



T.C.

**BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AKIŞ ALANLARININ POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT
HÜCRELERİ (PEMFC) PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şevval ÖZTÜRK

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2024

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AKIŞ ALANLARININ POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT
HÜCRELERİ (PEMFC) PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şevval ÖZTÜRK
20233483051
ORCID: 0000-0002-7121-3682

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ertuğrul ERKOÇ
ORCID: 0000-0002-7934-1515

ŞUBAT 2024

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20233483051 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Şevval ÖZTÜRK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AKIŞ ALANLARININ POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT HÜCRELERİ (PEMFC) PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertuğrul ERKOÇ
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Ayşenur YEŞİLYURT
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Osman Nuri ATA
Atatürk Üniversitesi

Teslim Tarihi :

Savunma Tarihi : 05.02.2024

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Şevval ÖZTÜRK

İmzası:

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım kapsamında bilgisi ve deneyimiyle yoluma ışık tutan, yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Ertuğrul Erkoç'a, her koşulda yanımda olan, beni cesaretlendirip çalışmalarım süresince desteğini hep hissettiğim sevgili eşim Yunus Emre Öztürk'e, aileme ve arkadaşlarıma en içten sevgilerimi sunarım.

Şubat 2024

Şevval ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Yakıt Hücresi	3
2.2.1.Yakıt pili tarihçesi.....	4
2.1.2.Yakıt pili tipleri.....	6
2.1.2.1.Alkali yakıt pilleri (AYP).....	6
2.1.2.2.Katı oksit yakıt pili (KOYP).....	7
2.1.2.3.Fosforik asit yakıt pili (FAYP).....	8
2.1.2.4.Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)	8
2.1.2.5.Doğrudan metanol yakıt pili (DMYP)	9
2.1.2.6.Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP).....	10
2.1.3.Yakıt pili uygulamaları	11
2.1.3.1.Otomobiller	11
2.1.3.2.Scooter ve bisikletler.....	11
2.1.3.3.Ticari araçlar	11
2.1.3.4.Yedek güç.....	12
2.1.3.5.Taşınamalır güç.....	12
2.1.3.6.Uzay	12
2.2.PEM Yakıt Pili	12
2.2.1.PEM yakıt pili çalışma prensibi.....	12
2.2.2.PEM yakıt pili parçaları.....	14
2.2.2.1.Membran	14
2.2.2.2.Katalizör tabakası.....	15
2.2.2.3.Gaz difüzyon tabakaları	15
2.2.2.4.Bipolar tabaka	16
2.3.Bipolar Tabakalar	16
2.3.1.Bipolar tabakalarda kullanılan malzemeler.....	17
2.3.1.1.Metalik tabakalar	17
2.3.1.2.Grafit-kompozit.....	18
2.3.1.3.Kompozit grafit/metalik.....	18
2.3.2.Bipolar tabakalarda akış alanları	18
2.4.Literatür Taraması	21

3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1. PEM Yakıt Pili Termodinamiği ve Kimyası.....	24
3.1.1. Teorik yakıt pili potansiyeli	25
3.1.2. Teorik yakıt pili verimi	26
3.1.3. Sıcaklığın etkisi	27
3.1.4. Basıncın etkisi.....	28
3.2. Polarizasyon Eğrisi.....	29
3.3. Korunum Denklemleri ve Sayısal Analiz Kabulleri	29
3.3.1. Kütle korunum denklemi.....	29
3.3.2. Momentum korunum denklemi	30
3.3.3. Enerji korunum denklemi.....	30
3.3.4. Modelde yapılan kabuller.....	31
3.4. PEM Yakıt Pili Sayısal Analizi	31
3.4.1. Geometrinin tasarımı.....	31
3.4.2. Ağ yapısı oluşturma	32
3.4.4. Çözüm parametreleri ve analiz	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
4.1. Yakınsama Kriterleri.....	38
4.2. Polarizasyon Eğrisi	38
4.3. Akım Yoğunluğu Dağılımı.....	39
4.4. Sıcaklık Dağılımları	41
4.5. Hız Dağılımları	42
4.6. Basınç Dağılımları.....	43
4.7. Reaktanların Dağılımı	44
4.7.1. Su dağılımı	44
4.7.2. Hidrojen dağılımı.....	46
4.7.3. Oksijen dağılımı.....	48
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ.....	53

KISALTMALAR

AYP	: Alkali Yakıt Pili
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
EKYP	: Erimiş Karbonat Yakıt Pili
FAYP	: Fosforik Asit Yakıt Pili
H ₂ O	: Su
KOYP	: Katı Oksit Yakıt Pili
N ₂	: Diazot
PEMYP	: Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili

SEMBOLLER

μ	: Dinamik Viskozite
E	: Potansiyel
F	: Faraday Sabiti
N_{avg}	: Avogadro sayısı
P	: Basınç
q	: Yük
q_{el}	: 1 elektron yükü
R	: Evrensel Gaz Sabiti
S_x	: Kaynak terimi
T	: Sıcaklık
V_m	: Molar Hacim
W_{el}	: Elektriksel İş
ΔG	: Gibbs Serbest Enerjisi
ΔH	: Entalpi
η	: Teorik Yakıt Pili Verimi
ρ	: Yoğunluk

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1.	Elektrolit türlerine göre yakıt pilleri ve parametreleri.	6
Çizelge 2.2	Bipolar tabakaların sahip olması gereken özellikler	17
Çizelge 3.1.	Hidrojen oksidasyonunda entalpi, entropi ve gibbs serbest enerjisi değerleri	27
Çizelge 3.2.	Sayısal analizde kullanılan modelin geometrik ölçüleri	32
Çizelge 3.3.	Analizde tanımlanan hacimler ve özellikleri	33
Çizelge 3.4.	Analizde kullanılan gevşeme faktörü değerleri	37
Çizelge 3.5.	Sayısal analizde programa tanımlanan elektrokimyasal değerler.	37
Çizelge 3.6.	Yakıt piline yapılan besleme miktarları ve çalışma parametreleri	37



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Yakıt pili batarya benzetimi (Srinivasan, 2006).....	4
Şekil 2.2. Sir William Grove'un deneysel çalışması (Barbir, 2005).....	5
Şekil 2.3. Alkali yakıt pilinin çalışma mekanizması.....	7
Şekil 2.4. Katı oksit yakıt pilinin çalışma mekanizması.....	8
Şekil 2.5. Fosforik asit yakıt pili çalışma mekanizması	8
Şekil 2.6. Erimiş karbonat yakıt pili çalışma mekanizması	9
Şekil 2.7. Doğrudan metanol yakıt pili çalışma mekanizması.....	10
Şekil 2.8. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi çalışma mekanizması.....	11
Şekil 2.9. Suyun elektrolizi ve güç kaynağının devreden çıkarılması ile oluşan akım	13
Şekil 2.10 Katot-elektrolit-anot yapısı.....	14
Şekil 2.11 Nafion kimyasal yapısı	15
Şekil 2.12 a) Serpantin akış alanı b) Düz paralel ya da Z tipi akış alanı c) Birbiriyle ilintili akış alanı.	20
Şekil 2.13 a) Ağ akış alanı b) Kademeli akış alanı	21
Şekil 3.1. Yakıt pilinde döngüsünde enerji girdi ve çıktıları.....	26
Şekil 3.2. Paralel akış kanallı yakıt hücresi için mesh yapısı ve orthogonal quality değerleri.....	33
Şekil 3.3. Paralel akış kanallarına yakından bakış	34
Şekil 3.4. Serpantin akış kanallı yakıt hücresi için mesh yapısı ve orthogonal quality değerleri.....	34
Şekil 3.5. Serpantin akış kanallarına yakından bakış.....	35
Şekil 3.6. Ağ yapılı akış kanallı yakıt hücresi için mesh yapısı ve orthogonal quality değerleri.....	35
Şekil 3.7. Ağ yapılı akış kanallarına yakından bakış	36
Şekil 4.1. Ağ yapılı akış kanalına sahip yakıt hücresi için 0.7V hücre voltajında kalıntı değerleri.....	38
Şekil 4.2. Polarizasyon eğrisi.....	39
Şekil 4.3. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakası-gaz difüzyon tabakası arayüzündeki akım yoğunluğu dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarım	40
Şekil 4.4. 0.4V hücre voltajında katot katalizör tabakası-gaz difüzyon tabakası arayüzündeki akım yoğunluğu dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı	41
Şekil 4.5. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakası-membran arayüzündeki sıcaklık dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı	42
Şekil 4.6. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakasındaki hız dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı	43
Şekil 4.7. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakasındaki basınç dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı	44
Şekil 4.8. 0.7V hücre voltajında membranda su dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı	45
Şekil 4.9. 0.4V hücre voltajında membranda su dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı	46

Şekil 4.10. 0.7V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı.....	47
Şekil 4.11. 0.4V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı.....	48
Şekil 4.12. 0.7V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı.....	49
Şekil 4.13. 0.4V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı.....	49



AKIŞ ALANLARININ POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT HÜCRELERİ (PEMFC) PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

ÖZET

Günden güne ilerleyen teknolojik gelişmeler, sanayileşme sürecinin getirdiği yenilikler ve nüfus yoğunluğundaki artış ile birlikte enerji kaynakları yetersiz kalmaya başlamıştır. Azalan fosil kaynaklara alternatif enerji çeşitleri arayışı ile birlikte yakıt hücreleri için yapılan çalışmalar yıllar içerisinde artış göstermektedir. Temiz, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan yakıt hücreleri kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik veya ısıya dönüştürebilen sistemlerdir. Çalışma prensibi değerlendirildiğinde bir pil gibi çalışmasının yanında sisteme oksijen beslemesi yapıldığı takdirde geleneksel piller gibi şarj ihtiyacı duymamaktadır. Yakıt pillerinin çalışma performansını etkileyen basınç ve sıcaklık gibi çalışma parametreleri ile birlikte hücre içerisindeki bileşenleri geometrik özellikleri de doğrudan pil performansına etki etmektedir. Bu çalışma ile yakıt hücresinin bileşenlerinden olan bipolar tabaka üzerinde yer alan akış kanallarının pil performansına etkileri incelenmiştir. Çalışmada, Ansys Fluent programı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Paralel akış kanallı, ağ yapılı akış kanalı ve serpantin akış kanallı tasarımlar, 2 atm ve 70°C sıcaklıkta çalışma parametreleri için hücrede basınç dağılımı, sıcaklık dağılımı, akım yoğunluğu, hız dağılımı ve bileşenlerin dağılımı gibi özellikler karşılaştırılmıştır. Bunların yanı sıra farklı hücre voltajları (0,4V, 0,5V, 0,6V, 0,7V, 0,8V ve 0,9V) için analizler gerçekleştirilerek polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler değerlendirildiğinde serpantin kanal tasarımına sahip hücrenin daha yüksek akım yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. İncelenen diğer parametreler için ise her tasarımın birbirlerine göre üstün olduğu özellikler değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Akış kanalları, Proton değişitirmeli membran yakıt pili, Sayısal analiz

EFFECT OF FLOW FIELDS ON THE PERFORMANCE OF POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELLS (PEMFC)

SUMMARY

With the technological developments that progress day by day, the innovations brought by the industrialization process and the increase in population density, energy resources have become insufficient. With the search for alternative energy types to decreasing fossil resources, studies on fuel cells have increased over the years. Fuel cells, a clean, environmentally friendly and sustainable energy source, are systems that can convert chemical energy directly into electricity or heat. Considering its working principle, it works like a battery and does not need charging like traditional batteries if oxygen is supplied to the system. Along with the operating parameters such as pressure and temperature that affect the operating performance of fuel cells, the geometric properties of the components inside the cell also directly affect the battery performance. In this study, the effects of flow channels on the bipolar layer, one of the components of the fuel cell, on battery performance were examined. Numerical analyzes were carried out in the study using the Ansys Fluent program. Features such as pressure distribution in the cell, temperature distribution, current density, velocity distribution and distribution of components for parallel flow channel, mesh flow channel and serpentine flow channel designs were compared for operating parameters at 2 atm and 70°C. In addition, polarization curves were obtained by performing analyzes for different cell voltages (0.4V, 0.5V, 0.6V, 0.7V, 0.8V and 0.9V). When these curves were evaluated, it was seen that the cell with the serpentine channel design had a higher current density. For the other parameters examined, the features that make each design superior to each other were evaluated.

Keywords: Flow fields, Proton exchange membrane fuel cell, Numerical analysis

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji, sanayileşme ve günden güne artan nüfus ile birlikte dünyanın enerji tüketimi de artmaktadır. Bu enerji tüketimine paralel olarak fosil enerji kaynaklarının rezervleri azalmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan karbondioksit, metan, karbonmonoksit gibi zehirli gazlar çevre kirliliğine neden olarak küresel ısınmayı da beraberinde getirmektedir (Meral, 2019).

Azalan fosil yakıt rezervleri karşısında alternatif enerji kaynaklarına yönelim olmuştur. Bu kaynaklara örnek olarak; hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve jeotermal enerji verilebilir (Meral, 2019).

Alternatif enerji kaynaklarına yönelimi sağlayan çevre sorunlarının en önemlisi sera etkisi olarak kabul edilebilir. Bilim insanları ve hükümetler bu etki karşısında araştırma ve çalışmalar yapmaktadır. Bu bağlamda yapılan en önemli adımlar, BM İklim Değişikliği Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü'dür (Işıklı, 2020).

Kyoto Protokolü 2 taahhüt döneminden oluşmaktadır. 2008-2012 yılları arasında kalan I. Dönem için anlaşmaya dahil olan ülkelerin toplam sera gazı salınım seviyelerini 1990 yılındaki seviyeye kıyasla en az yüzde 5 oranında azaltması beklenmekteydi. II. Taahhüt dönemi ise 2013-2020 yılları arasını kapsıyor olup 1990 yılına kıyasla en az yüzde 18 daha az sera gazı salınımı olacağı kabul edilmiştir (T.C. Dış İşleri Bakanlığı, Kyoto Protokolü, 2022). 2020 yılı sonrası ise iklim rejimini düzenleyen Paris Anlaşması yürürlüğe girmiştir. Bu anlaşma ile, insanlar sebebiyle oluşan sera gazı salınımları sonucu oluşan küresel sıcaklık artışını, sanayileşmenin henüz olmadığı döneme kıyasla 2 santigrat derecenin altında tutmak hedeflenmektedir. Emisyon azaltımı konusunda anlaşma, gelişmiş ülkelerde emisyon azaltım hedeflerini sürdürmeye, gelişmekte olan ülkelere ise hedefleri yükselterek yıllar içerisinde ekonominin bütününe kapsayacak yeni hedefler benimsemelerine yöneltmektedir (T.C. Dış İşleri Bakanlığı, Paris Anlaşması, 2022).

Alternatif enerji kaynaklarındaki bu arayış ile birlikte yakıt hücreleri üzerinde yapılan çalışmaları günden güne arttırmaktadır. Yakıt hücreleri, temiz,  evre dostu ve sürdürülebilirliği olması sebebiyle gelecek için umut vaat eden bir g   sistemi olarak görülmektedir. Yakıt hücreleri, kimyasal reaksiyon enerjisini direkt olarak elektrik enerjisi veya ısıya dönüştüren sistemlerdir. Çalışma prensibi olarak bir pil gibi çalışmasını yanı sıra, yakıt ve oksijen sağlandığı takdirde pil gibi şarj edilmesi gerekmemektedir (Küpeli, 2020).

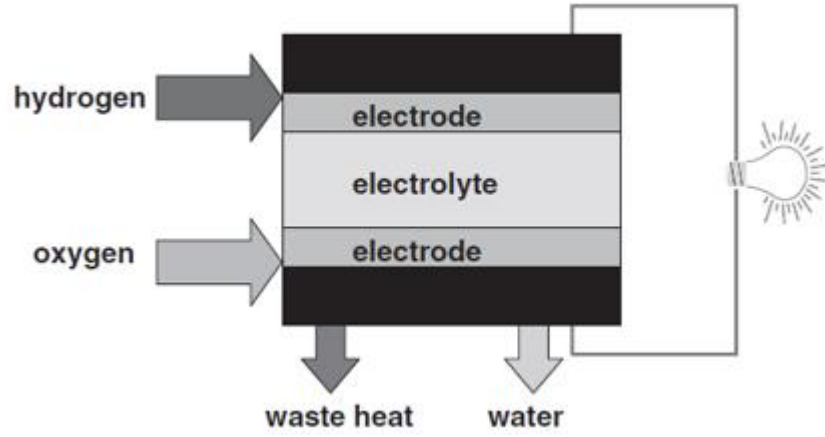


2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yakıt Hücresi

Yakıt hücreleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir konumdadır. Yakıt hücreleri yakıtı alıp doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji dönüşüm cihazı olarak düşünülebilir. Çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak sınıflandırılan yakıt hücrelerinin pek çok çeşidi bulunmaktadır. Oluşan reaksiyonlar da özel olarak yakıt hücresinin tipine bağlıdır. Genel olarak, yakıtlardan enerji elde etme aşamaları bu sırayla gerçekleşmektedir; yakıtın yanması ile kimyasal enerji ısıya dönüşür, bu ısı suyu kaynatıp buhar üretmek için kullanılır, elde edilen buhar ile türbin çalıştırılarak termal enerji mekanik enerjiye dönüştürülür ve son olarak mekanik enerji, elektrik üreten jeneratörü çalıştırmak amacıyla kullanılır (Küpel,2020).

Yakıt hücreleri; elektrolite, pozitif ve negatif elektrotlara sahip olması açısından bataryaya benzetilebilir. Bu benzetim Şekil 2.1.'de gösterilmektedir. Ek olarak, bataryalarda içeriğinde bulunan elektrokimyasal malzemeler sayesinde elektrik üretmektedir. Malzemeler tükendiğinde batarya boşalmaktadır. Şarj etme işlemi uygulandığında ise ters yönde ilerleyen elektrokimyasal reaksiyonlar devam edebilmektedir. Yakıt hücreleri ise pilden farklı olarak yakıt ve oksitleyici kaynak gerektirmektedir. Bu kaynaklar sağlandığı sürece yakıt hücresi çalışmaya devam eder. Sağlanan reaktanların saf haliyle bulunma zorunluluğu yoktur. Hidrojen; CO₂, N₂ ve CO gibi bir karışım halinde ortamda bulunduğu takdirde ortam havası yakıt hücrelerinde kullanılacak kadar oksijen içermektedir (Barbir, 2013).



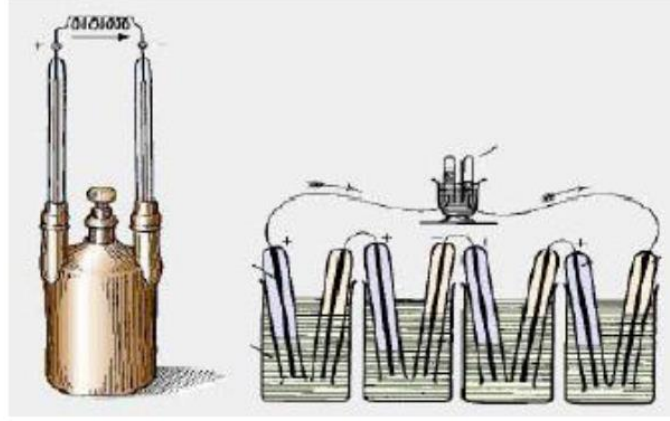
Şekil 2.1. Yakıt pili batarya benzetimi

2.2.1. Yakıt pili tarihçesi

Yakıt pilleri 19. yüzyılda icat edilmiş olup 20. yüzyıl için yüksek teknoloji kabul edilebilecek düzeyde gelişmeler sergilemiştir. Bu gelişim tarihsel olarak incelendiğinde dikkat çeken noktalar aşağıda sırasıyla belirtilmektedir (Srinivasan, 2006).

İsviçreli Bilim İnsanı Christian Frederic Schönbein, tersine su elektrolizi ile ısı elde ederek 1838 yılında yakıt hücresini keşfettiğini öne sürmüştür.

Takip eden süreç içerisinde, Sir William Grove 1839'da gerçekleştirdiği deney ile yakıt hücrelerinin çalışma mantığını keşfetmiştir. Şekil 2.2.'de gösterildiği üzere sülfirik aside daldırılmış bir platin elektrot ile oksijen ve hidrojen ile dolu bir kaba daldırılmış platin elektrot arasında elektriksel akım olduğunu bildirmiştir. Bu olay suyun elektrolizinin tersidir. 1842 yılında yakıt hücresi tipini açıklayan ilk bilimsel makale olma özelliğini taşıyan çalışması yayınlanmıştır (Barbir,2013).



Şekil 2.2. Sir William Grove'un deneysel çalışması

Friedrich Wilhelm Oswald, yakıt pilinin barındırdığı her ekipmanın hücreye etkilerini ve hücredeki amaçlarını 1893 yılında araştırmıştır.

Walter Nernst, çok yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerini kararlı duruma getirmek amacıyla katı oksit kullanarak, zirkonyumun iyon ilettiğini bildirmiştir (Meral, 2019).

Francis T. Bacon, Langer ve Mond, 1932 yılında Cambridge Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri çalışma ile yakıt pili tasarımında yapılan değişiklikler sonucunda, Bacon Cell adı ile bilinen ilk alkali yakıt pili olarak tarihe geçmiştir (Meral, 2019).

Williard T. Grubb 1955 senesinde proton değişim membranı üzerinde çalışmıştır. Leonard Niedrach adıyla bilinen kimyager ise, 1958'de membranın üzerine uyguladığı platin ile Grubb-Niedrach isimli yakıt pilini geliştirmiştir (Kırlı, 2008).

Endüstriyel alanda ilk uygulama niteliği taşıyan çalışma Francis Bacon tarafından 1959 yılında hidrojen-hava yakıtı kullanarak 5kW'lık bir kaynak makinesi yapılmıştır. Pratt & Whitney isimli uçak üreticisi firma, Bacon'un patentlerinin lisansını alarak orijinal tasarım üzerinde değişiklikler yapmışlardır. Bu değişiklikler ile daha uzun ömürlü olan hücre tasarımı, NASA Apollo projelerinde başarı göstermiştir (Kırlı, 2008).

Günümüze yaklaştıkça yakıt hücreleri üzerinde çalışmalar; üniversiteler, devlet kuruluşlar ve sektörden firmalar özelinde artış göstermektedir. Özellikle otomotiv üreticileri yakıt pilleriyle çalışan araçlar üzerinde çalışmalar yaparak pek çok gelişime olanak sağlamıştır. 1993 yılında Ballard isimli şirket, yakıt pili ile çalışan ilk aracı tanıtmıştır. Ballard Power Systems, proton değişim membranlı yakıt pillerinde seri üretimin başlangıcını 2001 yılında yapmıştır (Kırlı, 2008).

2.1.2. Yakıt pili tipleri

Günümüzde yakıt pilleri pek çok özelliğine göre farklı sınıflandırmalara tabii tutulabilmektedir. Bu özellikler; aktarılan iyon çeşidi, çalışma sıcaklığı ve pil içerisinde kullanılan yakıt türüdür. En sık karşılaşılan sınıflandırma çeşidi ise, kullanılan elektrolitin cinsine göre sınıflandırmadır. Elektrolitin cinsine göre ayrıldığında 6 tip yakıt hücresi ile karşılaşmaktayız Çizelge 2.1’de bu yakıt pili tipleri özellikleri verilmiştir.

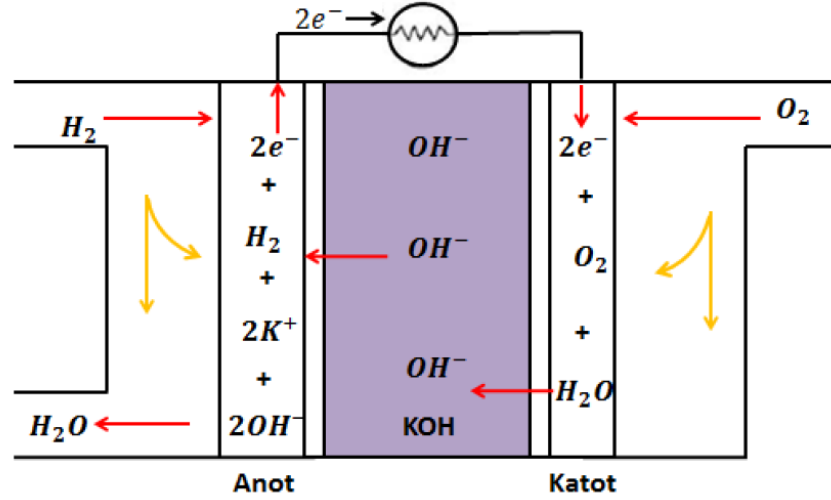
Çizelge 2.1. Elektrolit türlerine göre yakıt pilleri ve parametreleri.

Yakıt Pili	Kullanılan elektrolit	Çalışma sıcaklık aralığı	Elde edilen elektriksel verim	Kullanılan yakıt/oksitleyici
Alkali Yakıt Pili (AYP)	Potasyum hidroksit	90-100 °C	%60-70	H ₂ /O ₂
Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)	Erimiş alkali metal karışımı	600-1000 °C	%60-65	H ₂ , doğalgaz kömür, biyogaz/ O ₂ , hava
Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)	Fosforik asit çözeltisi	150-200 °C	%55	H ₂ , doğalgaz, biyogaz/O ₂ , doğalgaz, hava
Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)	Lityum veya potasyum karbonat	600-700 °C	%65	H ₂ , doğalgaz, biyogaz, kömür gazı/ O ₂ , hava
Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP)	Katı polimer	60-90 °C	%20-30	CH ₃ OH/O ₂ , hava
Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)	Katı polimer (Nafion)	20-100 °C	%40	%60 H ₂ /O ₂ , hava

2.1.2.1. Alkali yakıt pilleri (AYP)

1960’lı yıllarda kullanılan ilk modern yakıt pillerinden biri olan AYP’nin elektrolitinin alkali bir çözelti olması gerekmektedir. Bu nedenle düşük maliyetli ve çözünürlüğü yüksek olan potasyum hidroksit ve sodyum hidroksit yaygın olarak kullanılmaktadır (Küpeli, 2020). İlk modern yakıt pili olması dolayısıyla NASA uzay çalışmalarında Apollo aracında kullanılmıştır. Bu yakıt pilinin dezavantajı, yüksek maliyetli olması

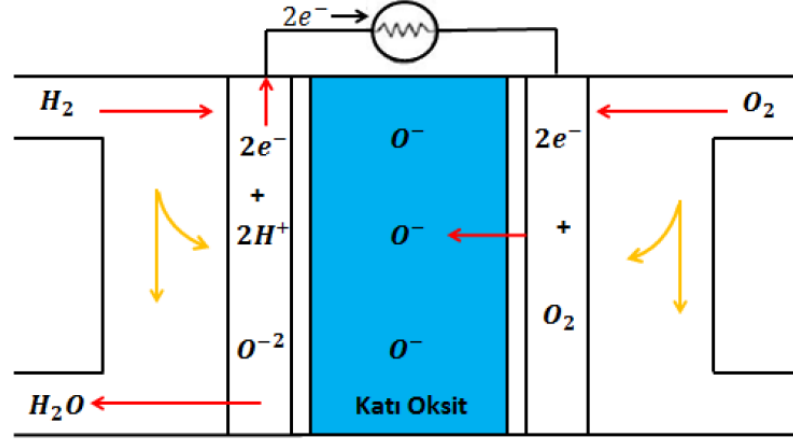
ve karbondioksit'e karşı duyarlı olmasıdır. Bu sebeple mobil çalışmalar için tercih edilmez. Şekil 2.3.'de gösterildiği üzere anotta yer alan hidrojen, katalizör sayesinde elektron ve protonlarına ayrılır. Katoda taşınan elektronlar, hidroksil iyonlarını oluşturur. Hidroksil iyonları elektrolit ile birlikte anoda taşınıp reaksiyona girer. Bu reaksiyon sonucunda su ve enerji açığa çıkar (Meral, 2019).



Şekil 2.3. Alkali yakıt pilinin çalışma mekanizması.

2.1.2.2. Katı oksit yakıt pili (KOYP)

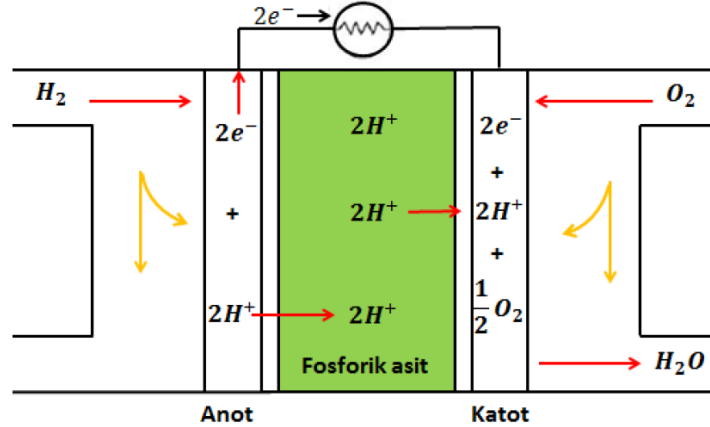
Katı haldeki yakıt pilleridir ve pil malzemelerinin büyük çoğunluğunu nikel de özel seramikler oluşturmaktadır. Elektrolit olarak katı madde kullanılması sebebiyle, reaksiyon sırasında elektrolitte azalma olmaz veya besleme gerektirmez. Çalışma meknizması Şekil 2.4.'te gösterilmektedir (Meral, 2019). Karbonmonoksit ile birleşmiş hidrojeni yakıt olarak kullanıp tepkime sonucunda da su buharı ve CO_2 meydana gelmektedir. KOYP'ler yüksek sıcaklıkta çalışmalarından dolayı yüksek kalitede ısı üretebilirler. Bu özellikleri sayesinde kojenerasyon çalışmaları için uygundur. 1000 °C sıcaklıkta dahi, oluşan buharla bir buhar türbini çevrimini birleştirebilir. Bu sayede, sistemin verimi %55 seviyelerine ulaşabilir (Küpel, 2020).



Şekil 2.4. Katı oksit yakıt pilinin çalışma mekanizması

2.1.2.3. Fosforik asit yakıt pili (FAYP)

Fosforik asit yakıt pilleri, sıvı fosforik asidi (H_3PO_4) çözeltisini elektrolit olarak kullanır. Fosforik asit pile, ısı ve kimyasal kararlılık sağlamaktadır. Yakıt olarak ise doğalgaz ve kömür gazı kullanılmaktadır. Ticarileşmenin ilk görüldüğü yakıt pili tipi olan FAYP, bazı taşıt uygulamalarında ve alışveriş merkezi gibi yerlerde elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 2.5.'te gösterildiği üzere hidrojen elektron ve protonlarına ayrılarak anotta iyonlaşmaktadır. Elektrolit sayesinde fosforik asit katoda ulaşır. Burada bulunan oksijen, elektron ve protonlarla tepkimeye girerek suyu meydana getirir (Küpeli, 2020).

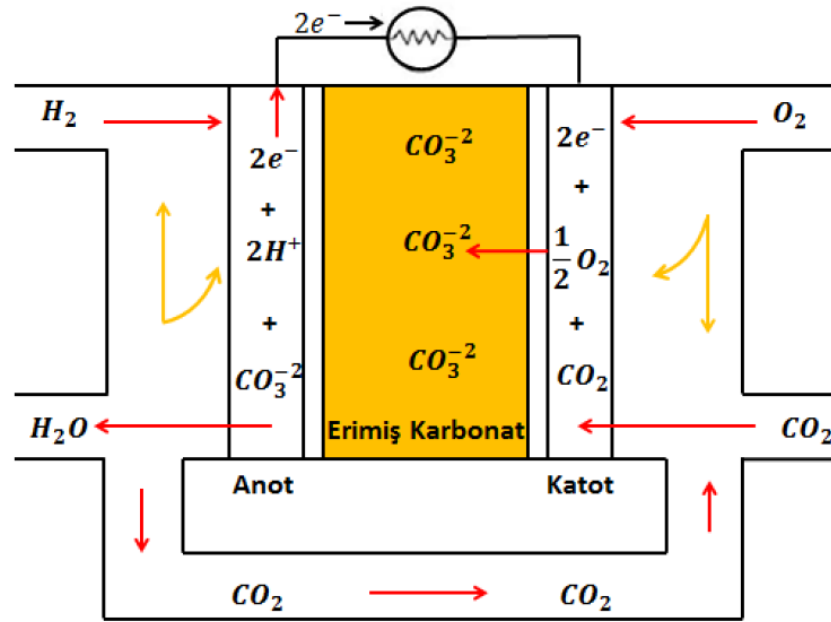


Şekil 2.5. Fosforik asit yakıt pili çalışma mekanizması

2.1.2.4. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)

Erimiş karbonat yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışmaktadır. Elektrolit olarak kimyasal olarak inert bir seramik matrisli beta-alümina içinde asılı erimiş karbonat

tuzu karışımı kullanırlar. Çalışma sıcaklığının yüksek olması avantaj ve dezavantajları beraberinde getirmektedir. Kurulum için herhangi bir altyapı gerektirmemelerine karşın, 600°C gibi bir çalışma sıcaklığına ulaşmak ve güç elde etmek için uzun bir zaman gerektirmektedir. Günümüzde elektrik şebekeleri, endüstriyel ve askeri çalışmalarda ve doğalgaz santralleri için kullanılmaktadır. Erimiş karbonat yakıt pilinin hidrojen elektrodunda; karbondioksit, su ve hidrojen yakıtı arasında tepkime gerçekleşir. Anotta besleme gazı ve su ise hidrojen, karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂) dönüştürülür. Aynı anda iki reaksiyon hidrojen ve CO tüketir, elektron üretir. İndirgeme ise katotta gerçekleşir. Oksijen ve karbondioksitten yeni karbonat iyonları oluşur. Üretilen bu karbonat iyonları elektrolit sayesinde anoda aktarılır (Mekhilef ve diğ., 2012). Çalışma mekanizması. Şekil 2.6.'da gösterilmektedir.

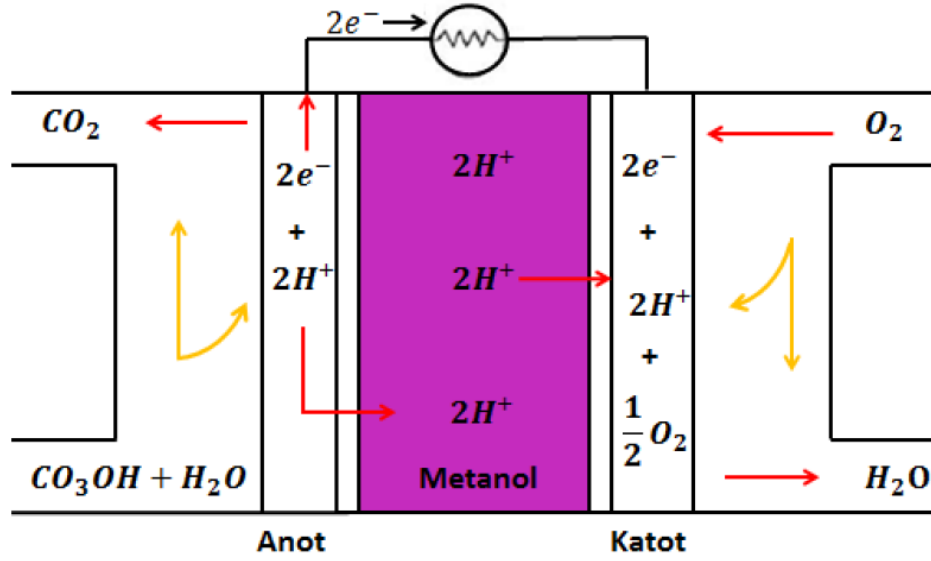


Şekil 2.6. Erimiş karbonat yakıt pili çalışma mekanizması

2.1.2.5. Doğrudan metanol yakıt pili (DMYP)

Doğrudan metanol yakıt pilleri, proton değişitirmeli membran yakıt pilinin geliştirilmiş bir türüdür. Çalışma sıcaklığının düşük olması, uzun kullanım ömrü ve hızlı yakıt doldurma gibi özellikleri sayesinde taşınabilir enerji araçları için kullanımı uygundur. Proton değişitirmeli membran yakıt pillerinde olduğu gibi herhangi bir dönüştürücüye gerek duymadan metanol su ile birleşerek sıvı fazda kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Enerji kapasitesi düşüktür. Şekil 2.7.'de gösterildiği üzere anotta

metanol karbondioksit'e dönüştürülür. Katotta ise havadaki oksijen kullanılarak buhar ve su oluşturulmaktadır (Mekhilef ve diğ, 2012).

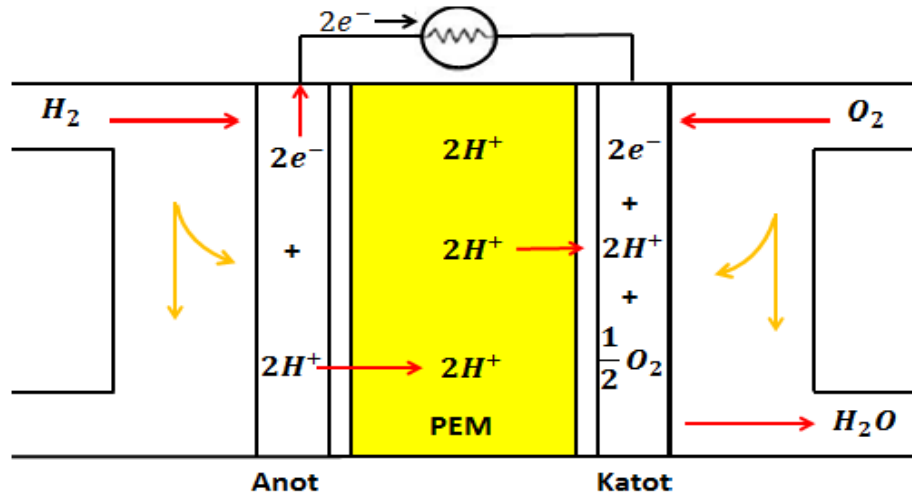


Şekil 2.7. Doğrudan metanol yakıt pili çalışma mekanizması

2.1.2.6. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)

Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri elektrolit olarak katı polimer membranları kullanmaktadır. Bu membran, Nafion olarak da adlandırılan perflorosülfonik asittir. Membranın asidik olmasına bağlı olarak taşınan iyonlar hidrojen iyonları veya protonlardır. Yakıt olarak ise saf hidrojen ve oksitleyici olarak da oksijen veya hava ile beslenmektedir (Ehsani M. ve diğ, 2010).

PEMYH'nin verimleri %50 dolaylarındadır. $100^\circ C$ 'nin altında çalışabilmektedir. Taşıt uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Çalışma mekanizması Şekil 2.8.'de gösterilmektedir (Ehsani M. ve diğ, 2010).



Şekil 2.8. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi çalışma mekanizması

2.1.3. Yakıt pili uygulamaları

Bir yakıt pili taşınabilir cihazlardan büyük araçlara, tekneler, enerji santralleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Kullanılan yakıt hücreleri membran tipine, yakıt tipine ve çalışma sıcaklığına göre farklılık göstermektedir. Çizelge 2.2.'de yakıt pili çeşitlerinin çalışma alanlarına bağlı özelliklerini özetlemektedir (Alaswad A. ve diğ, 2020).

2.1.3.1. Otomobiller

Günümüzde pek çok otomotiv üreticisi bu alanda bir test aracı üretip çalışmalar yürütmektedir. General Motors, Toyota ve Honda kendi pilini geliştirmek üzere çalışmalar yürütürken Ford, Nissan, Fiat gibi firmalar da yakıt pili geliştiren firmalardan tedarik ederek ürettiği araçlar üzerinde çalışmalar gerçekleştirmektedir (Alaswad A. ve diğ, 2020).

2.1.3.2. Scooter ve bisikletler

Bazı firmalar metal hidritler üzerinde depolanmış olarak bulunan hidrojeni ya da doğrudan metanol yakıt pilleri ile çalışan bisikletleri tanıtmıştır (Alaswad A. ve diğ, 2020).

2.1.3.3. Ticari araçlar

Ticari araçların yakıt hücresine dönüştürülmesi ve bunların denenmesi üzerine çalışmalar yaygın olarak devam etmektedir. Yolcu araçlarına ek olarak çim biçme makinesi, forklift gibi araçların da yakıt pilleri ile tasarlanması markette oldukça talep göreceği öngörülmektedir (Alaswad A. ve diğ, 2020).

2.1.3.4. Yedek güç

Ballard, 1kW yedek güç jeneratörlerini yaygınlaştırmaya yönelik ilk çalışmalarını 2000 senesinde Coleman ile birlikte gerçekleştirmiştir. Proton Energy Systems, tasarladığı PEM elektrolizörünü Ballard'ın Nexa adını verdikleri üniteleri ile bir araya getirerek rejeneratif yakıt hücrelerini tanıtmışlardır. Bu hücrelerin özelliği, elektriğin mevcut olduğu durumda kendi hidrojenini üretmesidir (Alaswad A. ve diğ, 2020).

2.1.3.5. Taşınabilir güç

Günümüz koşullarında enerji ihtiyacını karşılayabilmek için taşınabilir olarak kullanılan elektronik cihazlarda kullanılmak üzere pillerine yerini alabilecek minyatür yakıt hücreleri tasarlanmaktadır. Yakıt depolama sorunu sebebiyle, doğrudan metanol yakıt pillerinde veya PEM yakıt pillerinde mikro dönüştürücüler sayesinde metanol kullanılabilir (Alaswad A. ve diğ, 2020).

2.1.3.6. Uzay

Yakıt pilleri ABD uzay programlarında kullanılarak yörünge araçların enerji sağlamaktadır. Günümüzde alkalın tipte yakıt pili kullanılmasına karşın Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) PEM yakıt pillerinin kullanılacağına dair çalışmalar yapıldığını bildirmiştir. (Barbir, 2013).

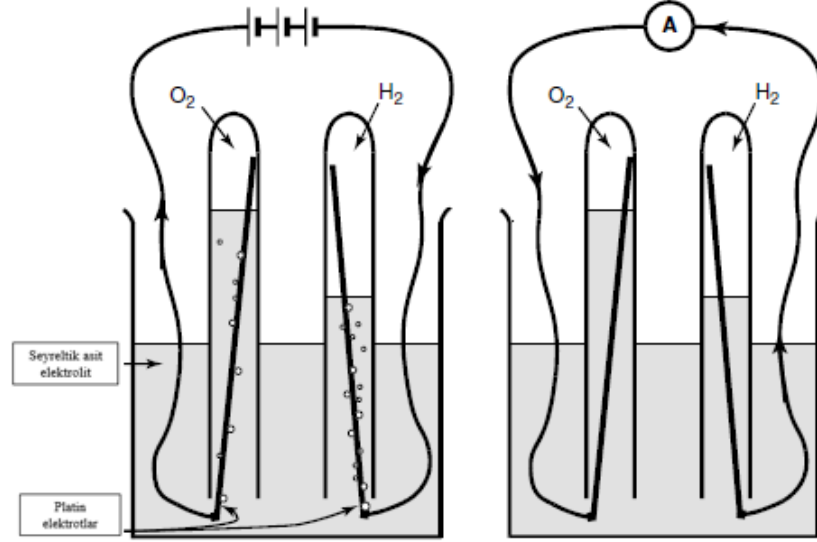
2.2. PEM Yakıt Pili

PEM yakıt pilleri, yüksek verimli güç kaynağı sayesinde çevre dostudur. Sıfır kirlilik, hızlı reaksiyona girme, düşük çalışma sıcaklığı ve yüksek güç yoğunluğu gibi özelliklerinden dolayı pek çok kullanım alanı olan umut vaat eden materyallerden biridir (Wilberforce ve diğ, 2021). PEM yakıt piline ilişkin daha detaylı inceleme ilerleyen bölümlerde yapılacaktır.

2.2.1. PEM yakıt pili çalışma prensibi

Hidrojen yakıt hücresinin temel çalışması son derece basittir. Yakıt hücresinin ilk gösterimi avukat ve bilim adamı William Groove tarafından yapıldığından önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu gösterim temel olarak, su içinden elektrik akımının geçirilmesi ve suyun oksijen ve hidrojene elektroliz edilmesini kapsamaktadır. Sonraki aşamada ise elektriği sağlayan güç kaynağının bir ampermetre ile değiştirilerek küçük

bir akım olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 2.9.'da reaksiyonun akışı gösterilmektedir. Bu akımın kaynağı ise elektrolizin tersine dönmesidir. Hidrojen ve oksijenin yeniden birleşmesi ile elektrik akımı ortaya çıkmaktadır (Barbir, 2013).



Şekil 2.9. Suyun elektrolizi ve güç kaynağının devreden çıkarılması ile oluşan akım

Yakıt pilinin çalışma mantığını başka bir deyişle hidrojenin basit bir kimyasal reaksiyonla yanması olduğunu da söyleyebiliriz. Bu reaksiyon sonucu ısı enerjisi yerine elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır.

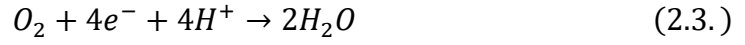


Bu şekilde üretilen akımlar; gaz, elektrot ve elektrolit arasındaki düşük temas alanından ve elektrotlar arasındaki mesafenin büyük olmasından kaynaklı oldukça küçüktür (Larminie ve Dicks, 2003).

Bu problemleri yok etmek için Şekil 2.10'da gösterildiği gibi elektrotlar ince bir elektrolit tabakası ile düz yapılmaktadır. Bu sayede plakanın bir tarafından elektrolit diğer tarafından ise gazın difüzyonu sağlanmaktadır. Burada amaç, elektrolit ve gazın temas yüzeyini mümkün mertebe fazla tutmaktır. Hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyonun nasıl elektrik akımı ürettiğine Grove tarafından kullanılan hücre üzerinden düşünüldüğünde, ilk etapta asit elektrolit yakıt hücresinin anot kutbunda hidrojen gazı iyonlaşarak elektronlarını serbest bırakmakta ve H^+ iyonları oluşturmaktadır.

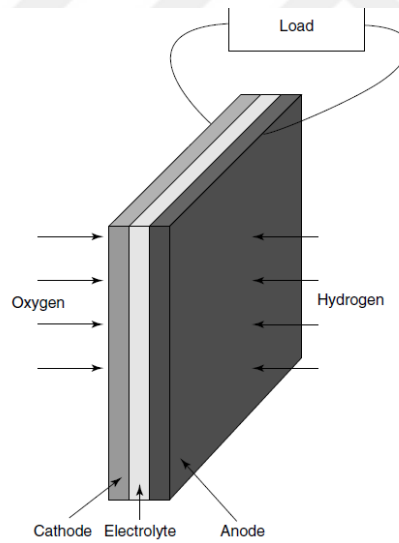


Bu tepkime sonucunda enerji açığa çıkmaktadır. Yakıt pilinin katot tarafında ise oksijen, elektrottan alınan elektronlar ve elektrolitten alınan H^+ iyonları ile girdiği tepkime sonucu su açığa çıkmaktadır (Larminie ve Dicks, 2003).



Her iki tepkimenin de sürekliliğinin sağlanması için anotta üretilen elektronların bir elektrik devresinden katoda geçmesi gerekmektedir. Asit ise serbest H^+ iyonları içeren bir sıvıdır ve yakıt pilinde kullanım amacı da bu iyonları barındırmasıdır.

Denklem 2.2 ve 2.3 karşılaştırıldığında sistemin dengede kalması için her oksijen molekülüne karşılık iki hidrojen molekülüne ihtiyaç olduğu görülmektedir. Şekil 2.9.'da görüldüğü üzere, elektrolitin içerisinden sadece H^+ iyonlarının geçmesine izin vermesi gerekmektedir. Aksi durumda elektronlar elektrolitten geçecek ve kaybolacaktır (Larminie ve Dicks, 2003).



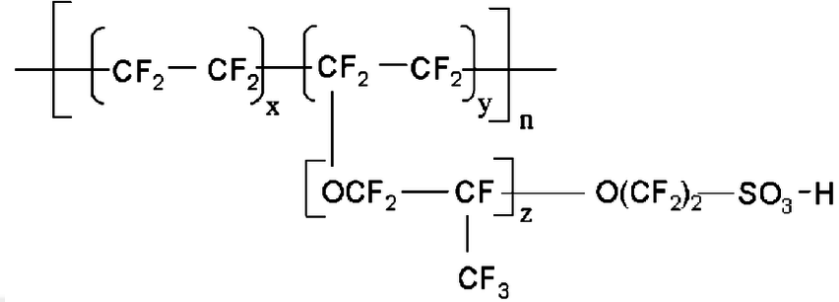
Şekil 2.10. Katot-elektrolit-anot yapısı

2.2.2. PEM yakıt pili parçaları

2.2.2.1. Membran

Polimer elektrolit membran veya proton değişim membranı (PEM), anot ve katot bölmesini ayırmaktadır. Yarı geçirgen ve reaktif gazlarla elektronların anottan katoda ya da tam tersi geçişini kısıtlamaktadır. Sadece protonların geçişine olanak sağlamaktadır. Protonların geçişinin sağlanabilmesi için hidrasyon gerekmektedir. Bu amaçla PEMYP, nemlendirilmiş reaktan gazlar ile aktiflik sağlamaktadır. Giren

gazların bağıl nemi %100'e yakın olmalıdır. Nafion adı verilen çeşidi en yaygın kullanılan membrandır. Kimyasal yapısı Şekil 2.11'de gösterildiği üzere, hidrofobik bir ana zincir üzerinde yer alan hidrofilik yan zincirler sayesinde protonların moleküler olarak taşınmasına olanak sağlar ya da protonların yönlendirilmesi için atlama mekanizması olarak destek sağlamaktadır. (Thosar, 2019).



Şekil 2.11. Nafion kimyasal yapısı

2.2.2.2. Katalizör tabakası

Anot ve katot bölmelerin ikisinde ayrı ayrı yer alan katalizör tabakası, polimer elektrolit membran ile ayrılmaktadır. Diğer yüzeyi ise gaz difüzyon tabakası ile temas halindedir. Yakıt pillerinde gerçekleşen indirgenme yükseltgenme reaksiyonları bu tabakalarda gerçekleşmektedir. Katalizör tabakası reaksiyonların aktivasyon enerjisini azaltarak elektrokimyasal tepkimelerin daha düşük sıcaklıkta veya daha hızlı gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Gözenekli yapıda olması, katmanın reaktif gazlar ve suyun geçişi için aktif alanlar sağlamaktadır. Yaygın olarak, elektrokatalitik aktivitesi yüksek olan ve korozyona, oksidasyona karşı direnci olan platinden yapılmış katalizör tabakaları kullanılmaktadır (Sezgin, 2016).

2.2.2.3. Gaz difüzyon tabakaları

Katalizör tabakası gibi hem anot hem de katot bölmelerinde yer alan gaz difüzyon tabakaları, bipolar tabaka ile katalizör tabakası arasına sıkıştırılmış gözenekli tabakadır. Yakıt pili içerisindeki görevi, reaktantları katalizör tabakaya doğru taşımaktır. Katalizör katmanında üretilen suyu hücrenin gaz çıkış kanallarına aktarılmasında gaz difüzyon tabakası görev almaktadır. Bu özelliği sayesinde yakıt hücresinin su yönetiminde önemli rol oynamaktadır. Isının katalizör tabakadan diğer tabakalara aktarılması için termal iletkenliğe ihtiyaç duyulurken aynı zamanda elektronları aktarmak için de elektriksel iletkenliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Yapısı;

karbon kağıdı, karbon elyafı ya da karbon kumaşı gibi ürünlerdendir. İyi elektronik iletkenlik, asit ortamında stabilite ve reaktantların aktarımına kolaylık sağlaması gibi özelliklerinden dolayı karbon bazlı ürünler, gaz difüzyon tabakasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sezgin, 2016).

2.2.2.4. Bipolar tabaka

Bipolar tabakalar, yakıt pilinde tepkimeye giren reaktanlar ile hidrojenin gaz difüzyon tabakasının da yardımıyla taşınmasında görev almaktadır. Tepkimeye giren reaktantların mümkün olduğunca homojen dağılılabilmek olması ve suyun uzaklaştırılması bipolar tabakadaki gaz akış kanallarını ile sağlanmaktadır. Dolayısı ile tabaka üzerindeki kanalların tasarımı pilin performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir (Günüşen, 2019)

2.3. Bipolar Tabakalar

Bipolar tabakalar, yakıt hücrelerinde akımın ve suyun toplanmasında ve gazların dağılımının sağlanmasında görev almaktadır. Üzerinde bulunan akış kanalları sayesinde gaz difüzyon tabakasına yakıt ve oksidant desteği sağlamaktadır. Bir yakıt hücresinde 2 adet bipolar tabaka bulunmaktadır. Bipolar tabakalar, yakıt hücresi performansını doğrudan etkileyen en önemli katmanlardan birisidir. (Çelik, 2018)

Bipolar tabakaların bir yakıt hücresinde çeşitli işlevleri vardır. Tabakanın sahip olması gereken özellikler ise bu görevlerinden kaynaklanmaktadır. Bu görevler:

- Yakıt hücrelerinin seri bağlanmasında görev alması sebebiyle elektriksel iletken olmalıdır.
- Bitişğinde bulunan hücrelerin gazlarının birbirine karışmaması için gazları geçirmeyen bir yapıya sahip olmalıdır.
- Yakıt piline yapısal destek sağlamak amacıyla dayanıklı ama hafif bir malzemeden imal edilmelidir.
- Isıyı soğutma hücrelerine ve kanallara iletebilmek için termal iletken olması gerekmektedir.
- Korozyona dayanımı yüksek olmalı ancak maliyeti yüksek olmamalı ve seri üretim sürecine elverişli olmalıdır. (Barbir, 2013).

2.3.1. Bipolar tabakalarda kullanılan malzemeler

Yakıt pillerinde bipolar tabakalarda ilk kullanılan materyal, yüksek kimyasal stabiliteye sahip olması sebebiyle grafitir. Fakat grafitin gözenekli yapısı yakıt pillerinde zararlı bir uygulamadır. Grafitin geçirgenliğini ortadan kaldırmak amacıyla emprenye edilmesi gerekmektedir. Ayrıca grafit plakaların üretim süreci kolay bir uygulama olmaması maliyeti de arttırdığı için çok tercih edilmemektedir. Laboratuvar koşullarında çalışılan yakıt hücreleri ve UTC yakıt hücreleri adı verilen bir üretici tarafından tercih edilmektedir. Genele bakıldığında ise bipolar tabakalar için iki grup malzeme tercih edilmektedir. Bunlar, grafit bazlı malzemeler ve metalik malzemelerdir. Çizelge 2.2’de bipolar tabakaların sahip olması gereken özellikler listelenmiştir (Meral, 2019).

Çizelge 2.2 Bipolar tabakaların sahip olması gereken özellikler

Özellik	Koşullar	Yorum
Elektriksel iletkenlik	$>1000 \text{ S cm}^{-1}$	Yığın iletkenlik
Korozyon hızı	$<16 \text{ mA cm}^{-2}$	
Hidrojen geçirgenliği	$<2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	@80°C, 3 atm
Sıkıştırma dayanımı	$>2 \text{ MPa}$	
Termal iletkenlik	$>20 \text{ W/mK}$	Yığın tasarımında önemli bir etkidir, bazı tasarımlar daha yüksek iletkenlik gerektirebilir.
Tolerans	$<0.05 \text{ mm}$	
Maliyet	$<\$10/\text{kW}$	İşleme ve malzeme maliyetini içerir.
Ağırlık	$<1 \text{ kg/kW}$	

2.3.1.1. Metalik tabakalar

Alüminyum, çelik, titanyum, nikel vb. metaller bipolar tabaka malzemesi olarak yakıt hücresi içinde oldukça aşındırıcı bir ortama maruz kalmaktadır. Bu metaller korozyon sonucu çözünmüş metal iyonları, iyonomer zarına difüze olarak iyonik iletkenliğin azalmasına sebebiyet vermektedir. Bipolar tabakanın yüzey kısmında elektrik direnci de artmaktadır. Bu sebeple bu tabakanın yüzeyi grafit, iletken polimer, organik kendiliğinden birleşen polimerler, asıl metaller gibi aşındırıcı olmayan ancak elektriksel olarak iletken bir katman ile kaplanmalıdır. Korozyon kaplama direnci, kaplama katmanındaki gözeneklere ve kaplamanın termal genleşme katsayı arasındaki farka bağlı olarak bipolar tabakanın PEM yakıt hücresi içerisindeki korozyondan

korunmasındaki efektifliği saptanabilir. Metalik tabakaların bipolar tabakalarda kullanımı için kaplama ihtiyacı gibi bir dezavantajının yanı sıra, seri üretime uygun olması, çok ince imal edilebilmeleri sayesinde hafif yığınlar elde edilebilmesi gibi avantajları bulunmaktadır (Küpeli, 2020).

2.3.1.2. Grafit-kompozit

Karbon kompozit plakalar, termoplastikler veya termoset reçineler, dolgu maddeleri kullanılarak elde edilmektedir. Yakıt hücresinin korozyif ortamında stabil kalabilen malzemelerdir. Pek çok koşul için maliyet ve üretilebilirlik açısından da uygundur. Toleranslar, bükülme ve kabuklanma etkisi gibi özellikler bu plakaların tasarımında önemli faktörlerdir. Yapısında floropolimer içerenler, yakıt hücresi ortamında oldukça iyi kimyasal stabiliteye sahiptir. Minimum 2mm civarındaki kalınlığa sahip olması hacimli bir yapıda olmasını sağlamaktadır, diğer materyallere kıyasla kırılabilirliği daha fazladır (Küpeli, 2020).

2.3.1.3. Kompozit grafit/metalik

Ballard tarafından alınan patent olan, plakalar arasında ince bir metal levha bulunan iki kabartmalı grafit folyodan oluşan sandviç konsepti hem grafit hem de metalik plakaların avantajlarını bir araya getirmektedir. Hafif, üretimi kolay ve dayanıklı bipolar tabaka çeşidi ortaya çıkmaktadır. Grafit folyonun uyumluluğu sayesinde temas direnci çok düşüktür (Manso ve diğ, 2012).

2.3.2. Bipolar tabakalarda akış alanları

Bipolar tabakalar, yakıt hücresinin etkin bir şekilde çalışmasına doğrudan etki etmektedir. Bipolar tabakanın akış kanalı geometrisi hücre için gerekli mekanik desteği sağlamaktadır. Farklı reaktantları gaz difüzyon katmanı yardımıyla katalizör yüzeyine dağıtarak birbirinden izole edilmesini sağlar. Böylelikle hücre içerisindeki su ve ısıyı yönetilmesinde rol alır. Bunlara bağlı olarak hücrenin ürettiği güç yoğunluğu, reaktantların akış alan tasarımından direkt olarak etkilenmektedir (Manso ve diğ, 2012).

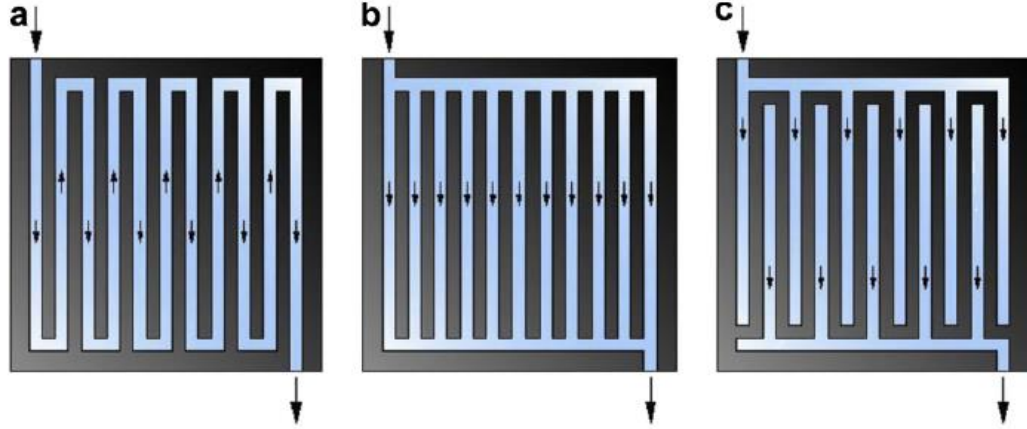
Reaktanların gazların yetersiz taşınması, elektrotların yüzeyinde yetersiz gaz konsantrasyonuna sebebiyet verebilmektedir. Bu durum yüksek akım yoğunluğunda konsantrasyon polarizasyon kaybına neden olabilir. Çünkü yüksek akım yoğunluğu olduğu durumda, elektrotun yüzeyinde üretilen reaktan su buharı yoğunluğu fazlaysa

gaz difüzyon katman deliğinde ve akış kanalların yüksek miktarda su baskınlarına yol açarak akışın engellenmesine neden olur. Ayrıca akış kanalları suyu elektrotların yüzeyinden doğru zamanda yakıt hücresinin çıkış kanalına gönderebilmek için basınç düşüşünü kontrol altında tutabilmelidir. Ancak bu durum, zarın proton iletkenliğini korumak için aşırı kuruduğu anlamına gelmemektedir, suyun dışarı atıldığında membranın proton iletkenliğinin ciddi bir şekilde azalacağını ve akım yoğunluğu yüksek olan uygulamaların zorlaşacağı anlamına gelmektedir. Nafion membran hidratlandığında, yüzeyinde oluşan hidrofilik ve hidrofobik alanlar sebebiyle mikrofaz ayırımına uğrar. Bu sayede protonlar için taşıma kanalları sağlanır. Tüm bunlar değerlendirildiğinde akış kanal tasarımının akış performansı üzerinde oldukça büyük etkileri vardır (Zhang, Z. ve diğ, 2022).

PEMYP'nin çalışma koşullarına bağlı olarak akış alanı tasarımlarının avantaj ve dezavantajları değişiklik gösterebilmektedir. Çalışmalarda yaygın olarak kullanılan akış tipleri aşağıda sıralandığı gibidir. Şekil 2.12. ve Şekil 2.13.'te bu akış tipleri gösterilmektedir.

- Serpantin akış alanı
- Düz paralel akışlı ya da Z tipi paralel
- Birbiriyle ilintili akış alanı
- Ağ akış alanı
- Kademeli akış alanı

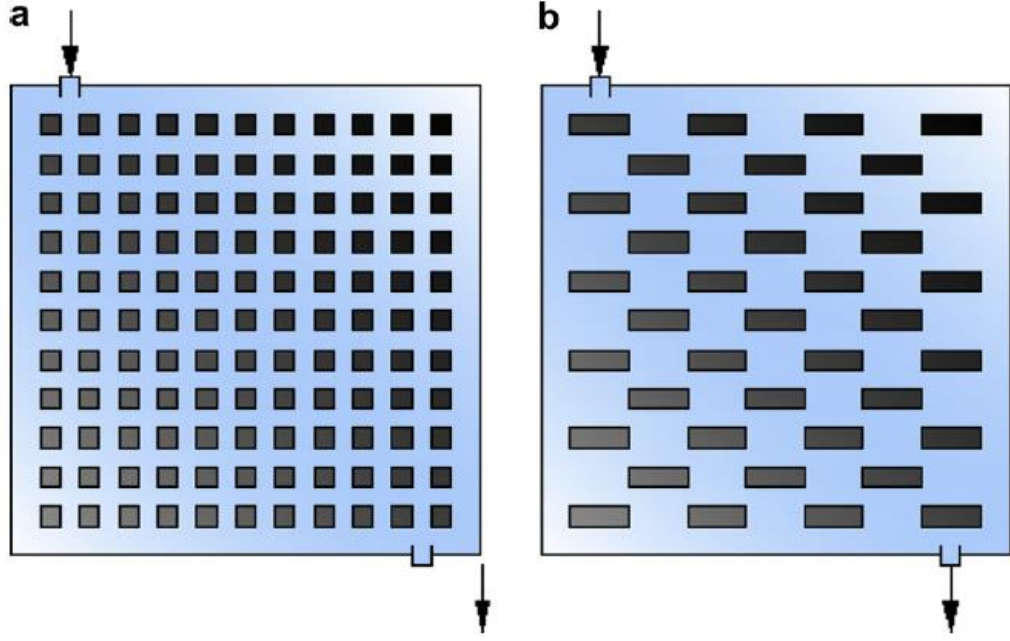
Akış hızını pek çok paralel yol izleyip eşit dağıtan düz paralel akış alanları, basınç düşüşünü minimize eden en basit tip akış alanıdır. Fakat akış direnci kanallarda aynı seviyede olmadığı takdirde reaktantların homojen dağılmamasına sebebiyet verebilmektedir. Reaktanların bu tür hatalı dağılımlarının önüne geçebilmek için serpantin akış alanı önerilmektedir. Şekil 2.12a'de görüldüğü üzere, reaktan gaz aktif yüzey alanının tümünü kaplayan ya da birden fazla akış kanallarından oluşabilen bir tek yoldan akışa zorlanmaktadır. Serpantin akış kanalı ile, çift fazlı su kanallardan taşınarak hem akış hızı hem de basınç düşüşünün arttırılmasını sağlayarak hücre içerisindeki ısı ve su yönetimini yükseltmektedir (Manso ve diğ, 2012).



Şekil 2.12 a) Serpantin akış alanı b) Düz paralel ya da Z tipi akış alanı c) Birbiriyle ilintili akış alanı.

Birbiriyle ilintili olan akış kanalları, alttan geçen kanal yoluyla gazların gaz difüzyon kanalına yönlendirilmesi temeline dayanmaktadır. Bu kanalların altından geçen yollar sayesinde suyun uzaklaştırılması sağlanır ve katalizörlerin etkinliğini arttırmaktadır. Şekil 2.12c’de birbiriyle bağlantılı olan akış kanalları gösterilmektedir (Manso ve diğ, 2012).

Pim tipi akış alanı adı verilen tasarım, dairesel ya da kübik ve belirli bir düzende bulunan kanallardan oluşmaktadır. Bu tasarım ile birlikte reaktanların seri ve paralel akış kanallarından oluşan bir düzenden akarken sadece düşük basınç düşüşleri oluşmaktadır. Fakat aynı zamanda bu tasarım gazların homojen dağılımına engel olmakta ve reaktanların da hatalı dağılmasına sebebiyet vermektedir. Her biri karşılık geçitle gelen bir açık boşlukla biten bir üst yüzeyi olan çok sayıda aşamadan oluşan bu model ile akış gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakasına ulaşır. Şekil 2.13a.’de pim tipi akış gösterilmektedir. Kademeli akış alanında ise tabakanın geometrisi başlangıçtaki akış dağılımı ve her bir kanalın uzunluğunu Şekil 2.13b’de görüldüğü gibi eşit olarak bölmektedir. Bu şekilde basınç düşüşleri ve akış hızları tabaka içerisindeki her yolda eşit olmaktadır. Bu tip akış alanlarındaki dezavantaj, reaktanların nüfuz etme derecelerindeki farklılık ve akışın gelişmesi ile birlikte yüksek basınç düşüşünün meydana gelmesidir (Manso ve diğ, 2012).



Şekil 2.13. a) Ağ akış alanı b) Kademeli akış alanı

2.4. Literatür Taraması

Yakıt pilleri özelinde performansı iyileştirmek ve alınan verimi arttırabilmek için pek çok çalışma yapılmaktadır. Yakıt pillerinin performansını iyileştirebilmek için pilin barındırdığı bileşenlerin özellikleri ve bunları etkileyen sıcaklık, basınç gibi parametrelerin etkisi incelenmelidir. Yapılan çalışmalar deneysel yöntemler ile gerçekleştirildiğinde deneylerin maliyetinin oldukça yüksek meblağlar olması ve uzun zaman gerektirmesi gibi etmenlere bağlı olarak sayısal analiz yöntemi büyük önem arz etmektedir. Bu kısımda literatürde yer alan sayısal analiz çalışmalarının bazıları incelenmiştir.

Eker ve Taymaz (2013) gerçekleştirdikleri çalışmada kanal genişliklerinin PEMYP performansına etkilerini incelemişlerdir. 25 cm²'lik akış alanı olan paralel akışlı plakanın, hücre genişliği ve derinliğini sabit tutarak 0.6, 0.7 ve 0.8mm akış kanal genişliğinde akım yoğunluğunu ölçmüşlerdir. Yapılan bu HAD çalışması ile artan kanal genişliğinde akım yoğunluğunun arttığını gözlemlemişlerdir.

Çelik (2018) farklı akış kanal tasarımlarının PEMYP performansına etkilerini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Karşılaştırmayı yapabilmek için serpantin akış dairesel, modifiye edilmiş dairesel serpantin akış, karesel serpantin akış, modifiye edilmiş serpantin akış ve paralel akış olmak üzere 5

farklı geometri ile çalışmasını gerçekleştirmiştir. Her geometri için aktif alan 50cm^2 olup kanal derinlik ve genişlikleri dairesel serpantin akış hariç 1mm olarak tasarlanmıştır. Dairesel serpantin akış için ise 1.5mm olarak belirlenmiştir. 50°C 'de gerçekleştirdiği deneyde, dairesel ve karesel tasarımlar karşılaştırıldığında dairesel akışta ölü bölgelerin bulunması sebebiyle küçük bir farkla karesel tasarımın daha iyi olduğu bulgusunu elde etmiştir. Akış kanal genişliğini karşılaştırdığında ise geniş kanal tasarımının pil performansında %25'lik bir düşüşe sebebiyet verdiğini belirtmiştir. Karesel tasarımlar arasında ise, paralel akışta hidrojenin yüzey ile teması için yeterli zamanı olmaması ve kanalı hızlı terk etmesi gibi nedenlerden kaynaklı olarak en düşük performansı gösterdiği bulgular arasında yer almaktadır. En yüksek karesel tasarımın ise serpantin akış olduğu bildirilmiştir.

Kloes ve diğ. (2009) yaptıkları çalışma ile PEM yakıt pillerindeki bipolar tabaka için yeni bir akış kanalı geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında serpantin, birbiriyle ilintili, yaprak tasarım ve akciğer modellemesi ile yeni bir tasarımı karşılaştırmışlardır. En iyi hücre performansını aldıklarını belirttikleri yaprak tasarım ile $65\text{-}75^\circ\text{C}$ 'de, 2atm basınç ve %100 bağıl nemde maksimum verime ulaştıklarını raporlamışlardır. Yaprak tasarım ve akciğer modelinin, geleneksel modellere kıyasla elde edilen güç yoğunluğunu %30'a kadar artış gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Maharudrayya ve diğ. (2005) bipolar tabakların çok paralel kanalı bulunan serpantin akış tasarımları için akışın dağılımını ve basınç düşüşünü incelemişlerdir. Analitik çalışmalarını HAD analizi ile de destekleyerek uyumlu olduğunu belgelemişlerdir. İnceledikleri modeller arasında serpantin kanalların önemli oranda basınç düşüşü gösterdiğini, paralel modellerin ise akış düzensizliklerinin yüksek olduğunu görmüşlerdir. Çoklu U tipi ve Z tipi akış modelleri kıyaslandığında ise, Z tipinin daha düşük bir akış düzensizliğine karşılık basınç düşüşünün yüksek olduğu belirtilmektedir. Ayrıca Z tipi modelde, anot ve katot tarafındaki akışların dağılımında düzensizlik görülmesi olası olduğu bildirilmiştir.

Zhang ve diğ. (2022) 3 boyutlu bir HAD modeli akış kanallarındaki konik eğimlerin PEM hücre performansına etkilerini incelemişlerdir. Ek olarak bu konik eğrilerin girişteki derinliklerinin ve kanal genişliklerinin etkisini de tartışmışlardır. Bu amaçla negatif, sıfır ve hibrit konik eğimler için akış kanallarındaki hücre voltajı, reaktan gazı ve su buharı konsantrasyonlarını göstermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre pozitif konik eğrili akış kanal modelinde reaktan gazların hücre yığımında yüksek difüzyonu,

düşük basınç düşüşü ve su giderme kapasitesi sayesinde otomotiv endüstrisinde kullanıma uygun olduğu belirtilmektedir. Kanal genişliği açısından yaptıkları değerlendirmede ise küçük kanal genişliğinin gaz basıncını düşürerek reaktanların difüzyonunu kolaylaştırıp suyun uzaklaştırmasını kolaylaştırdığını bildirip hidrojenin difüzyonunu büyük ölçüde iyileştirdiğini vurgulamaktadırlar.

Hamrang ve diğ. (2023) ise PEM yakıt pili için geleneksel serpantin akış kanallarını saptırmalı serpantin tasarım ile kıyaslamışlardır. Bu çalışmayı üç boyutlu iki fazlı HAD çalışması olarak gerçekleştirmişlerdir. Tasarımdaki saptırmanın yanı sıra kanal yüksekliğinin kanal genişliğine oranı, stokiyometrik oran, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerinde etkisi üzerinde durmaktadırlar. Elde ettikleri sonuçlara göre serpantin ve saptırmalı serpantin akış tasarımlarının her ikisi için de stokiyometrik oran, basınç ve sıcaklığın artması ile birlikte hücre performanslarında artış olduğunu belirtmektedirler. Çalışma parametrelerinde basınç artışı ile birlikte 1 atm'de %16.1'lik bir iyileşme, stokiyometrik oranındaki artış ile %16.1 ve sıcaklığın artışı ile ise 70°C'lik koşulda %19.9 iyileşme olduğunu belgelemektedirler. Kanal tasarımlarının etkisi incelendiğinde ise kanal yüksekliğinin kanal genişliğine oranının artırılması ile geleneksel serpantin akış kanallı hücrenin performansının önemli oranda azaldığını göstermişlerdir. Saptırmalı serpantin akış modelinde ise iyileştirilen özellikler göz önüne alındığında hücre voltajının hemen hemen aynı kaldığını belirtmektedirler.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

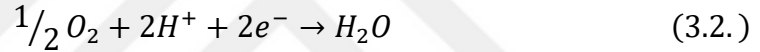
3.1. PEM Yakıt Pili Termodinamiği ve Kimyası

Elektrokimyasal reaksiyonlar yakıt hücrelerinde membranın iki tarafında bulunan anot ve katotta eşzamanlı olarak gerçekleşmektedir. Temel reaksiyonlar aşağıda belirtildiği gibidir:

Anotta:



Katotta:



Toplam:



Bu reaksiyonların gerçekleşmesi esnasında istenmeyen bazı ara reaksiyonlar da olabilmektedir, fakat ana reaksiyonlar bunlardır.

Hücrede gerçekleşen hidrojenin oksijenle tepkimesi yanmadır. Yanma reaksiyonu ekzotermik bir reaksiyon olup bu reaksiyonda da ısı oluşmaktadır.



Bir kimyasal reaksiyonun ısısı yani entalpisi ürün ve reaktanın oluşum ısıları arasındaki fark olduğu bilinmektedir. 25 °C’de sıvı suyun oluşma ısısı -286 kJ mol⁻¹’dir ve elementlerin oluşma ısısı tanım gereği sıfıra eşittir. Sonuç olarak ΔH= -286 kJ mol⁻¹’dür.

Bir yakıt hücresine giren enerjinin ölçüsü hidrojenin ısı değeri ile doğrudan bağlantılıdır. Hidrojenden sağlanabilecek maksimum enerjinin ölçüsüdür. Yakıt hücresinde üretilen bu enerjinin tamamı elektriğe çevrilemez. Kimyasal reaksiyonlarda entropi açığa çıkar ve bu sebeple hidrojenden elde edilen enerjinin bir kısmı faydalı işe dönüştürülemez. Elektriğe dönüştürülen kısım Gibbs serbest enerjisine karşılık gelmektedir, entropinin oluşmasıyla geri dönüşü olmayan kayıplar gerçekleşmektedir. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.5.)$$

Entalpi tanımında olduğu gibi entropi de ürünlerin ve girenlerin entropileri arasındaki fark ΔS 'i vermektedir (Barbir, 2013).

3.1.1. Teorik yakıt pili potansiyeli

Elektrik işi, yük ve potansiyelin bir çıktısıdır.

$$W_{el} = qE \quad (3.6.)$$

Bu denklemde;

$$W_{el} = \text{elektriksel iş} \left(\frac{J}{mol} \right)$$

$$q = \text{yük} \left(\frac{Coulomb}{mol} \right)$$

$$E = \text{potansiyel (Volt)}$$

Yakıt pilinde harcanan H_2 molü başına iletilen yük aşağıdaki denkleme eşittir:

$$q = n N_{Avg} q_{el} \quad (3.7.)$$

Burada ise:

$$n = H_2 \text{ molekülü başına elektron sayısı (1 molekül 2 elektron)}$$

$$N_{Avg} = 1 \text{ moldeki molekül sayısı (Avogadro sayısı)}$$

$$= 6.022 \times 10^{23} \text{ molekül mol}^{-1}$$

$$q_{el} = 1 \text{ elektronun yükü} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ coulomb elektron}^{-1}$$

Avogadro sayısı ile 1 elektron yükünün çarpımı ise Faraday sabitini vermektedir.

$$F = 96,485 \frac{\text{coulomb}}{\text{elektron} \times \text{mol}}$$

Ek olarak yakıt pilinde üretilebilecek maksimum elektrik enerjisi Gibbs serbest enerjisine eşit olduğu yukarıda belirtilmişti.

Bu durumda elektriksel iş aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

$$W_{el} = n F E = -\Delta G \quad (3.8.)$$

$$E = \frac{-\Delta G}{n F} \quad (3.9.)$$

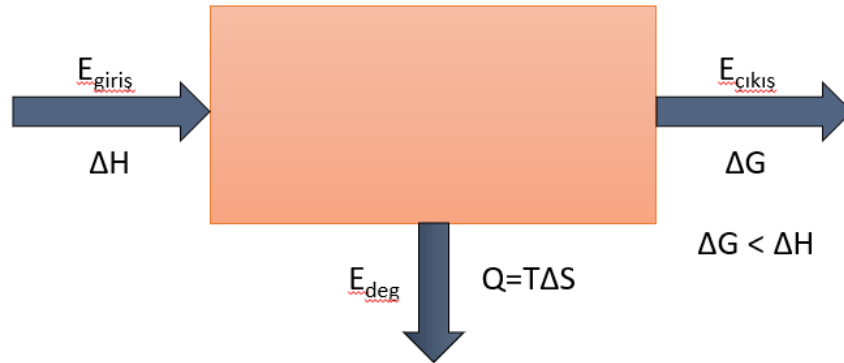
ΔG , n ve F bilindiği için yakıt pilinin teorik potansiyeli aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$E = \frac{-\Delta G}{n F} = \frac{-237.340 \text{ J mol}^{-1}}{2.96,485 \text{ As mol}^{-1}} = 1.23 \text{ Volt (25°C'de)} \quad (3.10.)$$

3.1.2. Teorik yakıt pili verimi

Yakıt pillerinde üretilen enerji, Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi hidrojenin entalpisinden sağlanmaktadır ve bu değer hidrojenin yüksek ısı enerjisidir. Gibbs serbest enerjisinin tamamıyla elektrik enerjisine çevrilebildiği durumda elde edilebilecek maksimum verim literatürdeki verilere dayanarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\eta = \Delta G / \Delta H = 237.34 / 286.02 = \%83 \quad (3.11.)$$



Şekil 3.1. Yakıt pilinde döngüsünde enerji girdi ve çıktıları

Yakıt pillerinin verimliliğini ifade etmek için çoğunlukla hidrojenin düşük ısı değeri kullanılmaktadır. Bu durumda hesaplanan maksimum teorik yakıt pili verimi:

$$\eta = \Delta G / \Delta H_{LHV} = 228.74 / 241.98 = \%94.5 \quad (3.12.)$$

Ancak düşük ısı değeri kullanıldığı takdirde yoğunlaşma ısısı hesaba katılmamaktadır. Termodinamik açıdan değerlendirildiğinde de üst ısı değerin kullanılması, tüm enerjiyi hesaba kattığı için daha doğru bir kabuldür (Barbir, 2013).

3.1.3. Sıcaklığın etkisi

Yakıt pilinin teorik potansiyeli sıcaklıkla değişmektedir.

$$E = - \left(\frac{\Delta H}{n F} - \frac{T \Delta S}{n F} \right) \quad (3.13.)$$

Çizelge 3.1. Hidrojen oksidasyonunda entalpi, entropi ve gibbs serbest enerjisi değerleri (Barbir, 2013)

	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O(l)$	-286.02	-0.1633	-237.34
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O(g)$	-241.98	-0.0444	-228.74

Yakıt pilinde artan sıcaklıkla birlikte teorik pil potansiyeli azalmaktadır. Çizelge 3.1.'de görüldüğü üzere entalpi ve entropi negatif işaretlidir ve bu değerler sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklığa bağlı olarak değişen entalpi ve entropi denklemleri aşağıda gösterildiği gibidir.

$$h_T = h_{298.15} + \int_{298.15}^T C_p dT \quad (3.14.)$$

$$S_T = S_{298.15} + \int_{298.15}^T \frac{1}{T} C_p dT \quad (3.15.)$$

Belirtilen denklemler için sıcaklık 100°C'nin altında olduğu durumda C_p , ΔH ve ΔS değişimleri oldukça azdır, fakat sıcaklık daha yükseklerde çıktığında ihmal edilmemelidir. Denklemlerden, sıcaklık arttıkça teorik hücre potansiyelinin artacağı sonucu çıkarılabilir ancak pratikte yakıt hücreleri çalışırken yüksek sıcaklıklarda daha yüksek potansiyel olduğu görülmektedir. Çünkü, yakıt pillerindeki voltaj kayıpları sıcaklıkla birlikte azalmaktadır ve bu durum teorikte olması gereken hücre potansiyeli kaybını oldukça telafi etmektedir (Barbir, 2013).

3.1.4. Basıncın etkisi

Bir yakıt hücresi atmosferik basınçtan 6-7 bar civarına kadar çalışabilmektedir. İzotermal bir süreç için Gibbs serbest enerjisindeki değişim aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$dG = V_m dP \quad (3.16.)$$

Burada;

$V_m = \text{Molar hacim}$

$P = \text{Basıncı, Pa}$

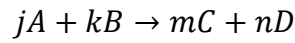
İdeal bir gaz denklemini kullanarak;

$$PV_m = RT \quad (3.17.)$$

$$dG = RT \frac{dP}{P} \quad (3.18.)$$

$$G = G_0 + RT \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.19.)$$

G_0 , standart sıcaklık ve basınçta (25°C, 1 atm) Gibbs serbest enerjisini, P_0 ise standart basıncı (1 atm) temsil etmektedir. Herhangi bir kimyasal reaksiyonda ürünler ve reaktantlar arasındaki Gibbs serbest enerjisi değişimi;



$$\Delta G = mG_C + nG_D - jG_A - kG_B$$

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln \left[\frac{\left(\frac{P_C}{P_0} \right)^m \left(\frac{P_D}{P_0} \right)^n}{\left(\frac{P_A}{P_0} \right)^j \left(\frac{P_B}{P_0} \right)^k} \right] \quad (3.20)$$

Nernst denklemi olarak tanımlanan bu denklemde P , reaktant ve ürünün kısmi basıncını temsil etmektedir. P_0 ise kısmi basınçtır. Hidrojen yakıt pili için Nernst denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (3.21)$$

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.22)$$

Belirtilen denklemler sadece gaz fazındaki ürün ve reaktanlar için geçerlidir. Yakıt hücrelerinde sıvı fazdaki su tüketildiğinde $P_{H_2O} = 1$ olacaktır. Reaktant basıncının yüksek olduğu durumlarda hücre potansiyeli daha yüksek olmaktadır. Eğer reaktanların derişimi seyreltilirse kısmi basınçlar da konsantrasyonlarla orantılı olmaktadır. Buna bağılı olarak hücre potansiyeli düşük olmaktadır. Hava ve oksijenin kıyaslandığı durumda teorik voltaj kaybı aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$\Delta E = E_{O_2} - E_{Air} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{P_{O_2}}{P_{Air}} \right)^{0.5} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{1}{0.21} \right)^{0.5} \quad (3.23)$$

3.2. Polarizasyon Eğrisi

Pil içerisindeki teorik hücre potansiyeli olarak kabul edilen V_{cell} değerinden, konsantrasyon, direnç ve aktivasyon kayıplarının çıkarılmasıyla elde edilen değer gerçek hücre potansiyelidir. Meydana gelen kayıplar hücrenin anot ve katot taraflarının ikisinde de gerçekleşmektedir. Bu kayıpların pile olan etkisini de hesaba katarak gerilim ve akımın ilişkisini gösteren grafikler ise polarizasyon eğrileridir.

3.3. Korunum Denklemleri ve Sayısal Analiz Kabulleri

3.3.1. Kütle korunum denklemi

Yakıt pilinde gerçekleşen kararlı halde difüzyon, faz değişimi gibi olaylar için geçerli olan kütle korunumu denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon \rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\varepsilon \rho w)}{\partial z} = S_m \quad (3.24.)$$

Burada belirtilen ifadelerde S_m kaynak terimini ve ρ ise akışkanın yoğunluğunu simgelemektedir. Kaynak terimi, gaz kanalları, gaz difüzyon tabakası ve membran için sıfırdır. ε ile gösterilen ifade ise gözeneklilik sembolü olup, gözenekli olmayan yakıt hücresi bileşenleri için 1 olarak değerlendirilmektedir.

Hücrede gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar katalizör tabakalarında gerçekleşmektedir. Burada hidrojen ve oksijen tükenirken, su oluşmaktadır. Yakıt hücresinde tüketilen ve üretilen gazlar için kaynak terim ifadeler ise belirtildiği gibidir: (Barbir, 2013)

$$S_m = \begin{cases} S_{H_2} + S_{H_2O} & \text{anot katalizör tabakası} \\ S_{O_2} + S_{H_2O} & \text{katot katalizör tabakası} \end{cases}$$

3.3.2. Momentum korunum denklemi

Newtonian akışlar için momentum korunumu ifadesi Navier Stokes denklemi ile ifade edilmektedir ve üç boyutlu kararlı durum için denklem aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$u \frac{\partial(\varepsilon \rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\varepsilon \rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\varepsilon \rho u)}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_{px} \quad (3.25.)$$

$$u \frac{\partial(\varepsilon \rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\varepsilon \rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\varepsilon \rho v)}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + S_{py} \quad (3.26.)$$

$$u \frac{\partial(\varepsilon \rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\varepsilon \rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\varepsilon \rho w)}{\partial z} = -\varepsilon \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + S_{pz} \quad (3.27.)$$

Eşitlikte yer alan ifadelerle bakacak olursak dinamik viskozite μ ile, hız bileşenleri u , v , w ile, basıncı ise P temsil etmektedir. S_p gözenekli ortamın sağladığı momentum kaynağıdır (Barbir, 2013).

3.3.3. Enerji korunum denklemi

Hücre içerisindeki sıcaklığın dağılımını incelemek amacıyla enerji denklemi çözülmelidir.

Kararlı hal için üç boyutlu enerji denklemi aşağıda belirtildiği şekildedir:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho u h)}{\partial x} + v \frac{\partial(\varepsilon \rho v h)}{\partial y} + w \frac{\partial(\varepsilon \rho w h)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_h \quad (3.28)$$

Denklemden kullanılan ifadelerden h entalpi (J/kg), S_h hacimsel kaynak (W/m³) ve k ise ısı iletkenliği (W/m-K) temsil etmektedir. Bu denklemde eşitliğin solunda yer alan ifadeler konvektif enerji aktarımını, sağında yer alana ifadeler ise yazıldığı sıraya göre iletim yoluyla ısı aktarımı ve hacimsel kaynağı göstermektedir.

Bu reaksiyonlar sırasında yaşanan kayıplar sebebiyle teorikte üretilen enerjinin tümü elektrik enerjisine çevrilememektedir. Bu nedenle enerji denkleminde ek olarak hacimsel kaynak terimi ifadesi yer almaktadır. Akış kanalları ve gaz difüzyon tabakası için ifade sıfır olurken membran ve katalizör tabakaları için aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$S_h = h_{react} + R_{an,cat} \eta_{an,cat} + I^2 R_{ohm} \quad (3.29)$$

Bu denklemde bulunan h_{react} ifadesi reaksiyonlar sebebiyle meydana gelen net entalpi farkını (J/kg-K), $R_{an,cat} \eta_{an,cat}$ ifadesi ise anot ve katot katalizör tabakasının potansiyel

ve akım aktarımının çarpımını temsil etmektedir. I terimi elektrik akımını (A) ve R_{ohm} elektriksel direnci gösteren sembollerdir (Barbir, 2013).

3.3.4. Modelde yapılan kabuller

Yakıt hücresinde gerçekleşen fiziksel ve kimyasal olayları modellemek için bir önceki bölümlerde bahsedilen kütlenin korunumu, enerjinin korunumu ve momentum korunumu gibi denklemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu model geliştirirken yapılan kabuller aşağıdaki gibidir:

- Membranın homojen bir yapıya sahip olduğu ve tamamen su ile doyurulduğu kabul edilmiştir.
- Reaksiyona giren reaktanların ideal gaz özelliğinde olduğu kabul edilmiştir.
- Üç farklı türün bulunduğu ve gaz akışının sürekli olduğu üç boyutlu bir yakıt pili olarak modelleme yapılmıştır.

3.4. PEM Yakıt Pili Sayısal Analizi

Bu kısımda üç boyutlu paralel, serpantin ve ağ akış kanallı ve izotermal olmayan PEM yakıt hücresinin HAD yöntemi kullanılarak kararlı ve tek fazlı hali analiz edilmiştir.

HAD yöntemi ile çözüm adımları; geometri oluşturmak, oluşturulan bu geometrinin ağ yapısını oluşturulması, sınır koşullarının belirlenerek çözücünün istenen parametrelere ayarlanması ve analizlerin gerçekleştirilmesinden oluşmaktadır. Ağ yapısının oluşturulması esnasında ağdan bağımsızlık analizleri ile en uygun ağ (mesh) sayısına karar verilmesi ve bu ağ sayısı ile çözümlemelerin yapılması analiz sonuçlarının doğruluğu üzerinde önem arz etmektedir.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak paralel, serpantin ve ağ yapılı akış kanalı olmak üzere üç adet tasarım bilgisayar destekli tasarım programı olan UG NX programıyla oluşturulmuştur. Elde edilen bu tasarımla Ansys Meshing ile ağ yapısı oluşturulup sınır koşulları tanımlanmıştır. Son aşamada ise Ansys Fluent ile çözüm yöntemleri, çalışma parametreleri ve yakınsama kriterleri programa girilerek analizler çözülmüştür.

3.4.1. Geometrinin tasarımı

PEM yakıt pilinin yapısında anot ve katot taraflarda akım toplayıcı tabakalar, gaz akış kanalları, gaz difüzyon tabakaları, katalizör tabakalar ve membran olarak toplamda 9

adet yapıdan oluşan tek hücreli bir pil modellemesi yapılmıştır. Tez kapsamında analizde kullanılan geometriler Siemens NX programı ile oluşturulmuştur. Çizelge 3.2.'da geometrilerin tasarım ölçüleri görülmektedir. Hücre bütününün eni ve boyu 45mm'dir.

Çizelge 3.2. Sayısal analizde kullanılan modelin geometrik ölçüleri

Parametre	Değer
Kanal kalınlığı	1 mm
Kanal genişliği	1 mm
Akım toplayıcı plaka kalınlığı	2 mm
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0.3 mm
Membran kalınlığı	0.05 mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0.01 mm
Toplam hücre kalınlığı	4.67 mm

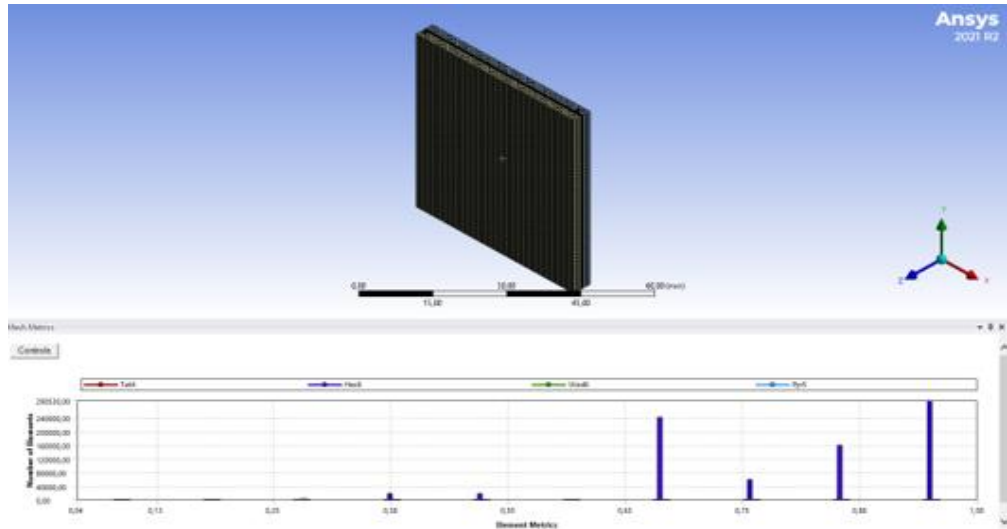
3.4.2. Ağ yapısı oluşturma

Çizim programında alınan dosyada Fluent programının analizi yapabilmesi için tasarım sonlu sayıda hücrelere ayrılarak çözücü için anlaşılır hale getirilir. Analizin doğru sonuçlar verebilmesi için çözücünün yakınsama kriterleri ve ağ yapısı büyük önem arz eder. Yüksek sayıda eleman barındıran bir ağ yapısı hesaplamaların yapılacağı bilgisayarın güçlü olmasını ve zaman gerektirirken, düşük kalitedeki ağ yapısı çözüm zamanını kısaltmasının yanı sıra sonuçların doğru çıkmamasına sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle doğru sonuçlar elde edilebilen minimum eleman sayısının belirlenip analizlerin ağdan bağımsızlığı gösterilmelidir. Ağ yapısı oluşturulup Fluent'te akışkan (solid), katı (solid) özelliklerini tanımlayan analizde kullanılan adları Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

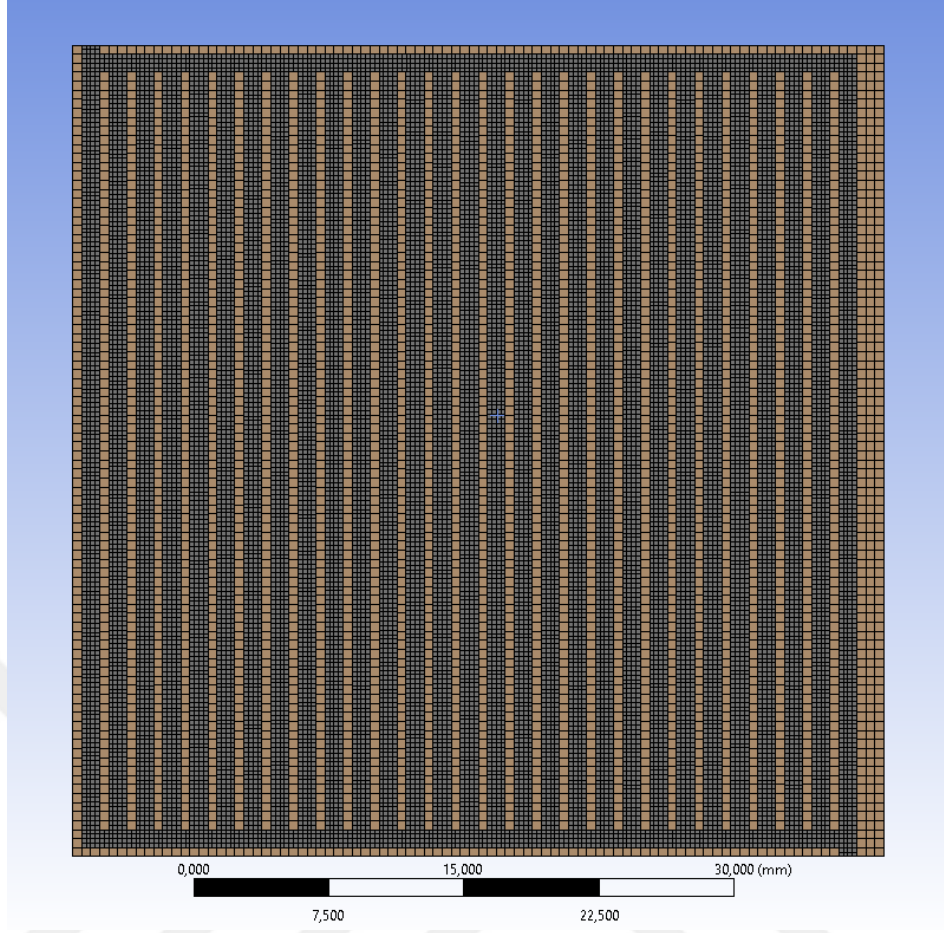
Çizelge 3.3. Analizde tanımlanan hacimler ve özellikleri

Sınır koşulu tanımlanan hacim	Fluent adı	Hacim Tipi
Anot akım toplayıcı plaka	anot_coll	Katı
Anot gaz akış kanalı	anot_channel	Akışkan
Anot gaz difüzyon tabakası	anot_diff	Akışkan
Anot katalizör tabakası	anot_cata	Akışkan
Membran	membran	Akışkan
Katot katalizör tabakası	katot_cata	Akışkan
Katot gaz difüzyon tabakası	katot_diff	Akışkan
Katot gaz akış kanalı	katot_channel	Akışkan
Katot akım toplayıcı plaka	katot_coll	Katı

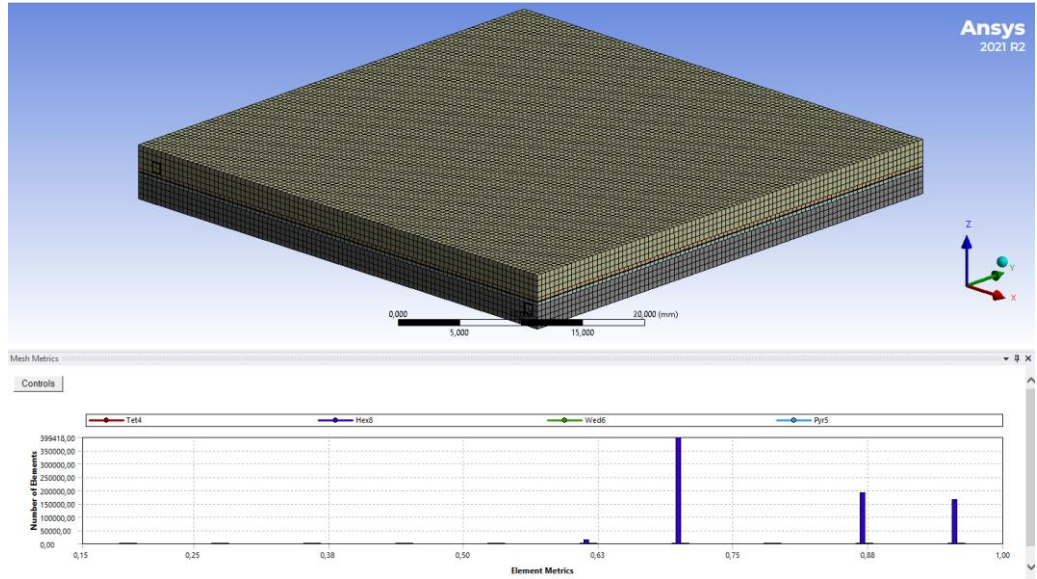
Bu çalışma kapsamında ağdan bağımsızlaştırma işlemi gerçekleştirilmiş olup paralel akış kanallı yakıt hücresi için 783192, serpantin akış kanallı yakıt hücresi için 770128, ağ yapılı akış kanallı yakıt hücresi için ise 754246 eleman olarak ağ değerleri belirlenmiştir. Paralel akış için Şekil 3.2, Şekil 3.3, serpantin akış için Şekil 3.4, Şekil 3.5. ve ağ yapılı akış kanalı için Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de mesh yapıları ve orthogonal quality değerleri görülmektedir.



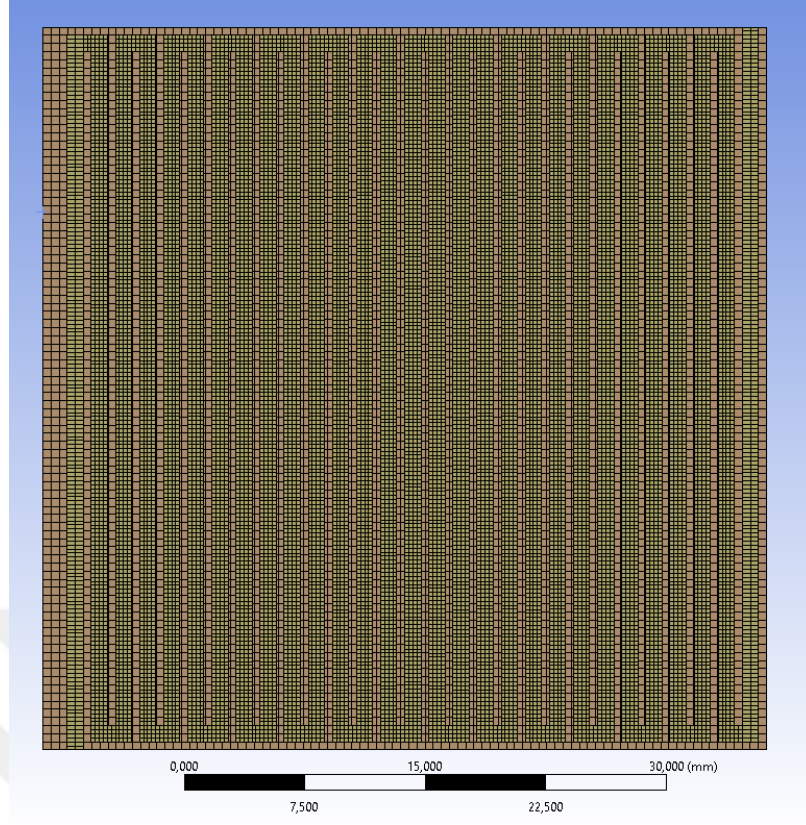
Şekil 3.2. Paralel akış kanallı yakıt hücresi için mesh yapısı ve orthogonal quality değerleri



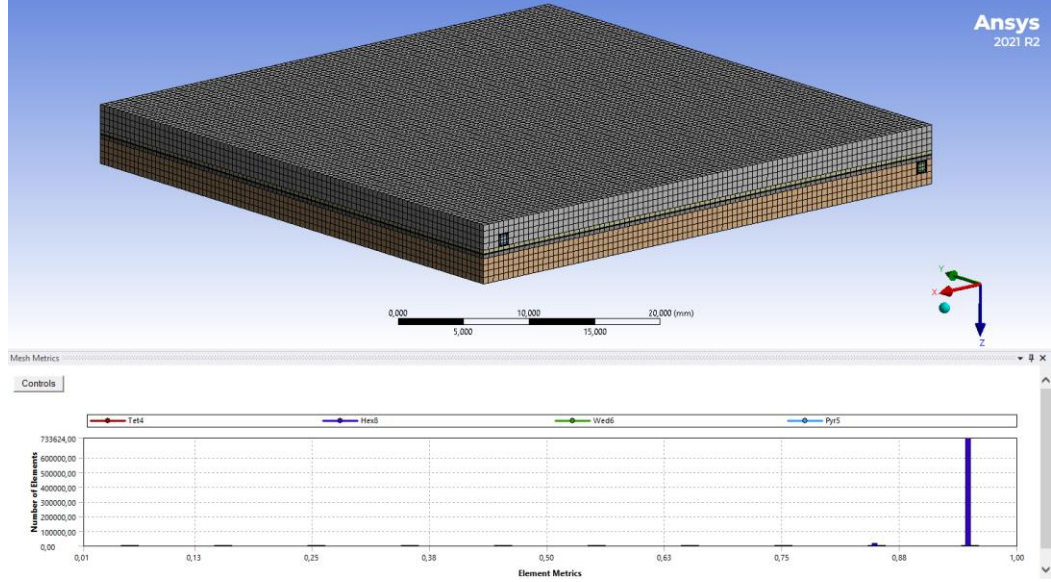
Şekil 3.3. Paralel akış kanallarına yakından bakış



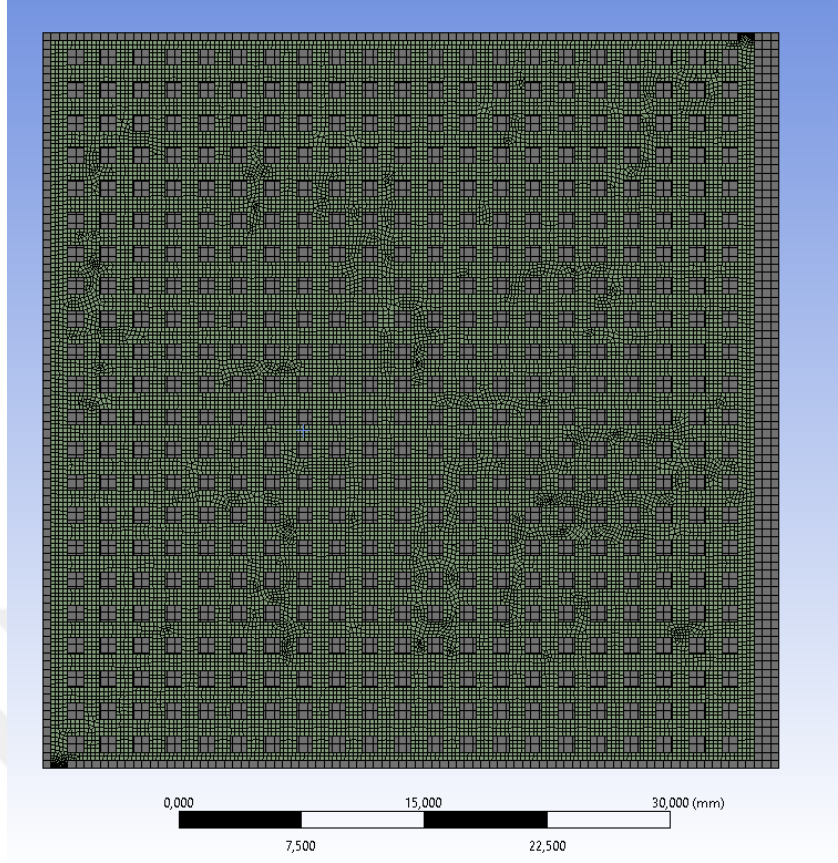
Şekil 3.4. Serpantin akış kanallı yakıt hücresi için mesh yapısı ve orthogonal quality değerleri



Şekil 3.5. Serpantin akış kanallarına yakından bakış



Şekil 3.6. Ağ yapılı akış kanallı yakıt hücresi için mesh yapısı ve orthogonal quality değerleri



Şekil 3.7. Ağ yapılı akış kanallarına yakından bakış

3.4.4. Çözüm parametreleri ve analiz

Geometri ve ağ yapısı oluşturma adımlarından sonra Ansys Fluent içerisinde yer alan modüllerden biri olan PEM Yakıt Hücresi modülü kullanılarak analiz gerçekleştirildi. Bu modül Ansys komut penceresine define/models/addon/9-PEMFC modüle komutları kullanılarak açılmaktadır. PEM yakıt pili modülü ile birlikte ağ yapısı oluşturulmuş hücre içerisinde gerçekleşen reaktan gazların taşınım olaylarını ifade eden matematiksel model ve elektrokimyasal denklemler çözülmektedir.

Çözüm yapılırken değişken parametreler çözücünün sonuç almaya çalıştığı bir denklemi temsil eder ve yapılan her iterasyon sonucunda bu değişkenler için elde edilen sonuçlar birbirine yakın olmalıdır. Bu esnada iterasyonların daha kararlı ilerleyebilmesi amacıyla gevşeme faktörü (under-relaxation factor) değerleri tanımlanır. Bu değerler ile birlikte çözümdeki sayısal kaynaklı hataların sebebiyet verdiği salınımları indirgemektedir. Çalışma kapsamında kullanılan gevşeme faktör değerleri Çizelge 3.4 ve verilmiştir.

Çizelge 3.4. Analizde kullanılan gevşeme faktörü değerleri.

Gevşeme faktörü	Değer
Momentum	0.2
Basınç	0.2
Protonik potansiyel	0.4
Elektrik potansiyel	0.4
H ₂	0.4
O ₂	0.4
H ₂ O	0.4
Su içeriği	0.4

Bu HAD çalışması Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz, 16GB RAM özelliklerindeki bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Çözüm sırasında yakıt hücresi elektrokimyasal parametreleri Çizelge 3.5.ile verilmiştir.

Çizelge 3.5. Sayısal analizde programa tanımlanan elektrokimyasal değerler.

Parametre	Sembol	Birim	Değeri
Anot referans akım yoğunluğu	j_{an}^{ref}	A/m ²	10000
Katot referans akım yoğunluğu	j_{cat}^{ref}	A/m ²	10
Anot referans mol konsantrasyonu	$[H_2]_{ref}$	kmol/m ³	1
Katot referans mol konsantrasyonu	$[O_2]_{ref}$	kmol/m ³	1
Anot konsantrasyon üssü	γ_{an}	-	1
Katot konsantrasyon üssü	γ_{cat}	-	1
Anot ve katot transfer katsayısı	$\alpha_{an}, \alpha_{cat}$	-	1
GDL gözenekliliği	ε_{GDL}	-	0.6
GDL viskoz direnci	-	1/m	3e+12
Katalizör tabakası gözenekliliği	ε_{CL}	-	0.2
Katalizör viskoz direnci	-	1/m ²	2e+13
Membran eşdeğer ağırlığı	M_m	kg/kmol	1100
Membran protonik iletim katsayısı	β	-	1
Membran protonik iletim üssü	ω	-	1

PEM yakıt hücresinde anotta hidrojen-su buharı girişi, katotta hava girişi olmak üzere iki adet besleme mevcuttur. Tez kapsamında analizlerde yapılan besleme miktarları ve çalışma parametreleri Çizelge 3.6.'de paylaşılmıştır.

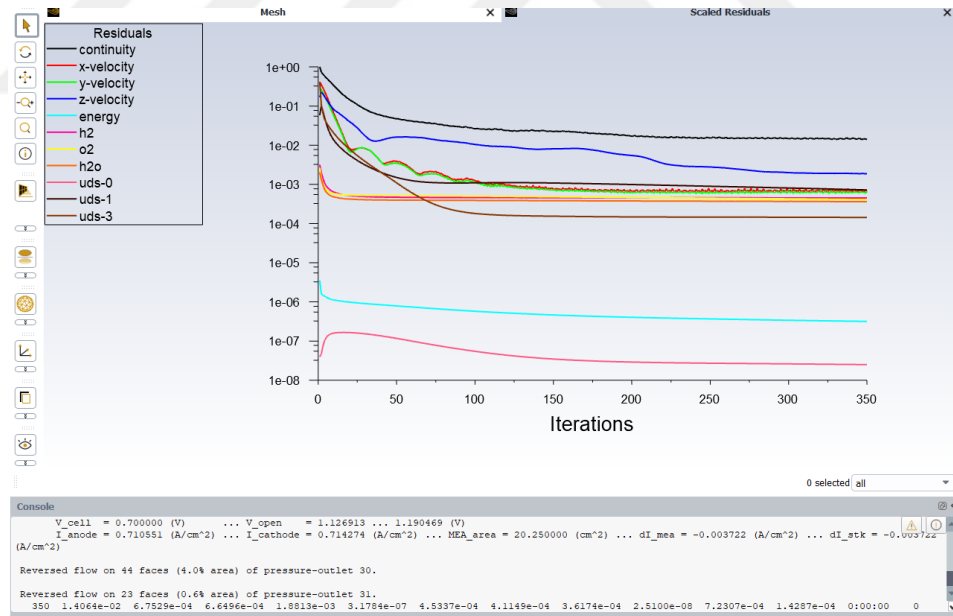
Çizelge 3.6. Yakıt piline yapılan besleme miktarları ve çalışma parametreleri.

Parametre	Birim	Değeri
Anot girişi kütle akış hızı	kg/s	8.25e-5
Katot girişi kütle akış hızı	kg/s	1.65574e-6
Anot girişi H ₂ kütle kesri	-	0.38
Anot girişi H ₂ O kütle kesri	-	0.62
Katot girişi O ₂ kütle	-	0.6
Katot girişi H ₂ O kütle kesri	-	0.101
Basınç	atm	2
Sıcaklık	K	343.15

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Yakınsama Kriterleri

Analizde kullanılan kalıntı (residual) olarak adlandırılan bu terim, gevşeme faktörlerinin (under-relaxation factor) uygunluğu konusunda bir yönlendiricidir. Çözümün yakınsadığını anlayabilmek için kalıntı değerlerinin iterasyon sayısı ile gösterdiği değişim ile bu yorum yapılabilir. Şekil 4.1.'de ağ yapılı akış kanalına sahip yakıt hücresi için 0.7V hücre voltajında 350 iterasyon için kalıntı değerleri görülmektedir. Bütün denklemler için değerlendirildiğinde yaklaşık 300 iterasyondan sonra yakınsamanın gerçekleştiği, buna bağlı olarak da 350 iterasyonun yeterli olacağı yorumu yapılmıştır.

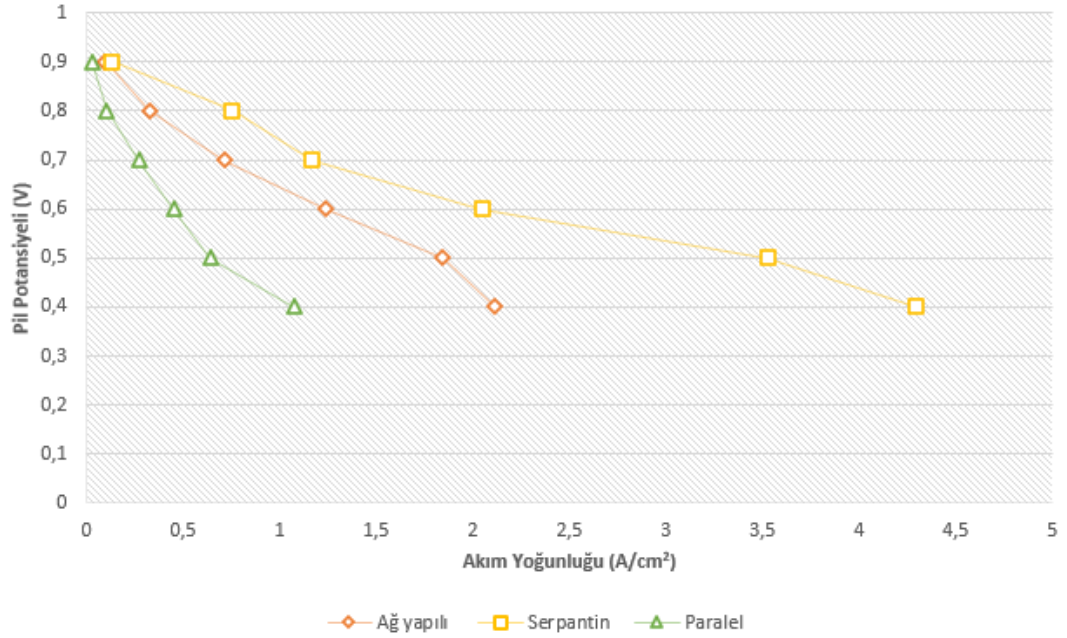


Şekil 4.1. Ağ yapılı akış kanalına sahip yakıt hücresi için 0.7V hücre voltajında kalıntı değerleri

4.2. Polarizasyon Eğrisi

Tez kapsamında incelenen 3 farklı geometri için 350 iterasyon ile 0,4V, 0,5V, 0,6V, 0,7V, 0,8V ve 0,9V hücre voltajları için 2 atm ve 70°C sıcaklıkta analizler yapılmış

olup elde edilen akım değerleri kaydedilmiştir. Bu akım değerleri kullanılarak polarizasyon eğrileri oluşturulmuş, 3 farklı tasarım için karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 4.2.'de elde edilen polarizasyon eğrisi görülmektedir.



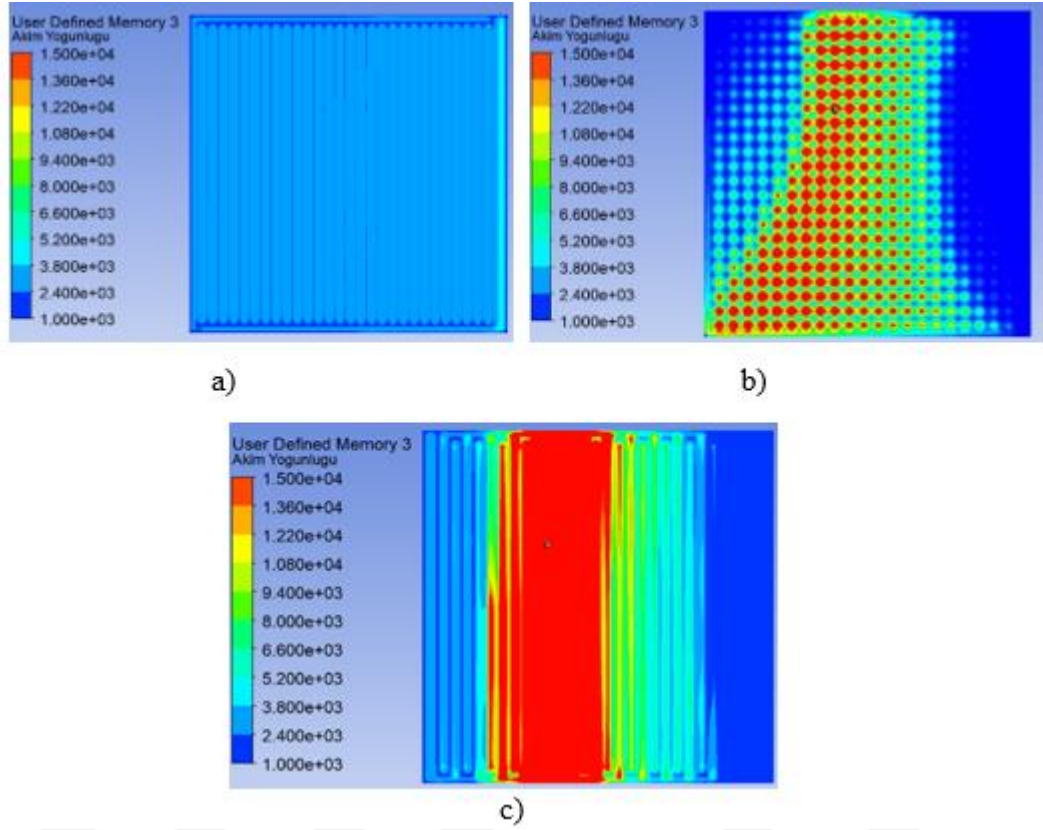
Şekil 4.2. Polarizasyon eğrisi

Eğrilerden anlaşılabacağı üzere en çok akım serpantin kanal tasarımına sahip yakıt hücresinden elde edilmiştir. En yüksek alınan akım değeri serpantin akış kanalına sahip hücrede 0,4V hücre voltajı için gerçekleştirilen analizde 4,29 A/cm²'dir.

4.3. Akım Yoğunluğu Dağılımı

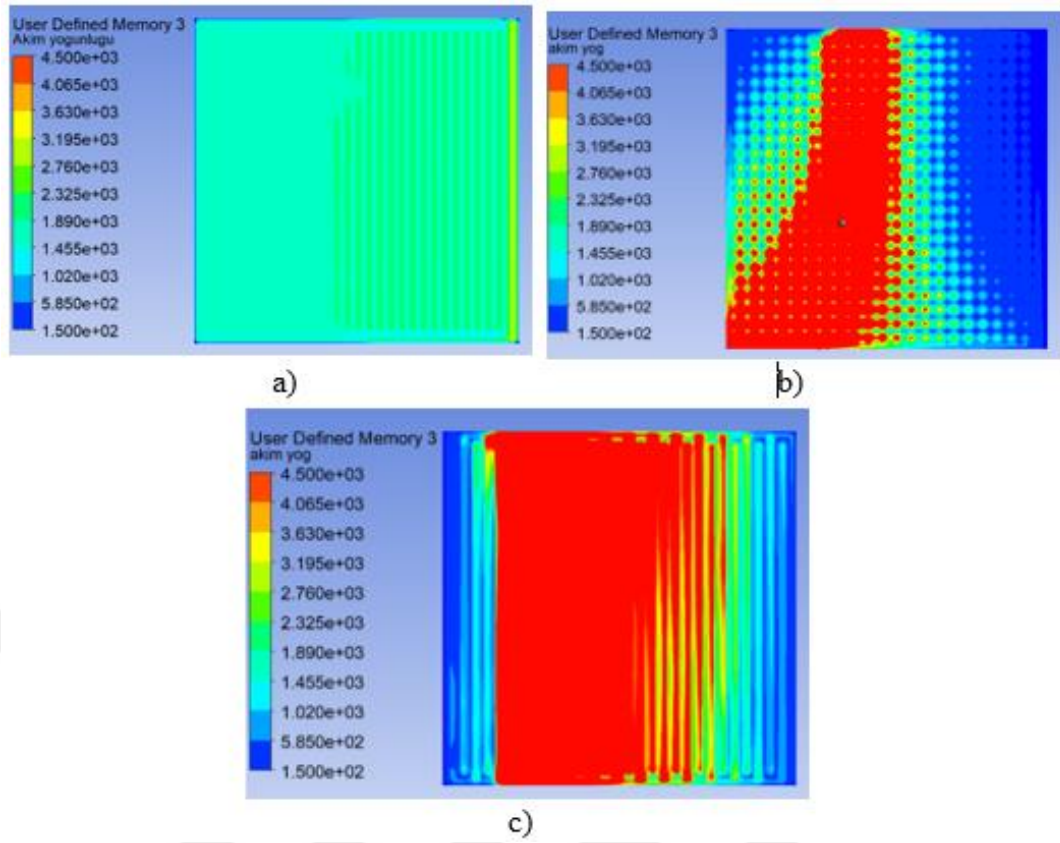
Katot katalizör ve gaz diz difüzyon tabakası arayüzeyinde akım yoğunluğu dağılımı incelendiğinde Şekil 4.3.'te görüldüğü üzere her geometri tasarımı için farklı bir dağılım görülmektedir. Paralel kanalda, ağ yapılı ve serpantin kanal tasarımlarına kıyasla daha eşit bir dağılım olmasına karşılık geçen akımın yoğunluğu arasında oldukça büyük bir fark vardır. Dağılıma bakıldığında görsellerde yer alan ölçekten de görüldüğü üzere maksimum seviyeye ulaştığı noktalarda 15000 A/cm²'ye ulaşmaktadır. Akım yoğunluğu membran boyunca sabit kalır, Katalizörde ise elektrolit olan faz akımı adım adım katı ve elektriksel iletkenliği olan faza aktarmaktadır. Çok düşük akım yoğunluğu olduğu durumda reaksiyon hızı katalizör katmanı boyunca

sabit olacaktır. Daha yüksek akım yoğunluklarında ise yaklaşık bütün reaksiyon aktiviteleri katalizör katmanında gerçekleşmektedir.



Şekil 4.3. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakası-gaz difüzyon tabakası arayüzündeki akım yoğunluğu dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarım

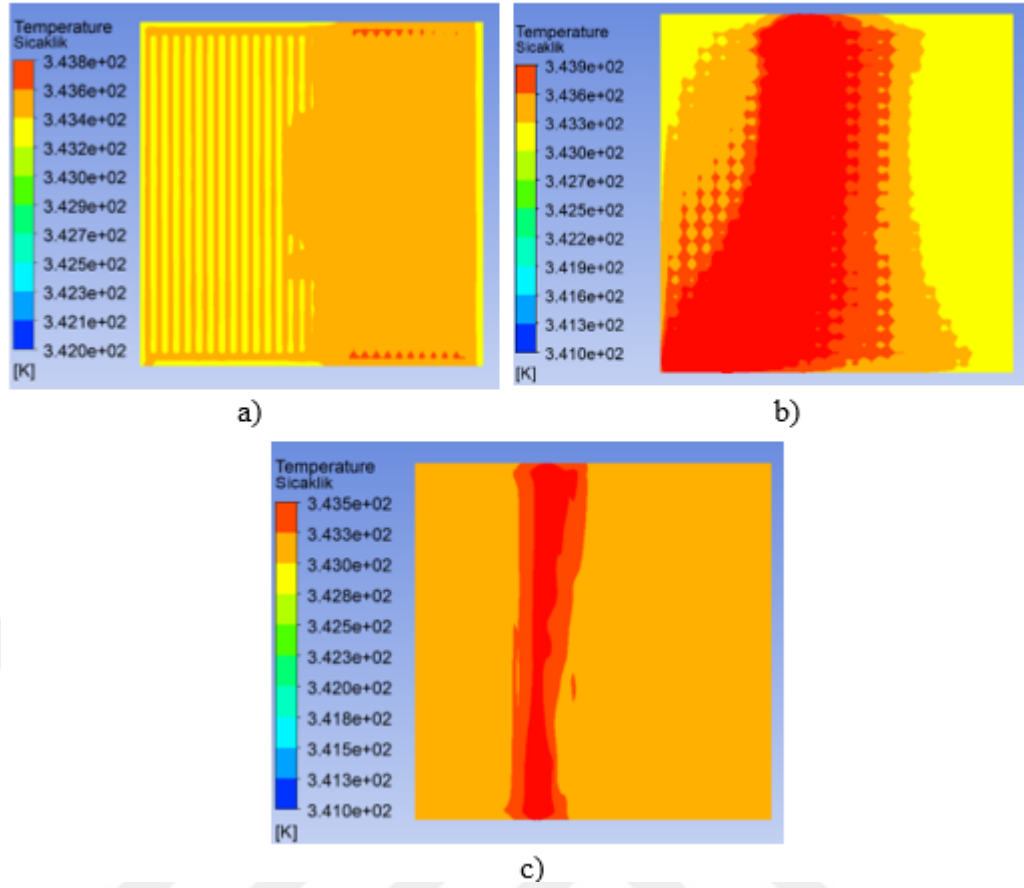
0.4V hücre voltajında sayısal analizler tekrarlandığında ise, Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi daha düşük bir hücre voltajında çalışıldığında daha yüksek akım yoğunluğu elde edilmektedir. Polarizasyon eğrisinde gerçekleşen ani düşüşlerin konsantrasyon kaybı sebebiyle bu bölgelerde yaşanmasına bağlı olarak karşılaştırmayı ise yüksek akım yoğunluğunda yapmak daha doğru bir değerlendirme olacaktır.



Şekil 4.4. 0.4V hücre voltajında katot katalizör tabakası-gaz difüzyon tabakası arayüzündeki akım yoğunluğu dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

4.4. Sıcaklık Dağılımları

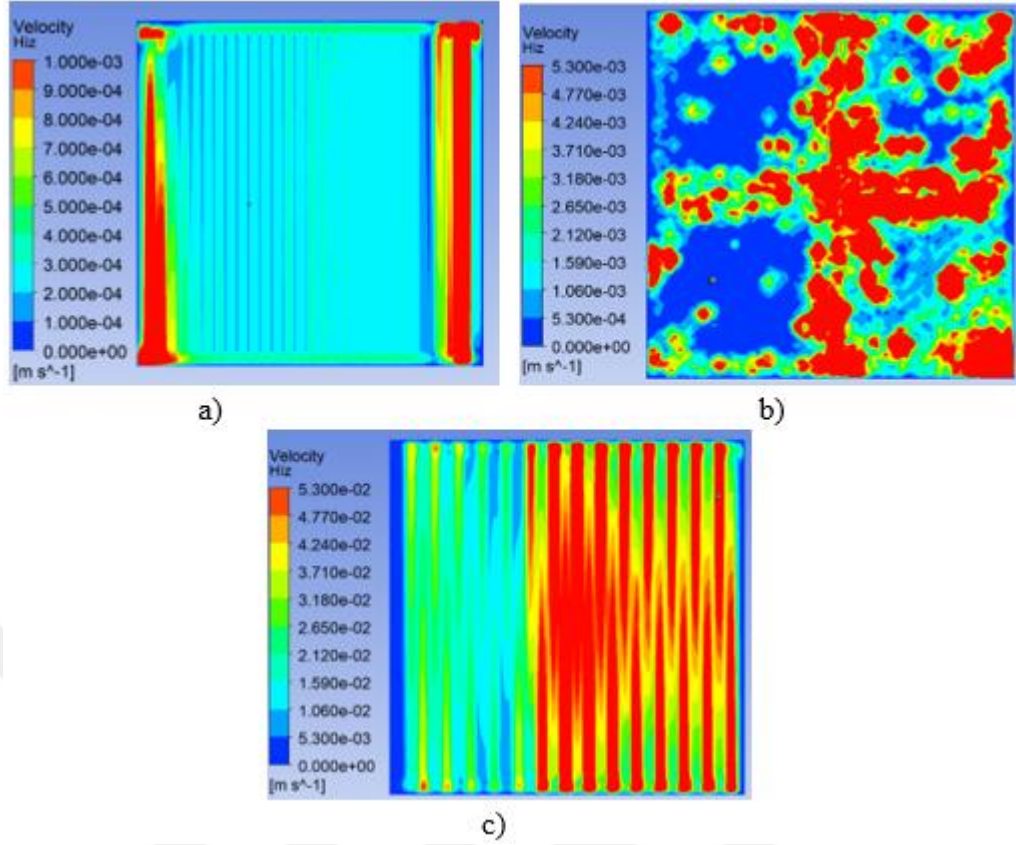
Yakıt pillerinin çalışma performansında önemli bir parametre olan sıcaklık, pilin alt bileşenlerinin de ömrüne büyük etkisi bulunmaktadır. Şekil 4.5.'te analizleri yapılan yakıt pillerinin 0.7V hücre voltajında katot katalizör ve membran arayüzleri arasındaki sıcaklık dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.5. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakası-membran arayüzeyindeki sıcaklık dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

4.5. Hız Dağılımları

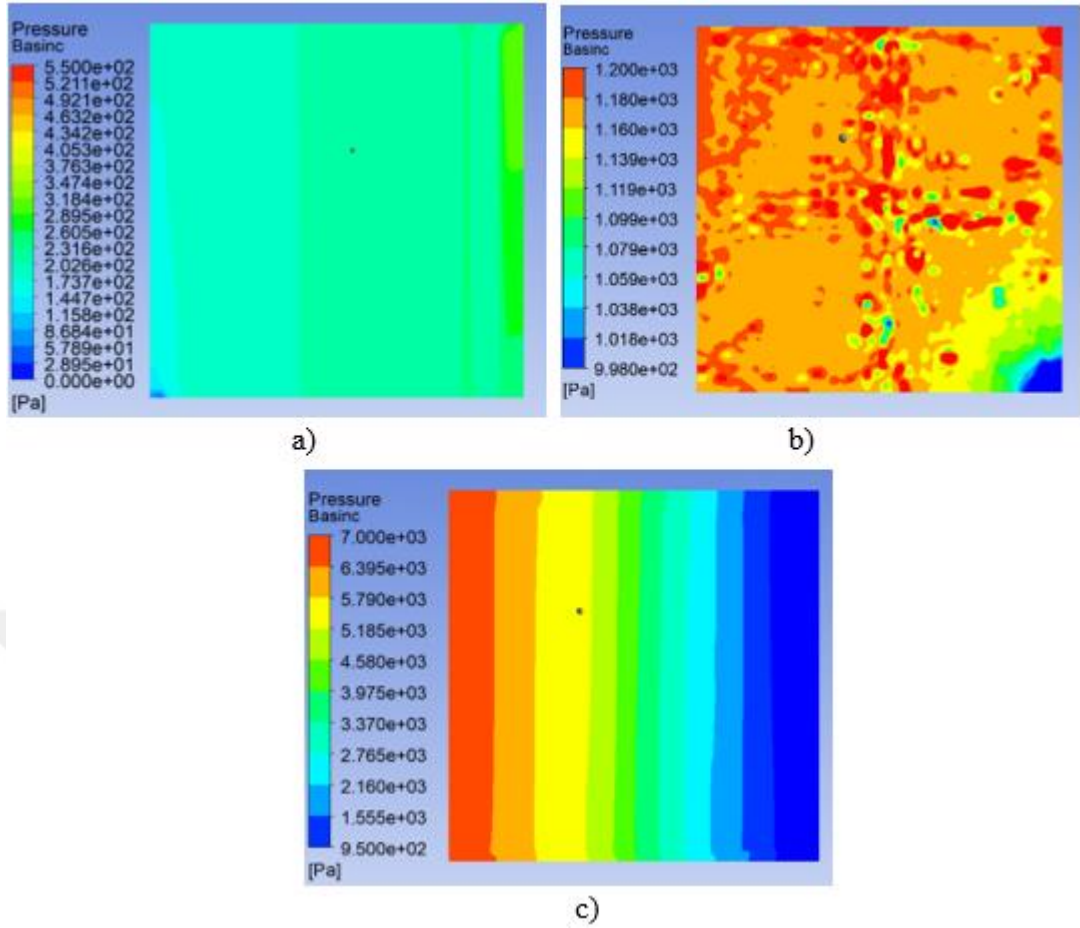
Sayısal analizleri gerçekleştirilen yakıt hücrelerinin 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakasındaki hız dağılımları Şekil 4.6.'da görülmektedir. Paralel ve ağ yapılı tasarımların serpantin tasarıma kıyasla daha dağınık bir hız profili olduğu söylenebilir. Yakıt pillerindeki hız dağılımı, hücrenin içerisinde gerçekleşen reaksiyonların hızını direkt olarak etkileyeceği için suyun dağılımına da etki edecektir. Düzgün bir hız profili sergilendiği koşulda suyun pilden tahliyesi kolaylaşacak, su baskınlarının önüne geçilecektir. Yüksek hızlı akış olduğu durumda hücre içerisinde oluşan suyun dışarıya atılması daha kolay olurken, elektrokimyasal reaksiyonların yüksek verimde gerçekleşebilmesi için yeterli zaman sağlanamaması problemi ortaya çıkabilmektedir. Düşük akış hızında ise suyun tahliyesi zorlaşmakta ve membranda su baskınlarına sebebiyet verebilmektedir.



Şekil 4.6. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakasındaki hız dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

4.6. Basınç Dağılımları

Yakıt pillerinin performansını etkileyen bir diğer önemli parametre ise basınçtır. Literatürde yapılan incelemeler değerlendirildiğinde çalışma basıncındaki artışlar hücrenin performansının iyileşmesi ve reaksiyona giren gazların taşınımını artırarak konsantrasyondaki dirençlerin azalmasına destek olmaktadır. Fakat bu her yakıt pilinin yüksek basınçta çalıştığında yüksek performans sergileyeceği anlamına gelmemektedir. Sistemdeki bütün parametreler göz önüne alındığında optimum çalışma basıncına karar verilebilir. Şekil 4.7.'de tez kapsamında incelenen farkı akış kanallarına sahip yakıt pillerinin katot katalizör katmanındaki basınç dağılımları görülmektedir. Görsellerin yanında yer alan ölçeklere dikkat edildiğinde serpantin akış kanallı yakıt hücresi tasarımında tek ve uzun kanallı olması hücrenin giriş ve çıkış noktalarında diğer tasarımlara kıyasla daha yüksek basınç farkı oluşturmaya sebebiyet vermektedir.

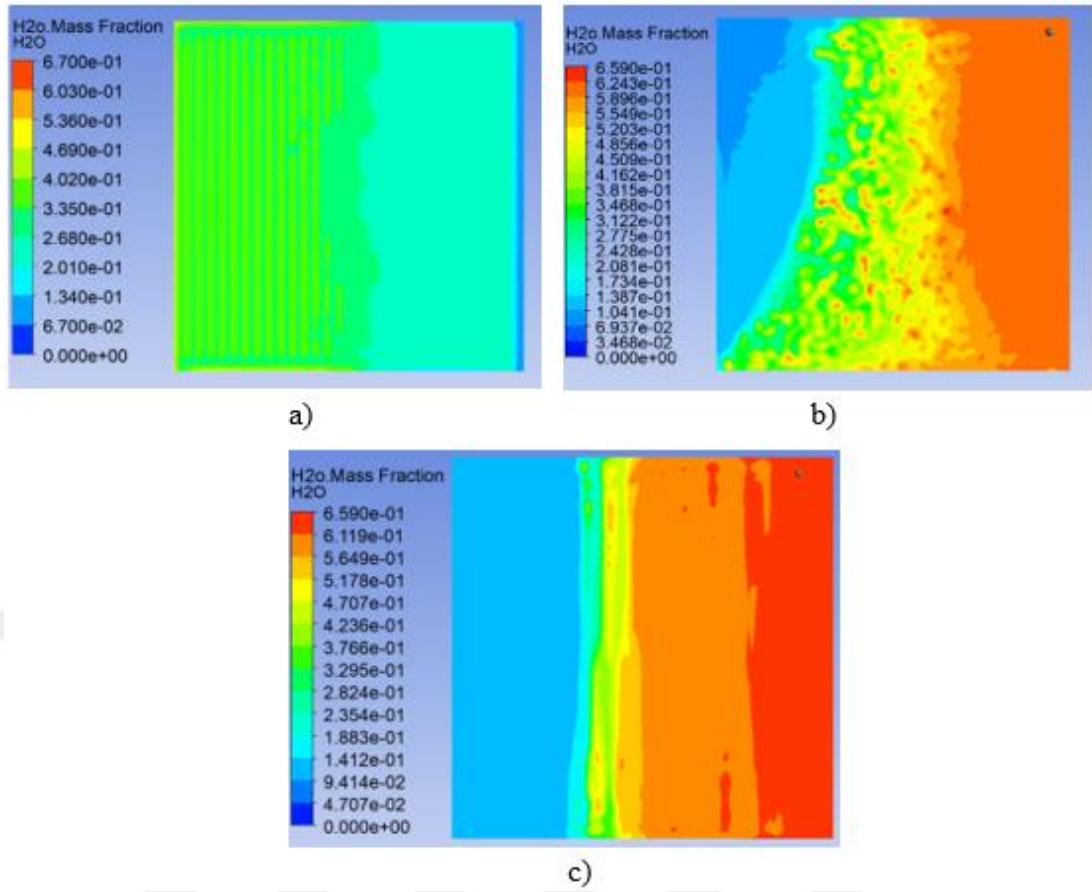


Şekil 4.7. 0.7V hücre voltajında katot katalizör tabakasındaki basınç dağılımları
a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

4.7. Reaktanların Dağılımı

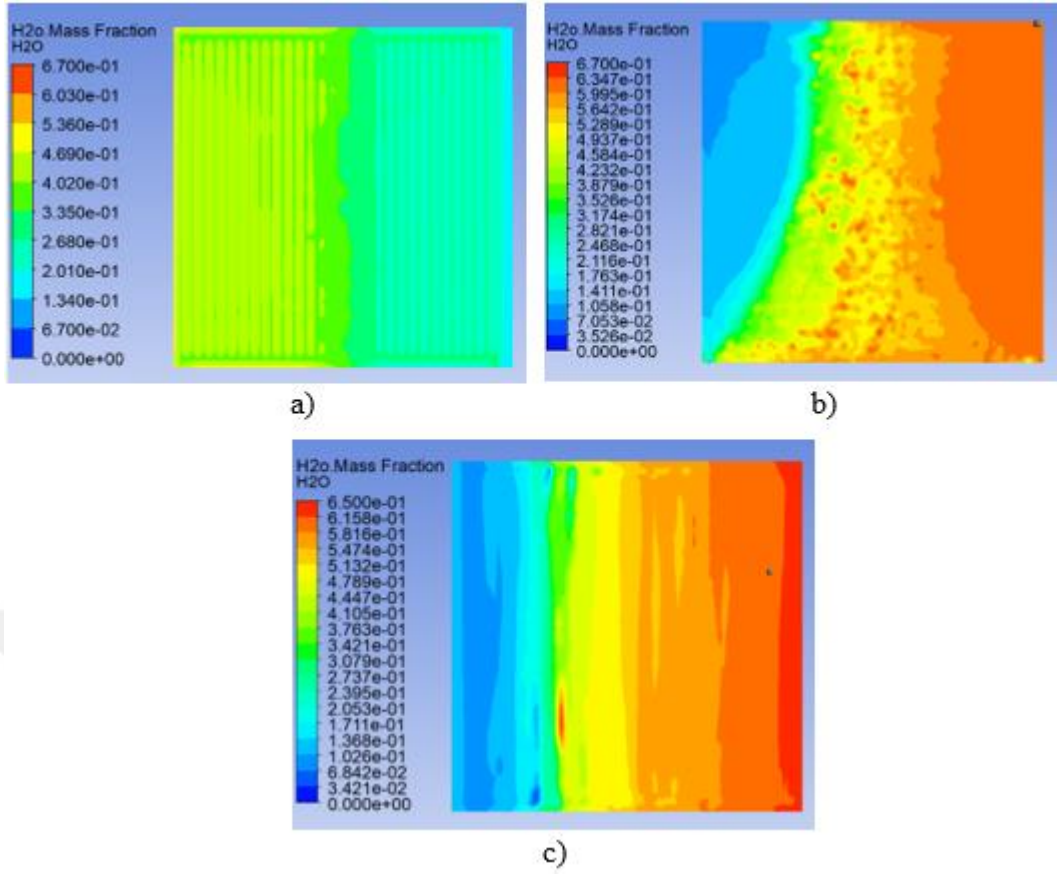
4.7.1. Su dağılımı

Yakıt pilleri içerisinde suyun yönetimi açısından literatürde yapılan çalışmalar oldukça yaygındır. Reaktanların hücre içerisine beslenmeden önce nemlendirilmesi gerekmektedir. Çünkü membranların protonik iletkenliğini sürdürebilmesi için suya ihtiyacı vardır. Şekil 4.8.'de 0.7V'luk hücre voltajı için membrandaki suyun dağılımı incelendiğinde serpantin tasarımda suyun girişte daha yoğun olduğu, paralel tasarımda ise daha düzgün su dağılımı sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.8. 0.7V hücre voltajında membranda su dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

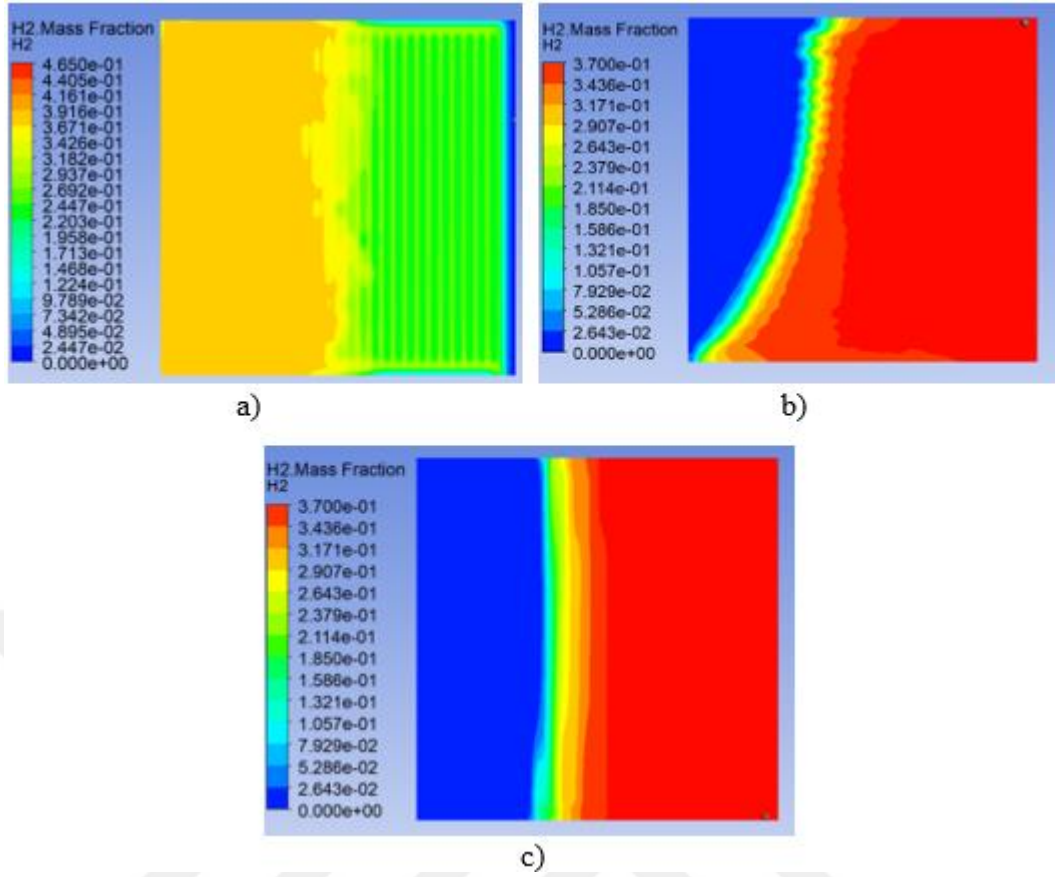
Şekil 4.9.'da ise 0.4V hücre voltajı için membrandaki su dağılımları görülmektedir. Yüksek hücre voltajındaki dağılım ile kıyaslandığında serpantin kanallı tasarım için su dağılımının daha homojen bir hal aldığı, paralel ve ağ yapılı tasarımlar için ise çok büyük değişikliklerin olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.9. 0.4V hücre voltajında membranda su dağılımları a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

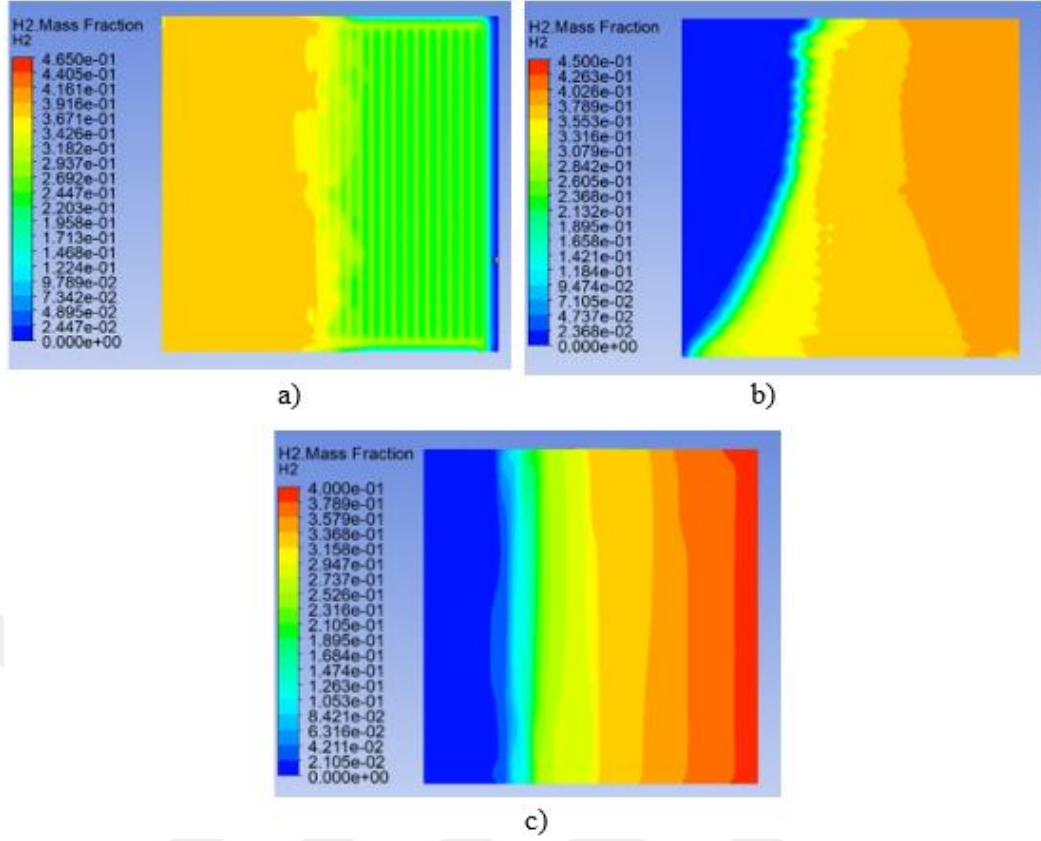
4.7.2. Hidrojen dağılımı

Şekil 4.10.'da 0.7V hücre voltajı için anot gaz difüzyon katmanındaki farklı akış kanal tasarımları için hidrojen dağılımları görülmektedir. Serpantin ve ağ yapılı tasarımda hidrojenin daha yoğun olduğu bölgeler görülmektedir. Yüksek reaktant oranına sahip bölgelerde gerçekleşen reaksiyonların yoğunluğu daha fazla olup daha fazla akım elde edildiği yorumu yapılabilir. Noktasal hidrojen kütle kesri değerleri incelendiğinde ise paralel akış kanal tasarımı için hidrojenin minimum değere ulaştığı çıkış bölgesinde 0.024, ağ akış kanallı tasarım için 0.022, serpantin akış kanallı tasarım için ise 0.020 olduğu görülmüştür.



Şekil 4.10. 0.7V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları
 a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

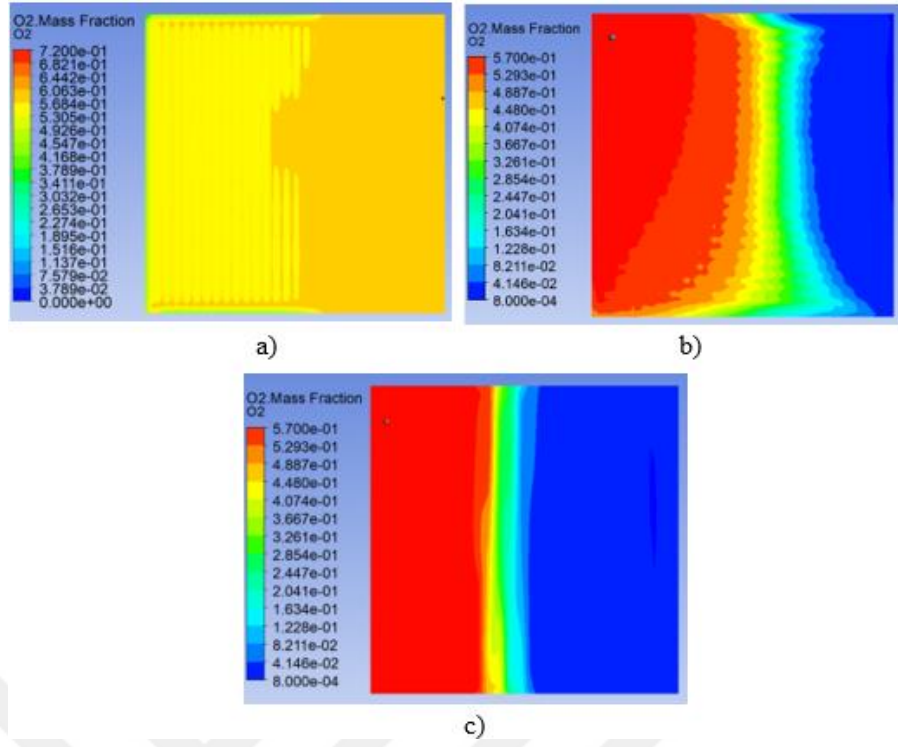
Şekil 4.11.'de ise 0.4V hücre voltajı için hidrojen dağılımları görülmektedir. Bu değer için çıkışa yakın kısımlardaki minimum kütle kesri değerleri paralel için 0.022, ağ tasarımı için 0.019, serpantin kanal tasarımı için ise 0.018 olarak kaydedilmiştir.



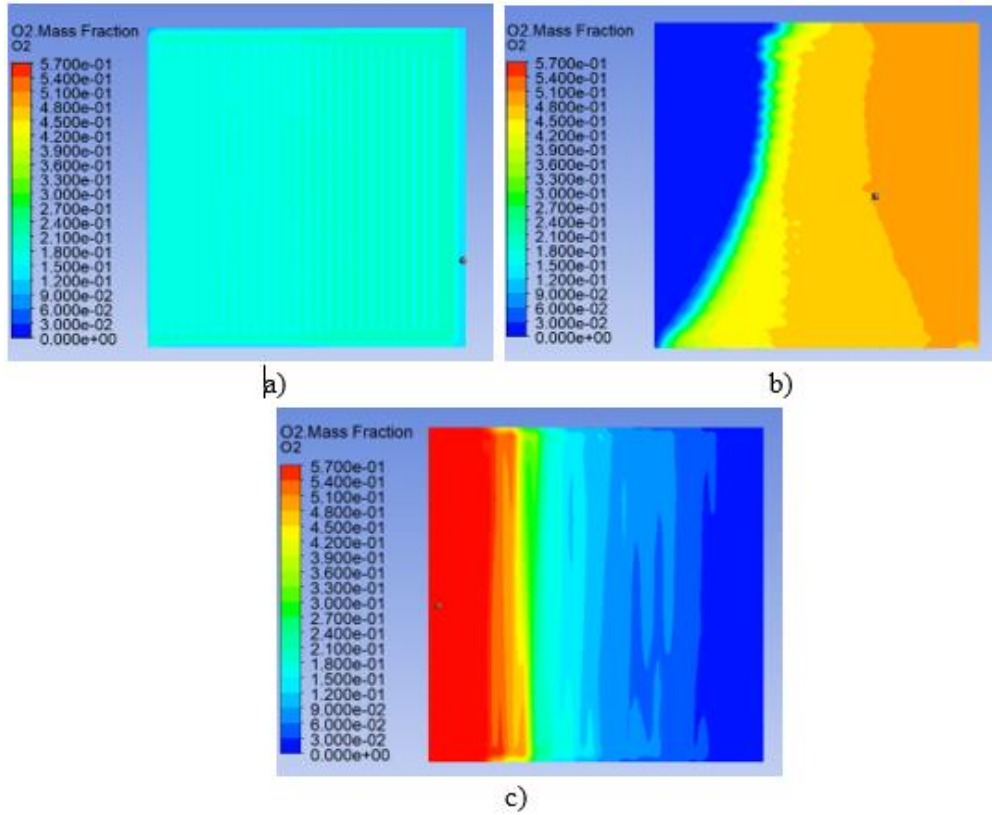
Şekil 4.11. 0.4V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları
a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı

4.7.3. Oksijen dağılımı

Şekil 4.12.'de 0.7V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasında farklı tasarımlar için oksijen dağılımları görülmektedir. Dağılımlar incelendiğinde serpantin akış kanal tasarımının tek ve uzun olması çıkış noktasına ulaşana kadar oksijen konsantrasyonundaki azalma görülmektedir. Ağ tipi ve paralel tasarımda da reaktanlar seri ve paralel akış yolları üzerinden akarken serpantine kıyasla daha düşük basınç düşüşleri meydana gelir. Fakat akış direncinin her kanalda aynı seviyede olmadığı durumda reaktanların düzensiz dağılımına sebebiyet verir. Analiz sonuçlarına göre paralel tasarımda akış direncinin diğer tasarımlara kıyasla daha sabit olduğu, oksijen dağılımının da buna bağlı olarak homojen bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Şekil 4.13.'te ise 0.4V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.12. 0.7V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları
a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarımı



Şekil 4.13. 0.4V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları
a) paralel kanal tasarımı, b) ağ yapılı kanal tasarımı, c) serpantin kanal tasarım

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Günümüz koşullarında artan nüfus ile birlikte enerji kaynaklarının rezervlerindeki azalma alternatif kaynaklara yönelim oluşturmaktadır. Yakıt pilleri de temiz enerji kaynaklarından biri olup, üzerine yapılan çalışmalar önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında paralel akış kanalı, ağ akış kanalı ve serpantin akış kanal tasarımlarına sahip 3 farklı proton değiştirmeli membran yakıt hücresinin sayısal analizi yapılmıştır. Bulgular kısmında tek tek değerlendirildiği üzere her tasarımın farklı özelliklerde birbirine üstünlükleri bulunmaktadır.

Polarizasyon eğrisine bakıldığında serpantin akış kanallı tasarımın dağılımı incelendiğinde diğer tasarımlara kıyasla daha dağınık bir model sergilemesine rağmen daha fazla akım geçtiği görülmektedir. Serpantin akış kanal tasarımına sahip yakıt hücresi tek ve uzun kanalı su tahliyesini ve ısı yönetimini kolaylaştırırken giriş ve çıkış noktalarında yüksek basınç farkları oluşmuştur.

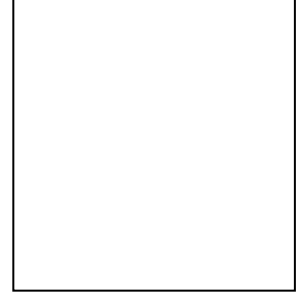
Bu noktada tek ve uzun kanal yerine birden fazla paralel kanala sahip bir serpantin akış kanal tasarımı ile meydana gelen basınç düşüşünün indirgenebileceği yorumu yapılabilir. Paralel akış kanallarında ise hücreye beslenen akışkan birçok paralel yollara eşit bir şekilde bölündüğünden yani tercihli akış geliştiğinden, en düşük basınç düşüşünün gerçekleştiği tasarım modelidir. Benzer şekilde ağ tipi akış alanında da belirli bir şekilde düzenlenmiş olan pimler arasından akış gelişirken basınç düşüşleri düşük olmuştur. Fakat bu tercihli akış ile reaktanların homojen dağılımı hücrenin her kanalında akış direnci eşit tutulmadığı durumda mümkün olamamaktadır. Yakıt pillerinin kullanım amacına ve çalışması beklenen koşullara göre optimum kanal tasarımı tercih edilerek elde edilen verim artırılabilir.

KAYNAKLAR

- Alaswad, A. Omran, A. Sodre, J. R. Wilberforce, T. Pignatelli, G. Dassisti, M, Baroutaji, A. Olabi, A. G.** (2020). *Technical and commercial challenges of proton-exchange membrane (PEM) fuel cells*, *Energies*, 14(1), 144.
- Barbir, F.** (2013). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, California, Academic Press.
- Srinivasan, S. Bocricks, J.** (2006). *Fuel Cells from Fundamentals to Applications*. New York, Springer.
- Çelik, S.** (2018) *Akış kanalı tasarımının PEM yakıt pili performansına etkilerinin incelenmesi*, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (1) 407-416.
- Ehsani M. Gao Y. Emadi A.** (2010), *Moderrn Electric, Hybrid Electic and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design*, CRC Press, ikinci baskı.
- Eker, E. Taymaz, İ.** (2012) Akış kanalı genişliğinin pem tipi yakıt hücresi performansına etkisinin incelenmesi, SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, 17 (2), 35-40.
- Günüşen, H.** (2019). *Serpantin kanallı proton aktaran membran yakıt hücresinin sayısal çözümü* (Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hamrang, A. Abdollahzadeh, M. Bilondi, A. M. Bagherighajari, F. Rahgoshay, S. M. Pascoa, J. C.** (2022) Comparison of PEMFC performance with parallel serpentine and parallel serpentine-baffled flow field under various operating and geometrical conditions; a parametric study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 7442-7459.
- Işıklı, F.** (2020). *PEM yakıt pilinin modellenmesi ve bir araç üzerinde performansının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kloess, J. P. Wang, X. Liu, J. Shi, Z. Guessous, L.** (2009) *Investigations of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membran fuel cells*, *Journal of Power Sources*, 188,132-140.
- Küpelı, S.** (2020). *PEM yakıt pillerinde geometrik ve çalışma parametrelerinin performansına etkileri ve yeni bir akış alanı tasarımı*. (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kahraman, H.** (2017). *Akış kanal tasarımının PEM yakıt hücresi performansına etkisinin incelenmesi*. (Tübitak Projesi,1002), 116M732, Sakarya.
- Larminie, J. Dicks, A.** (2003). *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley Publishing, Second edition.

- Mahadurayya, S. Jayanti, S. Desphande, A.P.** (2005) *Pressure drop and flow distribution in multiple parallel-channel configurations used in proton-exchange membran fuel cell stacks*, *Journal of Power Sources*, 157, 358-367.
- Manso, A. P. Marzo, F.F. Barranco, J. Garikano, X. Garmendia Mujika, M.** (2012). *Influence of geometric parameters of the flow fiels on the performance of PEM fuel cell: A review*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37. 15256-15287.
- Meral, P.** (2019). *PEM tipi yakıt hücrelerinde tasarım ve işletme parametrelerinin hücre performansına etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sezgin, B.** (2016). *Modeling of a high temperature PEM fuel cell* (Yüksek Lisans Tezi). Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- T.C. Dış İşleri Bakanlığı, Kyoto Protokolü, 2022.**
Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/kyoto-protokolu.tr.mfa>, erişim tarihi 26.08.2023.
- T.C. Dış İşleri Bakanlığı, Paris Anlaşması, 2022.**
Erişim adresi: <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>, erişim tarihi 26.08.2023.
- Thosar, A.** (2019) *PEM Fuel Cells: Analytical modelling and experimental validation*, Doktora Tezi, Chemical engineering and process development division, CSIR – National Chemical Laboratory, Pune.
- Wilberforce, T. Ijaodola, O. Emmanuel, O, Thompson, J. Olabi, A. G. Abdelkareem, M. A. Sayed, E. T. Elsaid, K. Maghrabie, H. M.** (2021). *Optimization of fuel cell performanca using computational fluid dynamics*, *Membranes* 11(2), 146.
- Zhang, Z. Wu, S. Miao, H. Zhang, T.** (2022) *Numerical Investigation of Flow Channel Design and Tapered Slope Effects on PEM Fuel Cell Performance*. *Sustainability*, 14, 11167.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Şevval ÖZTÜRK

Doğum Tarihi ve Yeri:

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2024, Bursa Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği ABD

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 02/2022-... Oyak Renault Otomobil Fabrikası, Araç Projeleri Devreye Alma Pilotu