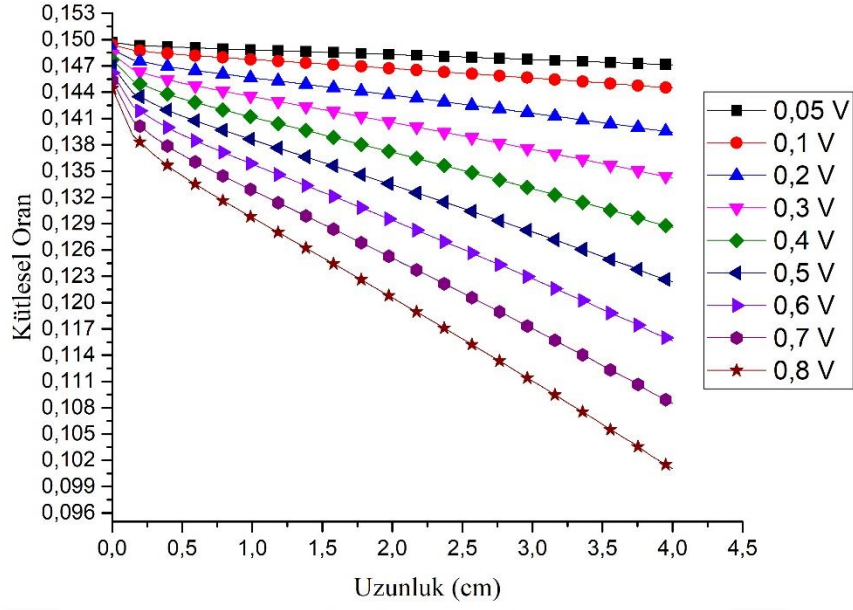
Katot bölgesindeki oksijen oranının incelenen tüm polarizasyon potansiyellerindeki (0,05-0,8 V) değişimleri sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sunulmuştur. Katot akış kanalının ortasındaki, katot akış kanalı ile elektrotun temas ettiği yüzeydeki ve katot elektrotu ile elektrolitin temas ettiği yüzeydeki oksijen oranlarını sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 ifade etmektedir. Şekil 5.1'de de görülebileceği gibi akış kanalının girişinden çıkışına doğru ve katottan elektrolite doğru oksijen konsantrasyonunda azalma görülmektedir. Aşağıdaki üç şekilde de bu durum doğrulanmakta ve tüm polarizasyon potansiyellerinde bu yönlerde oksijen oranı giderek azalmaktadır. Aynı zamanda çalışma voltajı değerlerindeki düşüş sonucunda üretilen akımın artışına bağlı olarak artan elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle bu oran arasındaki fark giderek daha da artmaktadır. Bu durum katot bölgesinde oksijen tüketiminin kanaldan elektrolite doğru giderek arttığını göstermektedir. Ayrıca akış kanalındaki kütle oranının azalması daha yavaş iken, elektrot içerisinde bu düşüş daha hızlı gerçekleşmektedir. Bunun sebebi ise elektrokimyasal reaksiyonların bu bölgede meydana gelmesi ile oksijen tüketiminin gerçekleşmesidir. Doğal olarak en yoğun tepkimenin elektrot ile elektrolit arayüzeyinde olduğu bilindiği için oksijen oranı Şekil 5.4'te de görülebileceği gibi hem daha hızlı bir düşüşe hem de sonuç olarak en düşük seviyesine inmektedir.



Şekil 5.2. Farklı polarizasyon potansiyellerinde katot akış kanalı içerisindeki oksijen tüketimleri



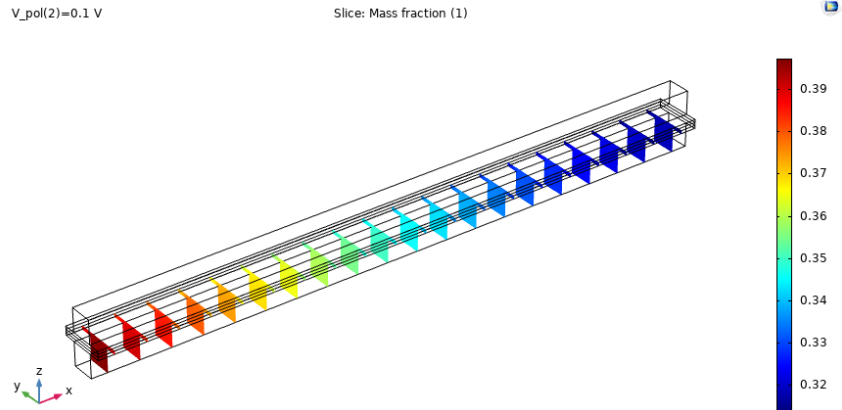
Şekil 5.3. Farklı polarizasyon potansiyellerinde katot akış kanalı ile elektrotu arasındaki oksijen tüketimleri



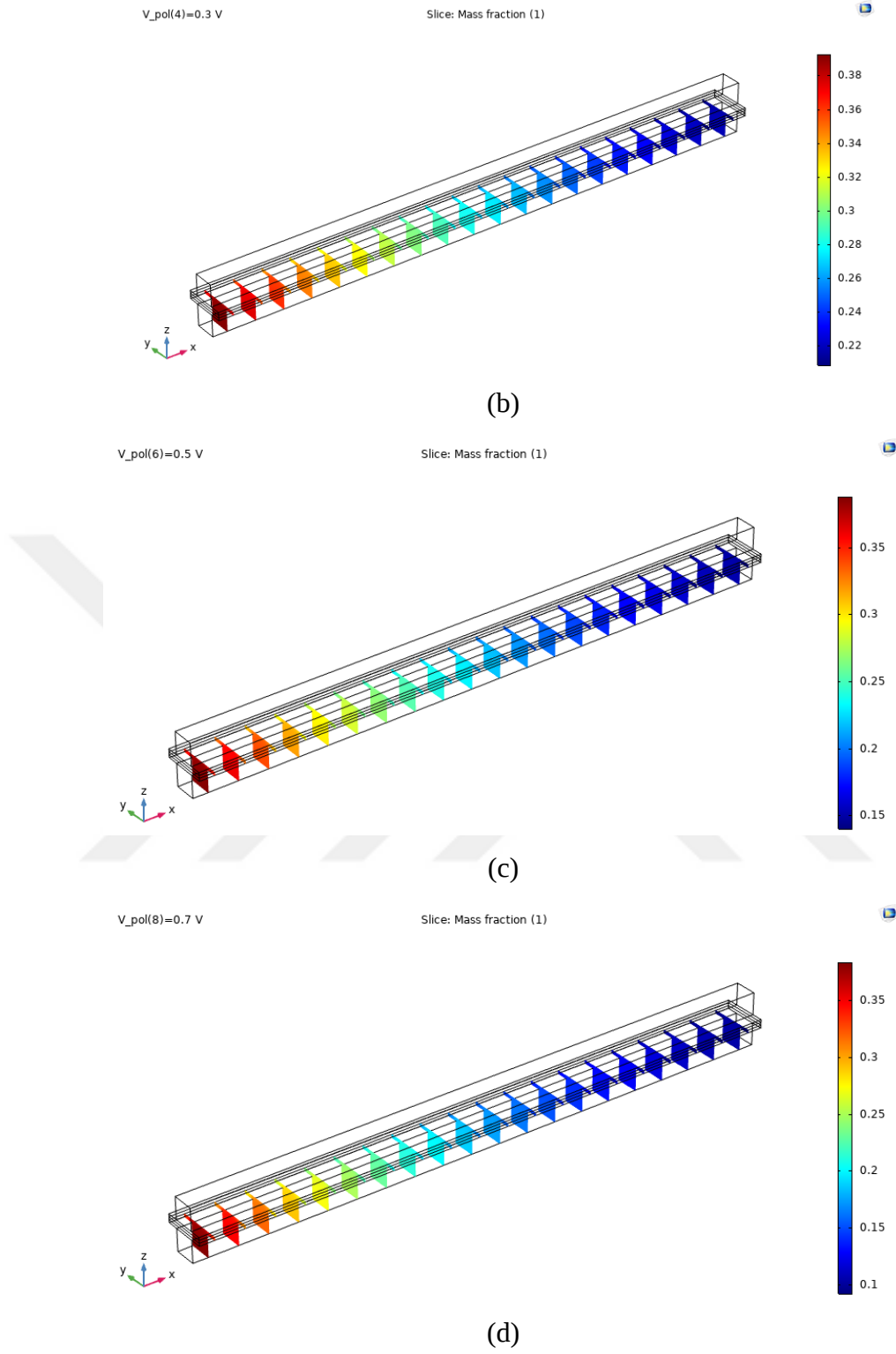
Şekil 5.4. Farklı polarizasyon potansiyellerinde katot elektrotu ile elektrolit arasındaki oksijen tüketimleri

5.1.2 Hidrojenin kütsel dağılımı

Oksijene benzer davranış, doğrulanan modelin anot bölgesindeki hidrojen dağılımında da gözlenmektedir (Şekil 5.5). Anot bölgesinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle hidrojenin tüketilmesi sonucunda anot akış kanalının girişinden çıkışına ve elektrolite doğru hidrojen konsantrasyonunun giderek azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda çalışma voltajı değerlerindeki düşüş sonucunda üretilen akımın artışına bağlı olarak artan elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle yine hidrojen tüketiminde artış olduğu görülmektedir.



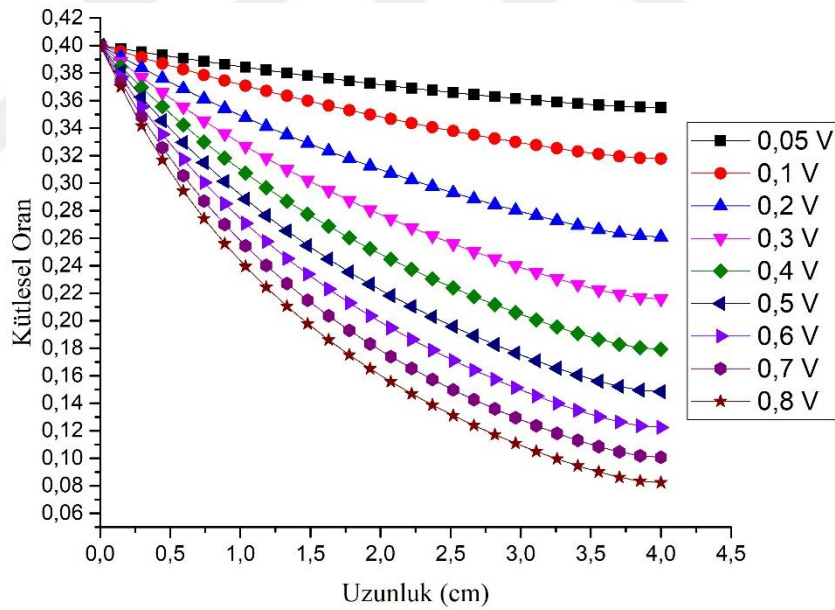
(a)



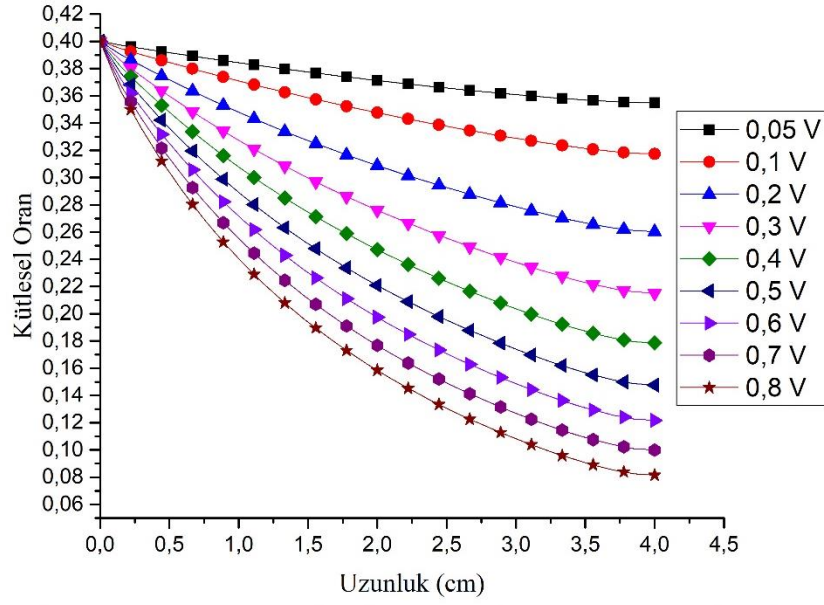
Şekil 5.5. Farklı polarizasyon potansiyellerindeki hidrojen tüketimi: 0,1 V (a), 0,3 V (b), 0,5 V (c) ve 0,7 V (d)

Anot bölgesindeki hidrojen oranının çalışılan tüm polarizasyon potansiyellerindeki (0,05-0,8 V) değişimleri sırasıyla Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’te sunulmuştur. Anot akış kanalının ortasındaki, anot akış kanalı ile elektrotun temas ettiği yüzeydeki ve anot

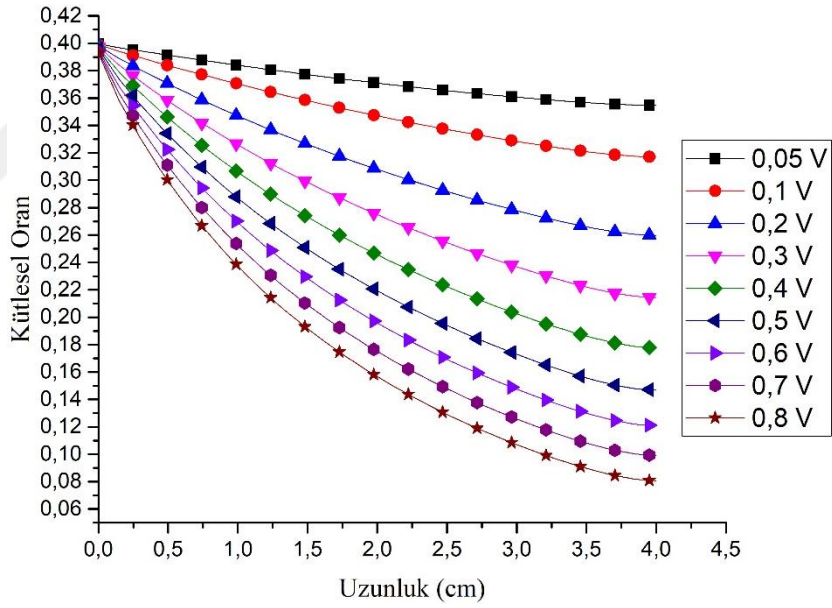
elektrotu ile elektrolitin temas ettiği yüzeydeki hidrojen oranlarını sırasıyla Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 ifade etmektedir. Şekil 5.5'te de görülebileceği gibi akış kanalının girişinden çıkışına doğru ve kanaldan elektrolite doğru hidrojen konsantrasyonunda azalma görülmektedir. Aşağıdaki üç şekilde de bu durum doğrulanmakta ve tüm polarizasyon potansiyellerinde bu yönlerde hidrojen konsantrasyonu giderek azalmaktadır. Aynı zamanda çalışma voltajı değerlerindeki düşüş sonucunda üretilen akımın artışına bağlı olarak artan elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle bu oran arasındaki fark giderek daha da artmaktadır. Fakat anot bölgesinde yani hem akış kanalında hem de elektrot içerisinde hidrojen oranı benzer değişim davranışı sergilemiş ve kütle oranının azalması hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 5.5'te de bu durum görülebilmektedir. Bunun sebebi ise hidrojenin oksijene oranla hızlı bir şekilde difüzyonu ile kanal boyunca ve elektrolite kadar aynı şekilde hızlı bir tüketimin gerçekleşmesidir. Doğal olarak hidrojen oranının sunulan üç farklı hat boyunca benzer aralığa ve davranışa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı içerisindeki hidrojen tüketimleri



Şekil 5.7. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı ile elektrotu arasındaki hidrojen tüketimleri

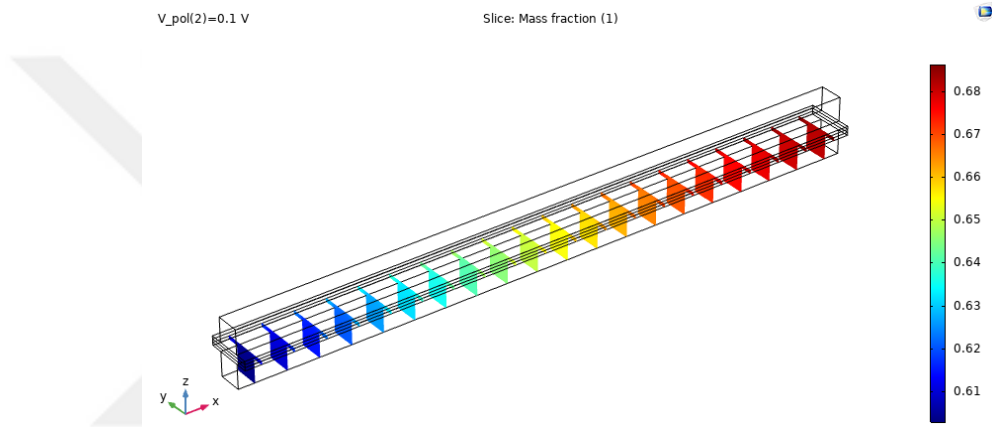


Şekil 5.8. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot elektrotu ile elektrolit arasındaki hidrojen tüketimleri

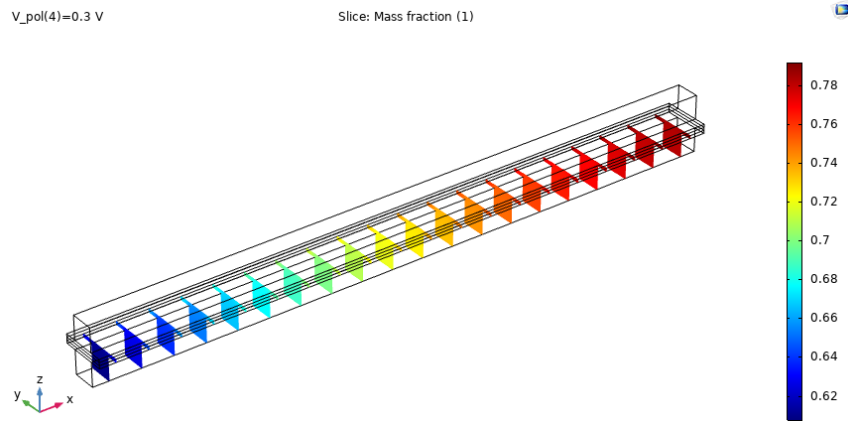
5.1.3 Suyun kütleli dağılımı

Doğrulan modelde farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı ile elektrotundaki su dağılımı ise Şekil 5.9'da verilmiştir. Anot bölgesinde elektrokimyasal olarak hidrojen oksitlenirken ürün olarak bilindiği gibi su açığa çıkmaktadır. Bu nedenle

göz önüne alınan bütün polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalının girişinden çıkışına kadar hidrojen nasıl tüketiliyor ve azalıyorsa tam tersi olarak da su konsantrasyonu artacaktır. Ayrıca elektrokimyasal reaksiyonlar anot elektrotunda meydana geldiği için kanaldan elektrota doğru da su konsantrasyonunda bir artış görülmektedir. Aynı zamanda su konsantrasyonundaki artışın büyüklüğünün, çalışma voltajının düşmesi veya polarizasyon potansiyelinin artmasıyla arttığı görülmektedir. Çünkü düşük çalışma voltajlarında yüksek akım değerlerinin elde edilmesi için elektrokimyasal reaksiyonların artması gerekmekte ve bunun sonucunda da su üretiminde artış olmaktadır.



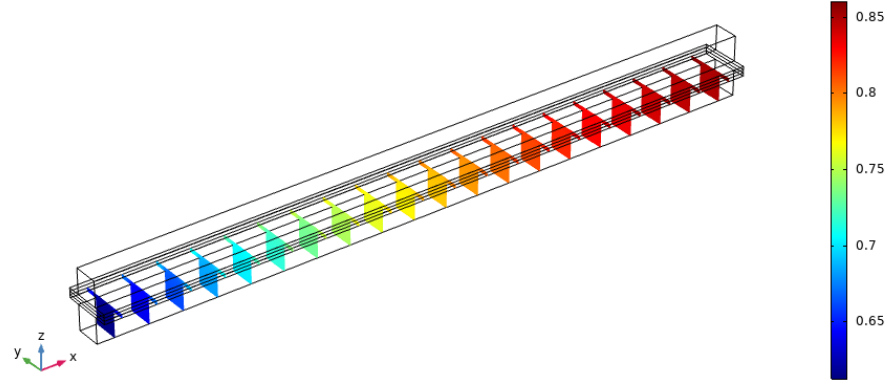
(a)



(b)

V_{pol}(6)=0.5 V

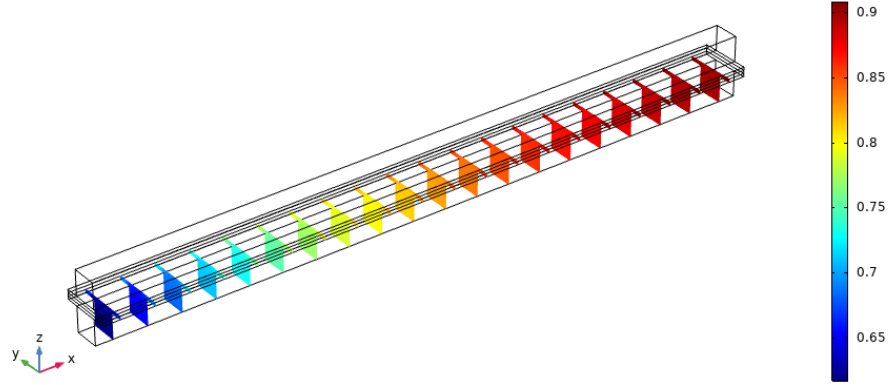
Slice: Mass fraction (1)



(c)

V_{pol}(8)=0.7 V

Slice: Mass fraction (1)

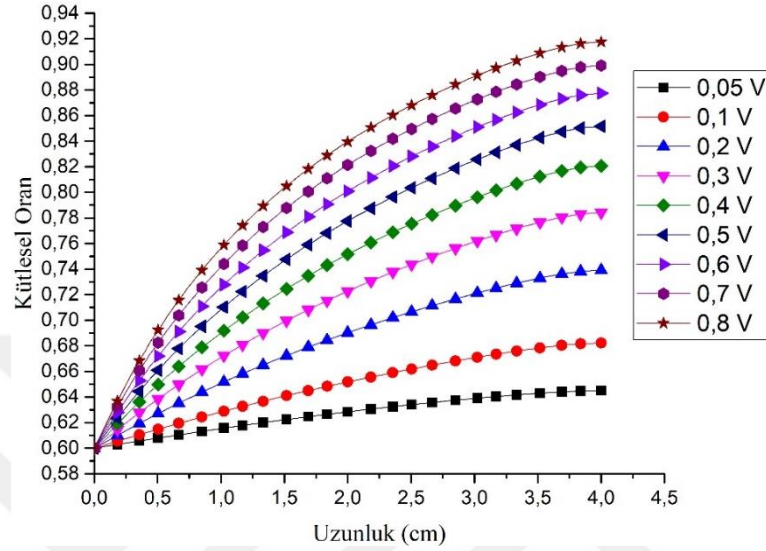


(d)

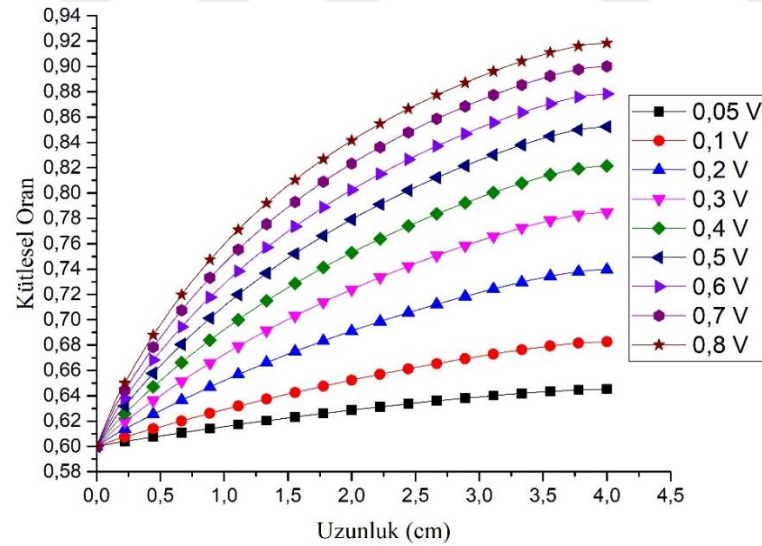
Şekil 5.9. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot bölgesindeki su dağılımı: 0,1 V (a), 0,3 V (b), 0,5 V (c) ve 0,7 V (d)

Anot bölgesindeki su oranının ele alınan tüm polarizasyon potansiyellerindeki (0,05- 0,8 V) değişimleri sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de sunulmuştur. Anot akış kanalının ortasındaki, anot akış kanalı ile elektrotun temas ettiği yüzeydeki ve anot elektrotu ile elektrolitin temas ettiği yüzeydeki su oranlarını sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 ifade etmektedir. Şekil 5.9’da da görülebileceği gibi akış kanalının girişinden çıkışına doğru ve elektrolite doğru su konsantrasyonunda artış görülmektedir. Şekil 5.10-5.11’de bu durum doğrulanmakta ve tüm polarizasyon potansiyellerinde su oranı bu doğrultularda giderek artmaktadır. Aynı zamanda çalışma voltajı değerlerindeki düşüş sonucunda üretilen akımın artışına bağlı olarak artan elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle bu oran arasındaki fark giderek artmaktadır. Fakat aşağıdaki anot bölgesinde yani hem akış kanalında hem de elektrot içerisinde su oranı benzer değişim davranışı sergilemiş ve kütleli oranın artması hızlı bir şekilde

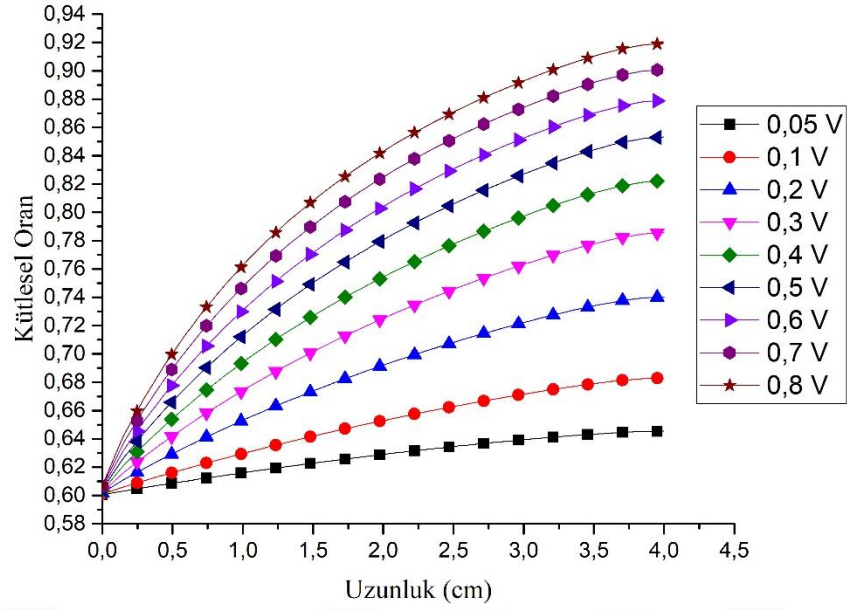
gerçekleşmiştir. Şekil 5.9’da da bu durum görülebilmektedir. Bunun sebebi ise yine hidrojenin hızlı bir şekilde difüzyonu ve oksitlenmesi sonucunda kanal boyunca ve elektrolite kadar aynı şekilde hızlı bir su üretiminin gerçekleşmesidir. Doğal olarak su oranının da incelenen bölgelerde benzer aralığa ve davranışa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı içerisindeki su üretimi



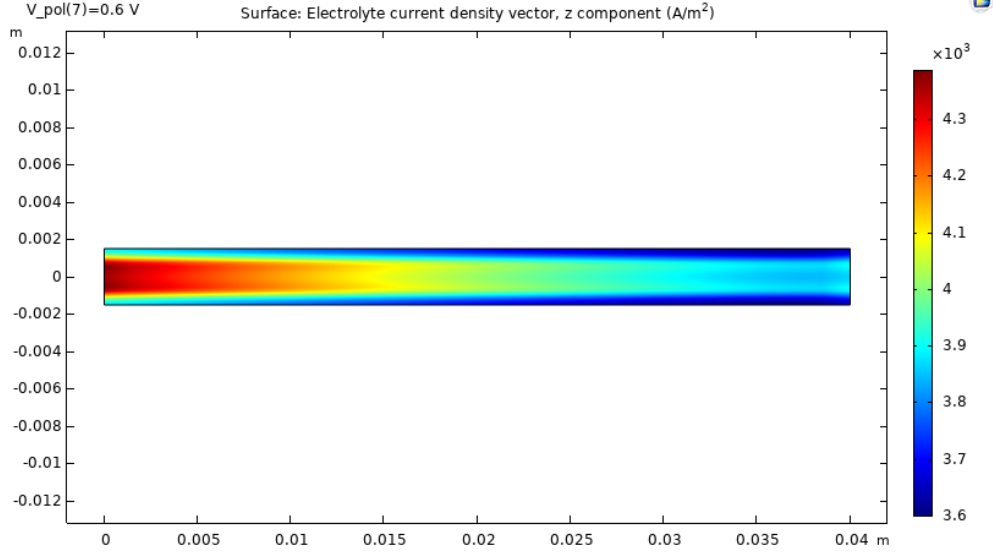
Şekil 5.11. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot akış kanalı ile elektrotu arasındaki su üretimi



Şekil 5.12. Farklı polarizasyon potansiyellerinde anot elektrotu ile elektrolit arasındaki su üretimi

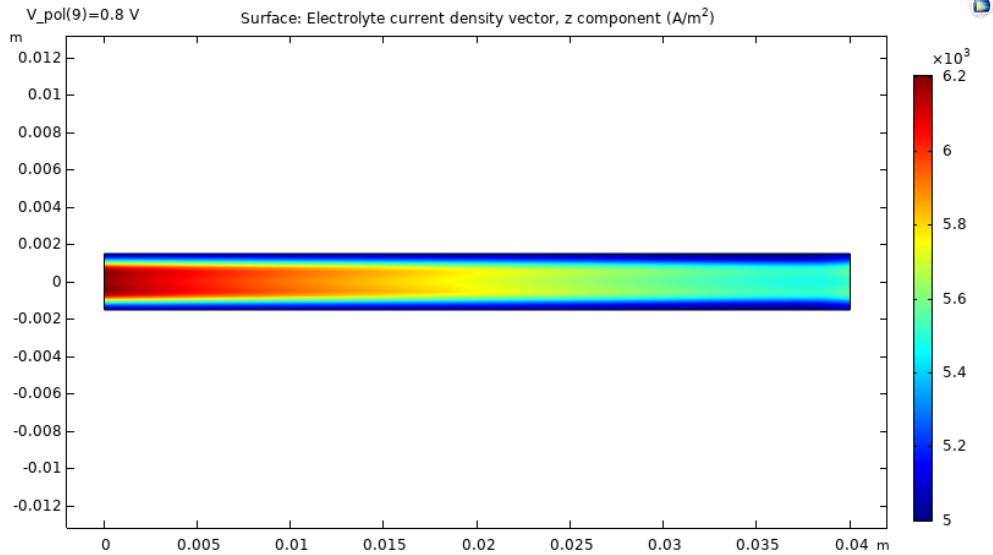
5.2 Akım Yoğunluğu Dağılımı

Modelimizde de elde ettiğimiz maksimum güç yoğunluğu yaklaşık olarak 0,6 V polarizasyon potansiyeline denk geldiğinden dolayı bu voltajtaki anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı Şekil 5.13'te verilmiştir. Anot akış kanalının girişinden taze hidrojenin sağlanması ve girişte oksijen iyonları ile karşılaşması sonucunda artan elektrokimyasal reaksiyonlar nedeniyle akım yoğunluğunda artış meydana gelmekte ve çıkışa doğru ise giderek azalmaktadır. Aynı zamanda interkonnektörde bulunan çıkıntıların türlerin özellikle de oksijenin taşınımını sınırladığı ve bu durumun akım yoğunluğundaki farkı arttırdığı bilinmektedir. Bu yüzden şekilde de görülebileceği gibi kanal boyunca türlerin direk teması söz konusu olduğu için akım yoğunluğu bu bölgelerde daha yüksek iken, çıkıntıların olduğu bölgelere doğru ise türlerin taşınımında sınırlamalar olduğu için akım yoğunluğu bu bölgelerde daha düşüktür. 0,6 V polarizasyon potansiyelinde maksimum akım yoğunluğu ise $0,4624 \text{ A/cm}^2$ 'dir.



Şekil 5.13. 0,6 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı

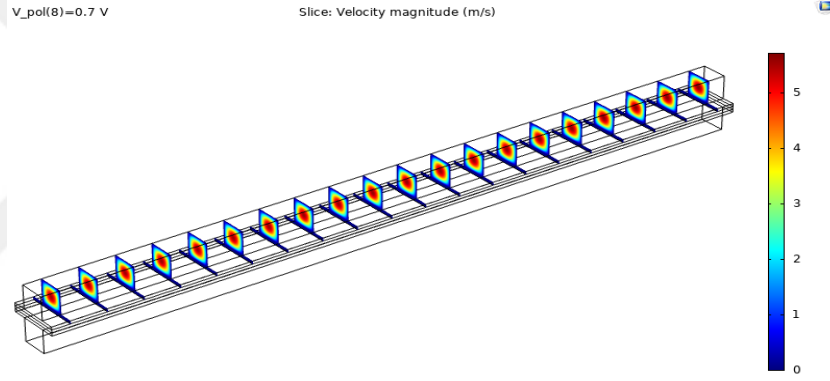
Şekil 5.14'te ise 0,8 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı verilmektedir. Beklenildiği gibi, polarizasyon potansiyeli arttıkça yani çalışma voltajı düştükçe akım yoğunluğundaki artış görülmektedir. Bu durum çalışma voltajı değerlerindeki düşüş sonucunda üretilen akımın artışına bağlı olarak artan elektrokimyasal reaksiyonların bir sonucudur.



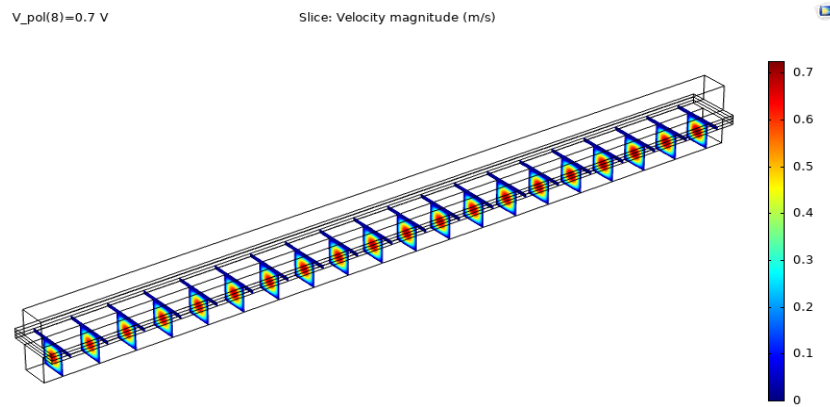
Şekil 5.14. 0,8 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı

5.3 Hız Dağılımı

Akış kanalları ve gözenekli elektrotlar içerisindeki 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki hız dağılımları Şekil 5.15'te verilmiştir. Modelimizde katot akış kanalına 900 SCCM oksijen sağlanırken, anot akış kanalına 300 SCCM hidrojen sabit bir değer olarak sağlanmıştır. Bu yüzden her iki akış kanalındaki hız dağılımları sabit bir şekilde ilerlemekte ve kanalın merkezinden dışa doğru beklenen hız profiline uygun olarak azalarak devam etmektedir. Elektrotlar içerisinde ise minimum seviyeye inmektedir. Bunun sebebi gözeneklilik ve geçirgenliğe bağlı olarak türlerin difüzyonundan kaynaklanmaktadır. Görülebileceği gibi katot tarafındaki akış, reaktanların stokiyometrik dengesini oluşturabilmek için anottaki akıştan daha hızlıdır. Katotta hız 5 m/s değerine ulaşırken, anotta hız 0,7 m/s değerine ulaşmaktadır.



(a)

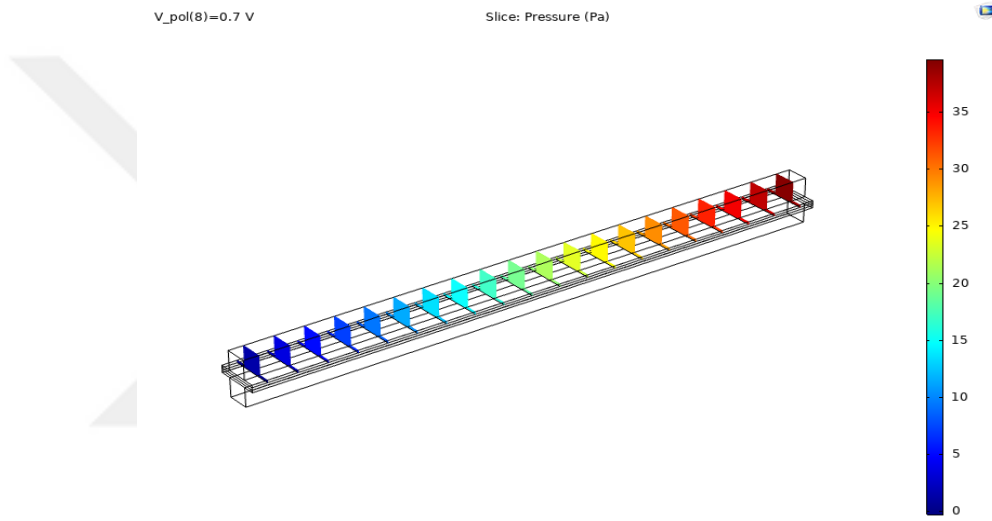


(b)

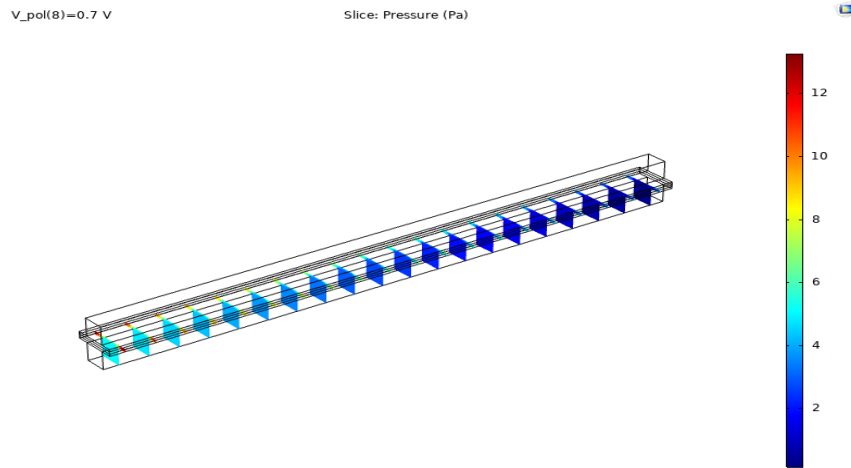
Şekil 5.15. Katot (a) ve anot (b) bölgelerinde 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki hız dağılımı

5.4 Basınç Dağılımı

Akış kanalları ve gözenekli elektrotlar içerisindeki 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki basınç dağılımları Şekil 5.16’da verilmiştir. Girişlere ve akış yönüne göre, basınç görüldüğü gibi anot ve katotta giderek azalmaktadır. Katot tarafındaki basınç düşüşünün, anot tarafındaki basınç düşüşünden daha fazla olduğu da görülmektedir. Bunun sebebi ise katottaki akış hızının yüksek olmasıdır. Ek olarak, elektrot boyunca gerçekleşen basınç düşüşü, kanallardaki basınç düşüşüne kıyasla daha yüksek olmaktadır. Katot bölgesinde basınç düşüşünün 35 Pa, anot bölgesinde 12 Pa olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

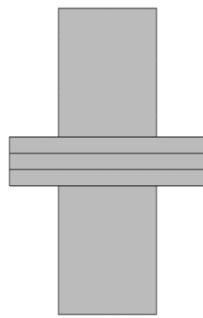
Şekil 5.16. Katot (a) ve anot (b) bölgelerinde 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki basınç dağılımı

5.5 Parametrik Çalışma ve Sonuçları

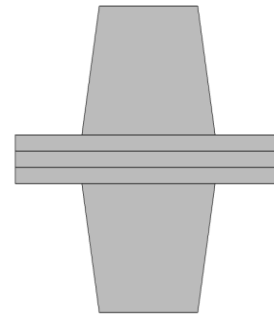
Daha önce de ifade edildiği gibi KOYP MEG’de üretilen akımın toplanmasının yanı sıra gerekli yakıt ve oksitleyicinin sisteme beslenmesi ise interkonnektör olarak adlandırılan ve üzerlerinde akış kanalları bulunan seramik veya metalik plakalarla sağlanmaktadır. Bu akış kanallarının geometrisi ısı, madde ve momentum aktarımını önemli ölçüde etkilediği için, KOYP performansı MEG özelliklerinin yanı sıra interkonnektör tasarımı ile de önemli ölçüde değişmektedir. Bu yüzden bu tezin amacı, kütük malzemeden talaşlı imalat ile akış kanalları işlenen geleneksel interkonnektör tasarımı yerine, pres ile sac malzemeden üretilmiş yeni interkonnektör tasarımının kanal geometrisinin sayısal olarak incelenerek optimum kanal geometrisini elde etmektir. İncelenen kanal geometrisi parametreleri ise kanalın genişliği (W), kanalın derinliği (H) ve rib açısı (θ) şeklindedir. Çalışmada kanalın genişliği ile ribin genişliği birbirine eşit olarak alınmıştır. Tez kapsamında çalışılan parametre değerleri ise Çizelge 5.1’de verilmiştir. İncelenen parametrik çalışmada değişimin anlaşılabilmesi için kanal genişliği ve kanal derinliğinin 1,5 mm olduğu fakat rib açısının değiştirildiği görseller şematik olarak Şekil 5.17’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. İncelenen interkonnektör tasarım parametreleri

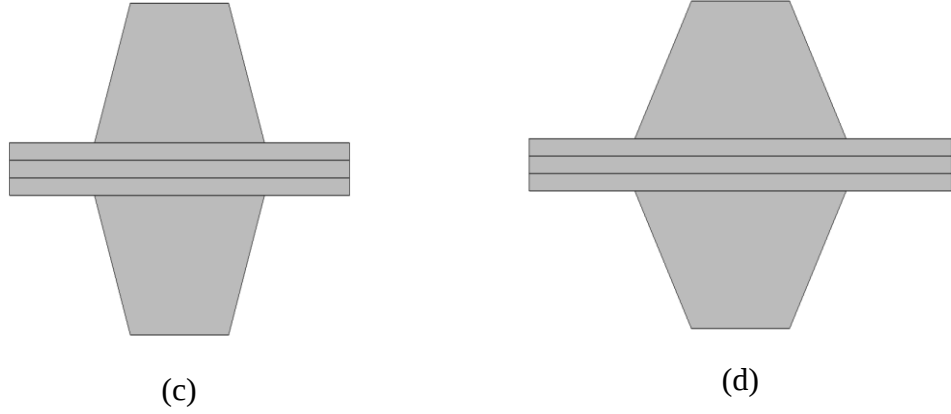
Parametre	İncelenen Değerler
Kanalın Genişliği (W)	0,5, 1, 1,5, 2 [mm]
Kanalın Derinliği (H)	0,5, 1, 1,5, 2 [mm]
Rib Açısı (θ)	90, 100, 110, 120 [$^{\circ}$]



(a)



(b)



Şekil 5.17. Farklı rib açılarında kanal geometrisinin değişimi; 90° (a), 100° (b), 110° (c) ve 120° (d)

Sonuç olarak kanal genişliği, kanal derinliği ve rib açısının değiştiği farklı interkonnektör tasarımları için KOYP hücre simülasyonları COMSOL Multiphysics® programında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda MEG ve iki akış kanalından oluşan KOYP hücresi analiz edilerek hücre içi madde, hız, basınç ve akım dağılımlarının yanı sıra hücre performansları da belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları vasıtasıyla performans açısından optimum sonucu ortaya koyan tasarım Çizelge 5.2’de verilmiştir. Ayrıca, bu optimizasyon çalışmasında bütün akış kanalı geometrileri için çalışma voltajı 0,05-0,8 V arasında değiştirilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçları ise aşağıda tartışılmıştır.

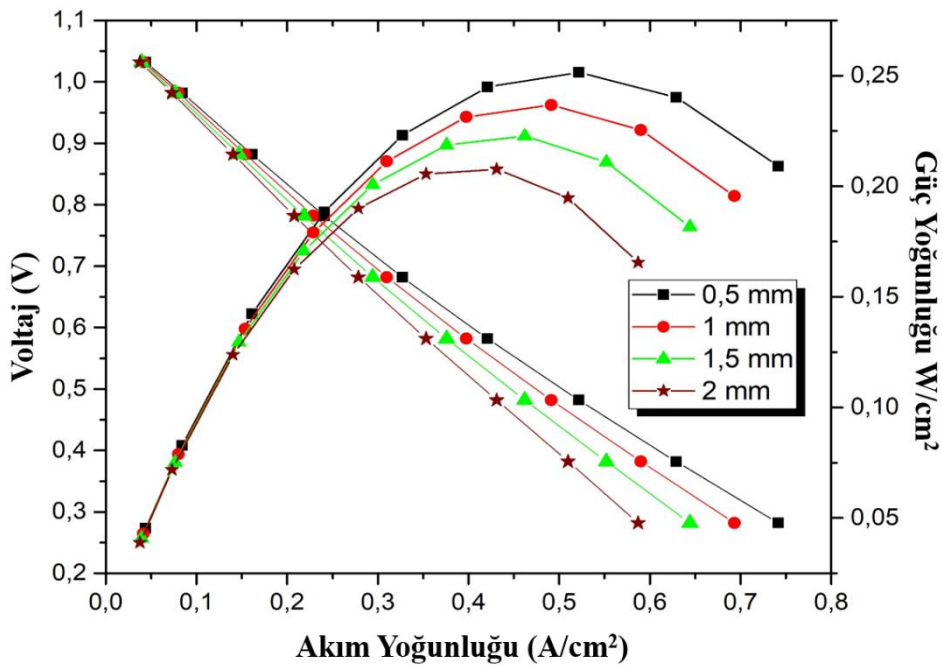
Çizelge 5.2. Optimizasyon sonuçları

Parametre	Optimum Değer
Kanalın Genişliği (W)	0,5 mm
Kanalın Derinliği (H)	0,5 mm
Rib Açısı (θ)	90°

5.5.1 Kanal genişliğinin performansa etkisi

Kanal genişliğinin diğer parametreler optimum değerlerinde iken 800 °C sıcaklıktaki pil performansına olan etkisi Şekil 5.18’de verilmiştir. Görülebileceği gibi kanal genişliği azaldıkça performansta iyileşmeler meydana gelmektedir. Yani kanallar daraldıkça akım yoğunluğunda artış gözlenmektedir. Bu artışın sebebi olarak ise akış alanının daralmasıyla birlikte kanaldan elektrotlara kütle taşınımı yolunun kısalması ve daha etkili

bir şekilde reaktantların iletilmesi sonucunda ortaya çıkan elektrokimyasal reaksiyonların artışıyla akım yoğunluğu dağılımının daha homojen olarak sağlanması söylenebilir. Kanal genişliği 2 mm iken, $0,43 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda maksimum güç yoğunluğu $0,207 \text{ W/cm}^2$ olarak elde edilmiştir. Kanal genişliği 0,5 mm'ye düştüğünde ise $0,52 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda maksimum güç yoğunluğu $0,252 \text{ W/cm}^2$ 'ye çıkmıştır. Yaptığımız kanal genişliği optimizasyonu sayesinde güç değerlerinde % 21,7'lik bir iyileşme görülmüştür. Anlaşılacağı üzere kanal genişliğinin pil performansı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.

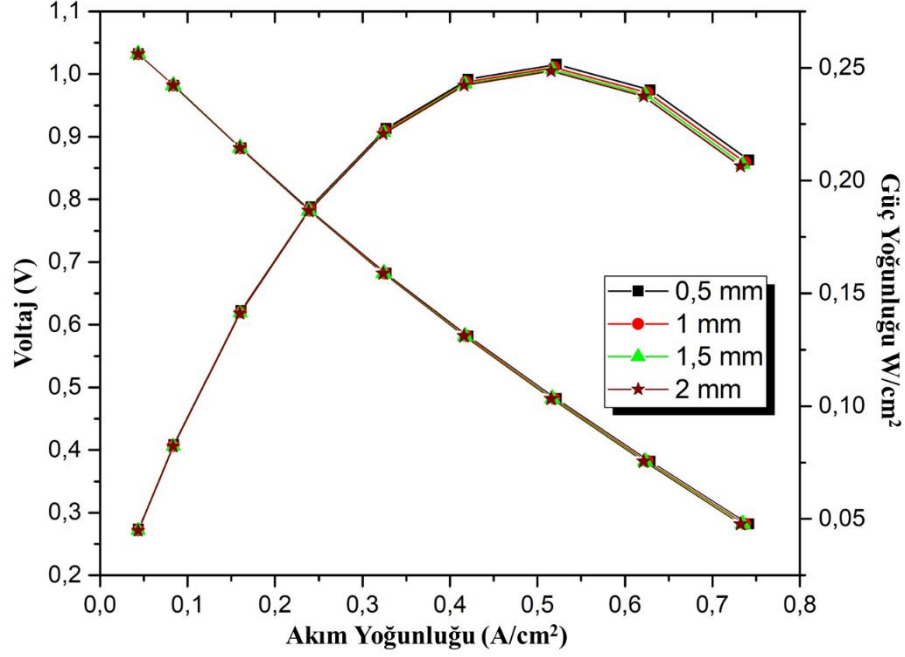


Şekil 5.18. Kanal genişliğinin pil performansına olan etkisi

5.5.2 Kanal derinliğinin performansa etkisi

Kanal derinliğinin diğer parametreler optimum değerlerinde iken $800 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki pil performansına olan etkisi Şekil 5.19'da verilmiştir. Görülebileceği gibi kanal derinliği azaldıkça performansta iyileşmeler meydana gelmektedir. Yani kanalın derinliği azaldıkça akım yoğunluğunda artış gözlenmektedir. Fakat bu artış hepsinde benzer davranış göstermektedir ve aralarındaki fark oldukça düşüktür. Bu da kanal derinliği parametresinin seçilen aralıkta akım yoğunluğu dağılımını diğer parametreler optimum değerlerinde iken ciddi bir şekilde etkilemediğini göstermektedir. Kanal derinliği 2 mm iken, $0,5156 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda maksimum güç yoğunluğu $0,249 \text{ W/cm}^2$ olarak

elde edilmiştir. Kanal derinliği 0,5 mm'ye düştüğünde ise 0,5216 A/cm² akım yoğunluğunda maksimum güç yoğunluğu 0,251 W/cm²'ye çıkmıştır. Elde edilen veriler ışığında kanal derinliğinin incelenen aralıkta pil performansına olan etkisi oldukça düşük olup %1,17'lik bir fark olduğu görülmektedir.

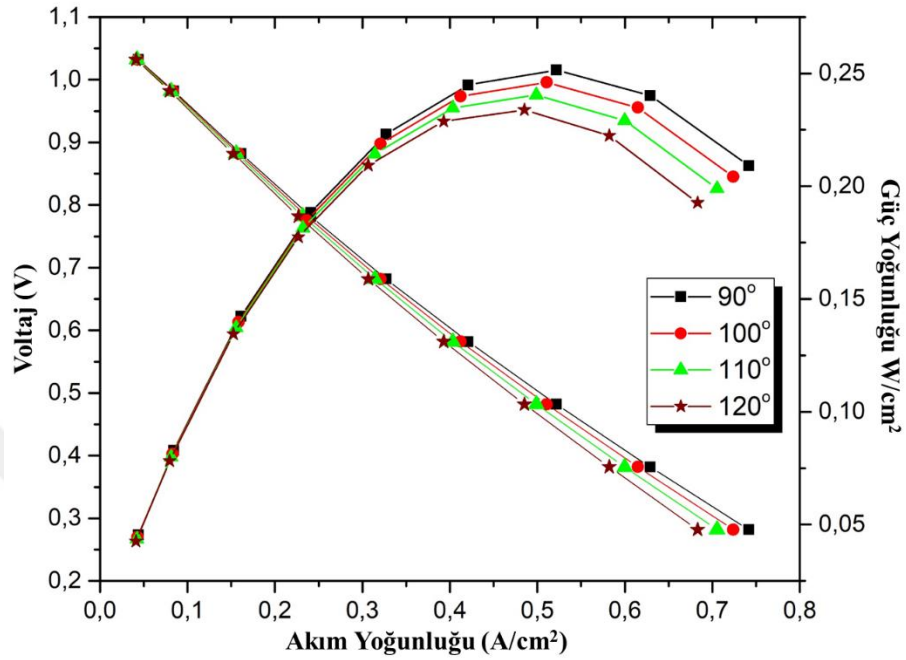


Şekil 5.19. Kanal derinliğinin pil performansına olan etkisi

5.5.3 Rib açısının performansa etkisi

Rib açısının diğer parametreler optimum değerlerinde iken 800 °C sıcaklıktaki pil performansına olan etkisi Şekil 5.20'de verilmiştir. Görülebileceği gibi rib açısı azaldıkça performansta iyileşmeler meydana gelmektedir. Yani rib açısı azaldıkça akım yoğunluğunda artış gözlenmektedir. Akış kanalının kesit alanı daraldıkça kütlenin taşınımı ve reaktanların iletimi daha verimli gerçekleşerek elektrokimyasal reaksiyonların artışı sonucunda performansta da artış meydana gelmektedir. Rib açısı 120° iken, 0,485 A/cm² akım yoğunluğunda maksimum güç yoğunluğu 0,234 W/cm² olarak elde edilmiştir. Rib açısı 90°'ye düştüğünde ise 0,522 A/cm² akım yoğunluğunda maksimum güç yoğunluğu 0,251 W/cm²'ye çıkmıştır. Yaptığımız rib açısı optimizasyonu sayesinde de güç değerlerinde % 7,3'lük bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu yüzden, kanal genişliği gibi rib açısının da pil performansı üzerinde oldukça etkili bir parametre olduğu ortaya çıkmaktadır. Üç farklı parametrenin incelenmesi neticesinde elde edilen

sonuç ise en dar kanal geometrisine sahip akış kanalının pil performansı açısından en iyi olduğu sonucuna varılmıştır ve optimum kanal geometrisinin; 0,5 mm kanal genişliği, 0,5 mm kanal derinliği ve 90° rib açısında olduğu ortaya çıkmıştır.

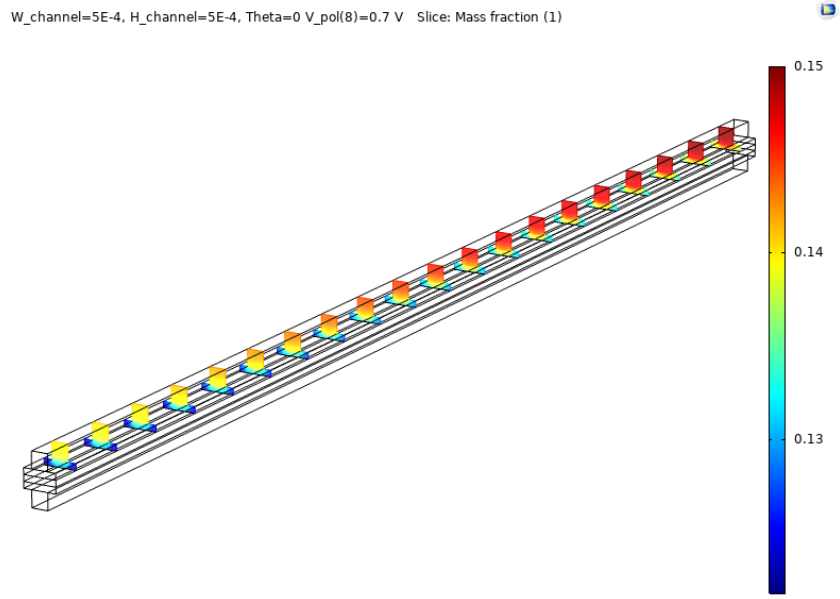
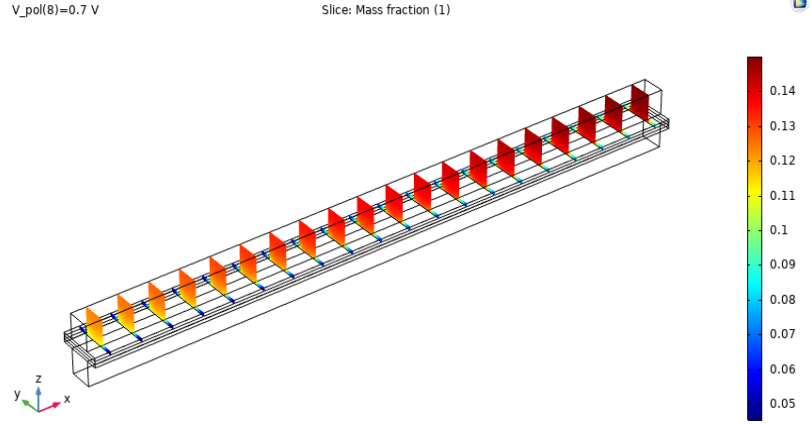


Şekil 5.20. Rib açısının pil performansına olan etkisi

5.5.4 Optimizasyon neticesinde türlerin kütleli dağılımında meydana gelen değişimler

5.5.4.1 Katotta oksijenin kütleli dağılımındaki değişim

Katot ve akış kanalı içerisindeki oksijen kütle oranının 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki değişimi Şekil 5.21’de verilmiştir. Optimizasyon sonucunda oksijen kanal daraldıkça daha az tüketilmektedir. Doğrulan modelde oksijen oranı aralığı kanalda 0,11-0,15 arasında iken, optimizasyon sonucu elde edilende oksijen oranı aralığı kanalda 0,14-0,15 aralığındadır. Fakat oksijen daha az tüketilmesine rağmen akım yoğunluğunda kanal daraldıkça daha homojen bir dağılım olması sebebiyle güç değerlerinde artış elde edilmiştir. Her ikisinde de girişten çıkışa doğru oksijen oranı azalmaktadır yani tüketilmektedir.

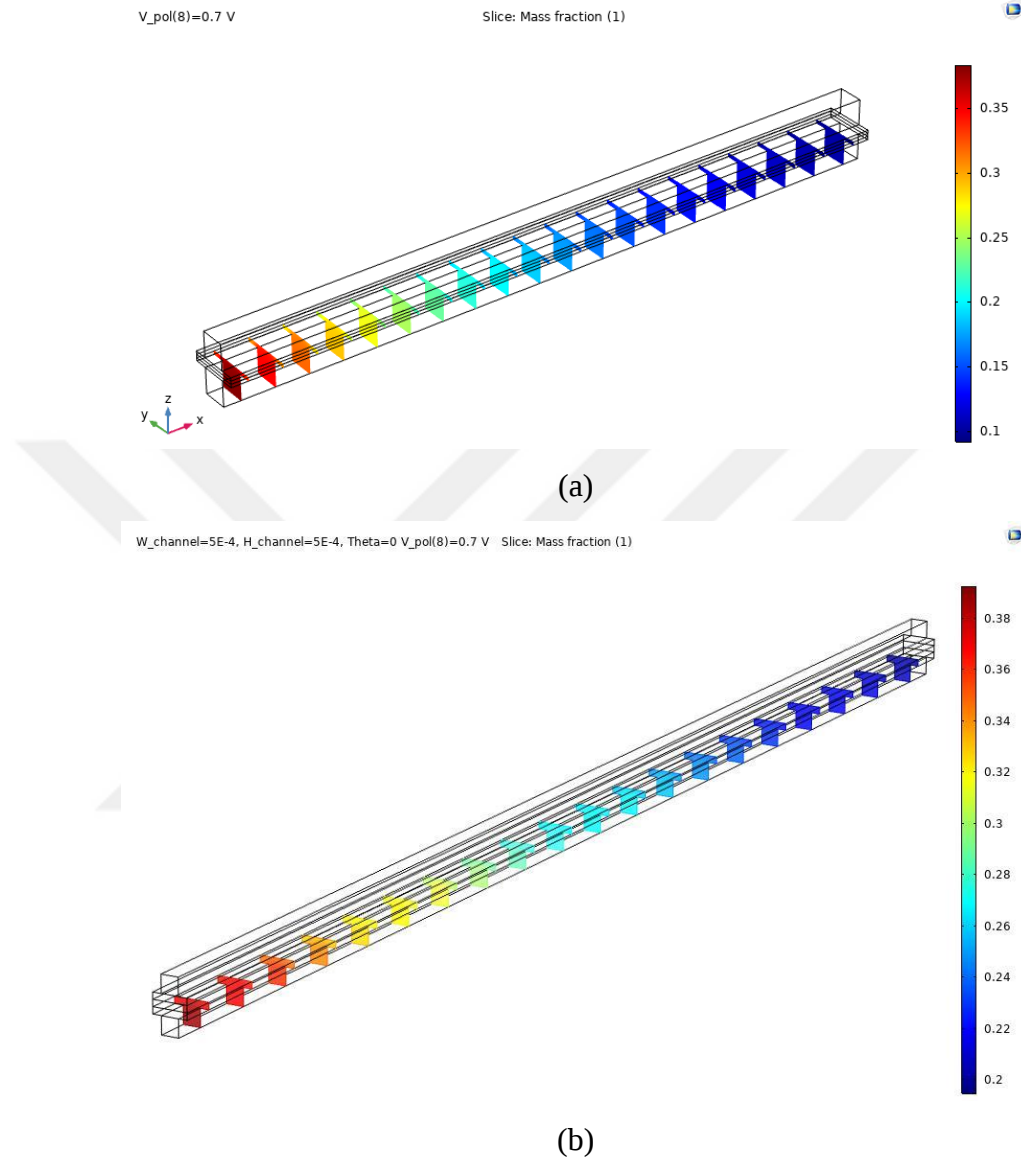


Şekil 5.21. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde oksijenin kütleel dağılımı; doğrulanan modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) oksijen dağılımı

5.5.4.2 Anotta hidrojenin kütleel dağılımındaki değişim

Anot ve akış kanalı içerisindeki hidrojen kütle oranının 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki değişimi Şekil 5.22’de verilmiştir. Optimizasyon sonucunda hidrojen kanal daraldıkça daha az tüketilmektedir. Doğrulanan modelde hidrojen oranı aralığı kanalda 0,1-0,35 arasında iken, optimizasyon sonucu elde edilende hidrojen oranı aralığı kanalda 0,2-0,38 arasındadır. Fakat hidrojen daha az tüketilmesine rağmen akım yoğunluğunda kanal daraldıkça daha homojen bir dağılım olması sebebiyle güç

değerlerinde yine artış elde edilmiştir. Her ikisinde de girişten çıkışa doğru hidrojen oranı azalmaktadır yani tüketilmektedir.

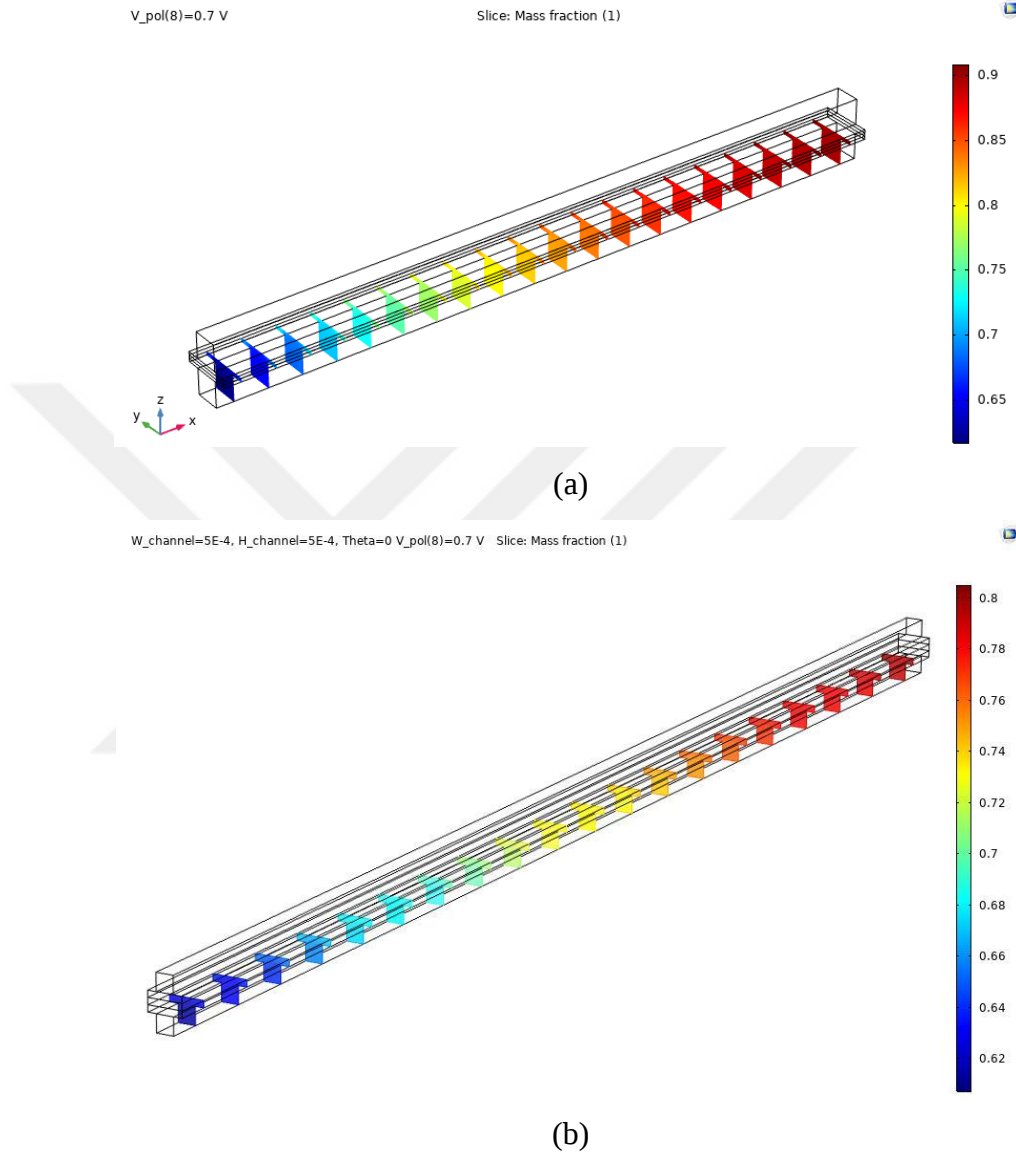


Şekil 5.22. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde hidrojenin kütleli dağılımı; doğrulanan modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) hidrojen dağılımı

5.5.4.3 Anotta suyun kütleli dağılımındaki değişim

Anot ve akış kanalı içerisindeki suyun kütle oranının 0,7 V polarizasyon potansiyelindeki değişimi Şekil 5.23’de verilmiştir. Benzer şekilde optimizasyon sonucunda su kanal daraldıkça daha az üretilmektedir. Doğrulanan modelde su oranı aralığı kanalda 0,65-0,9 arasında iken, optimizasyon sonucu elde edilende ise su oranı aralığı kanalda 0,62-0,8

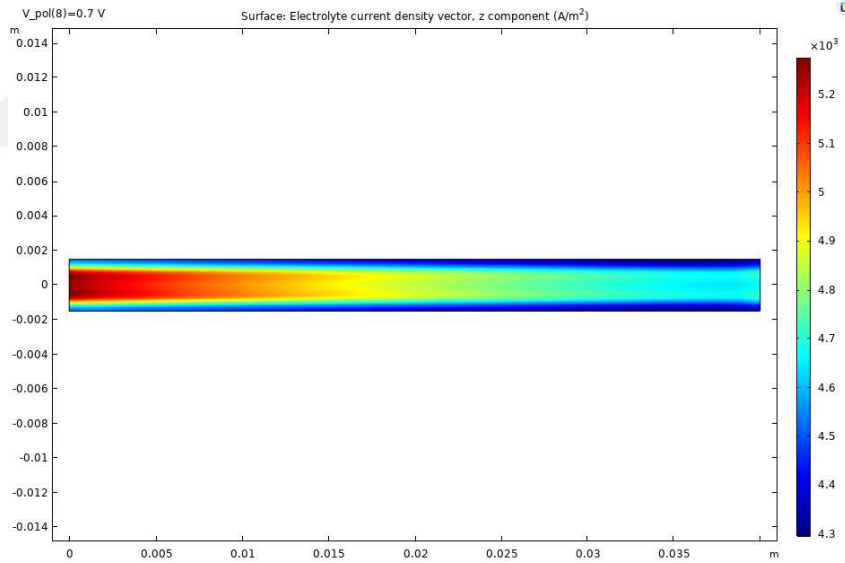
arasındadır. Fakat su daha az üretilmesine rağmen akım yoğunluğunda kanal daraldıkça daha homojen bir dağılım olması sebebiyle güç değerlerinde yine artış elde edilmiştir. Her ikisinde de girişten çıkışa doğru su oranı artmaktadır yani üretilmektedir.



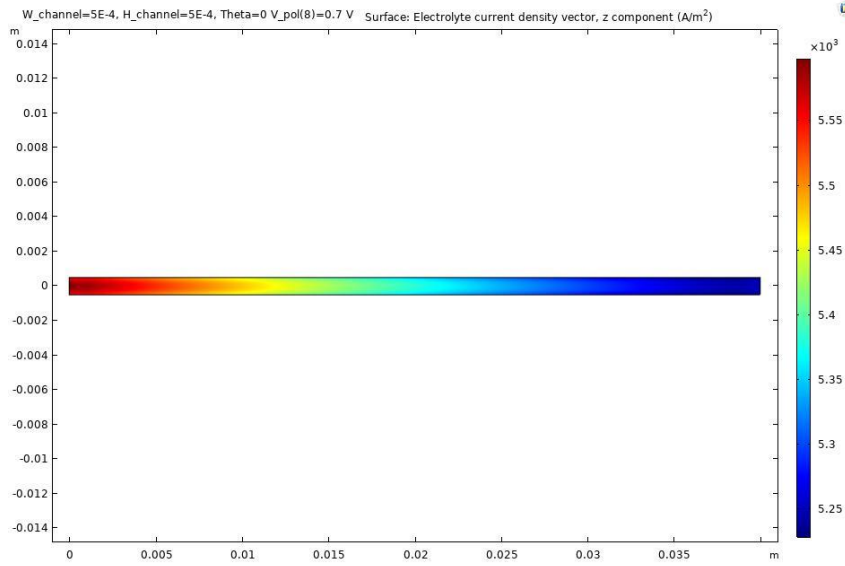
Şekil 5.23. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde suyun kütleel dağılımı; doğrulanan modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) su dağılımı

5.5.5 Optimizasyon neticesinde akım yoğunluğunda meydana gelen değişimler

Şekil 5.24'te ise 0,7 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzündeki akım yoğunluğu dağılımı verilmektedir. Kanalin kesit alanının daralmasıyla birlikte tür konsantrasyonlarında meydana gelen değişime bağlı olarak görüldüğü gibi akım yoğunluğu dağılımı ise daha homojen hale gelmektedir. Gerek kanal boyunca gerekse çıkıntıların olduğu kısımlarda homojen bir dağılım söz konusudur. Bu durum üretilen akım yoğunluğunda artışa neden olmakta ve performansı iyileştirmektedir. Her ikisinde de maksimum güç yoğunluğu 0,6 V polarizasyon potansiyelinde elde edildiğinden dolayı doğrulanan modelde ($W=1,5$ mm, $H=1,5$ mm, $\theta=90^\circ$) maksimum güç yoğunluğu $0,2229$ W/cm² iken, optimizasyon sonucunda elde edilen ($W=0,5$ mm, $H=0,5$ mm, $\theta=90^\circ$) maksimum güç yoğunluğu ise $0,2515$ W/cm² olarak bulunmuştur. Optimizasyon sayesinde güç değerlerinde %12,8'lik bir artış sağlanmıştır.



(a)



(b)

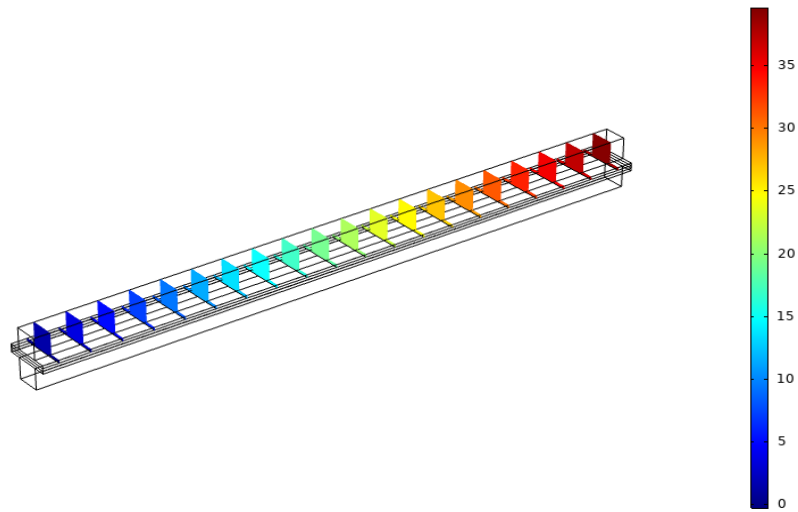
Şekil 5.24. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde anot elektrotu ile elektrolit arayüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı; doğrulanan modelde elde edilen (a) ve optimizasyon sonucunda elde edilen (b) akım yoğunluğu dağılımı

5.5.6 Optimizasyon neticesinde basınç dağılımında meydana gelen değişimler

Şekil 5.25'te ise 0,7 V polarizasyon potansiyelinde modelden elde edilen ve optimizasyon sonucu elde edilen basınç dağılımları verilmektedir. Modelde katot bölgesinde basınç düşüşü 35 Pa iken, optimizasyon sonucunda katot bölgesinde basınç düşüşü 3000 Pa değerine çıkmıştır. Benzer şekilde modelde anot bölgesinde basınç düşüşü 12 Pa iken, optimizasyon sonucunda anot bölgesinde basınç düşüşü 350 Pa değerine çıkmıştır. Her iki bölgede basınç düşüşündeki artışın sebebi beklenildiği gibi kanalın kesit alanının daralması olup bunun sonucunda daha yüksek pompalama ihtiyacının ortaya çıkması söz konusu olacaktır.

V_{pol}(8)=0.7 V

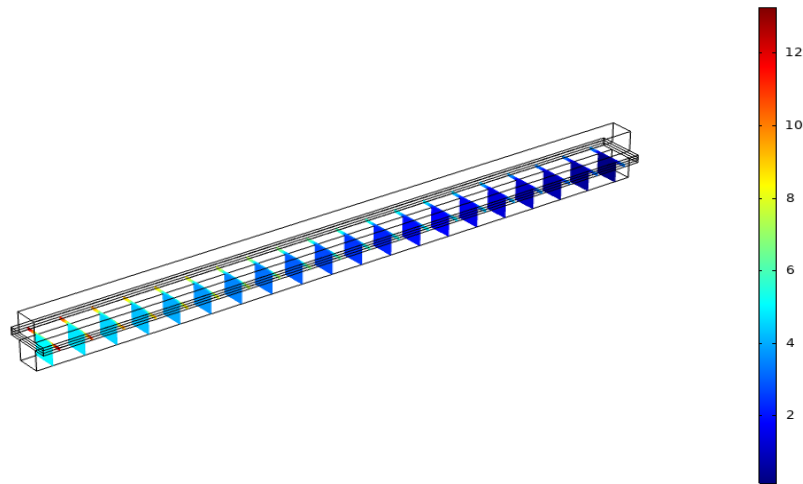
Slice: Pressure (Pa)



(a)

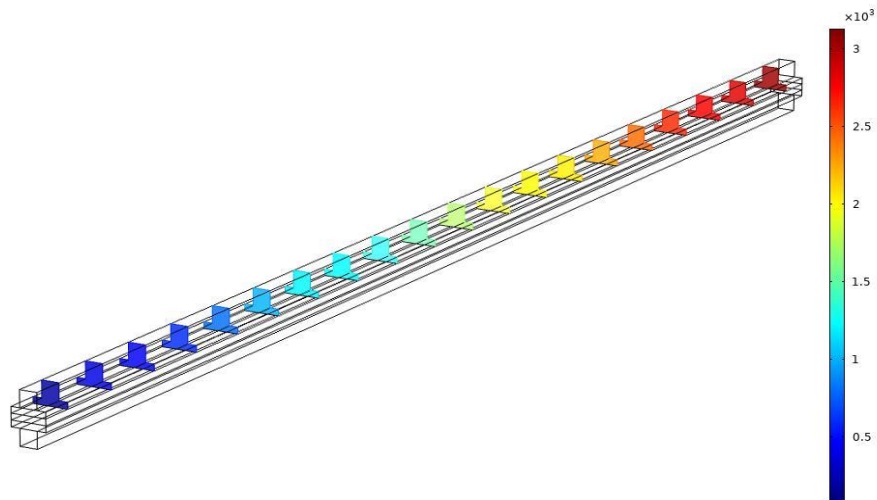
V_{pol}(8)=0.7 V

Slice: Pressure (Pa)



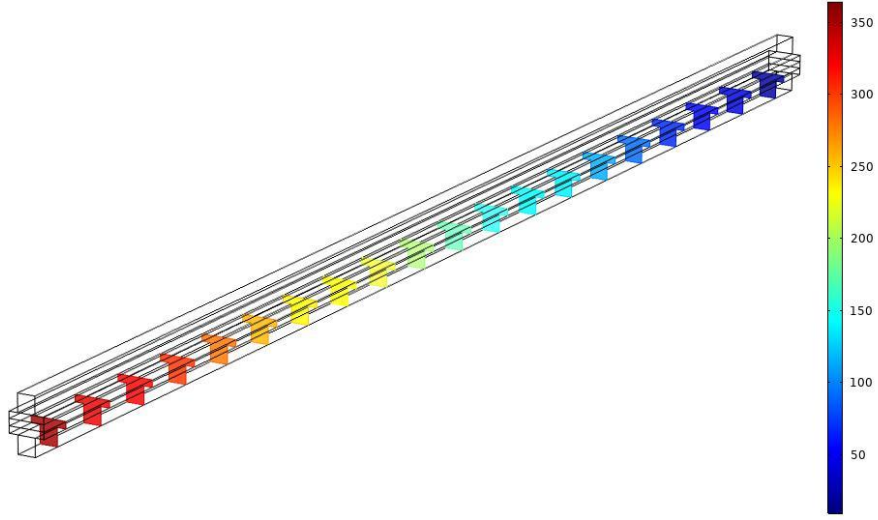
(b)

W_{channel}=5E-4, H_{channel}=5E-4, Theta=0 V_{pol}(8)=0.7 V Slice: Pressure (Pa)



(c)

W_channel=5E-4, H_channel=5E-4, Theta=0 V_pol(8)=0.7 V Slice: Pressure (Pa)



(d)

Şekil 5.25. 0,7 V polarizasyon potansiyelinde basınç dağılımları; doğrulanan modelde katot bölgesinde elde edilen (a), doğrulanan modelde anot bölgesinde elde edilen (b), optimizasyon sonucunda katot bölgesinde elde edilen (c) ve optimizasyon sonucunda anot bölgesinde elde edilen (d) basınç dağılımı

BÖLÜM VI

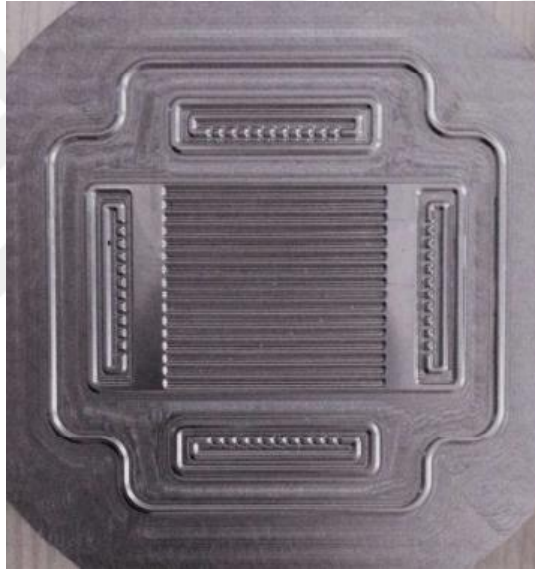
SONUÇ VE TARTIŞMA

İnterkonnektörler, katı oksit yakıt pillerinde önemli ve kritik bir bileşendir. Çünkü, gazların homojen bir şekilde dağıtılmasında ve aynı şekilde ürünlerin sistemden uzaklaştırılmasında rol oynayan interkonnektörler aynı zamanda her membran arasındaki elektriksel bağlantıdan da sorumludur. En önemlisi ise yakıt ve oksitleyicinin birbirine doğrudan temasını engellemesidir. Bu sebeplerle iyi bir interkonnektörde beklenen davranışlar yüksek elektron iletkenliği, zorlu çalışma şartları nedeniyle iyi bir kimyasal ve mekanik stabilite, gazlar için düşük geçirgenlik ve diğer sistem bileşenleri ile termal genleşme katsayısı uyumu olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle özellikle düzlemsel KOYP’de interkonnektör malzemesi olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlar kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan biri ve bu tezde de incelenen interkonnektör malzemesi Crofer 22 APU’nun sac formudur. İnterkonnektörlerin üzerlerindeki akış kanallarının geometrisi ısı, madde ve momentum aktarımını önemli ölçüde etkilediği için, KOYP performansı diğer elemanların özelliklerinin yanı sıra interkonnektör tasarımı ile de değişmektedir. Bu tezde de kütük malzemeden talaşlı imalat ile akış kanalları işlenen geleneksel interkonnektör tasarımı yerine, pres ile sac malzemeden üretilmiş ve farklı akış kanalı geometrisine sahip interkonnektör tasarımları sayısal olarak incelenmiştir.

6.1 Crofer 22 APU’nun Şekillendirilebilirliği

Geleneksel interkonnektörler, kütük malzemeden talaşlı imalat ile akış kanallarının işlenmesi ile üretilmektedir. Hassas CNC tezgahlarında uzun süreli kanal işlemenin yanı sıra etkin akım toplanması için taşlama gerektiren geleneksel interkonnektörlerin bu nedenle üretim maliyetleri yüksek olmaktadır. Öte yandan kanal işlenmesi sırasındaki mekanik hasarların önüne geçilmesi için kalın malzeme kullanımı gerekmektedir. Bu durum malzeme maliyetini artırdığı gibi ortaya çıkan interkonnektörler hem ağır hem de iri olmaktadır. Bu nedenle geleneksel interkonnektör içeren KOYP staklarının özgül (W/kg) ve hacimsel (W/m^3) güç yoğunlukları düşük olmaktadır.

Bu tez çalışmasında ise ince sac formundaki interkonnektör malzemesinin pres yöntemi ile tek aşamada üretimi önerilmektedir. Bu sayede malzeme ve üretim maliyeti düşürüleceği gibi azaltılan interkonnektör ağırlık ve hacmi sayesinde yüksek özgül ve hacimsel güç yoğunluğuna sahip KOYP stakları üretilebilecektir. Bu çalışmada söz konusu interkonnektörler için paralel kanallardan oluşan bir akış alanı ele alınarak kanal geometrisi pil performansı açısından sayısal olarak optimize edilmiştir. Optimizasyonlar sonucunda kanal genişliği ve derinliğinin 0,5 mm, rib açısının ise 90° olduğu tasarım, en yüksek pil performansını sergilemiştir. Benzer bir tez çalışmasında Önbilgin (2019), söz konusu interkonnektörleri üretim açısından incelemiştir. Bunun için ilk olarak CNC tezgahında kalıp üretimini gerçekleştirmiştir. Üretimini gerçekleştirdiği kalıbın yüzeyi Fotoğraf 6.1’de verilmiştir.



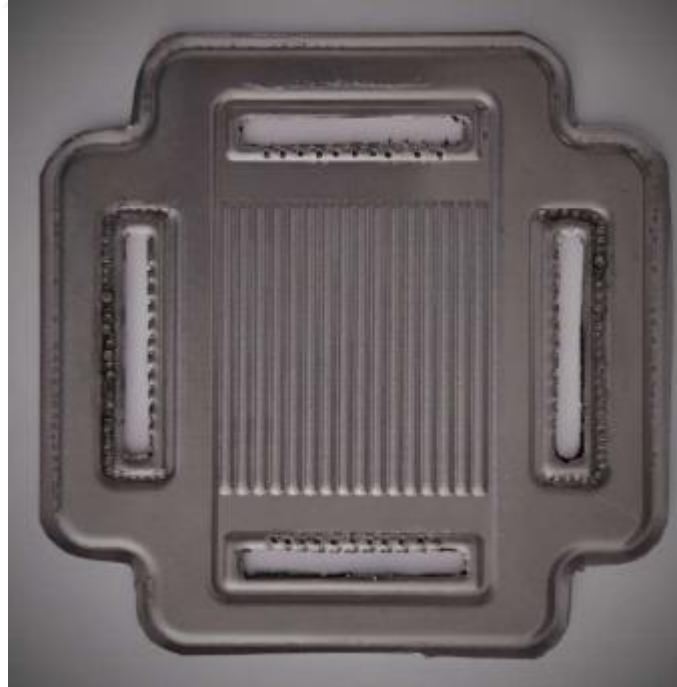
Fotoğraf 6.1. Kalıp yüzeyi (Onbilgin, 2019)

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi alt yapısında bulunan hidrolik pres ve üretilen kalıp ile 0,2 mm kalınlığa sahip sac formundaki Crofer 22 APU üzerine akış kanallarını işlemiştir. Fotoğraf 6.2’de de hidrolik presin görseli bulunmaktadır.



Fotoğraf 6.2. Hidrolik pres

Sonuç olarak sac malzemedan pres yöntemiyle üretimini tamamlamış olduğu interkonnektör ise Fotoğraf 6.3’de verilmektedir.



Fotoğraf 6.3. Sac malzemedan pres yöntemiyle üretilen interkonnektör (Onbilgin, 2019)

Akış kanallarının sac malzemeye işlenebilirliğini incelemek için ETA-Dynaform sonlu elemanlar programını kullanmıştır. Yapılan şekillendirilebilirlik analizlerinde sonuç olarak kanal genişliğinin 0,5 mm, kanal derinliğinin 0,5 mm olduğu ve rib açısının 120° olduğu tasarımın en uygun şekillendirilebilirliğe sahip olduğu bulunmuştur ve bu özelliklere sahip interkonnektörler üretilmiştir. Fakat bizim çalışmamızda performans açısından optimum sonuç kanal genişliğinin 0,5 mm, kanal derinliğinin 0,5 mm ve rib açısının 90° olduğu belirlenmiştir. Önbilgin (2019) tezinde kullanılan metotta bu değerlerdeki üretim sırasında interkonnektörün üzerinde akışın gerçekleştiği kanallarda ciddi yırtıklar oluştuğunu bildirmiş ve şekillendirilebilirliğinin mümkün olmadığını belirtmiştir. Bu yüzden bizim performans açısından bulmuş olduğumuz optimum değerlerde saca pres yöntemiyle form vermenin mümkün olmadığı görülmüştür. Fakat sac metalin üzerine farklı metotlar ile kanalların işlenmesi mümkündür. Bu metotlardan birisi hidroforming olarak adlandırılmaktadır. Özellikle kanalın kesit alanının çok küçük olduğu durumlarda (yani mikro kanallarda) bu yöntem şekillendirmede oldukça avantajlı olmaktadır. Hidroforming, oda sıcaklığında çalışma malzemesini özel bir kalıba yüksek basınçlı hidrolik bir sıvının bastırması yardımıyla şekillendirmesidir. Hidroforming aynı zamanda zor veya imkansız olan içbükeyleri olan karmaşık şekillerin oluşturulmasına da olanak sağlamaktadır. Aynı şekilde hidroforming ile biçimlendirilmiş parçalar genellikle geleneksel preslenmiş veya preslenmiş ve kaynaklı parçalara göre daha yüksek sertlik/ağırlık oranına ve daha düşük bir maliyetle yapılabilir. Alüminyum, pirinç, karbon ve paslanmaz çelik, bakır ve yüksek mukavemetli alaşımlar da dahil olmak üzere neredeyse soğuk şekillendirme yeteneğine sahip tüm metallere hidroforming uygulanabilmektedir. Ayrıca, yakıt pillerinin interkonnektörlerinin üretiminde de bu yöntem kullanılmaktadır (Mahabunphachai ve Koc, 2008; Peng vd., 2008; Dundar vd., 2010; Mahabunphachai vd., 2010; Hung ve Lin, 2012; Xu vd., 2012; Peng vd., 2014; Song vd., 2019). Kısacası elde etmiş olduğumuz optimum değerlerdeki ($W=0,5$ mm, $H=0,5$ mm, $\theta=90^\circ$) kanal geometrisinin şekillendirilebilmesi hidroforming yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Timurkutluk ve Önbilgin (2020) yaptıkları çalışmada sac Crofer 22 APU malzemesi üzerine kanal genişliğinin 0,5 mm, kanal derinliğinin 0,5 mm ve rib açısının 120° olduğu durumu kauçuk yastıklı şekillendirme yöntemi ile şekillendirmişlerdir. Şekillendirmiş oldukları interkonnektörü deneysel olarak test ettiklerinde 800 °C’de maksimum güç yoğunluğunun 0,2306 W/cm² elde etmişlerdir. Modellememizde de aynı durumda maksimum güç yoğunluğu 0,2338 W/cm² olarak bulunmuştur. Oldukça yakın olan bu sonuçlar modelin doğruluğuna işaret etmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada gerçekleştirilen optimizasyon sayesinde ($W=0,5$ mm, $H=0,5$ mm, $\theta=90^\circ$) maksimum güç yoğunluğunu % 7,6'lık bir artış ile $0,2515 \text{ W/cm}^2$ değerine yükseltmenin mümkün olduğu görülmektedir.



KAYNAKLAR

Bard, A. J. and Faulkner, L. R., "Fundamentals and applications", *Electrochemical Methods*, 2(482), 580-632, 2001.

Bhattacharya, D., Mukhopadhyay, J., Biswas, N., Basu, R. N. and Das, P. K., "Performance evaluation of different bipolar plate designs of 3D planar anode-supported SOFCs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123(382-396), 2018.

Celik, S., "Influential parameters and performance of a glass-ceramic sealant for solid oxide fuel cells", *Ceramics International*, 41(2), 2744-2751, 2015.

Çelik, S., Katı oksit yakıt pillerinde elektrot/elektrolit arayüzey dinamiğinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, s. 9, 2013.

Danilov, V. A. and Tade, M. O., "A CFD-based model of a planar SOFC for anode flow field design", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(21), 8998-9006, 2009.

Dundar, F., Dur, E., Mahabunphachai, S. and Koc, M., "Corrosion resistance characteristics of stamped and hydroformed proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates", *Journal of Power Sources*, 195(11), 3546-3552, 2010.

Dwivedi, S., "Solid oxide fuel cell: Materials for anode, cathode and electrolyte", *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, 2020.

Hsu, C. M., Yeh, A. C., Shong, W. J. and Liu, C. K., "Development of advanced metallic alloys for solid oxide fuel cell interconnector application", *Journal of Alloys and Compounds*, 656(903-911), 2016.

Huang, C. M., Shy, S. S. and Lee, C. H., "On flow uniformity in various interconnects and its influence to cell performance of planar SOFC", *Journal of Power Sources*, 183(1), 205-213, 2008.

Hung, J. C. and Lin, C. C., "Fabrication of micro-flow channels for metallic bipolar plates by a high-pressure hydroforming apparatus", *Journal of Power Sources*, 206(179-184), 2012.

Kaur, P. and Singh, K., "Review of perovskite-structure related cathode materials for solid oxide fuel cells", *Ceramics International*, 46(5521-5535), 2019.

Khazaee, I. and Rava, A., "Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries", *Energy*, 119(235-244), 2017.

Kim, Y. J. and Lee, M. C., "Numerical investigation of flow/heat transfer and structural stress in a planar solid oxide fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18504-18513, 2017.

Kim, Y. J. and Lee, M. C., "The influence of flow direction variation on the performance of a single cell for an anode-substrate flat-panel solid oxide fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, 2019.

Kong, W., Han, Z., Lu, S., Gao, X. and Wang, X., "A novel interconnector design of SOFC", *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, 2019.

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

Li, X., Shi, W. and Han, M., "Optimization of interconnect flow channels width in a planar solid oxide fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), 21524-21534, 2018.

Lin, C.-K., Chen, J.-Y., Tian, J.-W., Chiang, L.-K. and Wu, S.-H., "Joint strength of a solid oxide fuel cell glass–ceramic sealant with metallic interconnect", *Journal of Power Sources*, 205(307-317), 2012.

Liu, H., Li, P. and Van Lew, J., "CFD study on flow distribution uniformity in fuel distributors having multiple structural bifurcations of flow channels", *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17), 9186-9198, 2010.

Mahabunphachai, S., Cora, O. N. and Koc, M., "Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates", *Journal of Power Sources*, 195(16), 5269-5277, 2010.

Mahabunphachai, S. and Koc, M., "Fabrication of micro-channel arrays on thin metallic sheet using internal fluid pressure: Investigations on size effects and development of design guidelines", *Journal of Power Sources*, 175(1), 363-371, 2008.

Manglik, R. M. and Magar, Y. N., "Heat and mass transfer in planar anode-supported solid oxide fuel cells: effects of interconnect fuel/oxidant channel flow cross section", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 7(4), 2015.

Mench, M. M., Fuel cell engines, *John Wiley & Sons*, UK, 2008.

Önbilgin, S., Katı oksit yakıt pilleri için pres yöntemiyle interkonnektör geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2019.

Peng, L. F., Lai, X. M., Liu, D. A., Hu, P. and Ni, J., "Flow channel shape optimum design for hydroformed metal bipolar plate in PEM fuel cell", *Journal of Power Sources*, 178(1), 223-230, 2008.

Peng, L. F., Yi, P. Y. and Lai, X. M., "Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36), 21127-21153, 2014.

Saied, M., Ahmed, K., Nemat-Alla, M., Ahmed, M. and El-Sebaie, M., "Performance study of solid oxide fuel cell with various flow field designs: numerical study", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(45), 20931-20946, 2018.

Schluckner, C., Subotic, V., Preissl, S. and Hochenauer, C., "Numerical analysis of flow configurations and electrical contact positions in SOFC single cells and their impact on local effects", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(3), 1877-1895, 2019.

Sciacovelli, A. and Verda, V., "Entropy generation analysis in a monolithic-type solid oxide fuel cell (SOFC)", *Energy*, 34(7), 850-865, 2009.

Sharaf, O. Z. and Orhan, M. F., "An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 32(810-853), 2014.

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

Singhal, S. C. and Kendall, K., High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications, *Elsevier*, Netherlands, 2003.

Song, Y., Zhang, C., Ling, C.-Y., Han, M., Yong, R.-Y., Sun, D. and Chen, J., "Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, In Press, 2019.

Sreedhar, I., Agarwal, B., Goyal, P. and Singh, S. A., "Recent advances in material and performance aspects of solid oxide fuel cells", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 848(113315), 2019.

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

Stanislawski, M., Froitzheim, J., Niewolak, L., Quadackers, W. J., Hilpert, K., Markus, T. and Singheiser, L., "Reduction of chromium vaporization from SOFC interconnectors by highly effective coatings", *Journal of Power Sources*, 164(2), 578-589, 2007.

Tan, K. H., Rahman, H. A. and Taib, H., "Coating layer and influence of transition metal for ferritic stainless steel interconnector solid oxide fuel cell: A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(58), 30591-30605, 2019.

Tan, W. C., Iwai, H., Kishimoto, M. and Yoshida, H., "Quasi-three-dimensional numerical simulation of a solid oxide fuel cell short stack: Effects of flow configurations including air-flow alternation", *Journal of Power Sources*, 400(135-146), 2018.

Timurkutluk, B., Performance analysis of an intermediate temperature solid oxide fuel cell, Yüksek Lisans Tezi, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2007.

Timurkutluk, B., Altan, T., Celik, S., Timurkutluk, C. and Palaci, Y., "Glass fiber reinforced sealants for solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 18308-18318, 2019a.

Timurkutluk, B., Celik, S. and Ucar, E., "Effects of solid loading on joining and thermal cycling performance of glass-ceramic sealing pastes for solid oxide fuel cells", *Ceramics International*, 45(10), 12845-12850, 2019b.

Timurkutluk, B. and Onbilgin, S., "Design and fabrication of novel interconnectors for solid oxide fuel cells via rubber pad forming", *International Journal of Energy Research*, In Press, 2020.

Timurkutluk, B., Toros, S., Onbilgin, S. and Korkmaz, H. G., "Determination of formability characteristics of Crofer 22 APU sheets as interconnector for solid oxide fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14638-14647, 2018.

Wang, S. F., Lu, H. C., Liu, Y. X., Hsu, Y. F. and Liu, Z. Y., "Characteristics of glass sealants for intermediate-temperature solid oxide fuel cell applications", *Ceramics International*, 43(S613-S620), 2017.

Wei, J., Pecanac, G. and Malzbender, J., "Mechanical behavior of silver reinforced glass-ceramic sealants for solid oxide fuel cells", *Ceramics International*, 41(10), 15122-15127, 2015.

Xu, Z. T., Peng, L. F., Yi, P. Y. and Lai, X. M., "Modeling of Microchannel Hydroforming Process With Thin Metallic Sheets", *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme*, 134(2), 2012.

Yan, D., Bin, Z., Fang, D., Luo, J., Wang, X., Pu, J., Chi, B., Jian, L. and Zhang, Y., "Feasibility study of an external manifold for planar intermediate-temperature solid oxide fuel cells stack", *International journal of hydrogen energy*, 38(1), 660-666, 2013.

Zeng, S., Zhang, X., Chen, J. S., Li, T. and Andersson, M., "Modeling of solid oxide fuel cells with optimized interconnect designs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125(506-514), 2018.

Zhang, Z. G., Yue, D. T., Yang, G. G., Chen, J. F., Zheng, Y. F., Miao, H., Wang, W. G., Yuan, J. L. and Huang, N. B., "Three-dimensional CFD modeling of transport phenomena

in multi-channel anode-supported planar SOFCs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84(942-954), 2015.

Zhao, C., Yang, J., Zhang, T., Yan, D., Pu, J., Chi, B. and Li, J., "Numerical simulation of flow distribution for external manifold design in solid oxide fuel cell stack", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(10), 7003-7013, 2017.



ÖZ GEÇMİŞ

Emre UÇAR 03.04.1994 tarihinde İskenderun’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun’da tamamladı. 2012 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2017’de mezun oldu. 2019 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak akademik hayatına başladı. 2017 yılından bu yana Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans çalışmalarını sürdürmektedir.



