



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

**PEM YAKIT HÜCRESİ DİZİLİMİNDE GRAFİT AKIŞ KANALLI
GAZ DİFÜZYON TABAKASININ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LEYLA EROĞLU

DANIŞMAN

Doç. Dr. TOLGA TANER

AKSARAY, 2023

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 202358001 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi LEYLA EROĞLU tarafından hazırlanan “**PEM YAKIT HÜCRESİ DİZİLİMİNDE GRAFİT AKIŞ KANALLI GAZ DİFÜZYON TABAKASININ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OYBİRLİĞİ ile Nanoteknoloji Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Tolga TANER

Aksaray üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Aksaray üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Ahmet Selim DALKILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 19/01/2023

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

.....

Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

LEYLA EROĞLU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışma süreci boyunca bilgi ve deneyimlerini paylaşan, bana destek olan, yol gösteren tez danışman hocam Doç. Dr. Tolga TANER'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasında, analizlerin yapıldığı Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanlarına ve elektrik iletkenliği ile ilgili deneysel çalışmada yardımlarından dolayı Öğr. Gör. Yasin Bektaş'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi her zaman yanımda olan eşim ve kızlarıma, anneme ve artık aramızda olmasa da manen yanımda hissettiğim babama ayrıca teşekkür ederim.

Leyla EROĞLU
AKSARAY, 2023

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. YAKIT HÜCRELERİ	5
3.1 Yakıt Hücresi Çeşitleri.....	6
3.1.1 Alkali yakıt hücresi	6
3.1.2 Doğrudan metanol yakıt hücresi	6
3.1.3 Fosforik asit yakıt hücresi	7
3.1.4 Erimiş karbonat yakıt hücresi.....	8
3.1.5 Katı oksit yakıt hücresi.....	8
3.2 PEM Yakıt Hücresi	9
3.3 PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri	11
3.3.1 Membran.....	11
3.3.2 Katalizör tabakası	11
3.3.3 Gaz difüzyon tabakası.....	12
3.3.4 Bipolar plakalar	12
3.4 Yakıt Hücresi Termodinamiği.....	12
3.5 Yakıt Hücresi Kayıpları.....	14
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
4.1 Gaz Akış Plakaları	15
4.1.1 Metal malzemeli akış plakası	16
4.1.2 Kompozit malzemeli akış plakası	16
4.1.3 Grafit akış plakaları.....	16
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	18
5.1 SEM Analizi.....	18
5.2 EDS Analizi	20
5.3 TGA Analizi.....	22
5.4 Akış Plakaların Elektriksel İletkenlik Hesabı	24
5.5 Farklı Malzemelerin Yakıt Hücresi Performansı	28
6. SONUÇ.....	30
KAYNAKLAR	31
ÖZGEÇMİŞ.....	35

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PEM YAKIT HÜCRESİ DİZİLİMİNDE GRAFİT AKIŞ KANALLI GAZ DİFÜZYON TABAKASININ MALZEME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Leyla EROĞLU

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tolga TANER

ÖZET

Bu çalışma, PEM yakıt hücresi için farklı tasarımlara sahip grafit akış plakalarının malzeme özelliklerini sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, PEM yakıt hücreleri için gerekli elektriksel iletkenliği sağladığını göstermektir. Yakıt hücrelerinin performansları, yakıt hücresini oluşturan bileşenlerin malzeme özelliklerinden etkilenmektedir. Akış plakaları PEM yakıt hücresinde önemli bileşenlerden biridir. Reaksiyona girecek gazlar akış plakaları üzerinden gaz difüzyon tabakası aracılığıyla katalizör tabakaya iletilmektedir. Ayrıca hücrede üretilen elektriğin iletilmesinde de önemli bir role sahiptirler. Bu çalışmada, farklı akış alanı tasarımına sahip 4 grafit plakanın malzeme özellikleri SEM, EDS, TGA analizleri ile ve elektriksel iletkenliği dört nokta ölçüm tekniği ile ortaya konmuştur. Plakaların SEM görüntüleri grafitin katmanlı yapısını ortaya koyarken, EDS analizi sonucunda karbon dışında herhangi bir elemente rastlanmamıştır. Plakaların TGA analizi sonucunda PEM yakıt hücresinin termal kararlılık açısından son derece kararlı olduğu ve nem kaybı (% 0.40-% 4.40) dışında herhangi bir kütle değişimi olmadığı gözlenmiştir. Hücrenin elektriksel iletkenliği, farklı ölçümler neticesinde $678.17 \text{ [S cm}^{-1}\text{]}$ ve $847.71 \text{ [S cm}^{-1}\text{]}$ olarak elde edilmiştir. Böylece, bu çalışma ileride PEM yakıt hücresi akış kanalları ile ilgili yapılacak çalışmalara bir model oluşturmuştur.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt hücresi, Bipolar plaka, Akış plakası, Akış kanalı.

Ocak, 2023; 35 Sayfa

M. Sc. THESIS

**INVESTIGATION OF MATERIAL PROPERTIES OF GRAPHITE FLOW
CHANNEL GAS DIFFUSION LAYER IN PEM
FUEL CELL ARRAY**

Leyla EROĞLU

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanotechnology**

Supervisor: Associate Professor Dr. Tolga TANER

ABSTRACT

This study presents the material properties of graphite flow plates with different designs for the PEM fuel cell. The aim of this study is to provide the necessary electrical conductivity for fuel cells. The performance of fuel cells is affected by the material properties of the components that make up the fuel cell. Flow plates are one of the key components in a PEM fuel cell. The gases to be reacted are transmitted to the catalyst layer via the gas diffusion layer over the flow plates that also play an important role in the transmission of electricity produced in the cell. In this study, the material properties of 4 graphite plates with different flow field designs were revealed by SEM, EDS, TGA analyzes and their electrical conductivity was revealed by four-point measurement technique. While SEM images of the plates reveal the layered structure of graphite, no element other than carbon was found as a result of EDS analysis. As a result of the TGA analysis of the plates, it was observed that the PEM fuel cell was extremely stable in terms of thermal stability and there was no mass change except moisture loss (0.40-4.40%). The electrical conductivity of the cell was obtained as 678.17 [S cm⁻¹] and 847.71 [S cm⁻¹] as a result of different measurements. Thus, this study has formed a model for future studies on PEM fuel cell flow channels.

Keywords: PEM fuel cell, Bipolar Plate, Flow Plate, Flow Channel.

January, 2023; 35 Pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Alkali yakıt hücresi şeması.....	6
Şekil 3.2. Doğrudan metanol yakıt hücresi çalışma şeması.....	7
Şekil 3.3. Fosforik asit yakıt hücresi.....	7
Şekil 3.4. Erimiş karbonat yakıt hücresi şeması	8
Şekil 3.5. Katı oksit yakıt hücresi şeması	9
Şekil 3.6. PEM yakıt hücresi çalışma şeması	10
Şekil 3.7. Gerçek ve ideal voltaj akım yoğunluğu grafiği	14
Şekil 4.1. Farklı akış kanalı tasarımları	15
Şekil 4.2. Akış plakalarında kullanılan malzemeler	16
Şekil 4.3. Grafit akış plakaları.	17
Şekil 5.1. 1 numaralı numuneye ait SEM görüntüsü a) 5000X büyütme b) 20000X büyütme	18
Şekil 5.2. 2 numaralı numuneye ait SEM görüntüsü a) 5000X büyütme b) 20000X büyütme	19
Şekil 5.3. 3 numaralı numuneye ait SEM görüntüsü a) 5000X büyütme b) 20000X büyütme	19
Şekil 5.4. 4 numaralı numuneye ait SEM görüntüsü a) 5000X büyütme b) 20000X büyütme	20
Şekil 5.5. Numunelere ait EDS analizleri	21
Şekil 5.6. 1 numaralı numunenin TGA analizi	22
Şekil 5.7. 2 numaralı numunenin TGA analizi	23
Şekil 5.8. 3 numaralı numunenin TGA analizi	23
Şekil 5.9. 4 numaralı numunenin TGA analizi	24
Şekil 5.10. Dört nokta ölçme tekniği	25
Şekil 5.11. Dört nokta prob yöntemi tabaka direnci ölçümü	26
Şekil 5.12. Özdirenç ölçümü için deney düzeneği.....	26
Şekil 5.12 (Devam). Özdirenç ölçümü için deney düzeneği	27
Şekil 5.13. Farklı malzemelerin I-V grafiği.....	29

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Farlı üretim güç sistemlerinin karşılaştırmalı analizi.	5
Çizelge 3.2. Farklı türde yakıt hücreleri	6
Çizelge 5.1. Numunelere ait EDS analizleri nicel sonuçları.....	21
Çizelge 5.2. Numunelere ait kütle kayıpları	24
Çizelge 5.3. Numunelerin akım- gerilim ölçüm sonuçları.....	27
Çizelge 5.4. Numunelerin elektriksel iletkenliği	28



SİMGELER VE KISALTMALAR

EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
GDL	Gaz Difüzyon Tabakası
MEA	Membran Elektrot Tertibatı
PEM	Polimer Elektrot Membran
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	Termogravimetrik Analiz
F	Faraday Sabiti, F
G	Gibbs Serbest Enerjisi
h	Yükseklik, m
I	Akım, A
l	Uzunluk, m
pH	Potansiyel Hidrojen
S	Entalpi, kJ kg ⁻¹
T	Sıcaklık
V	Gerilim, V
q	Elektrik Yüğü, C
W	Elektriksel İş, kJ
w	Genişlik, m
°C	Santigrat
η	Verim, %
ρ	Özdirenç
σ	Elektriksel İletkenlik
Δ	Fark

1. GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel problemler, günümüz dünyasının önemli sorunları arasında yer almaktadır. Bu çevresel etkiler, çoğunlukla, enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılan fosil kökenli yakıtlardan kaynaklanmaktadır. Bu yakıtların kullanımı sonrası açığa çıkan ve sera gazı olarak nitelendirilen, karbondioksit, karbon monoksit gibi gazların çevreye ciddi zararları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, insanların daha konforlu yaşama isteğiyle artan sanayileşme ve teknolojik gelişmeler, enerji ihtiyacını arttırmaktadır. Bu bağlamda, fosil kaynaklı yakıtların tükenibilme ihtimali, çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgiyi arttırmıştır.

Hidrojen gelecek için önemli bir yakıt olarak düşünülmekte ve gün geçtikçe daha önemli hale gelmektedir. Hidrojen doğada serbest halde bulunmayıp, genellikle su gibi bileşik formda bulunur ve fosil yakıtlara oranla daha verimli bir yakıttır [1]. Hidrojenin bileşik formda bulunması sebebiyle kullanımı için öncelikle üretilmesi gerekmektedir. Üretim yöntemlerine bağlı olarak hidrojen gri hidrojen, mavi hidrojen ve yeşil hidrojen gibi renk kategorileriyle tanımlanır [2].

Hidrojen enerjisi kullanım alanlarından en yaygın yakıt hücreleridir. Yakıt hücreleri, yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren elektro-kimyasal araçlardır. Ölmez (2007)'e göre yakıt hücresinin çalışması bir pile benzemektedir fakat pil belli bir süre sonra tükenirken, yakıt hücreleri yakıt ve hava temin edildiği sürece elektrik üretimine devam etmektedir [3]. Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücreleri, yüksek verimli ve düşük emisyonu sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. PEM yakıt hücrelerinde elektrik üretim sürecinin tek ürünü su ve buhar olması nedeniyle işletme sırasında duman oluşturan ve sağlık sorunlarına neden olan karbondioksit emisyonları veya hava kirleticileri oluşmamaktadır [4].

Yakıt hücresi performansını ve verimini etkileyen bazı parametreler vardır. Bu parametreler; çalışma sıcaklığı, reaktan basıncı, mekanik tasarım ve malzeme özellikleri şeklindedir. Reaksiyona girecek gazların eşit olarak dağıtılması, basınç düşüşünün azaltılması ve su taşmalarını engellemek için uygun bir akış alanı gereklidir. Aksi takdirde, reaktan gazların yanlış dağılımı, düzensiz bir akım yoğunluğu dağılımına ve membranda yerel sıcak noktaların ortaya çıkma olasılığının

artmasına neden olarak performans ve malzeme bozulmalarına neden olur. Yüksek basınç düşümü, gaz beslemesi için güç tüketimini artırır. Ayrıca, su fazlalığı, reaksiyona girecek reaktanların katalizör aktif bölgelerine giden yolunu tıkayarak PEM yakıt hücresi performansını ve kararlılığını ciddi şekilde azaltabilir [5]. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki yakıt hücresi içinde kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri genel performansı etkilemektedir [6].

Bu çalışmada daha önce Taner (2019) [7] tarafından yakıt hücresi performansı incelenmiş olan 4 adet grafit akış kanalının malzeme özellikleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu), EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) ve TGA (Termogravimetrik Analiz) yöntemlerle ortaya konmuştur. Ayrıca elektriksel özellikleri kurulan elektrik devresi yardımıyla açıklanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yakıt hücrelerinin performansları, hücreyi oluşturan bileşenlerin malzeme ve tasarım özellikleriyle belirlenir. Yakıt hücresinden daha iyi yararlanılması ve yaygın olarak kullanılması için yapılmış olan birçok çalışma mevcuttur.

Bipolar plakalar PEM yakıt hücreleri için önemli parçalardır. Lee vd. (2007) farklı koşullarda ve özelliklerde üretilmiş bipolar levhalar üzerinde çalışmışlardır. Malzemenin elektriksel iletkenliği, grafit parçacıklarının karışım oranı, basınç ve sıcaklık parametreleriyle test edilmiştir. Aynı zamanda mekanik mukavemeti arttırmak amacıyla kompozite karbon kumaş, reçine ve orijinal grafit eklemeleri yapılmıştır [8].

Saadat vd. (2021) yeni bir yüksek basınçlı tasarıma sahip yüksek düzeyde iletken ancak mekanik olarak esnek olan bipolar plaka kompozitlerinin, tahribatsız yapısal analizi ve üretimiyle ilgili çalışmışlardır. 52 [MPa] eğilme mukavemeti, 221 [$S\ cm^{-1}$] değerinde yüksek iletkenlik rapor etmişlerdir [9]. Zhang vd. (2021) geleneksel akış alanlarına alternatif olarak gösterilen gözenekli akış alanlarıyla ilgili daha önce yapılan çalışmalar hakkında bilgiler vermiştir [5].

Iqbal vd. (2020) grafen bazlı yapılardaki gelişmeleri ele almışlardır. Sonuçta, bipolar plakalarda dolgu maddesi olarak grafen/grafen oksidin kullanılmasının, yakıt hücrelerinde iletken bir ağ geliştirerek kompozit malzemelerde yüksek bir elektrik iletimi sağladığı rapor edilmiştir. Bu nedenle, karbon ve grafen, grafen oksit gibi türevlerinin, yakıt hücresi enerji cihazlarının stabilitesini, verimliliğini ve elektrokatalitik performansını artırmak için umut verici bir malzeme olarak kullanılabileceği üzerinde durulmuştur [10].

Li ve Sabir (2005) akış alanı tasarımlarıyla ilgilenecek farklı akış alanı tasarımlarını incelemişlerdir [11]. Manso vd. (2012) de benzer şekilde akış alanı tasarımının yakıt hücresi performansına etkileriyle ilgili daha önce yapılmış çalışmaları gözden geçirmişlerdir [12]. Simaafrookhteh vd. (2020) PEM yakıt hücreleri uygulamaları için çok dolgulu termoset bazlı kompozit bipolar plakaların imalatı üzerinde çalışmışlardır [13]. Yakıt hücrelerinin iyi bir performans gösterebilmeleri için etkili bir ısı yönetimi gereklidir.

Chen vd. (2021) yakıt hücrelerinde termal yönetimle ilgili olarak, soğutma metotları ve malzeme özellikleri ile ilgili konularda daha önce yapılmış çalışmaları ele almışlardır [14].

Reaksiyona girecek gazların katalizör tabakasına düzgün bir şekilde dağıtılması yakıt hücresi verimi için önemli bir parametredir. Bu ise iyi tasarlanmış bir akış kanalıyla mümkündür. Dhahad vd. (2019) farklı tasarımlarda akış alanlarını deneysel olarak test ederek yakıt hücresi performansına etkilerini incelemişlerdir [15]. Fan vd. (2021) yakıt hücreleri ve hidrojen enerjisiyle ilgili son gelişmeleri incelemişlerdir [4].

Bipolar plakalarla ilgili diğer bir çalışma Çelik vd. (2022) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 3D yazıcı ile üretilen titanyum levha, PEM yakıt hücresinde iki kutuplu bir levha olarak imal edilmiş ve incelenmiştir. Çalışma sonucunda titanyum plakaların altınla kaplanması performansı artırırken, plaka ağırlığının arttığını gözlemlemişlerdir [16].

Akış kanalı yüzeyinin ıslanabilirliği, proton değişim membranlı yakıt hücresi performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Liu vd. (2022) yaptıkları çalışma neticesinde yakıt hücresinde düşük katot bağıl nemi söz konusu olduğunda ya da yakıtın nemlendirilmemiş olduğu durumlarda akış alanı yüzeyinin hidrofobikliğin hücre performansında etkili olduğunu göstermişlerdir [17]. İçingur vd. (2011) alüminyum gaz akış kanallı PEM yakıt hücrelerinin performanslarının, sıcaklık, nem ve basınç parametrelerine bağlı değişimlerini incelemiştir. Alüminyum gaz akış kanalı ile paslanmaz çelik gaz akış kanalını kıyaslamış ve alüminyum gaz akış kanalının yakıt hücresi performansında daha etkili olduğu sonucuna varmıştır [18].

Taner (2019), farklı akış kanalı tasarımlarıyla yaptığı çalışma ile bu tasarımların yakıt hücresi performansını arttırdığını tespit etmiştir [19]. Kahraman (2016) yaprak akış kanalı tasarımının hücre performansına etkilerini, sıcaklık, nem ve basınç parametrelerine bağlı olarak inceleyerek hücre performansını olumlu şekilde değiştirdiğini tespit etmiştir [20]. Kloess vd. (2009) bio akış kanallı tasarımlarını incelemişlerdir. Yeni yaprak ve akciğer tasarımları için optimum çalışma koşullarının 65–75 [°C] hücre sıcaklığı, 2 [atm] geri basınç ve % 100 bağıl nem olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışma koşulları altında, yaprak tasarımı en iyi performansa sahip olduğunu bildirmişlerdir [21].

3. YAKIT HÜCRELERİ

Bosse vd. (2018) tarafından yakıt hücresi, yakıtlarda ve oksidantlarda depo edilen kimyasal enerjiyi, elektrokimyasal reaksiyonlarla doğrudan güce dönüştüren güç üretim modülü olarak tanımlanmış ve iki elektrot (anot ve katot) ile bu elektrotlar arasına yerleştirilmiş elektrolitten meydana geldiği ifade edilmiştir [22].

Bir yakıt hücresinde, gaz yakıt anot elektrotlarda yükseltgenme, oksidant madde (hava veya oksijen) katot elektrotta indirgenme reaksiyonunu başlatmaktadır. Reaksiyonlar sonucu oluşan gerilim farkı neticesinde elektron akışı meydana gelmektedir [3].

Mekhilef vd. (2012) yakıt hücresi veriminin geleneksel motorlara kıyasla daha fazla olduğunu göstermiştir. Çizelge 3.1, yakıt hücrelerinin diğer geleneksel sistemlerle kapasite ve verimlilik açısından karşılaştırmasını ortaya koymaktadır [10].

Çizelge 3.1. Farklı üretim güç sistemlerinin karşılaştırmalı analizi [10].

Güç sistemleri	Kapasite	Verimlilik (%)
Dizel motor	500 [kW]-5 [MW]	~35
Türbin jeneratörü	500 [kW]- 5 [MW]	29-42
Fotovoltaik sistem	1 [kW]-1 [MW]	6-19
Rüzgar türbini	10 [kW]-1 [MW]	25
Yakıt hücresi	200 [kW]- 2[MW]	40-60

Yakıt hücreleri, kullanılan yakıt tipi, elektrolit, malzeme özellikleri ve çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak sınıflandırılırlar [23,24]. Çalışma sıcaklığı açısından yakıt hücreleri; düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri için, katalizör malzemelere ihtiyaç duyulurken yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleri için hücre bileşenlerini oluşturan malzemelerin yüksek erime noktalarına sahip olmaları gerekmektedir [25]. Çizelge 3.2 elektrolit, çalışma sıcaklığı, kullanılan yakıt ve verime göre yakıt hücrelerinin karşılaştırılmasını vermektedir [23-25].

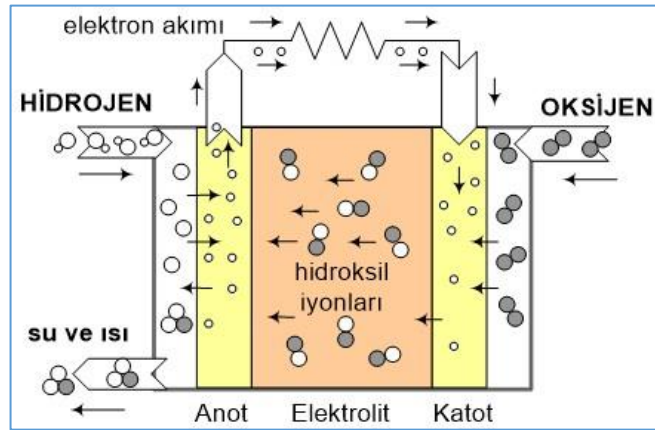
Çizelge 3.2. Farklı türde yakıt hücreleri [23-25].

Yakıt hücre tipi	Yakıt türü	Elektrolit tipi	Çalışma sıcaklığı [°C]	Elektriksel verim [%]
PEM	H ₂	Proton iletken elektrolit membran	20-80	40
Alkali	H ₂	Potasyum hidroksit çözeltisi	50-250	60-70
Doğrudan metanol	Sıvı Metanol	Polimer iletken membran	20-120	20-30
Fosforik asit	H ₂	Sıvı fosforik asit	200-250	40-55
Erimiş karbonat	H ₂ , CO, doğalgaz, propan	Alkali karbonatlar	600-800	60-65
Katı oksit	H ₂	Erimiş alkali metal karışımı	600-1000	45-70

3.1. Yakıt Hücre Çeşitleri

3.1.2. Alkali yakıt hücresi

Alkali yakıt hücreleri uzay gemilerinde elektrik ve su ihtiyacını karşılamak için üretilen ilk yakıt hücresi türüdür. Alkali yakıt hücresinde elektrolit olarak potasyum hidroksit kullanılır. Hücre reaksiyonunun hızlı olması veriminin yüksek olmasını sağlar. Bu yakıt hücrelerinde en önemli problem karbondioksit karşı duyarlılıktır. Hava içerisindeki çok az miktardaki karbondioksit dahi hücre performansını olumsuz etkilemektedir [26]. Şekil 3.1’de bir alkali yakıt hücresinin şeması verilmektedir [27].

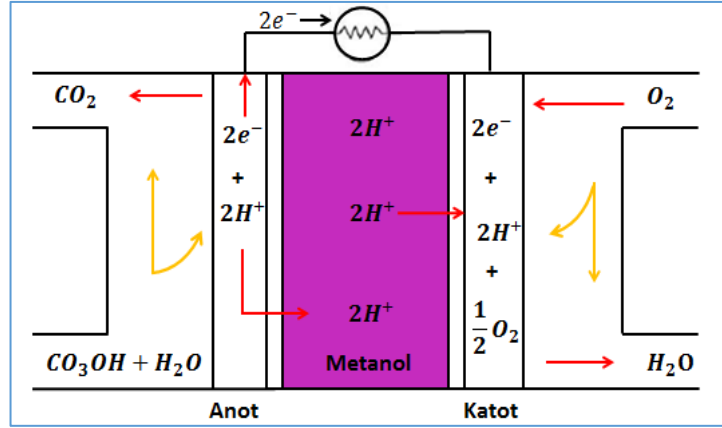


Şekil 3.1. Alkali yakıt hücresi şeması [27].

3.1.2. Doğrudan metanol yakıt hücresi

Yakıt olarak metanol kullanan yakıt hücresi çeşididir. Metanolün enerji yoğunluğu hidrojene göre daha fazla olduğu için depolanması kolaydır. Çalışma açısından PEM yakıt hücrelerine benzemektedir. Genellikle dizüstü bilgisayarlar ve cep

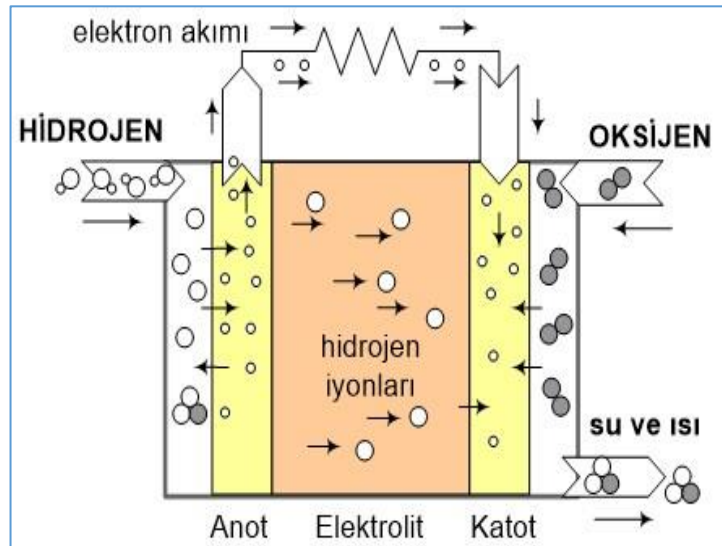
telefonlarında kullanılmaktadırlar. Şekil 3.2’de doğrudan metanol yakıt hücresi çalışma şeması görülmektedir [26].



Şekil 3.2. Doğrudan metanol yakıt hücresi çalışma şeması [3].

3.1.3. Fosforik asit yakıt hücresi

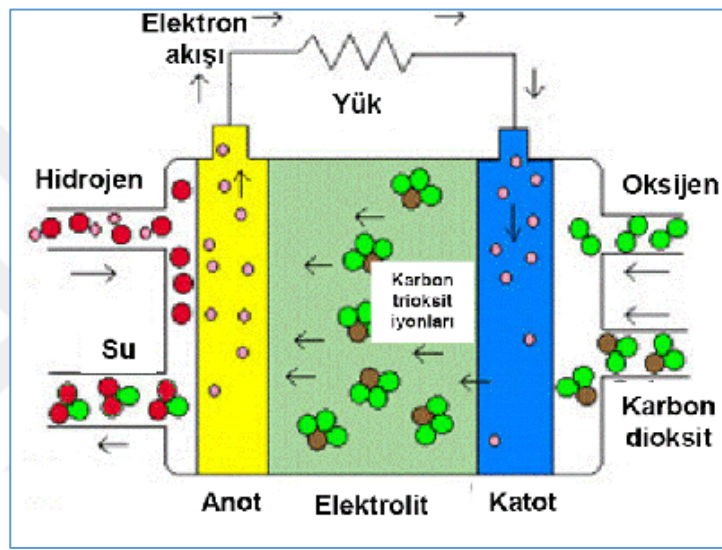
Sıvı fosforik asit elektrolite sahip yakıt hücreleridir. Katalizör tabakası platinden oluşur. Fosforik asit yakıt hücreleri, yakıt hücrelerinin ilk nesli olup ticari olarak kullanılan ilk yakıt hücresidir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakıt olarak saf hidrojen kullanma zorunluluğu yoktur. Şekil 3.3 bir fosforik asit yakıt hücresini göstermektedir [27].



Şekil 3.3. Fosforik asit yakıt hücresi [27].

3.1.4. Erimiş karbonat yakıt hücresi

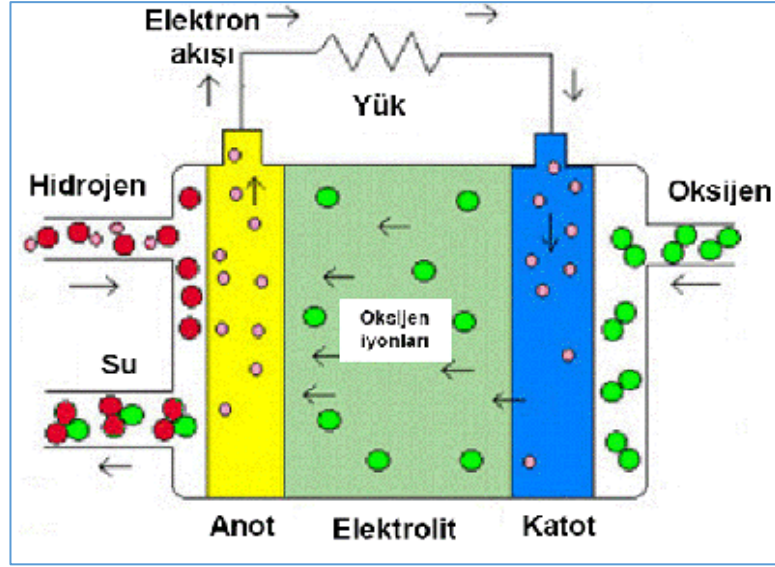
Bu yakıt hücreleri yüksek sıcaklıkta çalışırlar. Doğal gaz ve kömür bazlı santrallerde elektrik ihtiyacını karşılamak için geliştirilmişlerdir. Yüksek sıcaklıkta çalışmaları sebebiyle katalizör kullanımına ihtiyaç duymazlar. Hidrokarbon yakıt kullanımında, hidrokarbonu hidrojene dönüştüren harici bir sisteme ihtiyaç yoktur. Çünkü yüksek sıcaklıkta hidrokarbonlar hidrojene kendiliğinden dönüşür. En önemli dezavantajı dayanıklılık sorunudur [27]. Şekil 3.4 erimiş karbonat yakıt hücresini temsil etmektedir [28].



Şekil 3.4. Erimiş karbonat yakıt hücresi [28].

3.1.5. Katı oksit yakıt hücresi

Katı ve gözeneksiz seramik elektrolit içeren hücrelerdir. 1000 [°C]'ye kadar yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler ve bu nedenle katalizör tabakasında değerli metal kullanılması gerekmez. Sülfürlü bileşiklere ve karbon oksitlere karşı dirençli olmaları sebebiyle, kömür bazlı yakıtların kullanılması da mümkündür [26]. Şekil 3.5 katı oksit yakıt hücresi göstermektedir [28].



Şekil 3.5. Katı oksit yakıt hücresi [28].

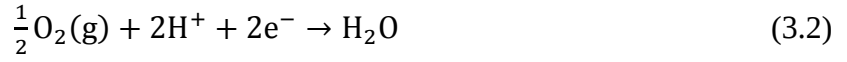
3.2. PEM Yakıt Hücresi

PEM yakıt hücreleri, tasarım ve işletim basitlikleri nedeniyle umut verici bir alternatif enerji kaynağıdır. PEM yakıt hücresi sistemlerinin ilgi çekici özelliklerinden bazıları hafif olması, yüksek enerji yoğunluğu, kirlenici emisyonlarının olmaması veya düşük olması ve düşük çalışma sıcaklığı şeklinde sıralanabilir [29]. Bu olumlu özelliklerine karşın PEM yakıt hücresinin ticarileşmesinin önündeki engeller, maliyet, yakıt depolama, performans kayıpları ve dayanıklılık problemidir [30].

PEM yakıt hücresi iki elektrot ile bu elektrotlar arasına yerleştirilmiş elektrolitten (membran) meydana gelir. Proton (H^+) iyonunu oluşturmak için katalizör tarafından aktive edilen hidrojen gazı, yakıt hücresindeki anot bölgesinden elektron yayar ve proton membranından geçer. Bu arada elektron, elektrik üretmek için dış devreden akar, yan ürün olarak ısı ve su açığa çıkar [7].

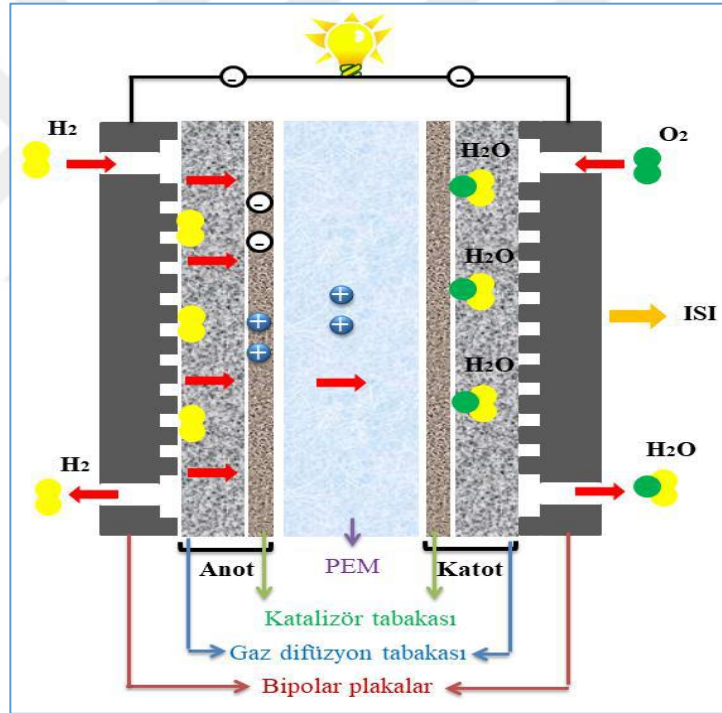
PEM yakıt hücresinin performansını etkileyen iki önemli kritik nokta vardır. Birincisi kinetik sınırlamalara yol açan yavaş indirgeme reaksiyonu, diğeri ise özellikle katot tarafında yüksek akım yoğunluklarında, kütle taşınımını sınırlayan su fazlalığı oluşmasıdır [30]. Bu nedenle yakıt hücresinin her bileşeni için etkili bir su ve ısı (termal) yönetiminin ortaya konması gerekmektedir.

PEM yakıt hücresinde anot, katot ve toplam reaksiyon aşağıda verilmektedir [7].



Denklem 3.1 anot reaksiyonunu, Denklem 3.2 katot reaksiyonunu ve Denklem 3.3 toplam reaksiyonu göstermektedir.

Şekil 3.6 PEM yakıt hücresi çalışma şemasını göstermektedir [31]. Yakıt hücresi, anot ve katot elektrotları, gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve gaz akış kanallarından oluşmaktadır.



Şekil. 3.6. PEM yakıt hücresi çalışma şeması [31].

Anot tarafında hidrojen gazı, akış kanalları ve gaz difüzyon tabakası aracılığıyla katalizör tabakaya ulaşmakta ve yükseltgenme reaksiyonu sonucu elektron kaybederek H^+ protonuna dönüşmektedir. Membran hidrojen protonlarını iletirken elektronlar dış devreden akmaktadır. Katot tarafında ise oksijen, akış plakaları ve gaz difüzyon tabakası aracılığıyla katalizör tabakaya ulaşmakta ve reaksiyon sonucunda su ve ısı açığa çıkmaktadır.

3.3. PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri

3.3.1. Membran

Membran, anotta gerçekleşen reaksiyon sonucu oluşan hidrojen protonlarının katot bölgesine geçmesini sağlarken, elektron geçişine izin vermemektedir. Bu nedenle membranın yüksek proton iletkenliğine sahip olması ve gazların birbirine karışmaması için, gaz geçirgenliğinin olmaması gerekmektedir [20].

Proton değişim zarının zayıf dayanıklılığı ve düşük proton iletkenliği gibi problemler, PEM yakıt hücresinin gelişmesini durdurmuştur. DuPont PEM yakıt hücreleri için Nafion membran geliştirmiş ve söz konusu problemleri çözerek PEM yakıt hücresinin gelişmesini hızlandırmıştır [32].

Yapısı gereği membranın, hidrojen iyonlarının geçişi için yeterli miktarda nemlendirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde membran kurur ve proton geçişleri yavaşlar. Polimer membranlar, kimyasal olarak aktif değildir, güçlü bağlara sahip olmaları sebebiyle ince üretilebilmektedirler, asidik özelliğe sahiptirler, yüksek miktarda su absorbe edebilmekte olup yeterli nemlenme sağlandığında hidrojen iyonunun geçişini gerçekleştirmektedir [20].

3.3.2. Katalizör tabakası

PEM yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyonlar, katalizör tabakalarda gerçekleşir. Anot kısmında aktivasyon enerjisinin düşük olması sebebiyle hidrojenin proton ve elektronlarına ayrılması kolay gerçekleşirken, katot reaksiyonu daha zor gerçekleşmektedir. Bu nedenle katot kısmında daha etkili bir katalizör kullanılması gerekmektedir [33].

Katotta üretilen suya ek olarak, nemlendirilmiş reaktan gazlarla birlikte su buharı da katalizör tabakasına girerek sıcaklık gradyanı nedeniyle yoğunlaşıp oksidan taşınmasını sınırlamaktadır. Bu nedenle, katalizör tabakası yapısı, elektronlar ve protonlara ek olarak, reaktan gaz ve sıvı suyun gözenekli ortam boyunca kolayca hareket edebileceği şekilde tasarlanmalıdır [30].

3.3.3. Gaz difüzyon tabakası

Gaz difüzyon tabakası (GDL), PEM yakıt hücrelerinde, gaz akış kanalları ile katalizör tabaka arasına yerleştirilen membran ve elektrot düzeneğinde kritik bir malzemedir. GDL temel olarak, bir gaz difüzörü, akım toplayıcı ve fiziksel destek işlevi görmekte olup katalizör kullanımını ve genel performansı belirlemektedir. Ayrıca gaz fazındaki suyun membrana ulaşmasını ve sıvı fazdaki suyun katalizör tabakasından uzaklaştırılmasında görevlidir [34].

Bu işlevleri yerine getirmek için GDL, mikro gözenekli bir katmanla kaplanmış makro gözenekli bir gaz difüzyon substrattan oluşmaktadır. GDL tabakaların, yüksek gözenekliğe sahip olmaları nedeniyle karbon fiber bazlı malzemeler kullanılmakta ve su problemlerini önlemek amacıyla genellikle teflon kaplama yapılmaktadır [34].

3.3.4. Bipolar plakalar

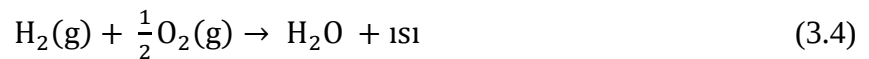
Grafit, metal veya karbon polimer kompozitten yapılabilen bipolar plakalar, hücre ağırlığının % 60-80'ini oluşturur. Ayrıca toplam maliyetin %30-40'ını kapsadıkları için hücre için önemli parçalardandır [9].

Bipolar plakalar, yakıtı ve oksijeni/havayı anot ve katot yüzeyi üzerinde ayrı ayrı eşit olarak dağıtırken, akımı bir hücrenin anodundan diğer hücrenin katoduna iletir. Ayrıca, soğutucu akışkanı taşıyarak hücredeki tersinmez ısıyı dışarı atarak reaktan gazlarla soğutucu akışkanı birbirinden ayırmaktadır [35].

Tüm bu işlevler için bipolar plakalar, mükemmel elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmalı ve gazları sızdırmamalıdır. Ayrıca hücre asidik ortam olduğu için korozyona dayanıklı olmalıdır [35].

3.4. Yakıt Hücresi Termodinamiği

Yakıt pili temel reaksiyonu hidrojenin yanma reaksiyonuna benzemekte olup ekzotermik bir reaksiyon olup Denklem 3.4 ile ifade edilmektedir [36].



Kimyasal tepkime ısısı (entalpi) reaktanların ve ürünlerin oluşum ısılarının farkından hesaplanır. 25 [°C]'de suyun oluşum ısısı -286 [kJ mol⁻¹] iken hidrojen ve oksijen için bu değer sıfırdır. Denklem 3.4'de verilen tepkime sonucu açığa çıkan ısı (entalpi) 25 [°C] ve atmosferik basınçta 286 [kJ mol⁻¹] olmaktadır [36].

Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyon sonucu oluşan enerji, sabit sıcaklık ve basınçta Gibbs Serbest Enerjisi (ΔG) değişimle ifade edilmekte olup Denklem 3.5'de verilmektedir [36].

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

ΔG , sabit sıcaklık ve basınçtaki reaksiyon için maksimum elektrik işinin (W_{elk}) ölçüsüdür [36]. Elektriksel iş taşınan yük ve gerilime bağlı olarak Denklem 3.6 ile ifade edilmektedir.

$$W_{elk} = q \cdot V \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da q yükü [C mol⁻¹] ve V gerilimi [V] göstermektedir [36].

q yükü, bir mol için taşınan elektron sayısı (n) (hidrojen için 2) ve Faraday sabiti (F) kullanılarak Denklem 3.7 ile ifade edilmektedir [36].

$$q = n \cdot F \quad (3.7)$$

Maksimum elektriksel iş, Gibbs enerjisindeki değişime denk olduğu için, Denklem 3.5, Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 düzenlenerek hücrenin teorik potansiyeli Denklem 3.8 ile ifade edilmektedir [36].

$$V = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (3.8)$$

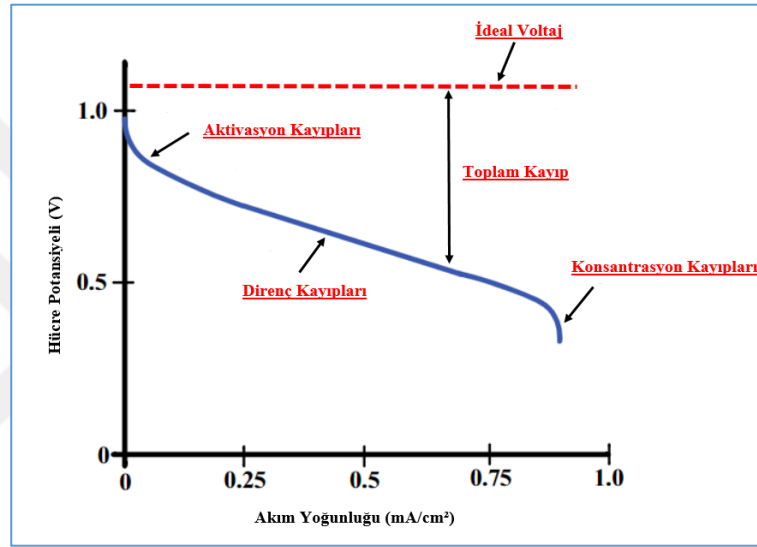
Denklem 3.8'de 25 [°C] için rakamsal ifadeler yerine konduğunda, hücre potansiyeli 1.23 [V] olarak elde edilmektedir [36]. Yakıt hücreleri için verim (η , %), üretilen elektrik enerjisi ile giren enerji arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır ve Denklem 3.9 ile ifade edilmektedir [36].

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.9)$$

Gibbs Serbest Enerjisinin tamamının elektrik enerjisine dönüştüğü kabul edildiğinde hücre için teorik verim literatürde % 83 olarak görülmektedir [36].

3.5. Yakıt Hücresi Kayıpları

Yakıt hücresi için hesaplanan 1.23 [V]'luk teorik gerilim değeri, gerçekte birçok faktörden kaynaklanan kayıplardan dolayı bu değerin altındadır [36]. Yakıt hücresinde gerçekleşen bu kayıplar Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, aktivasyon kaybı, direnç kayıpları ve konsantrasyon kayıpları şeklinde sıralanmaktadır [1].



Şekil 3.7. Gerçek ve ideal gerilim (voltaj) - akım grafiği [1].

Elektrotlarda reaksiyonların gerçekleşmesi için belirli bir enerji bariyerini aşmak gerekmektedir. Yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyon hızı yavaş elektrot kinetiği ile kontrol edildiğinde aktivasyon kayıpları görülmektedir. Direnç kayıpları, hidrojen iyonlarının membran içerisinden geçerken karşılaştıkları direnç ve elektrotlardan geçen elektron akışına karşı gösterilen dirençten kaynaklanmaktadır. Reaktanların taşınımı ile ilgili kayıplar konsantrasyon kayıplarını oluşturmaktadır [1].

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Gaz Akış Plakaları

Akış plakaları, GDL yardımı ile yakıt ve oksidanın katalizör tabakasına iletilmesini sağlar. Aynı zamanda hücre içerisinde üretilen ısı ve suyun kontrol edilmesinde görevlidir. Watkins ve Dircks (1992) tarafından gaz akış kanallarının doğru tasarımı sonucunda % 50'ye varan güç yoğunluğu artışı kaydedilmiştir [12].

Yakıt ve oksidan katalizör tabakasına verimli bir şekilde dağıtıldığında, hücredeki su etkin bir şekilde yönetilerek üretilen akım etkin bir şekilde toplanmaktadır [37]. Membran Elektrot Tertibatının (MEA) tamamının daha iyi kullanılması için, akış kanalları genellikle bipolar plakaların yüzeylerinde işlenmektedir [37].

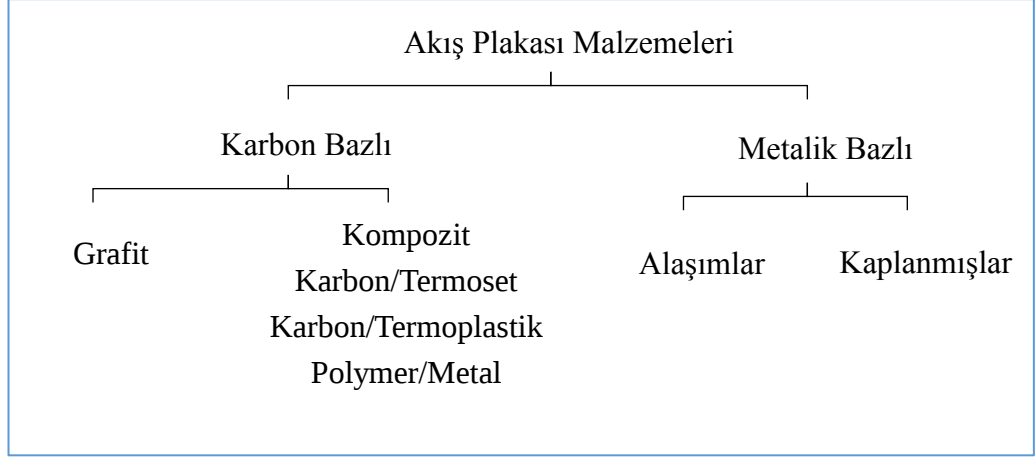
Akış kanalları iyi tasarlanmadığı takdirde, üretilen suyun hücreden yeteri miktarda uzaklaştırılması mümkün olmamakta ve gaz kanalları su ile dolabileceği için reaksiyona girecek gazların taşınması engellenebilmektedir. Şekil 4.1.'de farklı tasarımlara sahip akış kanalları gösterilmektedir [38].



a) Paralel akış kanalı b) Serpantin akış kanalı c) Birbirine bağlı akış kanalı

Şekil 4.1. Farklı akış alanı tasarım örnekleri [38].

İyi bir hücre performansında, akış kanalı tasarımı kadar akış plakalarında kullanılan malzemeler de etkilidir. Akış plakasında kullanılan malzemelerde, korozyona karşı direnç, termal ve elektrik iletkenliği gibi özellikler beklenmektedir. Şekil 4.2 akış plakalarında kullanılan malzemelerin bir özetini göstermektedir. Genel olarak akış plakalarında kullanılan malzemeler karbon bazlı ve metalik malzemeler olarak ikiye ayrılmaktadır [39].



Şekil 4.2. Akış plakasında kullanılan malzemeler [39].

4.1.1. Metal Malzemeli Akış Plakaları

Metaller elektriksel iletkenlik ve termal iletkenlik açısından mükemmel özelliğe sahiptirler. Düşük maliyetle üretilebilmeleri ve düşük gaz geçirgenliğine sahip olmaları da olumlu özellikleri arasındadır. Fakat yakıt hücresi ortamında düşük pH ve yüksek nem sebebiyle korozyona uğramaktadırlar [39].

4.1.2. Kompozit Malzemeli Akış Plakaları

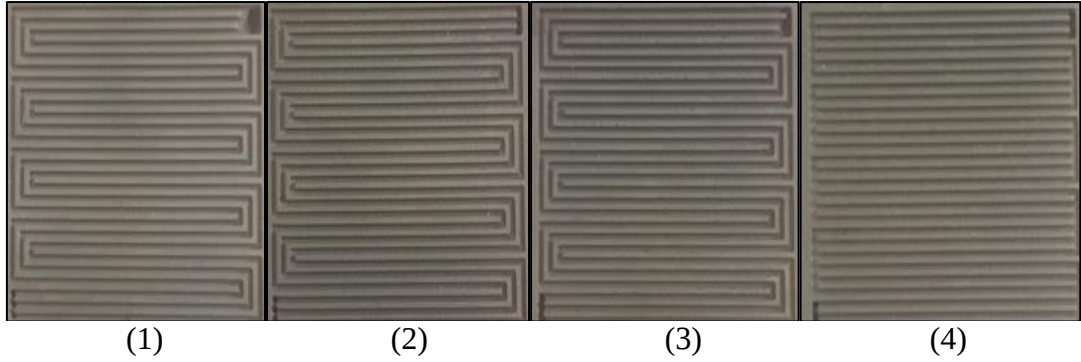
Kompozit akış plakaları, malzemeye elektriksel ve mekanik özellikler sağlamak için genellikle güçlü bir yalıtkan matris (polimer) içinde dağıtılan iletken bir dolgu maddesinden (metal veya karbon) oluşmaktadır. Kompozit akış plakaları metal bazlı ve karbon bazlı olarak iki şekilde üretilmektedir. Metal bazlı kompozitlerde, elektriksel iletkenlik ve güç artarken korozyon problemleriyle karşılaşilmektedir [39].

4.1.3. Grafit Akış Plakaları

Grafit plakalar korozyon problemlerinin önlenmesi amacıyla tercih edilmektedirler. Elektriksel iletkenlikleri iyi olup kırılgan yapıda ve gözeneklidirler. Akış kanallarının plaka üzerine işlenmesi zahmetli ve maliyetli olmaktadır [39].

Bu tez çalışmasında Şekil 4.2’de verilen farklı tasarımlara sahip 4 tane grafit akış plakasının malzeme özellikleri incelenmiştir. Taner (2019) tarafından söz konusu

plakalar hücre verimi açısından mevcut ticari akış plakaları ile karşılaştırılmış olup hücre performansını olumlu etkilediği ortaya konmuştur [7].



Şekil 4.3. Grafit akış plakaları.

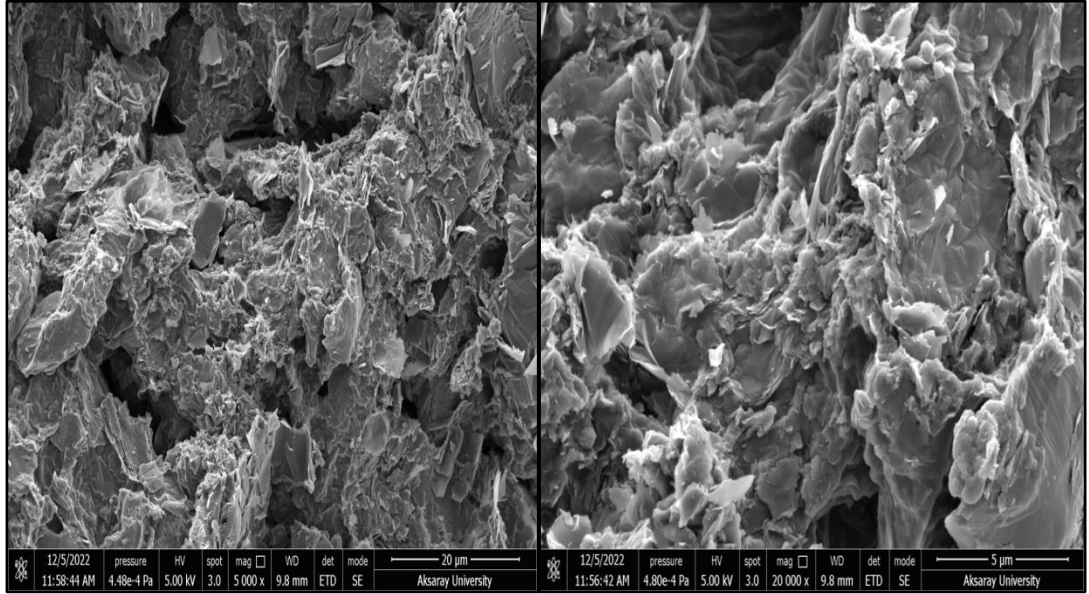
Akış plakaların malzeme özellikleri ile ilgili analizler Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Plakaların yüzey görüntüleri SEM analizleri ile incelenmiş olup, plaka içeriğindeki maddeler EDS analizi ile ortaya konmuştur. Termal kararlılıkları ise TGA analizleri ile belirlenmiştir. Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Elektrik Atölyesinde ise elektriksel özellikleri araştırılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. SEM Analizi

SEM analizinde, lensler yardımı ile odaklanmış elektron demetinin bir numune yüzeyini taraması sağlanmaktadır. Bu teknikte elektron ışınları ile numune yüzeyi arasındaki etkileşimler neticesinde elektron ve fotonların bir kısmı saçılırken bir kısmı da numuneye nüfuz etmektedir. Saçılan elektronlar dedektörde toplanarak numune hakkında bilgiler elde edilmektedir. SEM analizinde amaç numune yüzeyinin 3 boyutlu görüntüsünü elde etmektir. SEM analizinde tarama yapılabilmesi için numune yüzeyinin iletken olması gerekmektedir. İletken olmayan örnekler, altın, karbon gibi ince iletkenlerle kaplanmaktadır [40].

Bu tez çalışmasında numuneler 1, 2, 3 ve 4 şeklinde numaralandırılmışlardır. Her bir numune için farklı büyütme oranları ile görüntüler elde edilmiştir. Şekil 5.1, 1 numaralı numuneye ait SEM görüntülerini kapsamaktadır. Büyütme oranları 5000X ve 20000X şeklindedir.

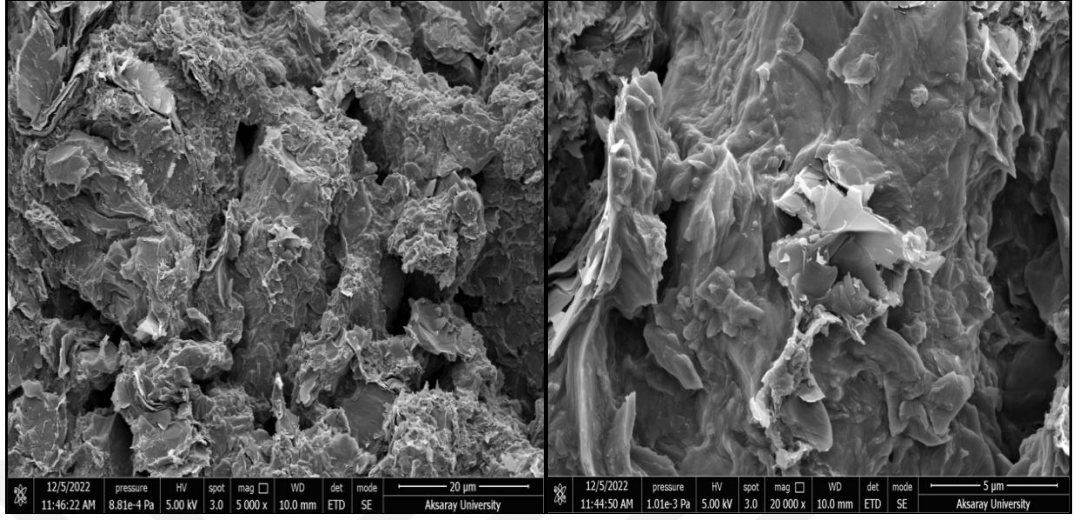


(a)

(b)

Şekil 5.1. 1 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri a)5000X b) 20000X büyütme.

Şekil 5.2, 2. numunenin SEM görüntülerini kapsamaktadır. Büyütme oranları 5000X ve 20000X'dir.

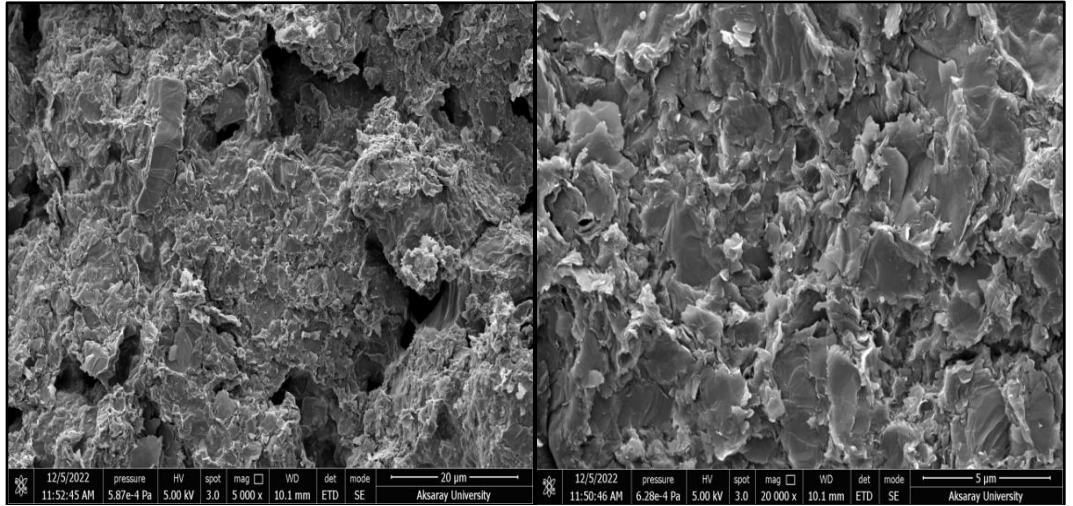


(a)

(b)

Şekil 5.2. 2 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri a) 5000X b) 20000X büyütme.

3. numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Büyütme oranları 5000X ve 20000X'dir.

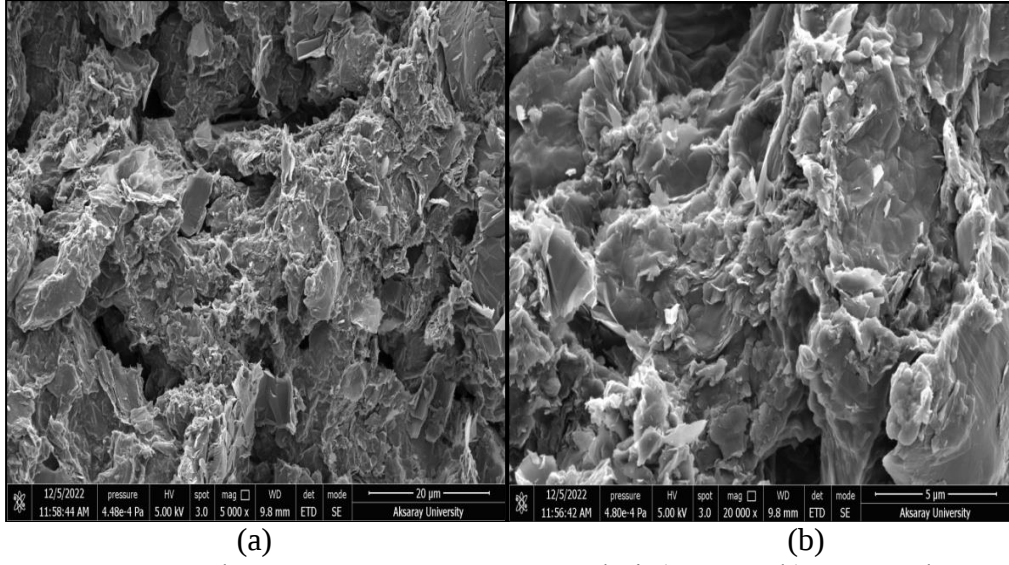


(a)

(b)

Şekil 5.3. 3 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri a) 5000X b) 20000X büyütme.

4. numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Büyütme oranları 5000X ve 20000X'dir.



Şekil 5.4. 4 numaralı numuneye ait SEM görüntüleri a) 5000X b) 20000X büyütme.

Karbon bazlı minerallerden biri olan grafit, grafen adı verilen yatay katmanlardan oluşmaktadır. Grafit doğada kendiliğinden bulunabildiği gibi sentetik olarak da üretilmektedir. Grafitleşme sıcaklığı 2500 [°C]'den yüksektir. Bu işlemin titiz sıcaklık yükseltme prosedürleri altında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Grafitleşme sonrası safsızlıkların buharlaşması nedeniyle yeni gözenekler oluşmakta bu da grafitte %20-30 arasında gözenekliliğe neden olmaktadır [41].

Gözeneklilik nedeniyle hücrede sızıntılar meydana gelmekte olup reaksiyon gazlarının konsantrasyonu düşmekte ve bu durum hücre performansını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle grafit plakaların iyi işlenmesi gerekmektedir [41]. Gözenekliliği engellemenin bir diğer yolu da plakaların 5-6 [mm] kalınlıkta imal edilmesidir [42].

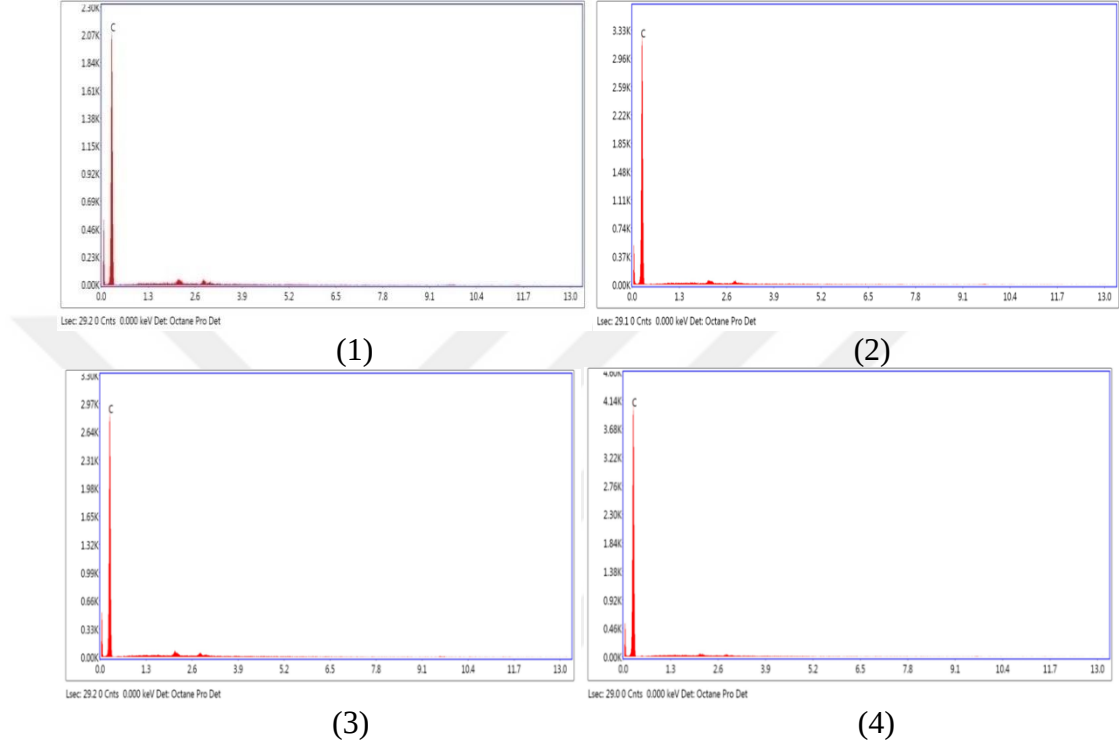
Bu tez çalışmasında, numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde grafit tabakaları görülmektedir. Ayrıca görüntülerde az da olsa gözenekler bulunmaktadır.

5.2. EDS Analizi

EDS analizi numunedeki element içeriği hakkında bilgi edinmek amacıyla SEM ile birlikte kullanılan bir yöntemdir. Analiz için numune yüzeyine yüksek enerjili elektronlar gönderilmektedir. Elektronların numune ile etkileşimi sonucu numune yüzeyinden elektronlar kopmaktadır. Elektronlar çekirdeğe yakın yörüngelerden koparsa atomlar kararsız hale gelmektedir. Atomun kararlı hale gelmesi için dış

yörüngedeki elektronlar iç yörüngedeki boşlukları doldurarak X ışını yayınlamaktadırlar. X ışınlarının algılanması neticesinde numunedeki elementler hakkında bilgi sahibi olunmaktadır [43].

Şekil 5.5 (1, 2, 3 ve 4) numunelere ait EDS analizlerini göstermektedir.



Şekil 5.5. Numunelere ait EDS analizleri.

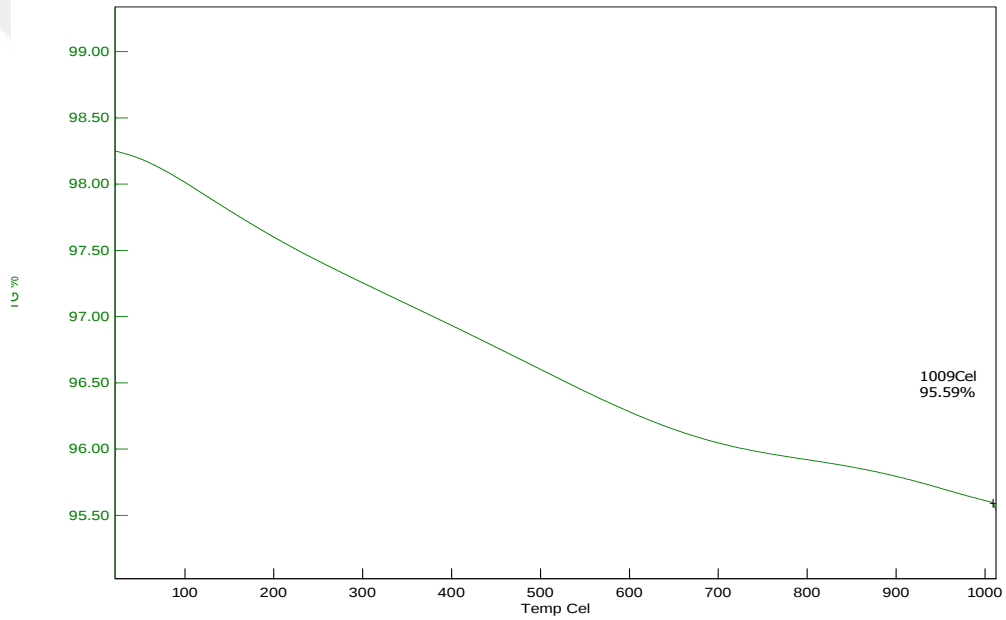
Çizelge 5.1’de EDS analizlerine ait nicel değerler gösterilmektedir. EDS analizleri incelendiğinde 4 numunede de sadece karbon elementi gözlenmiştir. Numunelerde başka herhangi bir elemente rastlanılmamış olması akış plakaların grafit yapıda olduğunu doğrulamakta ve safsızlıkların düzgün bir şekilde uzaklaştırıldığını göstermektedir.

Çizelge 5.1. Numunelere ait EDS analizleri nicel sonuçları.

Numune	Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)	Net Int.	Hata (%)
1	C	100	100	367.94	1.89
2	C	100	100	561.93	1.70
3	C	100	100	496.48	1.76
4	C	100	100	710.05	1.61

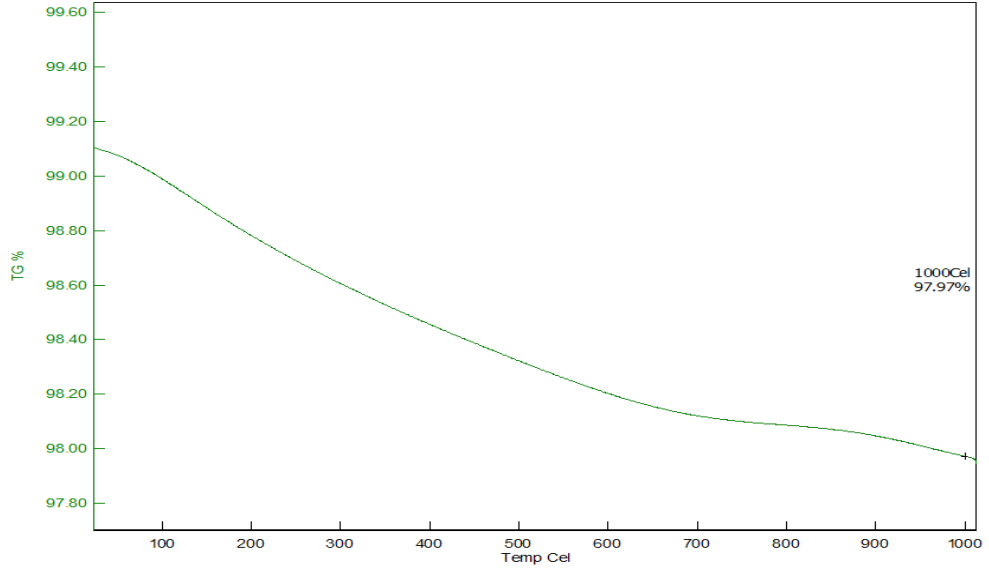
5.3. TGA Analizi

Bir numunenin sıcaklığa bağılı olarak kütlesindeki değişimi ortaya koyan analiz yöntemidir. Numunedeki su kaybı, termal bozunma ya da kimyasal tepkimeler neticesinde kütle değişimleri gözlenerek sıcaklığa bağılı kütle değişim grafikleri yardımıyla numunenin kararlılığı hakkında bilgi edinilmektedir. Bu tez çalışmasında TGA analizleri 30-1000 [°C] arasında azot ortamında dakikada 10 [°C] sıcaklık artışı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6, 1 numaralı numunenin TGA analiz sonuçlarını göstermektedir. Numunede kütle değeri başlangıçta % 98.25 civarlarındayken kademeli olarak uygulanan sıcaklık neticesinde 1000 [°C]'de % 95.59'luk değere inmiştir. İki sıcaklık arasında % 2.66'lık bir kütle farkı olduğu gözlenmiştir.



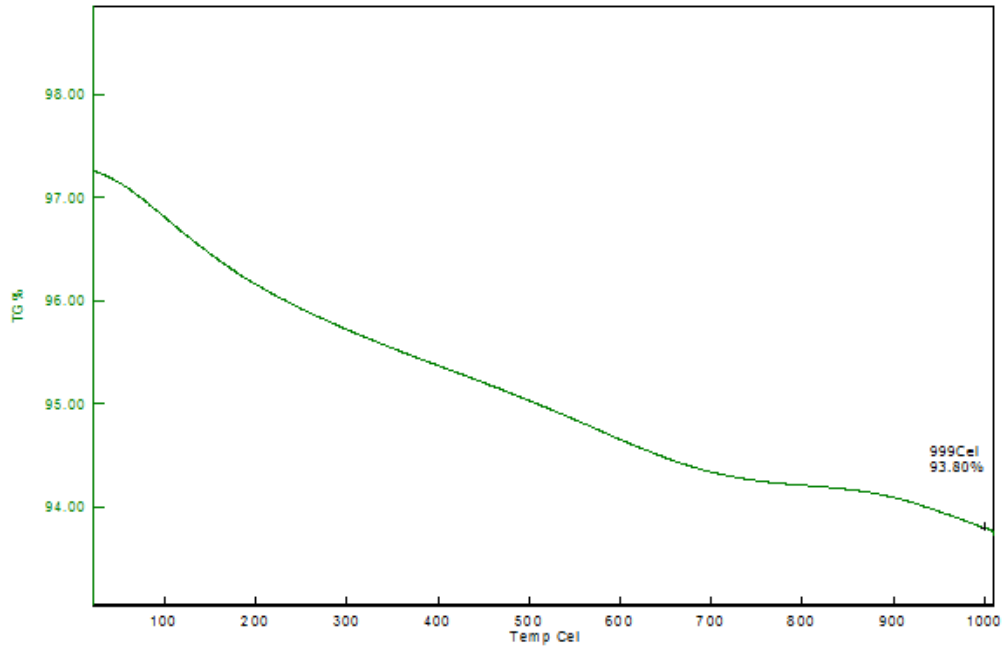
Şekil 5.6. 1 numaralı numunenin TGA analizi.

2 numaralı numunenin TGA analiz sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde, numunenin başlangıç kütle değeri % 99.10 olarak gözlenmektedir. 1000 [°C]'de ise % 97.97 değerine inmiştir. Aradaki kütle farkı % 1.13'tür.



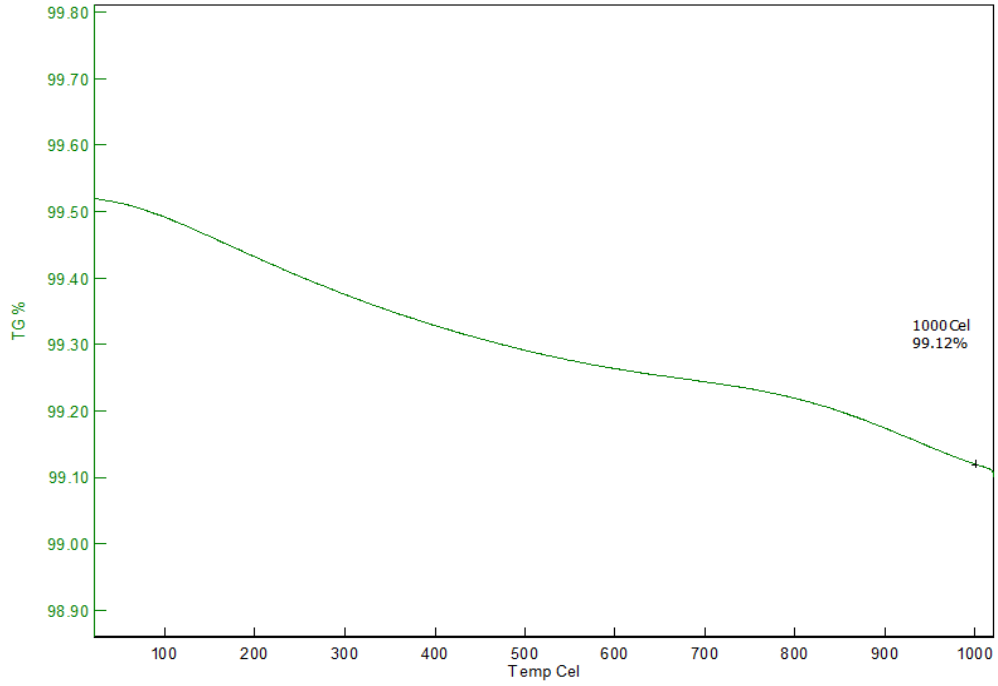
Şekil 5.7. 2 numaralı numunenin TGA analizi.

3 numaralı numunenin TGA analiz grafiği Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Numunenin kütle değerleri başlangıçta % 97.20 iken 1000 [°C]’de % 93.80’dir. Numunedeki kütle kaybı % 4.40 olmaktadır.



Şekil 5.8. 3 numaralı numunenin TGA analizi.

4 numaralı numunenin TGA analiz grafiği Şekil 5.9’da verilmiştir. Başlangıçta numunenin kütle değeri % 99.52 değerindedir. 1000 [°C]’de ise kütle değeri % 99.12 olmaktadır. Kütle kaybı % 0.40 olmaktadır.



Şekil 5.9. 4 numaralı numunenin TGA analizi.

Numunelere ait kütle kayıpları Çizelge 5.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Numunelere ait kütle kayıpları.

Numune	1. Kütle değeri (%)	2. Kütle değeri (%)	Kütle kaybı (%)
1	98.25	95.59	2.66
2	99.10	97.97	1.13
3	97.20	93.80	4.40
4	99.52	99.12	0.40

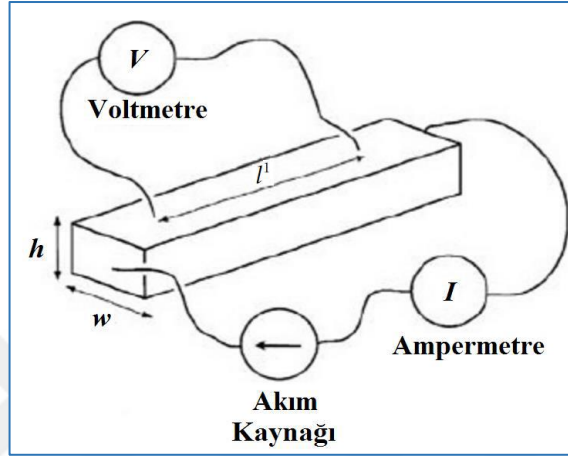
Çizelge 5.2 incelendiğinde en fazla kütle kaybının 3 numaralı numunede gerçekleştiği en az kütle kaybının ise 4 numaralı numunede gerçekleştiği görülmektedir.

5.4. Akış Plakaların Elektriksel İletkenlik Hesabı

Malzemelerin elektrik akımına karşı gösterdiği zorluk elektriksel direnç olarak tanımlanmakta olup bir malzemenin elektriksel iletkenliği (σ), öz direncinin (ρ) tersine eşittir ve Denklem 5.1 ile ifade edilmektedir [44].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5.1)$$

Bu tez çalışmasında, akış plakalarının öz direnç ölçümleri dört nokta tekniğinden yararlanılarak hesaplanmıştır. Bu teknikte, Şekil 5.10’da görüldüğü gibi, malzemeye iki uçtan sabit akım verilerek bir voltmetre yardımıyla malzeme üzerinde gerilim ölçümü yapılmaktadır [44].



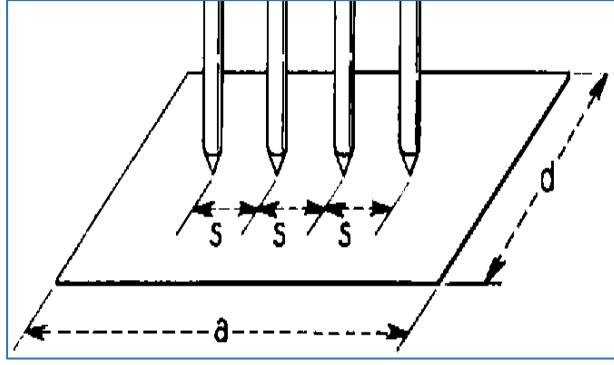
Şekil 5.10. Dört nokta ölçme tekniği [44].

Malzemenin öz direnci Denklem 5.2 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho = \frac{Vwh}{Il'} \quad (5.2)$$

Denklem 5.2’de V, ölçülen gerilim değeri [V], w genişlik [m], h yükseklik [m], I akım değerini [A] ve l’ voltmetre probaları arasındaki uzunluğu [m] göstermektedir.

Malzemelerin tabaka direnci ölçümü için Şekil 5.11’de gösterilen düzenek kullanılmaktadır. Bu ölçüm tekniğinde proplar arası mesafeler (s) eşit olacak şekilde seçilmektedir [45].



Şekil 5.11. Dört nokta prob yöntemi tabaka direnci ölçümü [45].

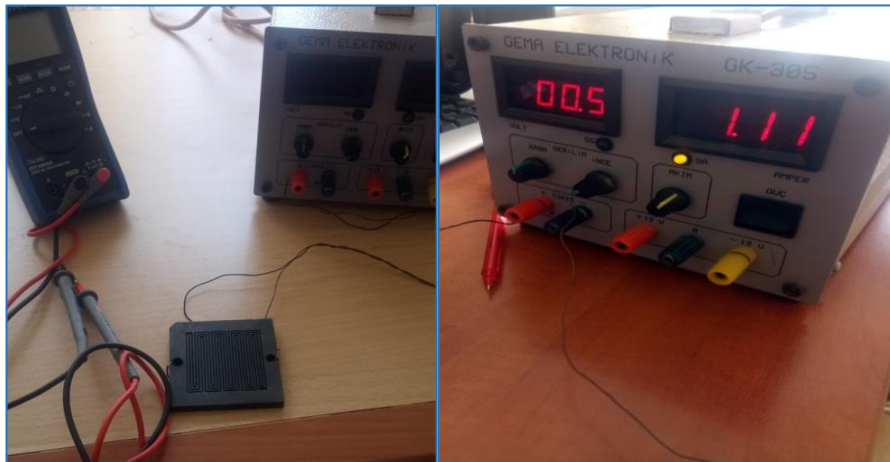
Bu durumda tabaka öz direnci Denklem 5.3 ile verilmektedir [45].

$$\rho_s = \frac{V d}{I s} C' \quad (5.3)$$

Denklem 5.3’de, ρ_s [Ω cm] tabaka öz direncini, d tabaka uzunluğunu, C' düzeltme faktörünü göstermektedir. C' düzeltme faktörü d/s oranına göre Smits (1957) tarafından hazırlanmış tablolardan yararlanılarak bulunmaktadır [45]. Hacimsel öz direnç (ρ) ise Denklem 5.4 ile ifade edilmektedir [45].

$$\rho = \rho_s \omega \quad (5.4)$$

Bu tez çalışmasında kullanılan deney düzeneği Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Devrede farklı değerlerde sabit akım uygulanarak plaka üzerinde gerilim değerleri ölçülmüştür. Plaka boyutları (7 [cm] x 7 [cm] x 0.6 [cm]) şeklindedir.



(a)

(b)

Şekil 5.12. Öz direnç ölçümü için deney düzeneği.



(c)

(d)

Şekil 5.12 (devam). Özdirenç ölçümü için deney düzeneği.

Şekil 5.12’de (a, b, c ve d) sırasıyla kullanılan devre düzeneğini, devreye akım sağlayan akım kaynağını, plaka üzerinde gerilim ölçümünü ve gerilim ölçmek için kullanılan multimetreyi göstermektedir.

Numunelere uygulanan 300 [mA] ve 500 [mA] akım değerleri için ölçülen gerilim değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Numunelerin akım – gerilim ölçüm sonuçları.

I [mA]	V [mV]			
	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune
300	0.3	0.3	0.3	0.3
500	0.4	0.4	0.4	0.4

Çizelge 5.3’de görüldüğü gibi 300 [mA] akım uygulandığında tüm numunelerde 0.3 [mV] gerilim değeri ölçülmüştür. Akım değeri 500 [mA] olarak uygulandığında ise tüm numunelerde gerilim değeri 0.4 [mV] olarak ölçülmüştür.

Ölçüm sonuçları kullanılarak plakaların elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır. Proplar arası uzaklık (s) 2.33 [cm] olarak alınmış olup d/s oranı 3 olmaktadır. C' ise 0,8192'dir.

Tüm numuneler için hesaplanan elektriksel iletkenlik değerleri Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Numunelerin elektriksel iletkenliği.

Numune	Elektriksel iletkenlik [$S\ cm^{-1}$]	
	300 [mA]	500 [mA]
1	678.17	847.71
2	678.17	847.71
3	678.17	847.71
4	678.17	847.71

Numunelerin elektriksel iletkenlik değeri Çizelge 5.4'de görüldüğü gibi 300 [mA] akım için 678.17 [$S\ cm^{-1}$] ve 500 [mA] akım değeri için 847.71 [$S\ cm^{-1}$] olarak hesaplanmıştır. Her iki değer de literatürle uyumludur [42, 46].

Grafitin kristal yapısı, altıgen şeklinde grafen tabakalardan oluşmaktadır. Yapıdaki her karbon atomu, tabakada diğer üç atomla kovalent bağ yapmaktadır. Bir karbon atomunun en dış yörüngesinde dört valans elektronu bulunur. Bu elektronlardan üçü kovalent bağda kullanılırken bir elektron serbest kalarak elektronlar sayesinde grafit elektriksel iletkenlik kazanmaktadır [47]. Tez çalışmasında numunelerin elektriksel iletkenliklerinin oldukça yüksek olduğu ve akış plakaları için gerekli elektriksel iletkenliği sağladığı gözlenmiştir.

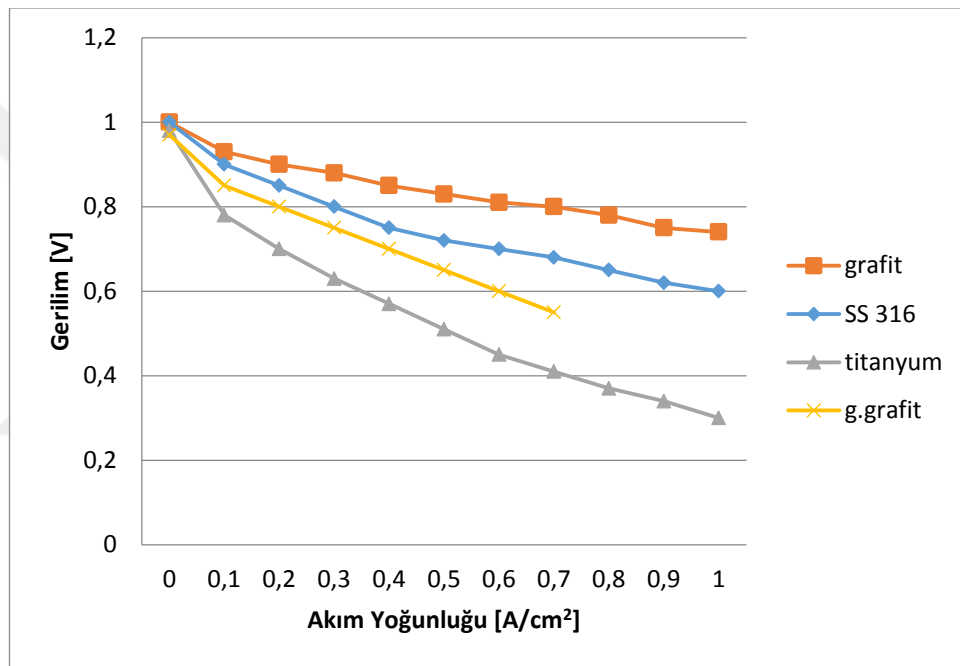
5.5. Farklı Malzemelerin Yakıt Hücresi Performansı

Akış plakaları malzemeleri ile ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Fakat malzemelerin hiçbiri yakıt hücresi için gerekli tüm şartları sağlamamaktadır.

Grafit, kararlı, düşük özgül yoğunluk, yüksek elektrik iletkenlik ve yüksek korozyon direncine sahip olmasına karşın, işlenmesi pahalıdır ve kalın üretilmek zorundadır [32]

Metaller mükemmel iletkenliğe sahiplerdir fakat korozyon dirençleri düşük olup kaplama yapılması gerekmektedir. Kompozitler ise yüksek korozyon direncine sahip olmalarına karşın elektrik iletkenlikleri düşüktür [32].

Şekil 5.12 farklı çalışmalardan alınmış grafit ve diğer malzemelerin akım ve gerilim grafiğini göstermektedir [46, 48, 49].



Şekil 5.13. Farklı malzemelerin I-V grafiği.

Şekil 5.13 incelendiğinde en az gerilim düşümünün grafitte olduğu gözlenmiştir. Hücre performansı en iyi olan grafittir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, PEM yakıt hücresi bileşenlerinden biri olan, grafit akış plakalarının malzeme özellikleri farklı parametrelerle incelenmiştir. Akış plakaları PEM yakıt hücresinde önemli bileşenlerden biridir. Yakıtın ve oksidanın katalizör tabakaya iletilmesi, su yönetimi ve üretilen akımın toplanmasında etkilidir.

Numunelerin yüzey morfolojisi için SEM görüntüleri elde edilmiştir. SEM analizi sonucunda grafit plakaların grafen tabakaları gözlenmiştir. EDS analizi plakalarda sadece karbon elementinin bulunduğunu göstermektedir. Plakalarda başka element bulunmaması safsızlık elementlerinin başarılı bir şekilde uzaklaştırıldığını göstermektedir.

TGA analizi sonucunda en yüksek kütle kaybı % 4.40 ile 3 numaralı numunede gözlenmiştir. Numunelerin TGA grafiğinde keskin kütle kaybı gözlenmemiştir ve tüm numunelerde kütle kaybı oldukça küçüktür. Bu durum kütle kaybının numunelerdeki nem kaybından ileri geldiği şeklinde yorumlanmaktadır. Dolayısıyla numune kimyasal açıdan oldukça kararlıdır.

Numunelerin elektriksel iletkenlikleri 300 [mA] akım değeri için 678 [$S\ cm^{-1}$], 500 [mA] akım değeri için 814 [$S\ cm^{-1}$] olarak hesaplanmıştır. Her iki ölçüm sonucunda elde edilen değerler PEM yakıt hücresinde kullanılan akış plakaları için gerekli elektriksel iletkenliği sağlamaktadır. Akış plakalarında farklı akış kanallarının işlenmesinin akış plakalarının malzeme özelliklerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı gözlenmiştir.

İleride bu tez çalışmasının, PEM yakıt hücresi performansını iyileştirmek amacıyla akış plakası malzemesi ile ilgili çalışmalarda nanoteknolojik gelişmeler eşliğinde model oluşturabilecek bir çalışma olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Özdemir S.N., 2019. PEM tipi yakıt hücrelerinde gaz akış kanalı içerisindeki engelleyici blokların hücre performansına etkisinin sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
2. Dinçer İ., Eroğlu İ. ve Öztürk M., 2021. Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritası raporu, URL Adres: <https://www.hidrojenteknolojileri.org> Erişim tarihi:22.12.2022.
3. Meral P., 2019. PEM tipi yakıt hücrelerinde tasarım ve işletme parametrelerinin hücre performansına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
4. Fan L., Tu Z. ve Chan S.H., 2021. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review, Energy Reports, 7, 8421-8446.
5. Zhang Y., Tau Y. ve Shao J., 2021. Application of porous materials for the flow field in polymer electrolyte membrane fuel cells, Journal of Power Sources 492, 229664.
6. Hossain S., Abdalla A.M., Suhaili S.B.H., Kamal, I., Shalk S.B.S., Dawood M.K. ve Azad, A.K., 2020. Nanostructured graphene material utilization in fuel cells and batteries: A review, Journal of Energy Storage, 29, 101386.
7. Taner T., 2019. Comparison of commercial design with innovative design PEM fuel cells, 5th Conference on Advances in Mechanical Engineering, Istanbul, Bildiri kitabı, 299-304.
8. Lee H.S., Kim H.J., Kim S.G. ve Ahn S.H., 2007. Evaluation of graphite composite bipolar plate for PEM (proton exchange membrane) fuel cell: Electrical, mechanical, and molding properties, Journal of Materials Processing Technology 187–188, 425–428.
9. Saadat N., Dhakal H.N., Jaffer S., Tjong J., Yang W., Tan J. ve Sain M., 2021. Expanded and nano-structured carbon acetous graphite for high performance an isotropic fuel cell polymer composites, Composites Science and Technology, 207, 108654.
10. Iqbal M.Z., Siddique S., Khan A., Haider S.S. ve Khalid M., 2020. Recent developments in graphene based novel structures for efficient and durable fuel cells, Materials Research Bulletin 122, 110674.
11. Li X. Ve Sabir I., 2005. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs, International Journal of Hydrogen Energy, 30, 359-371.
12. Manso A.P., Marzo F.F., Barranco J., Garikano X. ve Garmendia Mujika M., 2012. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review, International Journal of Hydrogen Energy, 37, 15256-15287.

13. Simaafrookhteh S., Khorshidian M. ve Momenifar M., 2020. Fabrication of multi-filler thermoset-based composite bipolar plates for PEMFCs applications: Molding defects and properties characterizations, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 14119-14132.
14. Chen Q., Zhang G., Zhang X., Sun C., Jiao K. ve Wang Y., 2021. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of cooling methods, material properties, and durability, *Applied Energy*, 286, 116496.
15. Dhadad H.A., Alawee W.H. ve Hassan A.K., 2019. Experimental study of the effect of flow field design to PEM fuel cells performance, *Renewable Energy Focus*, 30, 71-77.
16. Çelik S., Timurkutluk B., Aydın U. ve Yağız M., 2022. Development of titanium bipolar plates fabricated by additive manufacturing for PEM fuel cells in electric vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 89, 37956-37966.
17. Liu X., Zhang R., Zhang C. ve Yang D., 2022. Hydrophobic modification of flow channel surface and its effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 29430-29440.
18. İçingür Y. ve Kireç L., 2011. Bir polimer elektrolit membran yakıt pilinde kullanılmak üzere gaz akış plakaları tasarımı ve denenmesi, *Politeknik Dergisi*, 14, 1, 31-37.
19. Taner T., 2019. A flow channel with nafion membrane material design of PEM fuel cell. *Journal of Thermal Engineering*, 5, 5, 456-468.
20. Kahraman H., 2016. Akış kanal tasarımının polimer elektrolit membran yakıt hücresi performansına etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
21. Kloess J.P., Wang X., Liu J., Shi Z. ve Guessous L., 2009. Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton Exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 188, 132-140.
22. Taherian R., Ghorbani M.M. ve Kiahosseini S.R., 2018. A new method for optimal fabrication of carbon composite paper as gas diffusion layer used in proton exchange membrane of fuel cells, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 815, 90-97.
23. Küpeli 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.
24. Kaplan B. Y., 2017. Gas diffusion electrodes based on carbon and graphene for pem fuel cell, *Sabancı Üniversitesi, Doktora Tezi*, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

25. Özdemir B., 2012. Serpantin kanallı pem yakıt hücresinin sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. URL-1 <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>> Erişim Tarihi:28.12.2022.
27. URL-2 <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/6_70.html> Erişim Tarihi: 28.12.2022.
28. URL-3 <https://docplayer.biz.tr/5009881-Yakit-pilleri-hazirlayan-doc-dr-huseyin-bulgurcu-mayis-2013-kaynak-http-www-hidronerji-com-tr-olay-yakit_pili.html> Erişim Tarihi: 28.12.2022.
29. Wang X.D., Duan Y.Y., Yan V.M. ve Peng F.X., 2008. Effects of flow channel geometry on cell performance for PEM fuel cells with paralel and interdigitated flow fields, *Electrochimica Acta*, 53, 5334-5343.
30. Avcıoğlu G., Fıçıcılar B., Bayrakçeken A. ve Eroğlu İ., 2015. High performance PEM fuel cell catalys tlayers with hydrophobic channels, *International Journol of Hydrogen Energy*, 40, 7720-7731.
31. Karanfil G., 2020. Proton değişim membran yakıt hücreleri: termodinamiği, bileşenleri ve uygulama alanları, *Mühendis ve Makine*, 61, 698, 57-76.
32. Liu Q., Lan F., Zeng C., Chen J. ve Wang J., 2022. A review of proton exchange membrane fuel cell's bipolar plate design and fabrication process, *Journal of Power Sources*, 538, 212543.
33. Dündar F., 2011. Topaklaşma ve karbon korozyonu sorunlarının giderilmesi amacıyla özgün yapıda katalizör sentezi ve yakıt hücresi çalışma koşullarının geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
34. Park S., Lee J.W. ve Popov B.N., 2012. A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 5850-5865.
35. Luo B., Hu M., Li F. ve Cao G., 2010. A novel material fabrication method for the PEM fuel cell bipolar plate, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 2643-2647.
36. Barbir F., 2005. Pem fuel cell: theory and practice, Fıst Edition, Elsevier Academic Pres, London, England.
37. Wilberforce T. El-Hassan Z., Khatib F.N., Makky A.A., Mooney J., Barouaji A., Carton J.G. ve Olabi A.G., 2017. Development of Bi-polar plate design of PEM fuel cell using CFD techniques, *International Journol of Hydrogen Energy*, 42, 25663-25685.

38. Çelik S., 2018. Akış kanalı tasarımının PEM yakıt pili performansına etkilerinin incelenmesi, ÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7,1, 407-416.
39. Hamilton P.J. and Pollet B.G., 2010. Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) flow field plate: design, materials and characterization, Fuel Cells 10, 4, 489–509.
40. Baykara T., 2016. Nanoteknolojiler Dünyasına Doğru, 1. Baskı, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
41. Song Y., Zhang C., Yu Ling C., Han M., Yuan Yong R., Sun D. ve Chen J., 2020. Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, 45, 29832-29847.
42. Cunningham B.D. Huang J. ve Baird D.G., 2007. Review of materials and processing methods used in the production of bipolar plates for fuel cells, International Materials Reviews, 52, 1, 1-13.
43. URL-4 <<https://www.kuark.org/2017/04/taramali-elektron-mikroskobu-sem-eds-analizi/>> Erişim Tarihi: 28.12.2022.
44. URL-5 < <https://docplayer.biz.tr/38783324-Dort-nokta-teknigi-ile-elektriksel-iletkenlik-olcumu-deneyi-foyu.html>> Erişim Tarihi: 28.12.2022.
45. Smits F.M., 1958. Measurement the of Sheet Resistivities Four-Point Probe, The Bell System Technical Journal, 37, 711-718.
46. Yuan X.Z., Wang H., Zhang J. ve Wilkinson D.P., 2005. Bipolar plates for PEM fuel cells - from materials to processing, Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 8, 4, 257-267.
47. URL-6< <https://www.grafitelektrot.com/karakteristikler-ve-ozellikleri/>> Erişim Tarihi: 28.12.2022.
48. Wang S.H., Peng J. ve Lui W.B., 2006. Surface modification and development of titanium bipolar plates for PEM fuel cells, Journal of Power Sources, 160, 485-489.
49. Yan X., Hou M., Zhang H., Jing F., Ming P. ve Yi B., 2006. Performance of PEMFC stack using expanded graphite bipolar plates, Journal of Power Sources, 160, 252-257.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Leyla EROĞLU

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Gazi Üniversitesi, Fizik Eğitimi Bölümü, 1994-1998

Yüksek Lisans :

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, Öğretim Görevlisi.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Eroğlu L., Taner T. ve Dalkılıç A.S., 2021. Investigation of the effect of flow channel design on pem fuel cell voltage, 6th International Conference on Advances in Mechanical Engineering, İstanbul, Bildiri Kitabı, 1555.
2. Eroğlu L. ve Taner T., 2022. Application of the material properties of graphite flow plates: a case of the different flow channel design, 3. Uluslararası Anadolu Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Kayseri, Bildiri Kitabı, 3. Cilt, 204-209.