KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT PİLİ KAPATMA (SON PLAKA) PLAKASININ PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BÜŞRA YILGIN

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT PİLİ KAPATMA (SON PLAKA) PLAKASININ PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BÜŞRA YILGIN

Prof. Dr. Cenk ÇELİK		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Fatma Gül BOYACI SAN		
Eş Danışman,	**TÜBİTAK - MAM**	**.....**
Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Erman ASLAN		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Gökhan COŞKUN		
Jüri Üyesi,	**Sakarya Üniversitesi**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.07.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler .....tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)
.....
Büşra YILGIN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi' ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dahilinde bana ait olacaktır.
Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.
Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyettarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılmasımezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
(İmza)
.....
Büşra YILGIN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde verimli ve temiz enerji kaynakları ihtiyacı giderek artmakta ve bu bağlamda yakıt pili teknolojisinin geliştirilmesi ve ticari olarak yaygınlaştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple henüz tam olarak ticarileşmemiş olan yakıt pili teknolojisinin geliştirilmesi için yüksek hücre performansı, düşük maliyet, uzun ömür gibi kriterlerin sağlanmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışma kapsamında, yakıt pili kapatma (son plaka) plakasının hücre performansına etki eden parametreleri incelenmiştir. Son plakadaki hücre performansına etki eden her bir kriter mümkün olduğunca deneysel verilerden elde edilen değerlere göre incelenmiş, teorik bilgiler uygulamaya dökülerek gelecekteki çalışmalara rehber niteliği kazandırılmıştır.

Yüksek lisans eğitim sürecimin tamamında yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren, bilgisinden ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Cenk ÇELİK'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın deney kısmı, ülkemizde yakıt pili teknolojisinin gelişmesine katkısı olan TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Bu duruma imkan sağlayarak bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsünde Başuzman Araştırmacı olarak görev yapan, değerli Eş Danışmanım Doç. Dr. Fatma Gül BOYACI SAN'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmalarımın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, beni yönlendiren değerli arkadaşım Y.Mak.Müh. Anıl Can TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitim süresince desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Şeyma YILMAZ, Huzaifa Adam HARAMEEN, Ömer YILDIRIM ve İpek ÇAĞLAYAN'a teşekkür ederim.

Çalışma arkadaşlarım Pelin AKMAN POLAT, Tuğçe YAVUZ, Cennet ÖZTÜRK ve Yeşim AKAY ERDEM'e manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen, mutluluğum ve geleceğim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmadan beni en iyi şekilde yetiştiren aileme, sonsuz sevgi ve saygılarımı sunar; en içten duygularla teşekkür ederim.

Son olarak bana yüksek lisans yapma imkânı sağlayan, destek ve tavsiyeleriyle daima yanımda olan ve yolumu aydınlatan kıymetli amirlerime teşekkür ederim.

Mayıs - 2023 Büşra YILGIN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 3
2.1. Yakıt Pili 3
2.2. Yakıt Pili Tarihçesi 3
2.3. Yakıt Pillerinin Yapısı 7
2.3.1. Yakıt İşleme (Besleme) Ünitesi 8
2.3.2. Güç Üretim Sistemi 8
2.3.3. Güç Dönüştürücü Sistemi 8
2.3.4. Kontrol Sistemi 8
2.4. Yakıt Pillerinin Çalışma Prensibi 9
2.5. Yakıt Pillerinin Özellikleri ve Önemi 10
2.6. Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları 11
2.7. Yakıt Pillerinin Çeşitleri 12
2.7.1. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEMYP) 13
2.7.2. Alkali Yakıt Pili (AYP) 15
2.7.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP) 17
2.7.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP) 19
2.7.5. Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) 21
2.7.6. Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP) 23
2.8. Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları 25
3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI 27
4. PROTON DEĞİŞİM MEMBRAN YAKIT PİLLERİNİN YAPISI 39
4.1. PEM Yakıt Pili Elemanları 39
4.1.1. Elektrolit/Membran 40
4.1.2. Elektrotlar (Katalizör) 41
4.1.3. Bipolar/Gaz Akış Plakaları 42
4.1.4. Gaz Difüzyon Tabakaları (GDL) 42
4.1.5. Son (Kapatma) Plakaları 43
4.1.6. Akım Toplayıcı Plakalar 43
4.1.7. Contalar 44
4.2. PEM Yakıt Pilinin Termodinamik Açıdan İncelenmesi 45
4.2.1. Sıcaklığın Etkisi 47
4.2.2. Basıncın Etkisi 48
4.2.3. Yakıt Pili Verimliliği 49
4.2.4. Yakıt Pili Kayıpları 52
4.2.4.1. Aktivasyon Kayıpları 52
4.2.4.2. Direnç (Omik) Kayıpları 54

4.2.4.3. Konsantrasyon Kayıpları…..……..…55
5. MATERYAL VE YÖNTEM 56
5.1.Mekanik Sıkıştırma Deney Düzeneği 56
5.1.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....58
5.1.1.1.Kapatma Plakası Malzemeleri……..……59
5.1.1.1.1.Delrin (POM)…….....60
5.1.1.1.2.Alüminyum……...61
5.1.1.1.3.Paslanmaz Çelik……63
5.1.1.2.Akım Toplayıcı Plaka……...64
5.1.1.3.Basınç Ölçüm Filmleri……..65
5.1.1.4.Cıvatalar……65
5.1.1.5.Torkmetre…….66
5.1.2.Yakıt Hücresinde Homojen Basınç için Optimum Koşulların Belirlenmesi……..….....66
5.2.Test Sistemi.....74
5.2.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi.....81
5.2.2. Deney Parametrelerinin Analizi 82
5.2.3. Yakıt Pili Optimum Koşulların Belirlenmesi 83
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 87
6.1.Test Hücresi Parametrelerinin Akım Yoğunluğuna Etkisi 87
6.2.Test Hücresi Parametrelerinin Güç Yoğunluğuna Etkisi.....91
6.3.Test Hücresi Parametrelerinin Dirence Etkisi 94
7. TEZİN ÖZGÜNLÜĞÜ 98
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 100
KAYNAKLAR 102
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 107
ÖZGEÇMİŞ 108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. William Grove'un 1839 yılındaki gaz bataryası ve 1842 yılındaki gaz zinciri 4
Şekil 2.2. Bacon'un hidrojen- oksijen yakıt hücresi yığını 6
Şekil 2.3. Apollo uzay aracının 1,5 kW yakıt hücresi yığını 6
Şekil 2.4. Yakıt pili sisteminin genel yapısı ve elemanları 8
Şekil 2.5. Yakıt pilinin şematik gösterimi 9
Şekil 2.6. Geleneksel teknoloji ve yakıt pillerinde enerji dönüşümü 10
Şekil 2.7. PEM yakıt pilinin çalışma prensibi 13
Şekil 2.8. Alkali yakıt pilinin çalışma prensibi 15
Şekil 2.9. Fosforik asit yakıt pilinin çalışma prensibi 17
Şekil 2.10. Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma prensibi 20
Şekil 2.11. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi 21
Şekil 2.12. Doğrudan metanol yakıt pilinin çalışma prensibi 23
Şekil 2.13. Yakıt pili reaksiyon ve süreçlerinin özeti 24
Şekil 4.1. PEM tipi yakıt hücresi bileşenleri 39
Şekil 4.2. Elektrot iç yapısı 42
Şekil 4.3. Yakıt pili ve Carnot çevrimi verimlerinin sıcaklıkla değişimi 51
Şekil 4.4. Yakıt hücresinde potansiyel kayıplar ve polarizasyon eğrisi 52
Şekil 5.1. Deney düzeneğinde kullanılan PEM yakıt hücresinde sıkma torku ve cıvata yerleşimi 57
Şekil 5.2. Kapatma plakalarının CAD modeli 58
Şekil 5.3. Delrin kapatma plakasının işlenmesi 58
Şekil 5.4. Delrin kapatma plakasına ait cıvata yerleşimleri 61
Şekil 5.5. Alüminyum kapatma plakasına ait cıvata yerleşimleri 62
Şekil 5.6. Paslanmaz çelik kapatma plakasına ait cıvata yerleşimleri 63
Şekil 5.7. Akım toplayıcı plaka 64
Şekil 5.8. Basınç ölçüm filmleri 65
Şekil 5.9. Basınç ölçüm filmlerinin görünüşü 69
Şekil 5.10. Basınç ölçüm filmlerinin analizi 70
Şekil 5.11. YCY'ye göre basınçlı kağıt sıkıştırma oranının 3B görünümü 73
Şekil 5.12. Test hücresi 74
Şekil 5.13. Test Sistemi 76
Şekil 5.14. Test Sistemi şematik gösterimi 78
Şekil 5.15. PEM yakıt piline ait elektriksel eşdeğer devre modeli 82
Şekil 5.16. Yakıt pili polarizasyon eğrisi 85
Şekil 6.1. YCY'ye göre akım yoğunluğunun 3B görünümü 89
Şekil 6.2. YCY'ye göre güç yoğunluğunun 3B görünümü 93
Şekil 6.3. YCY'ye göre direncin 3B görünümü 96

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. 298 K ve 0.1 MPa basınç altında verilen entalpi ve entropi oluşum değerleri 46
Tablo 5.1. Delrin malzemelerin mekanik özellikleri 60
Tablo 5.2. Alüminyum malzemelerin mekanik özellikleri 62
Tablo 5.3. Paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özellikleri 63
Tablo 5.4. Kapatma plakası malzemelerinin karşılaştırılması…….64
Tablo 5.5. Optimizasyon deney koşulları ve deney sonuçları 68
Tablo 5.6. İstatistik değerler 71
Tablo 5.7. Test hücresi bileşenleri ve materyal özellikleri 75
Tablo 5.8. Optimizasyon deney koşulları ve deney sonuçları 83
Tablo 5.9. Yakıt Pili Test Sistemi'nden alınan veriler…….85
Tablo 6.1. Akım yoğunluğu için istatistiksel değerler ……..87
Tablo 6.2. Akım yoğunluğu varyans analiz sonucu 88
Tablo 6.3. Güç yoğunluğu için istatistiksel değerler …….....91
Tablo 6.4. Güç yoğunluğu varyans analiz sonucu..... 92
Tablo 6.3. Direnç için istatistiksel değerler ……..……..…95
Tablo 6.4. Direnç varyans analiz sonucu……..... 95

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
A	: Amper
°C	: Celcius (sıcaklık birimi)
CO	: Karbonmonoksit
CO_2	: Karbondioksit
CO_3	: Karbonat
e	: Elektron
H_2	: Hidrojen
H_2O	: Su
O_2	: Oksijen
V	: Volt
W	: Watt
Ω	: Ohm

Kısaltmalar

AYP	: Alkali Yakıt Pili
BBP	: Bipolar Plaka
DMYP	: Doğrudan Metanol Yakıt Pili
EKYP	: Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili
FAYP	: Fosforik Asit Yakıt Pili
GDL	: Gaz Difüzyon Tabakası
KOYP	: Katı Oksit Yakıt Pili
MEA	: Membran Elektrot Ünitesi
PEMYP	: Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili
YCY	: Yüzey Cevap Yöntemi

YAKIT PİLİ KAPATMA (SON PLAKA) PLAKASININ PERFORMANS ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez kapsamında yakıt hücresi kapatma plakasının hücre performansına etkileyen parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, 50 cm^2 aktif alana sahip tek hücreli proton değişim membranlı (PEM) yakıt pil modülü kullanılmış ve hücre performansını etkileyen parametreleri incelemek amacıyla mekanik sıkıştırma deneyleri ve yakıt pili performans testleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik sıkıştırma deneyinde, yakıt piline ait kapatma plakası üç farklı malzemeden (delrin, alüminyum, paslanmaz çelik) imal edilerek tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan kapatma plakalarına, farklı cıvata konfigürasyonlarında (4a, 8a, 8b) sıkma torkunun farklı kombinasyonları (1 Nm, 5 Nm ve 9 Nm) uygulanarak yakıt pili performansları incelenmiştir. Deneysel parametreleri optimize etmek amacıyla Yüzey Cevap Yöntemi (YCY) uygulanmış, giriş parametreleri olarak plaka malzemesi, tork ve cıvata kombinasyonu seçilmiştir.
Yapılan çalışmada, paslanmaz çelik kapatma plakasına 8b cıvata yerleşimindeyken maksimum tork uygulandığında hücreye homojen basınç uygulandığı gözlemlenmiştir. Deneyin ikinci aşamasında ise mekanik sıkıştırma deneyinde en iyi performans gösteren test hücresinin montajı yapılmış ve bu test hücresinin hücre performansına etki eden parametreleri (çalışma sıcaklığı, akış hızı ve tork etkisi) YCY'ye göre incelenmiştir. Bu analize göre incelenen aralıkta, hücre sıcaklığının ve katot akışın hücre performansına etkisinin oldukça fazla, tork etkisinin ise yok denecek kadar az olduğu gözlenmiştir. Test hücresinde sıkıştırma torku parametresinin direnç üzerinde etkisinin olmaması ise ilk aşamadaki mekanik sıkıştırma deneylerinden elde edilen tasarım sonuçlarının, ikinci aşamadaki performans testlerinde kullanılmasının sonucudur. Bu durum mekanik sıkıştırma deneyleri sonucunda başarılı bir tasarımın seçildiğinin göstergesidir. Sonuçlar, parametrelerin optimize edilmesinin uygun performansa sahip kapatma plakası tasarımına yol açacağını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kapatma Plakası, Optimizasyon, Yakıt Pili, Yüzey Cevap Yöntemi.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FUEL CELL END (CLOSURE PLATE) PLATE ON PERFORMANCE

ABSTRACT

In this thesis, the parameters affecting the cell performance of the fuel cell end plate were investigated experimentally. In the experimental studies, a single cell proton exchange membrane (PEM) fuel cell module with 50 cm^2 active area was used and mechanical compression experiments and fuel cell performance tests were carried out to examine the parameters affecting the cell performance. In the mechanical compression experiment, the end plate of the fuel cell was designed by manufactured from three different materials (delrin, aluminum, stainless steel). In addition, fuel cell performances were investigated by applying different combinations of clamping torque (1 Nm, 5 Nm and 9 Nm) to the designed end plates in different bolt configurations (4a, 8a, 8b). In order to optimize the experimental parameters, Surface Response Method (RSM) was applied and plate material, torque and bolt combination were selected as input parameters.
In the study, it was observed that a homogeneous pressure was applied to the cell when maximum torque was applied to the stainless steel end plate when the 8b bolt was used. In the second stage of the experiment, the test cell with the best performance in the mechanical compression experiment was assembled and the parameters affecting the cell performance (operating temperature, flow rate and torque effect) of this test cell were investigated according to RSM. According to this analys is in the range examined, it was observed that the effect of cell temperature and cathode flow on cell performance was quite high, while the effect of torque is negligible. The fact that the clamping torque parameter has no effect on the resistance in the test cell is the result of using the design results obtained from the mechanical compression experiments in the first stage in the performance tests in the second stage. This is an indication that a successful design has been selected as a result of mechanical compression tests. The results reveal that optimizing the parameters will lead to a end plate design with proper performance.

Keywords: End Plate, Optimization, Fuel Cell, Response Surface Methodology.

1. GİRİŞ

Enerji, insanoğlunun temel ihtiyaçlarını karşılamada gereksinim duyduğu önemli bir unsurdur. Bu nedenle, ülkelerin toplumsal refahı ve sürdürülebilir kalkınmayı sağlaması için enerji ihtiyacını karşılaması gerekir. Buna karşın dünyadaki enerji ihtiyacı; nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojik ilerleme gibi faktörlere bağlı olarak her geçen gün artmakta ve artan enerji talebinin karşılanmasında fosil yakıt rezervleri yetersiz kalmaktadır. 2016 yılında yapılan araştırmalar, birincil enerji tüketiminin %86'sının petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlı yenilenemez enerji kaynaklarından oluştuğunu ve bu kaynak rezervlerinin sırasıyla petrol 51 yıl, doğal gaz 53 yıl, kömür 114 yıl boyunca enerji tüketimini karşılayabilecek kapasitede olduğunu göstermiştir (Kaya ve diğ., 2018).

Fosil yakıtların gelecekte tükenme olasılığının yanı sıra bu yakıtların yanması sonucu meydana gelen kükürt oksit (SO_x), karbon dioksit (CO_2), azot oksit (NO_x) ve partikül emisyonları atmosfere yayılarak çevre kirliliğine yol açmakta ve bu durum ekosistemi tehdit etmektedir. Ayrıca, açığa çıkan CO_2 gibi sera gazları iklim değişikliğini etkileyerek yer kürenin aşırı ısınmasıyla birlikte doğal afetleri de beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu sorunlar, enerji ihtiyacını karşılamak için temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi zorunlu kılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları genel olarak güneş, rüzgar, dalga, jeotermal, biyokütle, hidrojen, hidrolik ve füzyon enerjisi şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bu kaynaklar içerisinde en yaygın olarak kullanılan ise güneş ve rüzgar enerjisidir (Çukurçayır ve diğ., 2008).

Yenilenebilir enerji kaynakları; toplumların enerji ihtiyacını yerli kaynaklarla karşılayarak dışa bağımlılığı azaltması, ekosisteme daha az zarar vermesi, sınırsız kaynaklardan enerji üretmesi gibi avantajlara sahiptir. Ancak doğal kaynakların kullanılmasında doğanın o anki koşullarından etkilenmesi (değişen hava olayları, iklim gibi) ve coğrafi sınırlamalarının olması yenilenebilir enerji kaynaklarının dezavantajı olarak sıralanmaktadır. Doğal bir enerji kaynağı olmayan hidrojen ise, doğada bol bulunması, üretim yönteminin çeşitli olması, yanma veriminin yüksek olması, sıvı halde kolayca depolanabilir olması ve yakıt olarak kullanılması durumunda sadece su buharının açığa çıkması gibi özelliklere sahip olmasından dolayı gelecek vaad eden önemli bir

enerji kaynağıdır. Aslında hidrojen birincil enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır (Özdemir ve diğ., 2019). Bu sebeple son yüzyılın enerji kaynağı olarak adlandırılan hidrojen enerjisi, yakıt pillerinde yanma çevrimi olmadan elektrik üreten sürdürülebilir bir enerji sistemidir.

Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin kimyasal tepkimesi sonucunda elde edilen enerjiyi doğrudan yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar; temiz, sessiz, güvenli ve yüksek verimli çalışması gibi avantajlarından dolayı gelecekte ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir kısmını karşılayacağı ön görülmektedir. Ancak bu cihazların günümüzde yaygın olarak kullanılabilmesi için öncelikle yakıt hücresinin kompleks yapısının çözülmesi gerekmektedir.

Yakıt pili hücresi içerisinde; elektrokimyasal reaksiyon, yük taşıma, ısı transferi ve çok fazlı akış gibi birçok fonksiyonun aynı anda gerçekleşmesi, yakıt pili yapısının karmaşık bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Yakıt pili verimliliğini ve hücre ömrünü artırmak için bu fonksiyonlara bağlı olarak yakıt hücresinin her bir bileşeni üzerinde çeşitli analiz ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır.

Bu tez kapsamında genel olarak yakıt pillerinden bahsedilmiş ve yakıt pili kapatma (son plaka) plakasının hücre performansına etki eden parametreleri incelenmiştir. Deneysel parametreleri optimize etmek amacıyla Yüzey Cevap Yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen veriler ise birbirleriyle ve literatürde var olan çalışmalarla kıyaslanarak hücre performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

En genel tanımıyla yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin elektrokimyasal reaksiyonu sonucu açığa çıkan enerjiyi doğrudan yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yakıt pilleri ihtiyaç anında elektrik üretim cihazı olarak kullanılmaktadır, bir enerji depolama cihazı değildir.

2.1.Yakıt Pili

Dünya nüfusunun artışı, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerle birlikte enerji tüketimi her geçen gün artmaktadır. Gerekli enerji ihtiyacının karşılanmasında ise fosil yakıtların kullanılması ile ilgili günümüzde birçok sorun karşımıza çıkmaktadır. Bunlar; fosil yakıt rezervlerinin yetersiz olması, bu rezervlerden yakıtların çıkarılmasının maliyetli olması ve bu yakıtların yanması sonucunda çevreye zararlı gazların yayılması olarak sıralanabilir. Dolayısıyla bu problemleri çözmek için temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırma ihtiyacı ortaya çıkmış ve bu araştırmalar neticesinde yakıt pili teknolojisinin bu sorunları çözebileceği keşfedilmiştir.

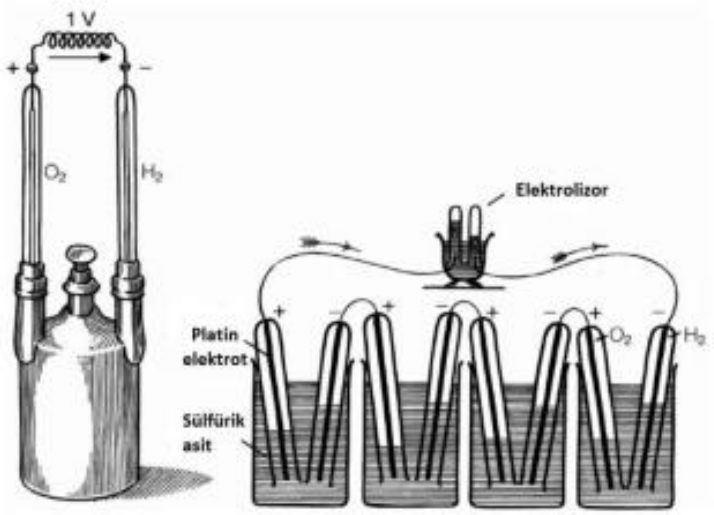
Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin kimyasal tepkimesi sonucunda elde edilen enerjiyi doğrudan yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Gerekli reaktanlar beslendiği sürece kesintisiz elektrik üretebilme kapasitesine sahip olan bu cihazlar; temiz, sessiz, güvenli ve yüksek verimli çalışması gibi avantajlarından dolayı gelecekte ihtiyaç duyulan enerjinin önemli bir kısmını karşılaması beklenmektedir.

2.2.Yakıt Pili Tarihçesi

Yakıt pilleri yüksek teknoloji görünümüne sahip olduğundan ilk bakışta yeni bir teknoloji zannedilmektedir, ancak yakıt pilinin bilinen tarihi 18. yüzyılın sonlarına dayanmaktadır. 19. Yüzyıl başlarında yakıt pili gelip geçici bir heves olarak değerlendirilmesine rağmen yakıt hücresi çalışmaları, özellikle II. Dünya Savaşı'ndan günümüze kadar geçen sürede önemini korumuş ve çalışmalara devam edilmiştir (Bıyıkoğlu, 2003)

Yakıt pili, 1838 yılında Alman bilim insanı Christian Friedrich Schönbein tarafından keşfedilmiş ve bu buluş "Philosophical Magazine" dergisinin Ocak 1839 baskısında yayımlanmıştır. Bu bilimsel dergide yayınlanan çalışmayı temel alan Galli bilim adamı

William Robert Grove ise 1839 yılında bir dergide ilk yakıt hücresini tanıtmıştır. Bundan 3 yıl sonra ise aynı dergide yakıt pili tasarımını yayınlamıştır. Grove, seyreltik sülfürik asit ve platin elektrotlar kullanarak; hidrojen ve oksijen gazları arasında elektrokimyasal bir reaksiyon gerçekleştirmiş ve bu tepkime sonucunda akım ortaya çıkmıştır. Daha sonra elektrokimyasal hücreleri seri bağlayarak daha yüksek akım değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca Grove, suyun elektroliz tepkimesinin ters reaksiyonu sonucunda sabit akım ve gücün üretilebileceğini keşfetmiştir. Son olarak Grove, günümüzde kullanılan fosforik asitli yakıt pili malzemelerine benzer malzemeler kullanarak yakıt hücresini geliştirmiştir. Şekil 2.1'de 1839 yılına ait Grove'un yaklaşık 1 V'lik gerilim ürettiği 'gaz bataryası' ve 1842 yılına ait Grove'un birkaç elektrodu devreye seri bağlayarak üretilen ve elektrolize güç veren gaz zinciri gösterilmektedir (Köroğlu, 2019).



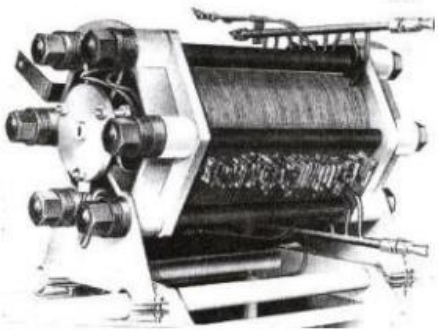
Şekil 2.1. William Grove'un 1839 yılındaki gaz bataryası ve 1842 yılındaki gaz zinciri (Köroğlu, 2019)

Ayrıca, William Grove yakıt pili performansını etkileyen en önemli faktörlerden birinin yakıt pilinin elektrokimyasal olarak aktif yüzey alanına bağlı olduğunu literatüre kazandırmıştır. Bu çalışmalardan esinlenen Ludwig Mond ve Charles Langer, yakıt hücresini ilk kez terim olarak 1889 yılında ortaya koymuş ve elektrotların yapımında gözenekli malzemeleri kullanmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda 0.73 V potansiyelde 20 mA/m^2 akım yoğunluğu ve güç üretimi 1,5 W olan bir yakıt hücresi elde etmişlerdir. 1893 yılında Friedrich Wilhelm Ostwald, yakıt pili hücresinin çalışma prensibinin anlaşılması için yakıt pilinin her bir elemanını incelemiştir. 1894 yılında ise kömür türevi fosil

yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır. Ayrıca Ostwald yakıt pillerini, yaygın teknoloji olan içten yanmalı motorlarla kıyaslamış ve yakıt pillerinin düşük emisyonlu ve daha yüksek verimliliğe sahip olduğunu vurgulamıştır. Walther Hermann Nernst o dönemdeki mevcut literatürde, zirkonyumu katı elektrolit olarak tanıtmıştır. 1896 yılında elektrik mühendisi ve kimyager olan William W. Jacques karbon elektrot kullanılması üzerine bir araştırma yapmış ve o zamanki koşullarda karbonun kömür yakıtlı sistemlerden çok daha verimli olduğunu bulmuştur. Jacques'in yapmış olduğu bu çalışma, alkali yakıt pillerinin temelini oluşturmuştur. Bununla birlikte, karbonun pahalı olması ve onu yeniden üretmenin zorluğu nedeniyle çalışmalarında çok ilerleyememiş ve daha sonra kömürün elektrokimyasal enerjisinden elektrik elde etmeyi amaçlamıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda 100 tübüler ünite içeren bir yığın ile 1.5 kW'lık yüksek güçlü bir yakıt hücresi elde etmiştir. 1937 yılında ise İsviçreli Emil Baur, farklı tiplerdeki yakıt pilleri üzerine araştırmalar yapmış ve Nerst'in yapmış olduğu katı oksit elektrolit ile çalışan yakıt hücresi tasarımını geliştirmiştir. Bununla birlikte, ilk erimiş karbonat yakıt pili sistemini tasarlayarak çalışmalarında kullanmıştır (Ulaş, 2021).

Yakıt pillerini günümüzdeki konuma gelmesini sağlayan çalışma, Thomas Bacon tarafından 1939 yılında tasarlanmıştır. Alkali yakıt pil olarak tasarlanan bu çalışma, NASA programında kullanılmıştır. 1932 yılında Francis Thomas Bacon, alkali yakıt pillerini araştırmış, ayrıca Mond ve Langer'ın yapmış olduğu yakıt pili tasarımının geliştirilmesi üzerine birçok çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, aşındırma etkisi yüksek olan asidik çözeltiler yerine potasyum hidroksit (alkali elektrolit) kullanmıştır. Ayrıca, nikel gözenekli gaz difüzyon elektrotlarını kullanarak 3000 psi'ye kadar basınç altında çalışan bir yakıt hücresi yapmıştır. 1959 yılında ise Bacon, ilk alkali yakıt hücresi olan Bacon hücresinin patentini almıştır. 1960 yılında % 60 enerji verimliliğe sahip olan 5 kW'lık güç üreten ve 40 hücreden oluşan bir yakıt hücresi yığınını üretmiştir. Bu çalışması ile kaynak makinesini ve elektrikli testereyi çalıştırmayı başarmıştır. Ayrıca Bacon yaptığı çalışmalarda, yüksek çalışma sıcaklığı ve yüksek gaz basıncını kullanmıştır. Bu durum hacimsel olarak yakıt hücresinin fazla yer kaplamasına, ağır bir tasarım olmasına ve maliyet açısından yüksek olmasına neden olmuştur. Ancak Bacon hücresi, büyük ilgi görmüş ve uçak motoru üreticisi olan Pratt&Whithey firmasının ilgisini çekmeyi başarmıştır. Bu firma, Bacon hücresine, Apollo uzay gemisinde kullanılması amacıyla

lisans vermiştir. Bacon ayrıca forklift ve uzay araçları için de çalışmalar yürütmüştür Şekil 2.2'de Bacon'un yapmış olduğu hidrojen-oksijen yakıt hücresi yığını gösterilmektedir (Köroğlu, 2019).



Şekil 2.2. Bacon'un hidrojen-oksijen yakıt hücresi yığını (Köroğlu, 2019)

1960 yılında ise Harry Karl Ihring, birçok hücreyi bir araya getirerek yakıt hücresi yığını oluşturmuş, 20 beygir gücündeki traktörü çalıştırmayı başarmış ve bu durum yakıt pilinin ticarileşmesine zemin hazırlamıştır. (Köroğlu, 2019).



Şekil.2.3. Apollo uzay aracının 1,5 kW yakıt hücresi yığını (Köroğlu, 2019)

1958 yılında yakıt pilleri, ilk kez NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde kullanılmıştır. Apollo gemisinde Şekil 2.3'teki P&W yakıt hücresi kullanılmıştır. 1960'lı yılların başlarında ise NASA, endüstriyel firmalarla işbirliği içerisinde çalışmalarına devam etmiş ve bu kapsamda P&W ile United Technology Corporation (UTC Power) şirketleri birleşmiştir. Bu şirketler alkali yakıt hücresinin verimliliğini artırmak maksadıyla hücre tasarımını geliştirmişler ve hücrede hava yerine saf oksijen kullanmışlardır. Daha sonra, geliştirdikleri hücre tasarımında

kullanılan alkali elektrolitin havadaki karbondioksit kontaminasyonunu önlediğini gözlemlemişlerdir. Bu tasarım, 1970'li yıllardan günümüze kadar NASA tarafından uzay mekiklerinde kullanılmıştır (Köroğlu, 2019).

Allis Chalmers, asbest içine gömülü platin ve potasyum hidroksit ile kaplı hidrojen oksijen beslemeli bipolar gözenekli elektrotlardan oluşan yakıt hücresi tasarlamış ve bu yakıt pili ile 15 kW güç elde ederek, bir traktöre entegre etmiştir.

1970'li yıllarda General Motor, "Elektrovan" adlı 160 kW'lık alkalin yakıt hücresi ile çalışan bir minibüs yapmıştır. Bununla birlikte aynı yıllarda, yakıt hücresi araştırmaları yapılması amacıyla devlet desteği ile Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarları kurulmuştur. Ayrıca, Siemens tarafından denizaltılarda kullanılmak üzere alkali yakıt pilleri tasarlanmış ve ticarileşmiştir.

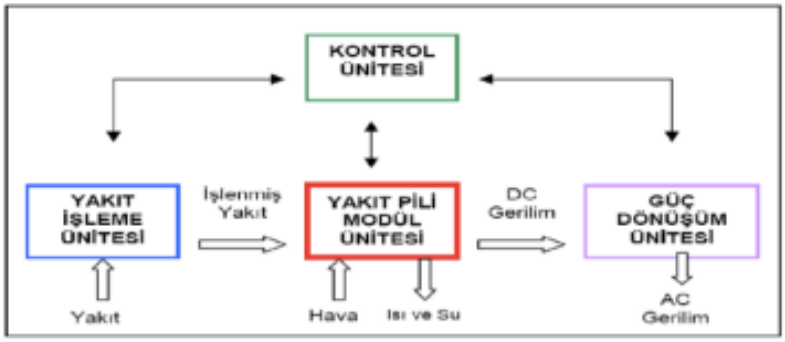
Daha sonraki yıllarda yakıt pillerinin kalbi olarak nitelendirilen membranlar konusunda önemli gelişmeler gerçekleşmiş ve Dupont firması tarafından Nafion membran yakıt pillerinde kullanılmak üzere üretilmiştir. Nafion membran; proton iletimindeki verimlilik, mekanik kararlılık gibi özelliklere sahip olmasından dolayı günümüzde dahi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

21. yüzyılda dünya çapında tanınmış otomobil üreticileri (Honda, Hyundai, Peugeot, Toyota, Mitsubishi, Ford vb.) yakıt hücresi teknolojisini araçlara entegre etmek amacıyla yoğun çalışmalar yapmış ve bu amaçla yakıt hücreleri ile çalışan birçok prototip aracı tanıtmışlardır (Ulaş, 2021).

Günümüzde ise yakıt pili maliyetlerinin düşürülmesi, verimliliğin artırılması ve kullanım alanlarının yaygınlaştırılması için çalışmalar devam etmektedir.

2.3.Yakıt Pillerinin Yapısı

Yakıt pili sistemi temel olarak dört ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler, yakıt besleme (işleme) ünitesi, güç üretim ünitesi (yakıt hücresi montaj modülü), güç dönüştürme ünitesi ve kontrol ünitesi olarak bilinmektedir (Bilen ve diğ., 2022).



Şekil.2.4. Yakıt pili sisteminin genel yapısı ve elemanları (Bilen ve diğ., 2022)

2.3.1.Yakıt İşleme (Besleme) Ünitesi

Yakıtın, yakıt piline beslenmeden önce hazırlandığı, eğer direkt olarak hidrojen kullanılmıyorsa, kullanılan yakıttan hidrojenin ayrıştırıldığı, saflaştırıldığı ve nihayetinde kullanıma hazır hale getirilerek kullanım için gönderildiği birim olarak adlandırılır. Yani bu birim, yakıt beslemesinin gerçekleştirildiği birimdir ve dolaylı besleme durumunda üç farklı işlemin yürütüldüğü ünite olarak adlandırılabilir (İlkılıç ve diğ., 2017).

2.3.2.Güç Üretim Sistemi

Bir veya birden fazla yakıt hücresi yığınının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Sistemde güç üretiminin gerçekleştirildiği ünitedir (Bilen ve diğ., 2022).

2.3.3.Güç Dönüştürücü Sistemi

Yakıt pilinde üretilen doğru akımı, ticari kullanım için alternatif akıma çeviren ünite güç dönüştürücü ünite olarak bilinmektedir (İlkılıç ve diğ., 2017).

2.3.4.Kontrol Sistemi

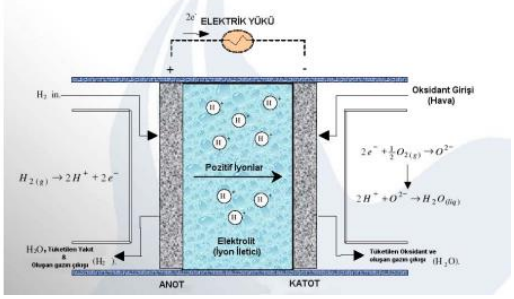
Tüm sistemin çalışması kontrol sistemi tarafından izlenir ve kontrol edilmektedir. Bu bağlamda yakıt pili sıcaklık kontrolü, yakıt/hava debi kontrolü, voltaj/akım çıkış kontrolü, atık ısı- atık su kontrolü, soğutucu akışkan kontrolü gibi temel faktörler özellikle kontrol edilir. (Bilen ve diğ., 2022).

2.4.Yakıt Pillerinin Çalışma Prensibi

En basit haliyle bir yakıt pili; iki elektrodun arasında bir tane elektrolit bulunan bir elektrokimyasal cihazdır. Elektrotlardan biri eksi kutuplu anot, diğeri ise artı kutuplu katottur ve bu elektrotlar yüksek gaz geçirgenliğine sahip gözenekli yapıdan oluşmaktadır. Elektrolit ise bu iki kutbu birbirinden ayıran, iyon geçişlerine izin veren ve yalıtkan malzemeden oluşan bir membrandır. Tipik bir yakıt pilinde, hidrojen yakıt olarak anot taraftan yakıt piline beslenirken, oksijen ise katot taraftan beslenir. Her iki tarafta da elektrokatalitik reaksiyonlar gerçekleşir ve tepkime sonucunda su ve ısı açığa çıkar (Yılmaz, 2006). Katalizör ise reaksiyonları hızlandırmak için kullanılır.

Anottan beslenen hidrojen, anot katalizör yardımıyla protonlarına ayrılır. Hidrojen içinde bulunan elektron hidrojenden ayrılır ve geriye sadece hidrojen protonu kalır (Ulaş, 2021). Serbest kalan elektron katot tarafına elektrolitin içerisinden geçemediğinden iletilemez. Diğer hidrojen iyonu yani proton ise iyon geçirgen (iletken) membrandan geçerek katot tarafına taşınır (Köroğlu, 2019). Böylece, katot tarafta oksijen ile hidrojen protonu birleşir ve su açığa çıkar. Ayrıca bu reaksiyon sırasında ısı açığa çıkmasından dolayı ekzotermik tepkimedir (Ulaş, 2021). Anotta serbest kalan elektronlar ise bir dış devreden iletilir ve elektronun hareketi elektrik akımının meydana gelmesini sağlar; böylece elektrik üretilir. Eğer yakıt hücresinde; yakıt olarak saf hidrojen, oksidan olarak da oksijen kullanılmışsa, bu elektrokimyasal reaksiyonda yan ürün olarak sadece saf su ve ısı elde edilir. (Yılmaz, 2006).

Söz konusu işlemin şematik gösterimi Şekil 2.5'te gösterilirken, ilintili reaksiyonlara ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3)'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Yakıt pilinin şematik gösterimi (Çavuşoğlu, 2006)

Anot: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ (2.1)

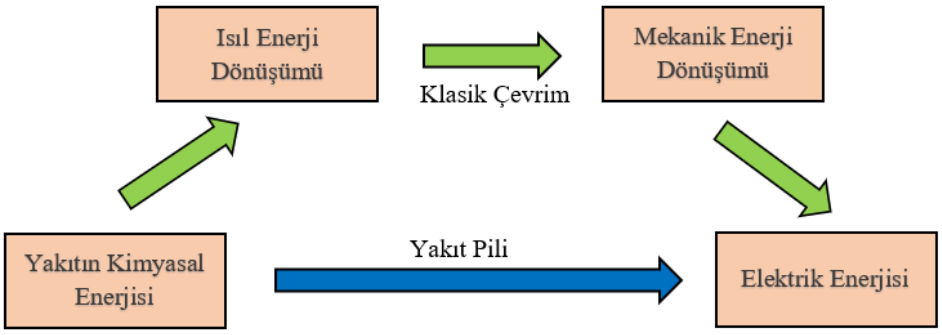
Katot: $O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ (2.2)

Toplam: $H2 + ½\, O_2 \rightarrow H_2O$ (2.3)

Yukarıda verilen reaksiyonlar elektrolit çeşidine göre farklı ara basamak içerebilir. İlerleyen bölümlerde bu ara reaksiyonlara yer verilecektir, ancak en genel haliyle yakıt pili içindeki ana süreci tanımlayan reaksiyonlar yukarıdaki gibidir.

2.5.Yakıt Pillerinin Özellikleri ve Önemi

Enerji üretim sistemlerinde enerji elde etmenin 3 aşaması bulunmaktadır. İlk aşamada yakıtın yanması sonucunda ısı enerjisi üretilir. İkinci aşamada, bu ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Son aşamada ise mekanik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elektrik enerjisi elde edilirken kademeler arası enerjinin birbirine dönüştürülmesi sırasında her bir aşamada enerji kaybı gerçekleşmektedir. Yakıt pillerinde ise kimyasal enerji direkt olarak elektrik enerjisine çevrildiği için enerji verimi diğer enerji sistemlere oranla daha yüksektir.



Şekil 2.6. Geleneksel teknoloji ve yakıt pillerinde enerji dönüşümü

Bu enerji dönüşümü sırasında ısı enerjisinden elektrik enerji eldesi sırasındaki verim %35-40 civarındayken, yakıt pillerindeki verim %70'e kadar çıkabilir. (Yılmaz, 2006). Bu sebeple, enerji ihtiyacı karşılamada yakıt pilinin verimli enerji dönüşümü sağlaması, yakıt pilinin araştırılmasına ve geliştirilmesine büyük oranda katkı sağlamıştır.

Yakıt pillerinde; alternatif enerji kaynakları, fosil yakıtlar veya kimyasal ürünler tarafından elde edilen hidrojenin doğrudan veya dolaylı olarak yakıt için kullanılması ve oksijenin ise oksitleyici olarak kullanılması durumunda yan ürün olarak sadece saf su açığa çıkmaktadır. Saf hidrojenin yakıt olarak kullanılması durumunda zehirli gaz emisyonu gözlenmemekte (saf su açığa çıkar), hidrojenin yakıt olarak kullanılmadığı durumlarda ise geleneksel enerji sistemlerine göre daha düşük zararlı gaz emisyonuna rastlanmaktadır. Yakıt pillerinin emisyonlarının düşük olması yani çevre dostu olması, bu sistemi geleneksel enerji sistemlerine kıyasla avantajlı hale getirmiştir (Yılmaz, 2006).

Aynı zamanda yakıt pilleri, elektrokimyasal bir tepkime sonucu elektrik üretmeleri bakımından pil veya akülerle benzerlik göstermektedir. Ancak aküler veya piller, kendi içerisinde depo ettiği enerjiyi elektrokimyasal bir reaksiyon ile elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Yakıt pili sistemini akülerden farklı kılan en temel özellik ise güç üretimi için yakıt pilinin herhangi bir şarja ihtiyaç duymamasıdır. Yakıt pillerinde gerekli yakıt ve oksitleyici beslendiği müddetçe, bu piller kesintisiz elektrik üretebilme kapasitesine sahip olan cihazlardır. Bu sebeple, yakıt pilleri bir bataryaya kıyasla da tercih edilmektedir (Kılıç, 2017).

2.6.Yakıt Pillerinin Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt pillerinin çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Aydın, 2007).

Avantajları;

- Hareketli aksam içermemesi sebebiyle servis süresi azdır, sürekli bir gözetleme gerektirmez,
- Genellikle sabit sıcaklıkta çalışırlar, yüksek sıcaklıkta çalışanlar ise kojenerasyon uygulama alanları için kullanılır,
- Her türlü sıcak ve soğuk ortamda kullanılabilir,
- Arzu edilen kapasitede üretilebilir,
- Yakıt esnekliğine sahiptir,
- Enerji dönüşümü verimlidir,
- Zararlı gaz emisyonu azdır,
- Sessiz çalışır,

- Kısmi yüklemelerde yüksek verim sağlar,
- Hızlı çalışma avantajına sahiptir,
- Düşük bakım ihtiyacı gerektirir,
- Yerleştirme kolaylığı vardır,
- Güvenli sistemdir,
- Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.

Dezavantajları ise;

- Erişilebilirliği sınırlıdır,
- Oldukça pahalı sistemdir,
- Karmaşık bir yapıda çalışır,
- Gaz akışındaki safsızlıklar hücre ömrünü kısaltır,
- Düşük dayanıklılığa sahiptir,
- Hacim başına düşen güç yoğunluğu düşüktür.

2.7.Yakıt Pillerinin Çeşitleri

Yakıt pilleri yakıtın dolaylı yoldan veya doğrudan beslenmesi, yakıt ve oksitleyicinin bileşimi, kullanılan elektrot ve elektrolit cinsi ve operasyon sıcaklığı gibi farklı kategorizelerde sınıflandırılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ise yakıt pillerinin elektrolit cinsine göre sınıflandırılmasının daha amaca yönelik olduğunu göstermiştir (Ulaş, 2021). Çünkü yakıt hücresinde kullanılan yakıtta, elektrolit malzemenin özelliğine göre sıcaklık ve performans özellikleri farklılık gösterebilir. Yakıt pili, içerdiği elektrolit tipine göre 6 çeşitten oluşmaktadır. Bunlar;

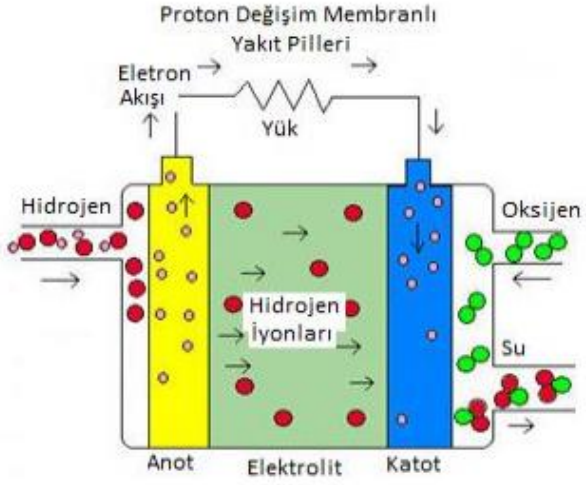
1. Proton değişim membranlı yakıt pili (PEMYP)
2. Alkali yakıt pili (AYP)
3. Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
4. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)
5. Katı oksit yakıt pili (KOYP)
6. Doğrudan metanol yakıt pili (DMYP)

2.7.1.Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)

Proton değişim membranlı yakıt pilleri, membranı polimerik malzeme kullanıldığı için polimer elektrolit yakıt pili olarak da adlandırılır. PEM yakıt pilleri 100 °C altındaki sıcaklık değerlerinde çalışma kapasitesine sahiptir ve %50 civarında elektriksel verimle çalışır (Türkmen, 2018). PEM yakıt pilleri elektrolit olarak protonları yani hidrojen iyonlarını ileten katı polimer (perflorlanmış polimer) bir membrandır. Bu pillerin elektrotları ise genellikle platin katalizör tabakasıyla kaplanmış gözenekli karbon elektrotlardır.

PEM yakıt pillerin çalışma prensibi; öncelikle yakıt olarak hidrojen beslenir ve hidrojen yakıt hücresine anot taraftan verilir. Daha sonra hidrojen, anotta yer alan platin katalizörden geçer ve burada protonlara ve elektronlara ayrışır. Bu ayrışan protonlar, polimer membrandan geçerek katoda doğru hareket eder. Geriye kalan ayrışmış elektronlar ise bir dış devreden katot tarafına aktarılır ve dış çevrimin etkisi ile elektrik akımını meydana getirir. Çünkü proton iletken membran; iyonik olarak iletken iken elektriksel anlamda yalıtkandır. Son olarak; katot katalizöre beslenen oksijen, anottan katoda gelen protonlar ve elektronlar ile bir araya gelir, tepkimeye girer ve ısı ve su açığa çıkar (Köroğlu, 2019).

PEMYP'nin çalışma prensibi Şekil 2.7'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.7. PEM yakıt pilinin çalışma prensibi (İlkılıç, 2017)

PEM yakıt pilinin reaksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6)'da verilmiştir.

$$Anot: H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \quad (2.4)$$

$$Katot: 2H^+ + ½\ O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O \quad (2.5)$$

$$Toplam: H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O \quad (2.6)$$

PEM yakıt pillerinin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

- Düşük çalışma sıcaklığına sahip olmasına rağmen yüksek verim elde etmesi
- Düşük çalışma sıcaklığına sahip olduğu için kısa sürede çalışması
- Yüksek akım yoğunluğunda sürekli çalışabilmesi
- Düşük hacim ve ağırlığa sahip olması
- Kesintili çalışmaya uygun olması
- Sessiz olması
- Elektrolitin katı olmasından dolayı sızıntı riski taşımaması
- Birim ağırlığa düşen spesifik gücün yüksek olması

Bu özelliklerinden dolayı PEM yakıt pilinin hem taşınabilir uygulamalar açısından hem de sabit güç kaynaklarının kullanımı yönünden önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde ise PEM yakıt pilleri içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilmekte ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise PEM yakıt pillerinin küçük boyutlarda uygulanabilir olmaları, düşük sıcaklıkta çalışmalarına rağmen yüksek güç üretebilme yetenekleri, yüksek verimde çalışmaları, %40-50 aralığında maksimum teorik voltaj üretebilme kapasitesi ve güç gereksinimindeki hızlı değişikliklere uyum sağlayabilme gibi otomotiv uygulamasına çözüm sunan avantajlarının olmasıdır.

Bununla birlikte PEMYP'nin dezavantajları da aşağıda listelenmiştir:

- Düşük sıcaklıkta çalışması sebebiyle kullanılan katalizörlerin (platin) maliyetinin yüksek olması
- Yakıt hücrelerinde platin katalizör kullanılmasından kaynaklı, karbon monoksitin (CO) katalizörü zehirlemesi (kullanılacak hidrojen için CO içermemesi ihtiyacı)
- Membranlar, hidrojen protonlarını aktarmak için hidrasyondan kaynaklı zarın bozulma riski

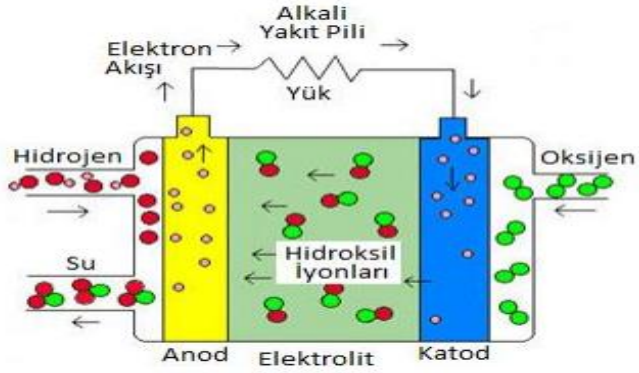
- Yakıt hücresinde nem oranı düştükçe ve çalışma sıcaklığı arttıkça, membran performansının düşmesine yol açması

2.7.2.Alkali Yakıt Pili (AYP)

Alkali yakıt hücreleri, atmosferik basınçta ortalama 80 °C çalışma sıcaklığında çalışır ve çalışma sıcaklığı belirli şartlar altında (yüksek konsantrasyonlu elektrolit) 250 °C'ye kadar yükseltilebilmektedir. Bununla birlikte, AYP'ler %50 civarında yığın verimliliğine sahiptir ve güç yoğunluğu ortalama 150 $mWcm^{-2}$ olarak bilinmektedir (Ulaş, 2021). AYP'lerde, yüksek çalışma sıcaklıklarında (250°C) ağırlıkça %85 civarında suda çözünmüş potasyum hidroksit, düşük çalışma sıcaklıklarında ise ağırlıkça %35-50 civarında suda çözünmüş potasyum hidroksit elektrolit olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bu yakıt pillerinde katalizör kullanımındaki çeşitlilik diğer yakıt pillerine göre daha fazladır (Yılmaz, 2006).

AYP'lerin çalışma prensibi; öncelikle yakıt olarak kullanılan hidrojen, yakıt hücresine anot taraftan beslenir ve oksijen beslemesi ise katot taraftan gerçekleşir. Daha sonra anot tarafında hidrojen OH^- iyonları ile tepkimeye girer. Bu tepkime sonucunda su ve elektron açığa çıkar. Tepkime sonucunda oluşan bu elektronlar, dış devreden dolaşarak katot tarafına taşınır. Katot tarafta ise oksijen elektron alır ve su ile reaksiyona girer. Bu tepkime sonucunda sonucunda ise oksijen elektrolite indirgenmiş OH^- iyonları serbest kalır. Elektrolit boyunca iyonların yapmış olduğu taşınım hareketi ile elektrik devresi tamamlanmış olur.

AYP'nin çalışma prensibi Şekil 2.8'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.8. Alkali yakıt pilinin çalışma prensibi (İlkılıç, 2017)

AYP'nin reaksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.7), (2.8) ve (2.9)'da verilmiştir.

$$Anot: H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^- \quad (2.7)$$

$$Katot: ½\ O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- \quad (2.8)$$

$$Toplam: H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O \quad (2.9)$$

AYP'nin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

- Kullanılan katalizörlerin soy metal olmaması sebebiyle üretim maliyetinin düşük olması
- Diğer yakıt pillerine göre daha yüksek elektriksel verime sahip olması
- Katot tarafında gerçekleşen oksijen indirgeme reaksiyonunun alkali ortamda daha hızlı bir kinetikle gerçekleşmesi
- Değişken ve ani yüklere kısa sürede uyum sağlaması
- Açığa çıkan suyun tüketilebilir nitelikte olması

Bu özelliklerinden dolayı AYP çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Bu uygulamalardan en önemlisi, 1960'lı yıllarda NASA tarafından Apollo uzay aracında su ve elektrik üretmek amacıyla AYP'nin kullanılmasıdır. Siemens denizaltılarda kullanılmak üzere 1970'li yıllarda 20 kW'lık bir hücre geliştirmiştir. Buna karşın AYP nakliye uygulamalarında nadiren kullanılmaktadır. Bunun en önemli sebebi, kullanılan elektrolitin sıvı olduğu için sızıntı yapması ve aşındırıcı özelliğe sahip olmasıdır (Türkmen,2018).

Bununla birlikte AYP'nin dezavantajları aşağıda listelenmiştir:

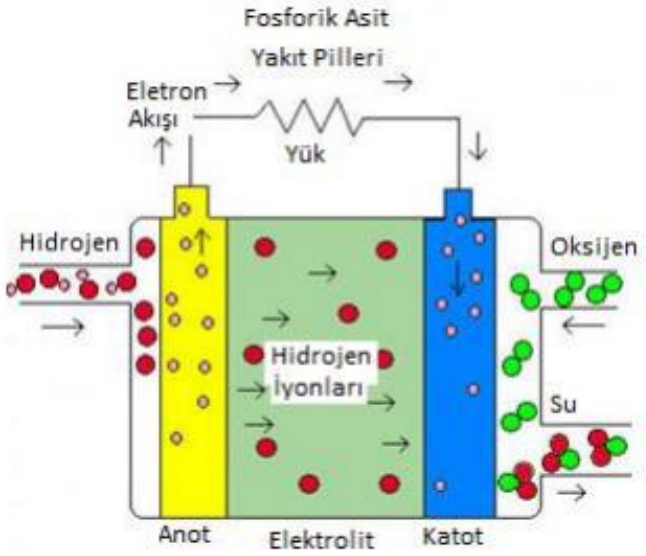
- Anot katalizörün diğer yakıt hücrelerine kıyasla daha fazla CO zehirlenmesine maruz kalması (yakıt pili performansını etkiler.)
- Karbondioksite karşı çok hassas olmaları (Havada ya da yakıtta az miktarda CO_2 olması bile hücre yapısını bozmaktadır. Karbondioksit (CO_2); potasyum hidroksit (KOH) ile reaksiyona girerek potasyum karbonat (K_2CO_3) oluşturur. K_2CO_3 ise elektrolitin yapısını değiştirerek, hücre yapısını bozmaktadır.)
- Elektrolit olarak KOH kullanılmasının yüksek maliyet getirmesi
- Kullanılan oksijen ve hidrojenin yüksek saflıkta olması gerekliliği (CO veya CO_2 zehirlemesini ortadan kaldırmak amacıyla)

2.7.3.Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)

Fosforik asit yakıt pillerinde elektrolit olarak adından da anlaşılacağı üzere derişik (%100) fosforik asit kullanılmaktadır ve yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak ise hava beslenmektedir (Ulaş,2021). Ayrıca fosforik asit yakıt pillerinde, anot ve katot kısmında platin katalizör tabakası içeren gözenekli karbon elektrot kullanılmaktadır. Elektrolit ise genellikle teflon bağlı silikon karbit (SiC) matrislerin içerisine yerleştirilmektedir (Çakanyıldırım, 2019). FAYP'ler 150 ile 210 °C aralığındaki sıcaklık değerlerinde çalışma kapasitesine sahiptir ve %45 civarında elektriksel verimle çalışır (Köroğlu, 2019).

FAYP'lerin çalışma prensibi; öncelikle yakıt olarak kullanılan hidrojen, yakıt hücresine anot taraftan beslenir ve daha sonra hidrojen, anotta bulunan katalizörden geçerek proton ve elektronlarına ayrışır. Anot katalizör tabakasındaki ayrışan bu protonlar fosforik asit elektroliti ile katot tarafına iletilirler. Katot taraftan beslenen oksijen ise hidrojenin protonları ile reaksiyona girerek suyun meydana gelmesini sağlarlar. Geriye kalan ayrışmış elektronlar ise bir dış devreden katot tarafına aktarılır ve dış çevrimin etkisi ile elektrik akımını meydana getirir.

FAYP'nin çalışma prensibi Şekil 2.9'da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.9. Fosforik asit yakıt pilinin çalışma prensibi (İlkılıç, 2017)

FAYP'nin reaksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.10), (2.11) ve (2.12)'de verilmiştir.

$$Anot: 2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad (2.10)$$

$$Katot: 4H^+ + 4e^- + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (2.11)$$

$$Toplam: 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (2.12)$$

FAYP'nin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

- Eş zamanlı olarak hem elektrik hem de ısı üretmesi
- Verimin yüksek olması
- Diğer asit türlerine göre sıcak ortamda daha kararlı olması (Bu sebeple yüksek sıcaklıkta 210 °C sıcaklıkta dahi işlevsel olarak çalışır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda elektrolitin iyon iletkenliği azalır ve CO ise platini zehirler.)
- Yakıt pilinin hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda çalışabilir olması
- Fosforik asidin elektrolit olarak kullanılmasının maliyet açısından ucuz olması
- CO hassasiyetinin az olması (yakıt %1 CO içerebilir.)
- Fosil yakıtlardaki safsızlıklara ve ayrıca karbondioksit gibi atık gazlara karşı toleranslı olması
- Isıl yönetiminin kolay olması
- Su yönetiminin kolay olması (%100 asit derişimi su buharının ve su basıncının aşırı oluşumunu önler.)
- Sistemden alınan ısının kaliteli olması

FAYP'ler modern yakıt hücrelerinin ilk nesli olarak kabul edilmektedir ve günümüzde ticari olarak kullanımı oldukça yaygındır (Kılıç, 2017). 200 kW ile 50 MW güç üretim kapasitesine sahip olan bu hücreler, ısı ve güç termodinamiklerinin %75 civarında olduğu bilinmektedir. Bu tip hücreler, sabit güç üretimi için kullanılmasının yanı sıra şehir otobüsü gibi büyük araç uygulamalarında da tercih edilmektedir.

Bununla birlikte FAYP'nin dezavantajları aşağıda listelenmiştir:

- Katot tarafta oksijen indirgenmesi yavaş olduğu için platin katalizöre ihtiyaç olması
- Anotta kullanılan platin katalizörün CO zehirlenmesine yol açarak verimi düşürmesi
- Düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 40°C) membrandan iletilen protonun yavaş olması (iyon iletkenliğinin azalması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması gerekir.)

- Düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 40°C) sıvı elektrolitin katılaşması
- Güç yoğunluğu diğer yakıt pillerine nazaran daha düşük olması (FAYPler diğer yakıt pillerine göre daha çok yer kaplar, hacimleri ve ağırlıkları daha büyük olduğu için güç yoğunluğu da daha düşüktür.)
- Fosforik asit korozif olduğundan grafit ayırıcılara ihtiyaç olması ve pahalı malzemeler kullanılması
- Fosforik asitin korozif olmasından dolayı elektrotların zamanla bozulması

2.7.4.Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)

Erimiş karbonat yakıt pillerinde elektrolit olarak alkali (potasyum, lityum, sodyum) karbonat karışımı kullanılmakta ve bu elektrolit gözenekli ve kimyasal olarak kararlı lityum alüminyum oksit ($LiAlO_2$) seramik matrisinin içerisinde tutulmaktadır. Ayrıca, yakıt olarak gazlaştırılmış biyokütle, doğalgaz, propan, biyogaz, karbon monoksit, etanol ve sentez gazı kullanılmaktadır. EKYP'ler 600 ile 700 °C aralığındaki sıcaklık değerlerinde çalışma kapasitesine sahiptir ve %60 civarında elektriksel verimle çalışırlar (Ulaş, 2021).

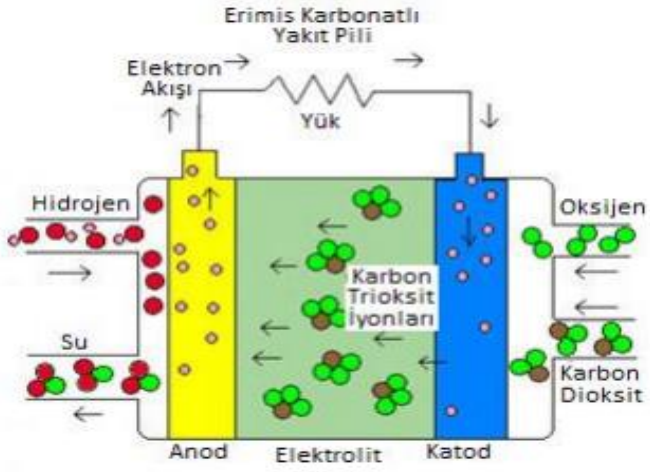
EKYP'lerin çalışma prensibi; öncelikle yakıt olarak kullanılan hidrojen, anot taraftan yakıt hücresine beslenir. Katot tarafta ise oksijen ile karbondioksit birlikte beslenir ve bu da karbonat oluşumuna neden olur. Oluşan karbonatlar iyonların iletimini sağlar ve bu iyonlar elektrolitin içinden geçerek anoda ulaşır. Daha sonra iyonlar, anotta beslenen hidrojenle reaksiyona girerler ve bu reaksiyon sonucunda su ve karbondioksit üretilir ve elektronlar açığa çıkar. Bu elektronlar, dış bir devre aracılığıyla katot tarafına taşınarak dış çevrimin etkisiyle elektrik akımını meydana getirir. Bununla birlikte, bu yakıt pili özelinde elektronların yanı sıra anotta meydana gelen karbondioksit de dış devreden iletilir (Köroğlu, 2019).

EKYP'nin çalışma prensibi Şekil 2.10'da gösterilmiş olup, EKYP'nin reaksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.13), (2.14) ve (2.15)'te verilmiştir.

$$Anot: 2H_2 + 2CO_3^{-2} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^- \quad (2.13)$$

$$Katot: 2CO_2 + O_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{-2} \quad (2.14)$$

$$Toplam: 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (2.15)$$



Şekil 2.10. Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma prensibi (İlkılıç, 2017)

EKYP'nin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir (Köroğlu, 2019):

- Yüksek sıcaklıkta çalışma kapasitesine sahip olduğundan katalizör kullanımında değerli metallere ihtiyaç duyulmaması (bu durum aynı zamanda üretim maliyetini düşürür.)
- Karbon monoksit zehirlenmelerine karşı dayanıklı olması
- Hücre içinde yakıt olarak gazlaştırılmış biyokütle, doğalgaz, propan, biyogaz, karbon monoksit, etanol ve sentez gazı vb. kullanılabildiğinden saf hidrojene ihtiyaç duyulmaması

EKYP'ler 500 kW ile 10 MW aralığında güç üretim kapasitesine sahiptir ve bu hücrelerin ise başlatma süresi oldukça uzundur. Dolayısıyla sabit uygulamalar için genellikle kullanılır (Türkmen, 2018).

Bununla birlikte EKYP'nin dezavantajları aşağıda listelenmiştir (Köroğlu, 2019):

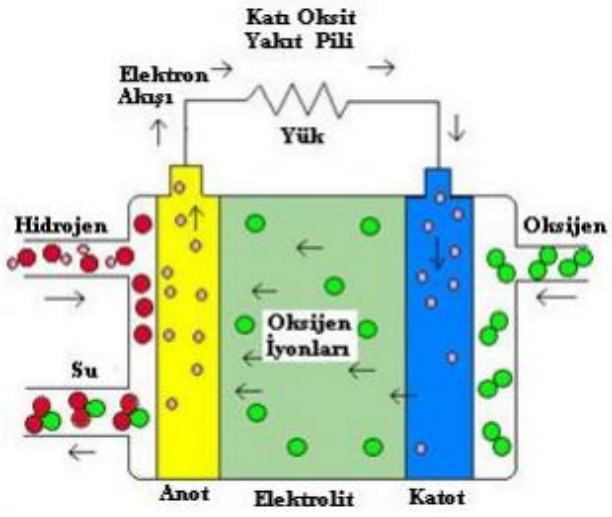
- Anot tarafta karbonat iyonlarının reaksiyona girmesi
- Katot tarafta sürekli karbondioksit beslemesine ihtiyaç duyulması
- CO_2 yönetiminin karmaşık olması
- Korozif olmasından dolayı elektrolitlerin zamanla bozulması

2.7.5.Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

Katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıklarda çalışırlar. KOYP'ler 700 ile 1000 °C aralığındaki sıcaklık değerlerinde çalışma kapasitesine sahiptir (Ulaş, 2021) ve yaklaşık %80 civarında elektriksel verimle çalışır. Bu yakıt hücrelerini opere etme sıcaklığı yüksek olduğu için hücrede kullanılan elektrolit, iyonik iletken olan seramik elektrolittir (Türkmen, 2018) (elektrolit olarak gözeneksiz metal oksitler %8-10 mol Y_2O_3 içeren ZrO_2 kullanılmaktadır). Elektrot olarak ise gözenekli gaz difüzyon elektrotları kullanılmaktadır. Anot olarak gözenekli Pt, Ni-ZrO_2 (Y_2O_3 içeren) veya Co-ZrO_2, katot olarak ise Sr yüklü $LaMnO_3$ kullanılmaktadır (Yılmaz, 2006).

KOYP'lerin çalışma prensibi; öncelikle yakıt olarak kullanılan hidrojen, yakıt hücresine anot taraftan beslenir. Katot tarafta ise oksijen beslenir ve daha sonra bu oksijen katot katalizörden geçerek proton ve elektronlarına ayrışır. Katot katalizör tabakasında ayrışan protonlar, seramik bazlı elektrolitten geçerek anot tarafına gelir ve anotta beslenen hidrojen ile tepkimeye girer. Bu tepkime sonucunda su açığa çıkar. Katotta açığa çıkan elektronlar ise bir dış devreden anot tarafa aktarılır ve bu elektronlar elektrik akımını meydana getirir.

KOYP'nin çalışma prensibi Şekil 2.11'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.11. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi (İlkılıç, 2017)

KOYP'nin reaksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.16), (2.17) ve (2.18)'de verilmiştir.

$Anot: H_2 + O^{-2} \rightarrow H_2O + 2e^-$ (2.16)

$Katot: ½ \quad O_2 + 2e^- \rightarrow O^{-2}$ (2.17)

$Toplam: H_2 + ½O_2 \rightarrow H_2O$ (2.18)

KOYP'nin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir (Köroğlu, 2019):

- Yüksek sıcaklıkta çalışma kapasitesine sahip olduğundan katalizör kullanımında değerli metallere ihtiyaç duyulmaması (bu durum aynı zamanda üretim maliyetini düşürür.)
- Yüksek çalışma sıcaklığının iç yakıt dönüştürme sistemine olanak sağlaması (çeşitli yakıtlar kullanılabilir.)
- Hücre içinde yakıt olarak metan (doğal gaz) başta olmak üzere hidrokarbon içeren yakıtları kullanılabildiğinden saf hidrojene ihtiyaç duyulmaması
- Karbon monoksite karşı duyarlı olması
- Hücre elektrolitinin katı halde seramik bir yapıda olmasından dolayı, korozyon sorununun az olması
- Gerçekleşen tepkimenin kinetiği yüksek sıcaklıkta hızlanması

KOYP'ler 1 kW ile 10 MW aralığında güç üretim kapasitesine sahiptir ve bu hücrelerin başlatma süresi oldukça uzundur. Dolayısıyla sabit uygulamalar için genellikle kullanılır. Genellikle büyük ölçekli merkezi elektrik santralleri ve sanayi uygulamalarında kullanılır. Ancak KOYP'ler, elektrik talebindeki değişimlere geç cevap vermektedir (Türkmen, 2018).

Bununla birlikte KOYP'nin dezavantajları aşağıda listelenmiştir (Köroğlu, 2019):

- Yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanabilecek özel malzemelere ihtiyaç olması
- Güç yoğunluğunun düşük olması
- Uygun çalışma sıcaklıklarına ulaşmak için geçen sürenin oldukça uzun olması (yardımcı ısıtıcılara ihtiyaç olabilir)
- Hücre ömürlerinin daha kısa olması
- Yüksek maliyetli olması

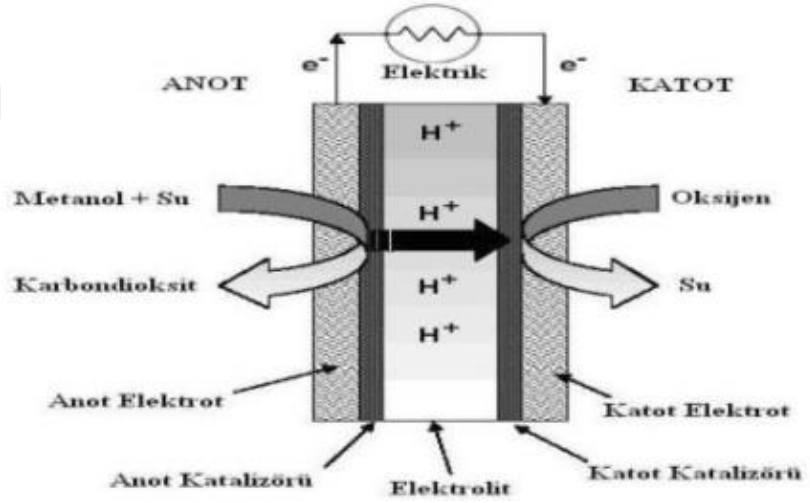
2.7.6.Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP)

Doğrudan metanol yakıt pilleri 60 ile 120 °C aralığındaki sıcaklıklarda çalışma kapasitesine sahiptir ve hücrede elektrolit olarak polimer membran kullanılmaktadır (Köroğlu, 2019).

DMYP teknolojisinin çalışma prensibi proton değişim membranlı yakıt hücreleri ile benzerlik gösterirler. Ancak, yakıt hücresinde kullanılan yakıtlar kıyaslandığında; PEMYP gaz halinde hidrojen, DMYP ise sıvı metanol kullanır (Türkmen, 2018).

DMYP'lerin çalışma prensibi; öncelikle anottan metanol, katottan ise oksijen beslenmektedir. Anot taraftan beslenen metanol, elektrokimyasal reaksiyon sonucunda protonlarına ve elektronlarına ayrışır ve karbondioksit açığa çıkar. Anotta açığa çıkan elektronlar ise bir dış devreden katot tarafa aktarılır ve elektrik akımını meydana getirir.

DMYP'nin çalışma prensibi Şekil 2.12'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.12. Doğrudan metanol yakıt pilinin çalışma prensibi (Köroğlu, 2019)

DMYP'nin reaksiyonlarına ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (2.19), (2.20) ve (2.21)'de verilmiştir.

$Anot$: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ (2.19)

$Katot$: $6H^+ + 6e^- + 3/2\ O_2 \rightarrow 3H_2O$ (2.20)

$Toplam$: $CH_3OH + 3/2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ (2.21)

DMYP'nin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

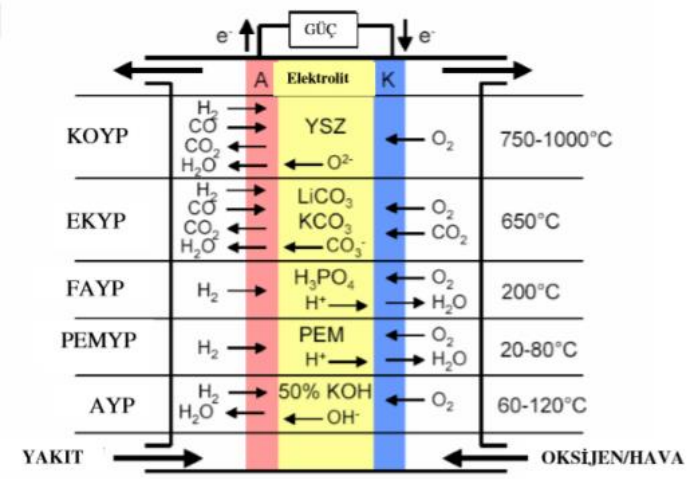
- Elektrokimyasal aktivitesinin diğer yakıt pillerine göre daha yüksek olması (Alkol ile beslenen diğer yakıt pillerine kıyasla daha iyi olması)
- Düşük maliyetli olması
- Yüksek verimlilikle çalışması
- Düşük emisyona sahip olması

DMYP'lerde başlatma süresi kısa olması ve yakıt ikmalinin kolay bir şekilde yapılabilmesi nedeniyle taşınabilir elektronik aletlerde ve araç uygulamalarında kullanımı oldukça yaygındır. Günümüzde ise yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum pillere alternatif olarak görülmektedir (Türkmen, 2018).

Bununla birlikte DMYP'nin dezavantajları aşağıda listelenmiştir (Türkmen, 2018):

- Anotta ve katotta iki faz (sıvı ve gaz) bulunmasından kaynaklı akış yönetiminin zor olması
- Verimliliğin ve spesifik gücün PEMYP'lere göre daha düşük olması
- Platin aktivitesinin zayıf olmasından dolayı PEMYP'lere göre yüksek miktarda katalizör ihtiyacı
- Hidrojen bazlı katalizör yükünün daha yüksek olması

Çeşitli yakıt pillerine ait tepkimelerin özeti Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Yakıt pili tepkimelerinin özeti (Yılmaz, 2006)

Her bir yakıt pili teknolojisinin çalışma prensibi aynıdır ve bu, aslında bakılırsa basit bir temele dayanmaktadır. Yakıt pili sisteminde kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri yakıt hücresinin çalışma prensibini, hücre verimliliğini ve dolayısıyla hücre ömrünü belirlemektedir.

Her bir yakıt pili teknolojisinin uygulama alanına göre avantajı veya dezavantajı bulunmaktadır. Örneğin, PEMYP ve AYP gibi düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri, yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt hücreleriyle kıyaslandığında, düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinin daha hızlı çalıştığı gözlenmektedir. Taşıma uygulamalarında ise yakıt pillerinin hızlı çalışmasına ihtiyaç duyulması nedeniyle PEMYP veya AYP'nin diğer yakıt teknolojilerine kıyasla daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri, bulunduğu ortam ve yakıt hücresi arasındaki sıcaklık farkının az olmasından dolayı, daha büyük hacme sahip bir ısı eşanjörü ve daha büyük miktarda katalizör gerektirmektedir. Bu durum PEMYP veya AYP gibi yakıt pillerinde, alan kısıtlamasını dezavantaj olarak göstermektedir. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde ise ortam ve hücre arasındaki sıcaklık farkının fazla olmasından dolayı küçük hacimli ısı eşanjörü kullanılmaktadır. Bu sebeple, yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinin başlatma süresi oldukça uzun, ancak ısı eşanjörü ihtiyacının az olmasından ötürü daha az hacim kaplarlar (Türkmen, 2018).

2.8. Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları

Yakıt pili tarihi çok eskilere dayanmasına rağmen, yakıt pillerinin uygulamaya geçmesi 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Günümüzde ise enerji ihtiyacının artmasıyla birlikte yakıt pili teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmış ve teknolojik buluşlar neticesinde yakıt pilleri günlük yaşantımızda birçok alanda yerini almıştır. Yakıt pilleri, bir miliwatt'tan yüzlerce kilowatt'a kadar elektrik güç üretebilmesi nedeniyle küçük ev aletlerinden dev elektrik santrallerine kadar neredeyse her uygulamada kullanılabilirler (Alkaya ve diğ., 2008).

Yakıt pillerinin kullanıldığı alanlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Çavuşoğlu, 2006):

a-) Yer üstü uygulamaları

- Elektrik santrallerinde

- Taşınabilir güç kaynaklarında
- Konutlarda
- Taşıt uygulamalarında

b-) Deniz uygulamaları

- Gemiler ve feribotlarda
- Denizaltılarda

c-) Havacılık ve uzay uygulamaları

- Uçaklarda ve helikopterlerde
- Uzay araçları ve uzay projelerinde

Yakıt pili teknolojisi incelendiğinde, yakıt pili güç çıkışı veya boyutu aynı olmasına karşın kullanım alanları farklı olduğu görülmektedir. Yakıt pili teknolojisinde verimlilik, su dengesi, ısı kullanımı, hızlı başlatma, hücre boyutu ve ağırlığı, yakıt tedariği gibi birçok faktöre bağlı olarak kullanım alanları değişkenlik göstermektedir. Yakıt pillerinin çeşitli uygulama alanlarına hitap etmesi; araştırma yapmaya teşvik etmiş ve bu durum yakıt pili teknolojisinin gelişmesine hız kazandırmıştır.

3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Taymaz ve Benli'nin çalışmasında, montaj basıncının (sıkıştırma kuvvetinin) yakıt hücresi performansına etkisi araştırılmıştır. Montaj basıncının etkisini tahmin edebilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle deforme olmuş tek hücreli yakıt pili modeli tasarlanmış ve bu model hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile analiz edilmiştir (Taymaz ve Benli, 2010).

Lee ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada; bipolar plakalar, membran, gaz difüzyon tabakası (GDL) gibi tüm yakıt hücresi bileşenlerinin geometrik boyutları ve mekanik özellikleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılarak incelenmiştir. Ayrıca yapılan analizlerle, tek hücreli PEM yakıt pili üzerindeki montaj basıncının etkisi ve basınç dağılımı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla bipolar plaka ile membran elektrot ünitesi (MEA) arasına basınç kağıdı yerleştirilerek deneysel test yapılmış ve son olarak analiz sonuçları ve test sonuçları birbirleriyle kıyaslanmıştır (Lee ve diğ., 2005).

Zhou ve diğ.'nin çalışmasında, yakıt hücresinde mekanik ve elektrokimyasal olaylar üzerindeki montaj basıncı etkisini gözlemlemek için sonlu elemanlar tabanlı bir model geliştirilmiştir. Bu modelde mekanik deformasyon, kütle transfer direnci ve elektriksel temas direnci analiz edilmiştir. Ayrıca farklı montaj basınçları altında deforme olmuş yakıt hücresi performans modeli geliştirilmiştir. Analiz sonucunda; montaj basıncı arttığında kütle direncinin arttığı, elektriksel temas direncin azaldığı ve hücre performansının montaj basıncı ile birlikte önce maksimuma çıktığı, ardından geniş bir basınç aralığında azaldığı gözlemlenmiştir (Zhou ve diğ., 2009a).

Zhou ve diğ.'nin yapmış olduğu bir diğer çalışmada, önceki çalışmada yapılan model geliştirilmiş ve yakıt hücresi çalışma koşullarının (montaj basıncı, sıcaklık ve bağıl nem) hücre deformasyonu ve temas direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geliştirilen modelde, gaz akış ve difüzyon, kimyasal reaksiyonlar, iyon ve elektron taşınması, güncellenen geometri ve malzeme özellikleri gibi parametrelere bağlı olarak analiz edilmiştir. Modelleme sonuçları, yüksek sıcaklık ve nemin GDL gözenekliliğini artırdığını ve temas direncini azalttığını göstermiştir. Ayrıca montaj basıncı

uygulandığında, artan sıcaklık ve nem ile birlikte yakıt hücresinin performansının iyileştiği gözlemlenmiştir (Zhou ve diğ., 2009b).

When ve diğ.'nin çalışmasında, cıvata konfigürasyonunun ve sıkıştırma torkunun farklı kombinasyonlarının tek bir PEMYP ile 10 hücreli yığının performans üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan deneyde, hem katot hem de anot için üç paralel kanallı serpantin akış alanlarına sahip 155 mm x 85 mm x 4 mm boyutlarındaki Pelcan® grafit bipolar plakalar kullanılmıştır. Kanal genişliği ve yüksekliği sırasıyla 1 ve 0,6 mm ölçülmüş ve her bipolar plakanın ortasına paralel düz hava soğutma kanalları yerleştirilmiştir. Gerekli soğutmayı sağlamak için yığının üstüne iki fan yerleştirilmiştir. MEA'nın her iki tarafı, gaz sızdırmazlığını sağlamak için bipolar plakaların çevrelerindeki o-ring yuvalarının içine yerleştirilmiş 0,8 mm çapında yeşil silikon kauçuk O-ring contalar ile kapatılmıştır. O-ring yuvaları 0,8 mm genişliğinde ve 0,3 mm derinliğindedir. MEA (Nafion® 112 membranı: Pt/Ru 0,5 mg cm^{-2} ve Pt 0,65 mg cm^{-2}) iki standart TORAY® karbon kağıdı (TGP-H-090) iki akış kanalı plakasının arasına GDL olarak yerleştirilmiştir. Her bir MEA'nın aktif alanı 100 cm^2 ve kapatma plakalar için 250 mm x 180 mm x 20 mm boyutlarında alüminyum alaşım kullanılmıştır (6061T651). Tek hücre durumunda, kapatma plakaları arasına sadece bir hücre yerleştirilmiş ve deneyde fan kullanılmamıştır. SS 304 cıvataların boyutları, tek hücre için 107 mm ve yığın için 157 mm uzunluğunda M10 × 1.25 mm kullanılmıştır. Polarizasyon eğrileri ve temas basıncı ölçümlerinin deneysel sonuçları, tek hücre ve 10 hücre yığınında; aynı cıvata konfigürasyonunda ve aynı sıkma torkundayken cıvata sayısı arttıkça maksimum güç yoğunluğunun arttığı ve sıkıştırma torku arttıkça kütle taşıma sınırlamasının daha yüksek akım yoğunluklarına kaydığını göstermiştir. 6 cıvatalı konfigürasyon ve 16 Nm sıkma torku kombinasyonu, deneylerde hem tek hücre hem de 10 hücre yığınında en iyi performansları göstermiştir. Ayrıca, mevcut deney koşulları altındaki tek hücre için, daha büyük ortalama temas basıncı, cıvata konfigürasyonu ve uygulanan tork ne olursa olsun, daha yüksek maksimum güç verme eğilimindedir. Genel olarak, ortalama temas basıncının arttırılması, temas basıncı dağılımının tekdüzeliğini iyileştirmiş ve omik direnci azaltmıştır. Ancak maksimum güç, ortalama temas basıncı ile lineer olarak artmamıştır (When ve diğ., 2009).

Zhou ve diğ.'nin çalışmasında, PEM yakıt pilinde sıkıştırma kuvvetinin arayüzey temas direnci ve GDL'in gözenekliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada yakıt hücresi tasarım parametreleri ile modelleme yapılmış ve bu parametrelerin hücre performansı üzerindeki etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, bipolar plaka grafitten yapıldığında daha büyük bir sıkıştırma kuvveti gerektiği ve daha geniş plakanın daha küçük bir temas direncine yol açtığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, GDL'lerin gözenekliliğinin sıkıştırma kuvvetinin artmasıyla azaldığı ve GDL'lerin deformasyonu ile boşluk hacminin değiştiği sonucuna varılmıştır (Zhou ve diğ., 2006a).

Zhou ve diğ.'nin yapmış olduğu diğer bir çalışmada, PEM yakıt pilinde sıkıştırma kuvvetinin arayüzey temas direnci, GDL gözenekliliği, GDL deformasyonu üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizde hücreye sıkıştırma kuvveti uygulandığında, GDL'nin yapı deformasyonu ve arayüzey elektriksel temas direnci doğrudan etkilendiği gözlemlenmiştir. GDL deformasyonu ve gözeneklilik değişimi nedeniyle sıvı suyun taşınması etkilenmiş ve sırasıyla reaktif gazın geçirgenliği ve difüzyonu ve omik kayıp potansiyeli de etkilenmiştir (Zhou ve diğ., 2006b).

Mikkola ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, yakıt pili yığınlarındaki sıkıştırma basıncı dağılımını ve hücre deformasyonunu tahmin eden bir FEM modeli geliştirilmiştir. Daha sonra, yakıt pili bileşenleri (son plaka olarak 130 mm × 96 mm × 40 mm Ensigner TECATRON GF40 PPS + 40% glass fibre ve akım toplayıcı olarak 127 mm × 93 mm × 10 mm GrafTech GrafCell FFP-300, bipolar plaka) içerisine basınç kağıdı yerleştirilerek hücredeki sıkıştırma basıncı dağılımı incelenmiş ve bu veriler Matlab programı kullanılarak bilgisayar ortamına işlenmiştir. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlarda, modelin uygulanabilirliği gösterilmiştir. (Mikkola ve diğ., 2009).

Lee ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, GDL ve cıvata torkunun değiştirilmesinin bir PEM yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, 10 cm^2 aktif alana sahip yakıt hücresine 100, 125 ve 150 inç Ibf'lik bir tork uygulanarak üç tip GDL (TORAY™ ELAT® CARBEL) karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, TORAY™ kullanılması durumunda, yüksek cıvata torkunun difüzyon tabakasına zarar verebileceği gözlemlenmiş ve daha az torkla daha

yüksek performans elde edilmiştir. Gözeneklilik, elektriksel temas direnci gibi parametrelerin sıkıştırma basıncından etkilendiği ve hücre performansını ise bu parametrelerin belirleyebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Lee ve diğ., 1999).

Zhou ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, PEM yakıt hücrelerinde bipolar plaka ve GDL arasındaki temas direncini tahmin etmek için mikro ölçekli bir sayısal model geliştirilmiştir. Modeli doğrulamak için bipolar plaka ve GDL arasındaki temas direncinin deneysel ölçümleri yapılmıştır. Deney 1'de bir GDL ve iki grafit bipolar plaka kullanılmış ve GDL, iki bakır levha akım toplayıcı arasına yerleştirilmiştir. Deney 1'den ölçülen direnç, iki bipolar plakanın dirençlerini, GDL'in direncini, bipolar plakalar ve GDL arasındaki temas dirençlerini içerir. Deney 2'de de benzer bir yığın kullanılır, ancak bipolar plaka ve GDL arasındaki temas direnci için iki bakır plaka arasında yalnızca bir bipolar plaka yerleştirilir. Deney 1 ve 2'den elde edilen sonuçların çok benzer olduğu gözlenmiştir. Özellikle sıkıştırma basıncı büyük olduğunda, aralarında küçük bir değişkenlik görülmüştür. Ayrıca deney sonuçlarında, temas eden iki yüzey arasındaki belirli bir mesafe için, daha büyük yoğunluk, artan bir temas alanı ve daha küçük bir temas direnci ile sonuçlanacağı; ancak buna bağlı olarak daha büyük sıkıştırma basıncı gerekli olacağı bulunmuştur (Zhou ve diğ., 2007).

Zhang ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, yakıt pilindeki bipolar plaka ve GDL arasındaki temas direnci, iki yarı ampirik yöntem kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu yöntemlerde, temas direnci ile temas basıncı arasında deneysel bir ilişki elde edilmiş ve daha sonra temas direncinin tahmin edilmesinde FEM analizi kullanılmıştır. Her iki yöntemde, deneysel sonuçlar ve tahminler arasında uyum olduğu gözlemlenmiştir (Zhang ve diğ., 2006).

Bazylak ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, PEM yakıt hücresinin sıkıştırılmasının gaz difüzyon tabakası morfolojik yapısına ve hücre içerisindeki su taşınımı davranışına etkisi araştırılmıştır. Sıkıştırma altında GDL'deki su aktarımı üzerindeki etkisini görselleştirmek için floresan mikroskobu kullanılmıştır. Floresan bazlı görselleştirme, floresan sergileyen moleküllerin enerjinin soğurulmasını, dağılmasını ve yayılmasını içerir. Geçici görüntü yoğunluğu verileri, sıvı yüzey yüksekliği ile ilişkilendirilmiş ve sıvı suyun dinamik taşınmasını çözmek için kullanılmıştır. Sıkıştırmanın GDL'nin morfolojisi

üzerindeki etkilerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM görüntülerine göre yüksek sıkıştırma basıncı etkisi GDL içerisinde bulunan liflerin parçalanmasına ve morfolojik yapının bozulmasına yol açtığı gözlemlenmiştir. GDL sıkıştırmasının sıvı su taşınımı üzerindeki etkisi, GDL'nin taşıma özellikleri üzerindeki gözenek yarıçapları ve yüzey gerilimi ilişkisi ile açıklanmıştır (Bazylak ve diğ., 2007).

Lin ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, PEM yakıt pili verimliliğini artırmak için bir montaj tekniği önerilmiştir. Bu tekniğe göre yakıt hücresi ve yakıt hücresi yığını için elastik bağlantı elemanı (yay) kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Bu modele göre yakıt hücresi bileşenleri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir (Lin ve diğ., 2009).

Xing ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, bir PEM yakıt pilindeki sıkıştırma basıncının GDL gözenekliliği/geçirgenliği ve iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiş ve ayrıca GDL'ler ile akım toplayıcı arasındaki temas direncini değerlendirmek için COMSOLTM multi-physics programında 3B model geliştirilmiştir. Ayrıca farklı voltajlar altındaki optimum sıkıştırma basınçları, eşzamanlı pertürbasyon stokastik algoritması yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları, sıkıştırma basıncının yüksek çalışma voltajları altında çalıştırılan bir yakıt pili performansını iyileştirdiğini ve düşük voltaj koşullarında çalıştırıldığında pil performansının düşmesine neden olduğunu göstermiştir. Sıkıştırma basıncı olmadığında, GDL ile akım toplayıcılar arasındaki temas direnci, sıkıştırma basıncı uygulanan duruma kıyasla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Farklı GDL malzemeleri için optimum sıkıştırma basıncının farklı olduğu ve GDL malzemeler olarak SGL-10-BA ve SGL-10-BB kullanılması durumda da çalışma voltajının artmasıyla farklı çalışma voltajlarına karşılık gelen optimum sıkıştırma basınçlarının arttığı gözlenmiştir (Xing ve diğ., 2010).

Gatto ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, düşük basınçta, hücre performansı üzerindeki tork momentinin etkisi incelenmiştir. Elektrokimyasal performans değerlendirilerek farklı kalınlıklarda farklı cıvata malzemeleri (NBR, genişletilmiş PTFE ve PTFE) birbiri ile mukayese edilmiştir. Yapılan deneyde elektrotlar, bir sprey tekniği ile karbon kumaş (Textron) üzerine katalizör ve mikro geçirgen plakaların uygulanmasıyla hazırlanmıştır. İlk cıvata 0,2 mm kalınlığa sahip pamuk ipliği ile güçlendirilmiş nitril kauçuktan yapılmıştır. Diğer cıvatalar PTFE polimerine dayalıdır ve kalınlık (PTFE-020 ve PTFE-

015) ve üretim süreci (Genişletilmiş PTFE) bakımından kendi aralarında farklılık göstermiştir. Yapılan deneylerde, malzeme özelliklerine bağlı olarak farklı tork değerleri ile hücreler maksimum performansa ulaşmıştır. Ayrıca sıkıştırma kuvvetinin arttırılmasıyla elektrotlar ve plakalar arasındaki elektriksel temas arttırılmış, ancak daha düşük hücre direnci ile karşılaşılmıştır. NBR ve Genişletilmiş PTFE, 11 Nm'lik bir tork momenti ile en iyi performansa ulaşırken, PTFE 9 Nm'de benzer performansa ulaştığı sonucuna varılmıştır. Buna göre daha ince PTFE'nin, ortalama 250 $mWcm^{-2}$ güç yoğunluğu ve en düşük standart sapma ile zaman içinde diğerlerinden daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir (Gatto ve diğ., 2011).

Chang ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, bir PEM yakıt hücresinin performansına sıkıştırma basıncının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Gaz difüzyon tabakasının gözeneklilik, gaz geçirgenliği, elektrik direnci ve kalınlık gibi elektro-fiziksel özellikleri, çeşitli sıkıştırma basınç seviyeleri altında özel tasarlanmış bir test düzeneği kullanılarak ölçülmüştür. Ek olarak, GDL ile bipolar (grafit) plaka arasındaki temas direnci, farklı sıkıştırma basınçları altında ölçülmüş ve aralarındaki temas elektrik direnci de belirlenmiştir. Yapılan deney düzeneğinde, iki bakır plaka arasındaki elektrik direncini ölçmek için bir miliohm metre kullanılmıştır. Karbon kağıtlarının kalınlık değişimi, 1.0 μm'lik minimum ölçüm limiti olan bir kalınlık ölçer kullanılarak izlenmiştir. Başlangıç kalınlığı 120 μm olan bir GDL, her biri bakır levha ile temas halinde olan iki grafit levha arasına yerleştirilmiştir. İki bakır levhadan sabit akım geçirilirken bakır levhalar arasındaki elektriksel potansiyel farkı ölçülmüştür. Temas direnci üzerindeki etkilerini incelemek için, aparat aracılığıyla uygulanan çeşitli sıkıştırma basınçlarında ölçümler tekrarlanmıştır. GDL kalınlığı, düşük bir sıkıştırma basıncı aralığında iken GDL'nin gözenekliliği, sıkıştırma basıncıyla ters orantılıdır. 10 barlık sıkıştırma durumu, 20 barlık sıkıştırma durumundan biraz daha yüksek bir arayüzey elektrik direncine sahiptir ve bu nedenle daha düşük bir güç yoğunluğu göstermiştir. Ayrıca, düşük sıkıştırma basıncının, bir PEM yakıt hücresinin elektrokimyasal performansını azalttığı, bipolar plaka ile gaz difüzyon tabakası arasında yüksek bir ara yüzey direnci ile sonuçlandığı gösterilmiştir. Buna karşılık, yüksek sıkıştırma basıncı, grafit plaka ile gaz difüzyon tabakası arasındaki temas direncini azaltmış; ancak bu arada gaz kanallarından katalizör tabakalarına kütle transferi için difüzyon yolunu daraltmıştır (Chang ve diğ., 2007)

Lai ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, deneysel arayüzey temas direncine dayalı olarak bipolar plaka (BPP) ve GDL arasındaki temas direncini tahmin etmek için mekanik-elektriksel bir FEM modeli geliştirilmiştir. Öncelikle, GDL ve düz bir grafit plaka arasındaki arayüzey temas direncini elde etmek için deneyler yapılmıştır. BPP ve GDL arasındaki temas direncini elde etmek için iki deney düzeneği kurulmuştur. İlk deneysel kurulumda, iki düz grafit plaka arasına GDL sıkıştırılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci deney düzeneği buna benzerdir ancak yalnızca bir düz grafit plakaya sahiptir ve GDL kullanılmamıştır. Daha sonra, deneysel sonuçlara dayanarak, düz grafit plaka ile GDL arasındaki arayüzey temas direnci elde edilmiştir. Sayısal model için mekanik-elektriksel sonlu elemanlar modeli kullanılarak analiz edilmiştir. BPP/GDL düzeneğinde, arayüzde mekanik ve elektriksel olan iki tür temas davranışı vardır. Bu çalışmada, iki temas davranışını modellemek için arayüzde CONTA172 ve TARGE 169 temas elemanları kullanılmıştır. Model çalışması bir diğer referanstaki çalışma ile kıyaslanmış ve sıkıştırma basıncı arttığında iki sonucun farklılıklarının azaldığı gözlenmiştir. Bunun sebebini ise temas direncinin hesaplanmasında, BPP ve GDL arasındaki temas yüzeyinin eş potansiyel olduğu varsayımı olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, normalde bir BPP/GDL düzeneğinde, yuvarlak köşenin ve BPP'nin marjının etkisinden dolayı, özellikle sıkıştırma basıncı daha küçük olduğunda, temas yüzeyinde elektrik potansiyelinde bazı farklılıklar olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle, sıkıştırma basıncı daha büyük olduğunda, iki sonuç daha iyi uyum sağlamıştır. Son olarak, BPP'nin yuvarlak köşesinin temas direnci üzerindeki etkisi de model kullanılarak incelenmiştir. Yuvarlak köşenin artmasıyla temas uzunluğu ve temas basıncı arasında temas direncini en aza indirildi bulunmuştur. Yalnızca temas direnci dikkate alındığında, bu çalışma için en uygun yuvarlak köşe 0,6 mm olarak bulunmuştur (Lai ve diğ., 2008).

Boyacı San ve Okur yaptıkları çalışmada, bipolar plakanın elektriksel iletkenliğini, fiziksel görünümünü ve pürüzlülüğünü kontrol eden ana parametreleri, Yüzey Cevap Yöntemi (YCY) kullanarak incelenmiştir. Bu yöntemde tepki parametreleri olarak elektriksel iletkenlik, fiziksel görünüm ve pürüzlülük belirlenmiş ve bağımsız parametreler olarak kalıplama sıcaklığı, basıncı ve süresi seçilmiştir. Yapılan çalışma sonucuna göre, bipolar levhanın elektriksel iletkenliği üzerine kalıplama sıcaklığının etkisinin zamanın etkisinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. İletkenlik düşük

sıcaklıkta zamanla artmış, ancak yüksek sıcaklıkta zamanla azalmıştır. Kalıplama sıcaklığı ise minimumdan maksimuma yükselirken, tüm basınçlarda elektriksel iletkenlik artmıştır. Polimer kompozit levhanın üretim koşullarının optimizasyonu, maksimum elektriksel iletkenlik ve minimum süre hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. 107.4 Scm^{-1}'lik maksimum elektrik iletkenliği 187 °C sıcaklıkta, 119 bar basınçta ve 5 dakikalık sürede elde edilmiştir (Boyacı San ve Okur, 2017).

Chung ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, son plaka tasarımını geliştirmek için literatürde mevcut olan yakıt pili prototipine dayalı olarak yakıt hücresi yığını modeli oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan model, sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre karbon plakaların yakıt hücresi bileşenleri içerisinde montaj basıncından en fazla etkilenen bir bileşen olduğu ve eşit olmayan montaj basıncında bu plakaların kırıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, kapatma plakalarının rijitliğinin arttırılması durumunda düzgün bir temas basıncı olduğu görülmüş, gaz difüzyon tabakasında daha düzgün bir sıkıştırma sağlanmış, o-ringlerin daha iyi bir sızdırmazlık performans gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmada cıvata konumlarının da hücre performansına etkisi üzerinde durulmuş ve bu parametrelerin optimum noktasını belirlenmesiyle hücre performansını artıracak bir tasarım bulunabileceği önerilmiştir (Chung ve diğ., 2009).

Kumar ve Reddy'nin yapmış olduğu çalışmada, bipolar plakanın veya kapatma plakasının gaz akış alanında gözenekli malzemelerin kullanılması incelenmiş ve geleneksel kanal tipi tasarımla karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç farklı gözenekli malzeme kullanılmıştır. Bunlar; Ni-Cr metal köpük (50 PPI), SS-316 metal köpük (20 PPI) ve karbon kumaştır Tasarım sonucuna göre Ni-Cr metal köpüklerin yakıt pili performansında en yüksek olduğu gözlenmiştir. Karbon bezinin ise yüksek basınçta gözenekler tıkandığı için en düşük performans gösterdiği görülmüştür. Genel olarak metal köpükler geleneksel kanal tasarımından daha iyi performans göstermiştir (Kumar ve Reddy, 2004).

Mason ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, yakıt pili sıkıştırma ünitesi kullanılarak kontrollü bir şekilde sıkıştırılmış ve buna göre hücre performans analizi incelenmiştir. Bu analize göre MEA'nın sıkıştırılması durumundaki davranışı, gaz difüzyon tabakası ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca çalışmada elektrokimyasal empedans spektroskopisi,

sıkıştırmanın temas direnci ve kütle transfer kayıpları üzerindeki etkisini göstermek için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sürekli olarak artan bir sıkıştırma ile yakıt hücresi performansında düşüş gözlenmiştir. Polarizasyon eğrisinde ise kütle taşıma bölgesinde önemli kayıplar meydana geldiği tespit edilmiştir (Mason ve diğ., 2013).

Mortazavi ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, gaz difüzyon tabakasında meydana gelen sıvı-gaz akışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneyde hücre içerisine sıvı enjekte edilmiş ve hücre içerisinde bulunan suyun ve havanın davranışı kamera ile görselleştirilip analiz edilmiştir. Görüntülerden yola çıkarak suyun yer değiştirmesi gözlenmiş ve suyun sızması durumundaki basıncı ölçülmüştür. Ayrıca çalışmada karbon kağıdı ve karbon kumaşı deneysel bulgulara göre test edilmiştir. Karbon kağıtları kullanıldığında, sıkıştırma uygulandığında dahi suyun davranışında kararlı bir yer değiştirme olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, karbon kumaş deneylerinde bunun tam tersi gözlenmiştir. Bu durum, karbon kumaşların karbon kağıtlara göre daha düşük gözenekliliğe sahip olması olarak açıklanmıştır (Mortazavi ve diğ., 2020).

Peker ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, bipolar plakaların yüzey topografyası araştırılmıştır. Çalışmada proses parametreleri olarak kanal yüksekliği, pürüzlülük, korozyon ve temas direnci seçilmiş, bu deneysel parametreler ANOVA programıyla analiz edilmiştir. Ayrıca, yüzey topografyasını gözlemlemek için hem kaplamalı (1 mm kalınlığında ZrN kaplı SS316L plaka) hem de kaplamasız (51 mm kalınlığında) plaka yüzeyleri mikroskobik olarak incelenmiş ve korozyon/temas direnci testleri yapılmıştır. Korozyon direnci test sonuçlarına göre kaplamalı plakaların korozyon direnci, kaplanmamış plakalara göre yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Temas direnci test sonuçlarına göre kaplanmamış plakaların, kaplanmış plakalara kıyasla daha yüksek düzeyde temas direnci gösterdiğini tespit edilmiştir. Böylece ZrN kaplama, plakaların korozyon ve temas direnci davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür (Peker ve diğ., 2011).

Dey ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, yakıt pili kapatma plakası tasarımının hücre performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada hücre geometrisi, cıvata konfigürasyonu, conta kalınlığı ve malzeme özellikleri gibi parametrelerin temas basıncına etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarını

desteklemek için deneysel çalışma yapılmıştır. Buna göre, kapatma plakası için altıgen geometrisinin ortalama 0,13 MPa temas basıncı ve 28 Ω cm^2 temas direnci ile iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Cıvata sayısı ve yerleşiminin temas basıncı üzerindeki etkisinin büyük ölçüde olduğu ve tasarımda 10 adet cıvata sayısının homojen dağılımı sağladığı tespit edilmiştir. Conta kalınlığı ise GDL ve conta arasındaki farkın 0,15 mm ile 0,2 mm arasında tolere edilebilecek şekilde olması ile yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda geometri, cıvata sayısı, konumları ve conta kalınlığı optimize edilmiş, 8–10 Nm'lik bir sıkma torkunda yaklaşık 0,8 MPa'lık ortalama temas basıncı elde edilmiştir (Dey ve diğ., 2019).

Liu ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, MEA'nın temas basıncı dağılımını ve deformasyonunu optimize edebilecek ve yakıt pilinin elektrokimyasal performansını iyileştirebilecek yeni bir sıkıştırma mekanizması önerilmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle, geleneksel cıvata sıkma mekanizmalı ve yeni pnömatik sıkıştırma mekanizmalı PEMFC modelleri oluşturulmuştur. Ardından ABAQUS ticari kodu kullanılarak sonlu elemanlar analizi (FEA) yapılmıştır. Modellerin analiz sonuçlarını doğrulamak için temas basıncı ve elektrokimyasal performans testleri yapılmıştır. Temas basıncı dağılımını incelemek için Fuji film marka basınca duyarlı filmler kullanılmıştır. Elektrokimyasal performans testinde pnömatik sıkıştırma mekanizmasına sahip PEMYP'nin maksimum güç yoğunluğu, geleneksel sıkıştırma mekanizmasına sahip PEMYP'ninkinden daha büyük olduğu gözlenmiştir. Yeni sıkıştırma mekanizması altında PEMYP için maksimum güç yoğunluğu %10 arttığı görülmüştür. Deney sonucunda yeni yapılan sıkıştırma mekanizmasında yakıt pili performansının daha iyi olduğu gözlenmiştir (Liu ve diğ., 2021).

Zhao ve diğ.'nin yaptıkları çalışmada, farklı vida dağılımı, kapatma plakası kalınlığı, kapatma plakası malzemesi ve geometrik yapısı, sıkma kuvveti gibi parametrelerin hücre performansı üzerindeki etkisini incelemek için bir deney yapılmıştır. Deneysel çalışmada, 50 cm^2 aktif alana sahip tek hücreli yakıt pili kullanılarak yapılmıştır. Deneydeki malzemeler; katot paralel düz kanallardan, anot ise 4 kanallı serpantin akış alanından oluşturulmuş, bipolar plaka (147 mm x 35 mm x 2 mm) grafitten yapılmış, akım toplayıcı plaka olarak altın kaplamalı pirinç kullanılmıştır. Deney beş bölümden oluşmuştur. Bunlar; dört farklı cıvata (4'lü, 6'lı, 7'li ve 8'li) dağılımı testi, sekiz farklı kapatma plakası

malzemesi (Paslanmaz çelik-304, Alüminyum alaşım-7075, Fiberglass levha-FR4, PEI, PPA, PTFE, Bakalit, Naylon ve cam elyaf karışımı), dört farklı kapatma plakası kalınlığı (5 mm, 8 mm, 15 mm, and 25 mm), altı farklı sıkıştırma kuvveti testi ve iki kapatma plakası geometrik yapısı testidir. Aynı zamanda, bu testler sadece nitel analiz olarak yapılmıştır. Tüm performans deneyleri, ticari yakıt pili test istasyonunda yapılmış ve hücreye saflığı %99.99 olan nemlendirilmiş hidrojen verilmiş ve hidrojenin giriş basıncı, sıcaklığı ve stokiyometrik oranı sırasıyla 50 kPa, 30°C ve 1.8 olarak seçilmiştir. Deney sonucunda kapatma plakasının sıkıştırma kuvveti ve kalınlığının bir fonksiyonu olarak GDL'de yaklaşık %75'lik bir optimum sıkıştırma oranı elde edilmiştir. Genel olarak, kapatma plakası ne kadar ince ise tork momenti o kadar büyük uygulanmış ve bu değer malzemenin yoğunluğunu ilişkilendirmeyi engellemiştir. Bu sebeple deneyde optimal bir kapatma plakası tasarlanmıştır (Zhao ve diğ., 2020).

Barzegari ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, yakıt pilinde pnömatik sıkıştırma sisteminin parametreleri yüzey cevap yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Öncelikle pnömatik sıkıştırma sisteminin optimizasyonu, üç boyutlu bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra YCY ile elde edilen model doğrulanmak istenmiştir. Yüzey cevap yönteminde pnömatik kapatma plakasının kalınlığı, geleneksel olarak kullanılan kapatma plakanın kalınlığı ve pnömatik kapatma plakanın yan uzunluğu bağımsız parametreler olarak belirlenmiş ve yanıt olarak gaz difüzyon tabakasındaki temas basıncı değerlerinin sapması yanıt olarak seçilmiştir. Sonuç olarak bu veriler sonlu eleman simülasyonu ile karşılaştırılmıştır ve hata oranı %4,5'tan az bulunmuştur. Ayrıca son olarak basınç haritalama sistemi tarafından deneysel veriler elde edilmiş ve deney düzeneği bu verilere göre hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde ise 400 cm^2 aktif alana sahip 9 hücreli polimer elektrolit membranlı yakıt pili yığını kullanılmış ve içerisine basınç ölçüm filmleri yerleştirilerek test edilmiştir. Sonuç olarak sonlu elemanlar analizi ile basınç haritalama sisteminin deneysel sonuçları arasındaki maksimum farkın %8'den az olduğunu gözlenmiştir. Ayrıca, pnömatik kapatma plakalı sıkıştırma sisteminin verimliliğinin, geleneksel kapatma plakalara sahip sıkıştırma sisteminden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır (Barzegari ve diğ., 2020).

Karvonen ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, farklı kapatma plakalarına sahip yakıt hücresinin GDL üzerine etki eden sıkıştırması sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmadaki

tasarım, COMSOL MULTIPHYSICS® ile modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Modellemede geleneksel düz plakalar yerine nervürlü plakalar kullanılmış ve geleneksel plakalar ile kıyaslanmıştır. Plaka malzemesi olarak alüminyum ve çelik kullanılmış ve bu plakalarda birbirleriyle kıyaslanmıştır. Modelleme sonuçlarına göre geleneksel düz plakalar yerine nervürlü alüminyum plakalar kullanılırsa daha düzgün basınç dağılımı elde edildiğini ve bu plakaların daha hafif olduğu için tercih edilebilir olduğunu göstermiştir (Karvonen ve diğ., 2008).

Alizadeh ve diğ.'nin yapmış olduğu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak MEA üzerindeki temas basıncı dağılımı incelenmiştir. Buna göre kapatma plakalarının kalınlığı ve malzemesi, sızdırmazlık elemanının (o-ring) sertliği, yığının hücre sayısı ve konumu gibi bazı parametreler veri olarak girilmiştir. Çalışmada, tek hücreye ait üç boyutlu model, hesaplama süresini azaltmak için iki boyutlu model şekline çevrilmiştir. Ayrıca yapılan analizi doğrulamak için deneysel çalışma yapılmış, basınç dağılımını görselleştirmek amacıyla da yakıt hücresinin içerisine basınç filmleri yerleştirilmiştir. Test düzeneğinde yakıt hücresi aktif alanı 400 cm^2 (20 cm x 20 cm), 295 mm x 295 mm x 3 mm ölçülerinde bipolar plaka, üç farklı sızdırmazlık elemanı (30 Shore A, 60 Shore A ve 90 Shore A) ve 350 mm x 350 mm boyutlarında iki farklı kalınlıkta (30 mm ve 50 mm) kapatma plakası iki farklı malzeme (alüminyum ve paslanmaz çelik) olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak yığın sayısı arttıkça MEA'ya yapılan basınç dağılımının daha homojen olduğu gözlenmiştir. Parametrelerin optimize edilmesi sonucunda ise 30 mm kalınlığında paslanmaz çelik kapatma plakasının ve 90 Shore A sızdırmazlık elemanının homojen basınç dağılımı sağladığı tespit edilmiştir (Alizadeh ve diğ., 2016).

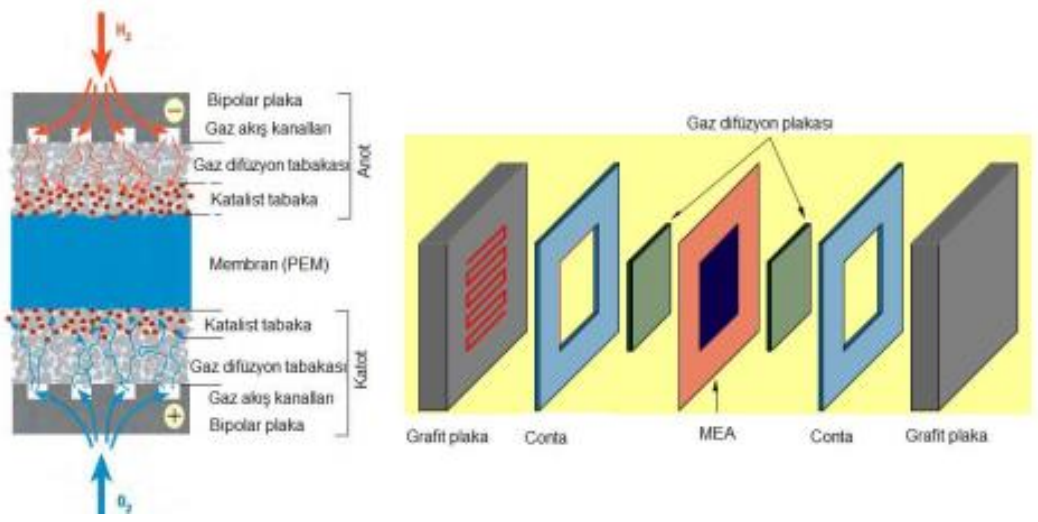
4. PROTON DEĞİŞİM MEMBRAN YAKIT PİLLERİNİN YAPISI

Bu bölümde PEM yakıt hücresinin yapısı termodinamik açıdan incelenecek ve yakıt pilini oluşturan başlıca bileşenler hakkında genel bir bilgi verilecektir. Tipik yakıt hücresi uygulamalarında hidrojen oksidasyon reaksiyonunun ve oksijen indirgenme reaksiyonunun verimli şekilde gerçekleşebilmesi için en iyi yöntem materyal ve malzeme seçimini belirlemektir. Bu tez çalışmasında bir PEM yakıt pilinin kapatma plakasının incelenmesi üzerine çalışılmıştır.

4.1.PEM Yakıt Pili Elemanları

Aşağıda bir yakıt pilinin genel olarak bileşenleri verilmiş ve Şekil 4.1'te bu bileşenler şematize edilmiştir.

1. Elektrolit (iyon iletken membran)
2. Gaz difüzyon tabakası
3. Membran elektrot ünitesi
4. Bipolar plakalar/gaz akış kanalları
5. Akım toplayıcısı
6. Son plaka
7. Conta



Şekil 4.1. PEM tipi yakıt pili modül bileşenleri (Köroğlu, 2019)

4.1.1.Elektrolit/Membran

Membran; anot ve katot katalizör tabakaları arasında konumlandırılan, elektrotlar arasında iyonik yüklerin taşınmasını sağlayan ve reaksiyona giren iki gazı birbirinden ayıran bir yakıt hücresi elemanıdır. Elektriksel olarak yalıtkan yapıya sahip olan membrandan proton iletkenliklerinin yüksek olması ve elektrik dirençlerinin düşük olması istenir. Yakıt pili verimliliği için su yönetimi, proton iletimi ve su aktarımı gibi özellikler membran üzerinde oldukça önemli bir etkendir. Proton iletimi için yeterli suyun var olması gerekir ama bu değer bir optimum noktaya sahiptir. Su miktarı az olduğunda membran kurur ve bu da proton veya hidrojen iyonlarının iletkenliğini azaltır. Ayrıca, suyun fazla olduğu durumlarda ise elektrot gözeneklerinde su taşması yaşanmaktadır. Bu durumda gaz difüzyon tabakaları su ile dolarak hidrojen ve oksijenin katalizör tabakasına ulaşmasını engellemektedir. Ayrıca membranın, yakıt pili çalışma ortamında kimyasal kararlılığa sahip olması gerekir. Çünkü sistemde bulunan veya sisteme beslenen diğer kimyasallarla herhangi bir reaksiyona girmesi istenmez. Başka bir deyişle, anot ve katotla temas halinde olan membranın, oksitleyicilerin kimyasal reaktivitelerine karşı nötr olması gerekmektedir. Aynı zamanda membranın mekanik olarak dayanıklı olması gerekir. Çünkü hücreye uygulanan basınç ve sıcaklığa dayanım, proton iletiminden sorumlu olan bileşenlerle birlikte yakıt pili performansını etkilemektedir (Ulaş, 2021).

PEM yakıt pilinde çoğunlukla perflorosülfonik asit (PFSA) içeren iyon değiştirici membranlar kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan membran malzemesi DuPont tarafından 1960'lı yıllarda üretilen teflon kökenli Nafion'dur. Nafion membranlar yüksek ısıl ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Ancak Nafion membranların yüksek sıcaklıklarda proton iletkenliklerinin düşmesi ve pahalı olmaları nedeniyle alternatif membran malzemeleri geliştirmeye yönelik yoğun çalışmalar devam etmektedir. Son zamanlarda geliştirilen bir diğer membran çeşidi ise Polibenzimidazol (PBI) veya fosforik asit temelli olanlardır ve bu membranlar su yönetimine ihtiyaç duymadan 220 °C'ye kadar kullanılabilmektedir. Bu membranların bazı avantajları; yüksek sıcaklıkta daha iyi verim elde edilmesi, yüksek güç yoğunluğu, kolay soğuma sağlaması, karbonmonoksit zehirlenmesine karşı düşük duyarlılık göstermesi şeklindedir (Kılıç, 2017).

4.1.2.Elektrotlar (Katalizör)

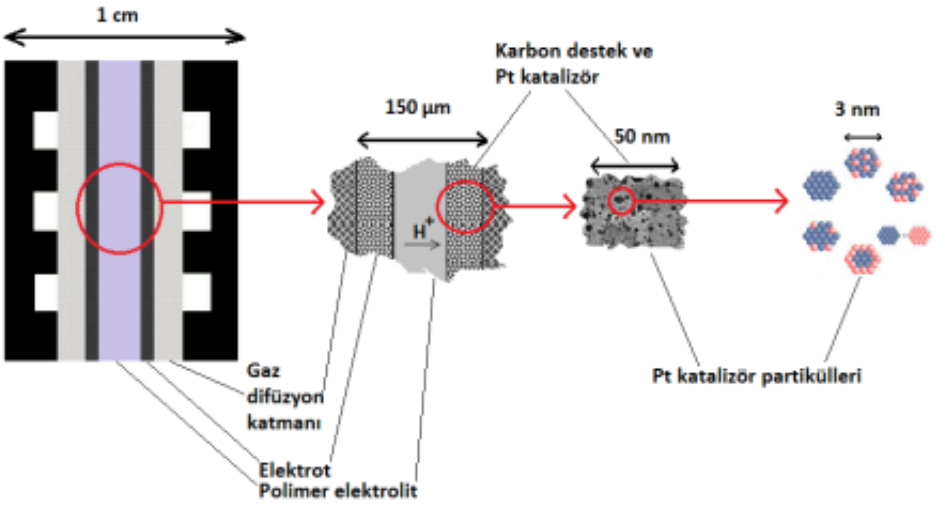
Elektrotlar; gaz difüzyon tabakası ile membran arasında konumlandırılan ince bir katalizör tabakasıdır ve bu tabakada hidrojen oksidasyon ve oksijen indirgenme reaksiyonları gerçekleşir.

Elektrotların yakıt pili içindeki görevleri aşağıda sıralanmıştır:

1. Sıvı veya gaz iyonizasyon/deiyonizasyon reaksiyonlarının meydana gelebileceği bir yüzey oluşturmak.
2. Oluşturulduktan sonra iyonların üç fazlı ara yüzeye/ara yüzeyden uzağa iletilmesini sağlamak (bu nedenle elektrotun yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemeden yapılması gerekir).
3. Elektroliti yakıt gaz fazından ayıran fiziksel bir bariyer işlevi de bulunmaktadır.

Elektrodun ilk görevini yerine getirebilmesi ve reaksiyon hızını artırabilmesi için gözenekli bir yapıya sahip olması ve yalnızca iletken değil aynı zamanda katalizör özelliklerine de sahip bir malzemeden üretilmesi gerekmektedir. Özellikle düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde, elektrodun katalitik fonksiyonu büyük önem taşır, çünkü iyonizasyon reaksiyonunun hızı sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmaktadır. Eğer sıcaklık artırılamıyorsa, reaksiyon hızını artırmak için katalizör kullanımı gerekmektedir. Aynı zamanda, gözenekli elektrotlar hem elektroliti hem de gazları geçirebilme kapasitesine sahip olmalı, fakat elektrolit taşımasına veya gazların buharlaşmasına izin vermemelidir. (Çavuşoğlu, 2006).

Hem oksijen indirgenme hem de hidrojen oksidasyon reaksiyonları için yakıt pillerinde platin, rutenyum, paladyum gibi metaller katalizör olarak kullanılır. Ancak, PEM yakıt pilinde en yaygın kullanılan katalizör platindir. Genellikle büyük yüzey alanına sahip nano boyutlu platin parçacıkları, tipik olarak karbon tozu olan katalizör desteğinin yüzeyine ince bir şekilde dağıtılır. Platin dağılımı yüzey alanının artmasını sağlar ve katalizör verimi de artar (Geliş, 2019). Şekil 4.2'de elektrot ve iç yapısı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.2. Elektrot iç yapısı (Köroğlu, 2019)

4.1.3.Bipolar/Gaz Akış Plakaları

Bipolar plakalar; reaktif bölgeye yakıt ve oksitleyici taşıyan ve hücre içerisindeki mekanik desteği sağlayan yakıt pili ana komponentlerinden biridir. Yakıt pili modülünün omurgasını oluşturan bu plakaların temel görevleri; elektrot yüzeyi üzerine homojen bir gaz dağılımı yapmak, hücreler arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlamak, sistemde oluşan suyu tahliye etmek ve minimum basınç kaybı oluşturmaktır (Geliş, 2019).

Genel olarak bipolar plakalarda malzeme olarak grafit ve metal kullanılmaktadır. Grafit plakalar, yakıt pilinin çalışma koşullarında oldukça kararlı davrandığı için genellikle grafit plakalar tercih edilmektedir; ancak bu plakaların yüksek gözenekli yapıya sahip olması ve kanal işleme maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Metal plakalar ise mekanik darbe ve gerilmelere karşı daha dayanıklı, üretimi kolay ve daha az maliyetlidir; ancak bu plakalar da korozyona karşı dayanaksızdır (Köroğlu, 2019).

4.1.4.Gaz Difüzyon Tabakaları (GDL)

Gaz difüzyon tabakası, katalizör ile bipolar plaka arasına konumlandırılan, gözenekli karbon yapıdan oluşan ve aynı zamanda membran elektrot ünitesine mekanik destek sağlayan, yakıt hücresinin kritik bir bileşenidir. Elektriksel olarak iletken yapıya sahip

olan bu tabaka birçok önemli işlevi yerine getirir. Bunlar; gaz halindeki reaktantların akış kanallarından katalizör tabakasına düzenli erişimini sağlamak, katalizör tabakası ile bipolar plaka arasında elektron transferini sağlamak, katalizör tabakaları ile bipolar plaka arasında su transferi yapmak, katalizör tabakaları ile reaksiyon bölgesinden bipolar plakaya ısı transferini sağlamaktır.

GDL'nin bu işlevleri gerçekleştirebilmesinde gözeneklilik, termal ve elektriksel iletkenlik değerleri oldukça önemli bir rol oynar.

GDL'nin bir diğer temel görevi ise yakıt pili sisteminde elektrolitin iyonik iletişimini sağlamak ve elektroliti düşük nemde ıslak durumda tutmaktır. Elektrolitin aşırı nemlendirilmesi kanallardan su taşmasına yol açarken, elektrolitin kuruması ise proton iletkenliğini azaltmaktadır. Bu sebeple GDL gözenekliliği, hücre içindeki su yönetimi için oldukça önemlidir. (Geliş, 2019).

4.1.5.Son (Kapatma) Plakaları

Son plakalar; yakıt pilinin iki dış yanına konumlandırılan, hücre bileşenlerini bir arada tutarak bir yığın olmasını sağlayan önemli bileşenlerden biridir. Bu plakaların en temel görevi; arzu edilen homojen sıkıştırmayı sağlamak için direnç kaybını azaltmaktır. Ayrıca bu plakalar, hem sızdırmaz olmalı hem de reaktif gaz ve soğutucu akışkan sıvılarının geçişlerini sağlamalıdır (Köroğlu, 2019):

Kapatma plakası seçim kriterleri aşağıdaki gibidir;

1. Elektrik ve ısı iletimi iyi olmalı
2. Mekanik dayanıklılık ve kimyasal kararlılık göstermeli
3. Korozyona karşı dayanıklı olmalı
4. Plaka yüzeyi paralel olmalı (Düzgün gaz geçişi için)

4.1.6.Akım Toplayıcı Plakalar

Akım toplayıcı plakalar; grafit plaka ile kapatma plaka arasında konumlandırılan, MEA'nın gaz ile temasını en üst düzeyde tutmak amacıyla yakıt ve oksitleyicinin geçişini

sağlayan bir yakıt pili bileşenidir. Elektriksel olarak iletken olan bu plakaların temel görevi, elektriksel iletimi sağlamaktır.

Akım toplayıcı plakalar, elektriksel iletimi optimize etmek için yüksek iletkenliğe sahip olmalı ve hatta, piller arasında farklı sıcaklıkların oluşmasını engellemek için ısıl iletkenlik özelliğini taşımalıdır. Ayrıca akım toplayıcı plakaların gözenekli olmaması gerekir, bu durum yakıt ve oksijenin karışmasını engellemek için oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra, hücre içinde su birikmesini önlemek ve neme dayanıklılığı artırmak amacıyla su geçirmez bir yapısının olması gerekmektedir (Eker, 2012).

Akım toplayıcı plakalar çeşitli iletken metallerden üretilebilir. Bu metallere bakır, alüminyum, titanyum örnek olarak verilebilir (Köroğlu, 2019).

4.1.7.Contalar

Yakıt pili modülünde gaz sızıntısı, hücre performansının düşmesine ve reaktantın kullanılamamasına neden olmaktadır. Gaz sızdırmazlığı, yığın sıkıştırmasının artırılması ve/veya daha iyi bir conta malzemesi bulunarak iyileştirilebilir. Contalar, bipolar plaka ve MEA arasında kullanılan sızdırmazlık elemanıdır.

Contaların yakıt pili içindeki görevleri aşağıda sıralanmıştır (Köroğlu, 2019):

- Uzun vadede kimyasal stabilite
- Yakıt ve oksidanın karışmasını önlemek
- Reaktantların çevresiyle karışmasını önlemek
- Gazların sızmasını engellemek
- Titreşim ve şok direnci göstermek
- Bileşenler arasında elektrik yalıtımı sağlamak
- Bileşenlerin mekanik bağlanmasını önlemek

Yakıt pili modülünde birçok farklı türde conta malzeme kullanılabilir. Yakıt hücreleri için yaygın olarak kullanılan bazı conta malzeme türleri arasında silikon, EPDM kauçuk ve PTFE bulunmaktadır (Köroğlu, 2019).

4.2.PEM Yakıt Pilinin Termodinamik Açıdan İncelenmesi

Yakıt pillerinde anot ve katot taraflarındaki reaksiyonlar eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir ve yakıt olarak hidrojen kullanıldığında yan ürün olarak saf su, elektrik ve ısı açığa çıkmaktadır. PEMYP'de gerçekleşen reaksiyonlar sırasıyla Denklem (4.1), (4.2) ve (4.3)'te gösterilmektedir;

$$Anot: 2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \quad (4.1)$$

$$Katot: 4H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad (4.2)$$

$$Toplam: 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{ısı} \quad (4.3)$$

Kimyasal reaksiyon ısısı, ürünlerin ve reaktantların arasındaki oluşum ısısı farkını temsil etmektedir ve genellikle Denklem (4.5)'teki gibi ifade edilir;

$$\Delta H = (H_f)_{H20\,(l)} - (H_f)_{H2} - \tfrac{1}{2}\,(H_f)_{O2} \quad (4.5)$$

25 °C'deki sıvı fazdaki suyun oluşum ısısı −286,02 kJ mol^{-1} olarak ölçülmüştür. Bu değer, hidrojenin üst ısıl değeri olarak bilinir ve hidrojenin oksijenle reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısıya eşittir. Bu denkleme ait ilinti Denklem (4.6)'da gösterilmiştir;

$$\Delta H = (H_f)_{H20\,(l)} - (H_f)_{H2} - \tfrac{1}{2}\,(H_f)_{O2} \quad (4.6)$$

$$= 286 \text{ kj mol}^{-1} - 0 - (\tfrac{1}{2} \times 0)$$

$$= 286 \text{ kj mol}^{-1}$$

Entalpi değerinin reaksiyon sonucunda negatif olması, reaksiyonun egzotermik bir reaksiyon olduğunu göstermektedir. Hidrojenin ısıl değeri ise yakıt hücresine verilen enerji miktarını ifade eder. Bu enerji, hidrojenden alınabilecek maksimum termal enerjidir ve yakıt hücreleri bu enerjiyi kullanarak elektrik üretir. Ancak termodinamik yasalarına göre, bu reaksiyonlardaki enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez ve Gibbs Serbest Enerji değişimi ile hidrojenin ısıl değerinin elektrik enerjisine çevrilebilecek miktarı bulunabilir. Gibbs Serbest Enerji (ΔG); yakıt hücresinin termodinamik verimi ile ilgili yorumlar yapabilmek amacıyla kullanılan bir kavramdır. ΔG'nin negatif ya da pozitif olması bir reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmeyeceği hakkında bilgi vermektedir (Toplam tepkimenin ΔG değerinin negatif olması reaksiyonun

gerçekleşeceğini göstermektedir). Gibbs serbest enerji değişimi (G) ile entalpi ve entropi değişimleri (H, S) arasındaki ilişki Denklem (4.7)'deki gibi ifade edilir;

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4.7)$$

Entropi değişimi, yakıt hücresinde oluşan tersinmez kayıpları ifade eder ve ürün ile reaktant entropisi arasındaki fark ile Denklem (4.8)'teki gibi bulunmaktadır;

$$\Delta S = (S_f)_{H20\,(l)} - (S_f)_{H2} - \tfrac{1}{2}\,(S_f)_{O2} \quad (4.8)$$

Bununla birlikte ΔH, ürünler ve reaktantlar arasındaki entalpi farkını göstermektedir. Entalpi ve entropi değerleri 1 atm ortam basıncında ve 25 °C'deki şartlarda geçerlidir.

25 °C'deki koşullarda, 286,02 kJ mol^{-1} enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan enerjinin 237,34 kJ mol^{-1}'ü elektriksel enerjiye, 48,68 kJ mol^{-1}'ü ise ısıya dönüşmektedir. Ancak bu değerler, 25 °C'den farklı sıcaklıklarda değişmektedir. Tablo 4.1'de 25 °C ve 0.1 MPa basınç altında verilen entalpi ve entropi oluşum değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.1. 298 K ve 0.1 MPa basınç altında verilen entalpi ve entropi oluşum değerleri

	H_f (kJ mol^{-1})	S_f (kJ mol^{-1} K^{-1})
H_2	0	0,13066
O_2	0	0,20517
$H_2O_{(s)}$	-286,02	0,06996
$H_2O_{(g)}$	-241,98	0,18884

$$W = qE \quad (4.9)$$

Bir elektrokimyasal reaksiyon için iş terimi, genleşme işinin yanı sıra anottan katoda yükün iletilmesinden sorumlu olan elektriksel işi de içermektedir. Denklem (4.9)'da belirtilen W elektriksel iş (J mol^{-1}), q yük (Coulombs mol^{-1}) ve E elektriksel potansiyeli (V) ifade etmektedir. Bir mol hidrojenin yakıt hücresinde reaksiyona girmesi sonucunda transfer edilen yük miktarı Denklem (4.10)'a göre bulunur.

$$q = nF \quad (4.10)$$

Bir molekül hidrojenden açığa çıkan elektron sayısı yani n değeri 2'dir. F ise Faraday katsayısıdır ve bu katsayının değeri Denklem (4.11)'de gösterilmiştir;

$F = 96485{,}3415\ As\ mol^{-1}$ (4.11)

Verilen eşitsizlikler denklemde yerine yazıldığında;

$W = nFE$ (4.12)

Denklem (4.12) elde edilir ve bu denklem sonucunda elektriksel iş değerine ulaşılır.

Elektriksel iş, tersinir olduğunda en büyük değere eşittir ve bu koşullarda elektriksel iş Gibbs serbest enerji değişimine eşit olur . Kendiliğinden gerçekleşen olayların Gibbs serbest enerji değişimi negatiftir ve Denklem (4.13)'te gösterilmiştir;

$W_{el} = -\Delta G$ (4.13)

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (4.14)$$

Gibbs serbest enerji değerine göre Denklem (4.14)'te verilen 25 °C'deki teorik hücre potansiyeli, Denklem (4.15)'teki gibi hesaplanmaktadır (Kılıç,2017);

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{-237{,}340\ j\ mol{-}1}{2x\ 96485\ As\ mol{-}1} = 1{,}23\ V \quad (4.15)$$

4.2.1.Sıcaklığın Etkisi

Yakıt hücrelerinde hücre gerilimi sıcaklık ile değişmektedir ve bu değişim Denklem (4.16) ile gösterilmiştir;

$$E = -\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF} \quad (4.16)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere teorik hücre gerilimi sıcaklık ile ters orantılıdır ve sıcaklık arttıkça gerilim düşer. Ancak, yakıt hücresi opere edildiğinde, hücre sıcaklığı

belli bir noktaya kadar arttırıldığında gerilimin de arttığı gözlenmektedir. Çünkü sıcaklık arttıkça, aktivasyon polarizasyonu, kütle transferi polarizasyonu ve omik kayıplar azalmaktadır ve bu kayıpların etkisi hücre gerilimindeki düşüşten daha fazla görülmektedir. Dolayısıyla, sıcaklığın yakıt hücresi performansı üzerinde olumlu bir etkisi bulunmaktadır (Kılıç, 2017).

4.2.2.Basıncın Etkisi

Atmosferik koşullar değiştiğinde veya yakıt hücresinin çalışma basıncı değiştirildiğinde Gibbs serbest enerji değişiminin basınç ile olan ilişkisi kullanılır ve farklı basınç değerlerine karşılık gelen hücre potansiyel değerleri hesaplanabilir. Gibbs serbest enerji değişimine göre;

$$dG = V_m \, dP \tag{4.17}$$

Denklem (4.17)'de V_m molar hacim (m^3mol^{-1}) ve P kısmi basınç (Pa)'tır.

İdeal gaz denklemi;

$$PV_m = RT \tag{4.18}$$

Denklem (4.18)'de gösterilmektedir. Denklemdeki eşitsizlikler yerine yazılıp integrali alınırsa Denklem (4.19) elde edilir.

$$G = G_0 + RT \ln \left(\frac{P}{P0}\right) \tag{4.19}$$

G_0 standart koşullardaki Gibbs serbest enerji değişim değerini, P_0 ise standart koşullardaki kısmi basıncı ifade etmektedir. Gibbs serbest enerji değişiminin tanımına göre PEM yakıt hücresi için Denklem (4.20) elde edilir;

$$G = G_0 + RT \ln \left(\frac{PH20}{PH2\sqrt{PO2}} \right) \tag{4.20}$$

Elektrik potansiyelinin tanımına göre teorik hücre gerilim denklemi Denklem (4.21)'deki gibidir;

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{PH2\sqrt{PO2}}{PH2O}\right) \quad (4.21)$$

Bu denkleme Nernst eşitliği denilmektedir. Nernst eşitliğine göre hidrojen ve oksijenin kısmi basınçlarının artması hücre gerilimini arttırmaktadır (Kılıç, 2017).

4.2.3.Yakıt Pili Verimliliği

Bir yakıt pilinin termodinamik verimliliği, elektrik enerjisi veya üretilen iş ile yakıtın mevcut enerjisi arasındaki oran temel alınarak tanımlanır. Bir yakıtın mevcut kimyasal enerji içeriği oluşum entalpisi (ΔH_f) olarak ifade edilir. Bununla birlikte, bir yakıt pilinde elektrik enerjisine dönüştürülebilecek maksimum enerji miktarı Gibbs serbest enerjisi ΔG_f tarafından sınırlıdır. Bu nedenle, yakıt pili verimliliğini tanımlamanın bir yolu, üretilen elektrik işinin mevcut Gibbs serbest enerjisine oranı şeklindedir ve (4.22)'deki gibi gösterilir:

$$\eta_{yp} = -\frac{Wcell}{\Delta Gf} \quad (4.22)$$

Mümkün olan maksimum elektrik işi Gibbs serbest enerjisindeki (ΔG_f) değişime eşdeğer olduğundan, hiçbir kayıp veya tersinmezlik dikkate alınmaz, ideal bir yakıt pilinde verim için maksimum teorik sınır %100'dür.

Ancak, yakıt pilinin verimliliğini temsil etmek için bu en iyi yaklaşım olmayabilir, çünkü bir yakıtın güç dönüşümü için kullanılabilir kimyasal enerji içeriği, oluşum entalpisi veya yakıtın ısı değerleridir. Bu nedenle, daha pratik bir yakıt pili verimlilik tanımı, Denklem (4.23)'te gösterildiği gibi üretilen elektrik işinin yakıtın oluşum entalpisi ile oranı olarak verilir.

$$\eta_{yp} = -\frac{Wcell}{\Delta Hf} = -\frac{neFE}{\Delta Hf} \quad (4.23)$$

Bir yakıt pilinde maksimum elektriksel iş, mevcut Gibbs serbest enerjisi ile sınırlıdır, bu nedenle bir yakıt pilinin maksimum termodinamik veya tersinir verimliliği, elektrik

enerjisine dönüşüm için Gibbs serbest enerjisi değişiminin, oluşum entalpisi şeklinde mevcut net yakıt enerjisine oranı olarak tanımlanır ve Denklem (4.24) ile gösterilir.

$$\eta_{yp,\ maks} = \eta_{yp,\ ters} = -\frac{\Delta Gf}{\Delta Hf} \tag{4.24}$$

Bu durum aynı zamanda, harici devre üzerinden hiçbir akımın geçmediği açık devre tersinir voltajı E_{ters}^{0} durumuna da karşılık gelir. Böyle bir durum maksimum elektrik enerjisi dönüşümüne yol açar ve bir yakıt pilinin tersinir termodinamik verimliliği için Denklem 4.25'teki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{yp,\ maks} = -\frac{\Delta Gf}{\Delta Hf} = -\frac{neFE_{ters0}}{\Delta Hf} \tag{4.25}$$

Gibbs serbest enerjisindeki değişim reaksiyonun oluşum entalpisinden daha az olacağından, tersinir bir yakıt pili için mevcut tüm enerji elektrik işine dönüştürülmesi mümkün değildir . Bu nedenle, bir yakıt pilinin ideal veya tersinir verimliliği, yüksek ve düşük sıcaklık limitlerine dayalı olarak ısı motorunun maksimum teorik verimliliğini belirleyen Carnot çevrimi verimliliği ile değil, Gibbs serbest enerjisi ile sınırlı olarak %100'den daha azdır.

Bir hidrojen-oksijen yakıt pilindeki oluşum entalpisi, ürün olarak suyun sıvı veya buhar olduğu varsayılarak tahmin edilebilir ve sırasıyla daha yüksek ısı değeri (hhv) veya daha düşük ısı değeri (lhv) olarak adlandırılır. Bu nedenle yakıt pilinin verimliliği, üründeki suyun durumuna bağlı olarak bu ısı değerlerinden birini kullanarak tanımlanabilir. Su ürünü sıvı olarak ele alındığında, hidrojen-oksijen yakıt pili reaksiyonu için oluşum entalpisi, daha yüksek ısı değeri olan ΔH_f = -285.835 kJ/mol olarak tahmin edilir. Benzer şekilde, ürün su buharı olarak kabul edilerek bu reaksiyonun oluşum entalpisi, daha düşük ısı değeri olan ΔH_f kJ/mol 1 = -241.83 olarak tahmin edilir. Daha yüksek ısı değeri, dönüşüm için mevcut enerjinin üst sınırlarını temsil ettiğinden yakıt pilinin tersinir verimini hesaplarken yüksek ısı değerini kullanmak daha uygundur.

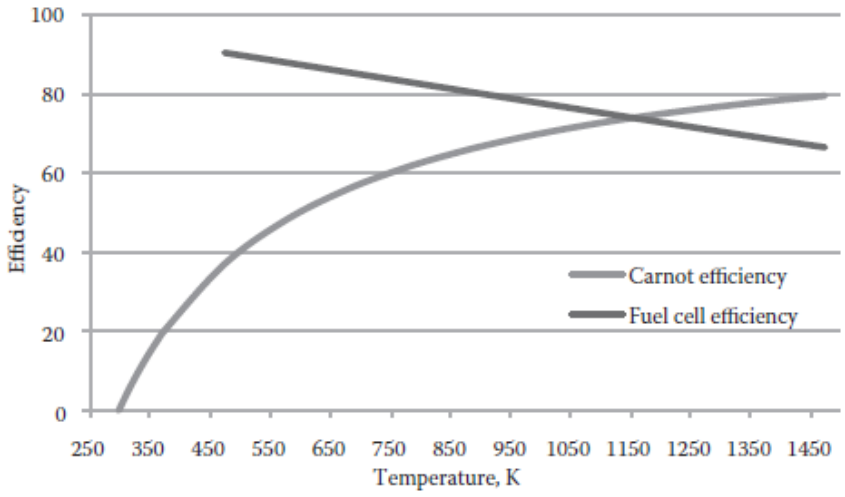
Örneğin, normal şartlar altında çalışan bir hidrojen-oksijen yakıt pili için daha yüksek ısı değeri ΔH_f = -285.835 kJ/mol ve Gibbs serbest enerjisi ΔG_f = -237,206 J/mol olarak

tahmin edilir. Yakıt pilinin tersinir termodinamik verimliliği Denklem (4.26)'da gösterilmektedir:

$$\eta_{th} = -\frac{\Delta Gh}{\Delta H} = \frac{237{,}206}{285{,}837} \text{ x100} = \%83.07 \qquad (4.26)$$

Şekil 4.3, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ve standart bir basınçta hidrojen-oksijen yakıt pilinin Gibbs serbest enerjisi farkı ve tersinir termodinamik verimliliğinin değişimini göstermektedir. Şekilde aynı zamanda, 25°C standart referans sıcaklığı tarafından verilen düşük sıcaklık ısı kaynağı ve yüksek sıcaklık ısı kaynağıyla artan sıcaklık değerleri için tersinir bir ısı motorunun Carnot çevrim verimliliği yer almaktadır. Bu yakıt pili verimini karşılamak için geleneksel bir ısı motorunun maksimum sıcaklığı 1150 K ve düşük sıcaklığı 25°C olan bir çevrimde çalışması gerekmektedir.

Dikkat edilmesi gereken nokta, Gibbs fonksiyonunun sıcaklık arttıkça azalmasıdır. Bu nedenle, bir yakıt pilinin tersinir işi ve termodinamik verimliliği sıcaklık arttıkça azalır. Bu durum, tersinir termodinamik verimliliğinin Carnot ısı motorunun verimliliğinden farklı olmasından kaynaklanır, çünkü burada verim veya tersinir iş sıcaklık arttıkça artar (Revankar ve Majumdar, 2014).



Şekil 4.3. Yakıt pili ve Carnot çevrimi verimlerinin sıcaklıkla değişimi

4.2.4.Yakıt Pili Kayıpları

Standart sıcaklık ve basınçta bir PEM yakıt pilinden elde edilecek maksimum voltaj 1.23 V olarak hesaplanmıştır. Ancak teorik değerden tersinmez kayıplar göz ardı edilmiştir ve böylece bu voltaj değerinde sapmalar gözlenmiştir. Yakıt pili sistemindeki bu tersinmez kayıplara polarizasyon adı verilir. Polarizasyon eğrisi ise belirli bir akım yoğunluğu yüklemesi için yakıt pilinin voltaj çıkışını gösterir. Polarizasyon eğrileri genellikle yakıt pilinden sabit bir akım çeken ve yakıt pili çıkış voltajını ölçen bir potansiyostat/galvanostat ile elde edilir. Yakıt pilleri için elde edilen polarizasyon eğrileri birbiriyle benzerlik gösterir ve bu eğrinin 3 bölgeden oluştuğu literatürde sıklıkla vurgulanmıştır ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir (Ulaş, 2021).



Şekil 4.4. Yakıt hücresinde potansiyel kayıplar ve polarizasyon eğrisi (Kılıç,2017)

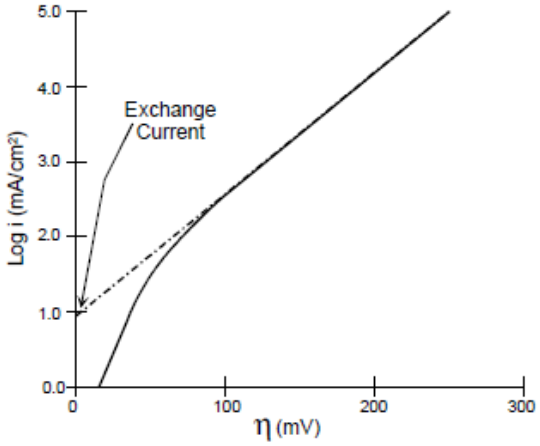
4.2.4.1.Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıpları, elektrot kinetiğinin yavaş olması sebebiyle meydana gelir. Elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar arasında, her ikisinde de tepkimeye giren türler tarafından aşılması gereken bir aktivasyon enerjisi bulunması açısından yakın bir benzerlik vardır. Gerçekte, aktivasyon kayıpları, her biri kendi reaksiyon hızına ve aktivasyon enerjisine sahip olan karmaşık yüzey elektrokimyasal reaksiyon adımlarının sonucudur. Genellikle, bir veya daha fazla hız sınırlayıcı reaksiyon adımının hız parametreleri ve aktivasyon enerjisi, belirli koşullar altında belirli bir elektrot üzerindeki aktivasyon kayıplarının neden olduğu voltaj düşüşünü kontrol etmektedir. Bununla

birlikte, ηact > 50-100 mV olan elektrokimyasal reaksiyonlar durumunda, aktivasyon polarizasyonundan kaynaklanan voltaj düşüşünü Tafel denklemi adı verilen yarı ampirik bir denklemle tahmin etmek mümkündür.

$$\eta_{th} = \frac{RT}{anF} \ln \frac{i}{i0} \tag{4.27}$$

Denklem (4.27)'de α elektrot üzerindeki tepkimenin elektron transfer katsayısıdır ve i_0 değişim akım yoğunluğudur. Şekil 4.5'te Tafel grafiği, bir yakıt pilinin aktivasyon polarizasyonunu görsel olarak göstermektedir. İhmal edilebilir polarizasyonda çekilebilecek maksimum akımın ve transfer katsayısının bir ölçüsü olan η_{act} = 0'daki ekstrapolasyonlu kesişme noktası tarafından verilen değişim akım yoğunluğunu ölçmek için kullanılırlar.



Şekil 4.5. Tafel grafiği

Tafel Denklemi'nin genellikle Tafel Grafiği ile kolayca ifade edilebilen yaygın formu Denklem (4.28)'deki gibidir:

$$\eta_{act} = a + b \ln i \tag{4.28}$$

burada a = (-RT/αnF) ln i_o ve b = RT/αnF olarak tanımlanır. Terim b, Tafel eğimi olarak adlandırılır ve ηact'ın ln i'ye göre grafiğin eğiminden elde edilir. Elektrokimyasal reaksiyonlar için daha düşük bir Tafel eğimi veren elektrokatalizörleri geliştirmek için

güçlü bir teşvik vardır, böylece akım yoğunluğundaki artışlar aktivasyon polarizasyonunda yalnızca nominal artışlarla sonuçlanır (Fuel cell handbook ,2004).

4.2.4.2.Direnç (Omik) Kayıpları

Omik kayıplar, elektrotların elektriksel dirençlerinden ve elektrolit içindeki iyonların akışına karşı oluşan dirençlerden kaynaklanan kayıplardır. Voltaj düşüşünün büyüklüğü sadece akımla orantılıdır ve Denklem (4.29)'da gösterilmektedir;

$$V = I \times R \tag{4.29}$$

Çoğu yakıt hücresinde, direnç genellikle elektrolitten kaynaklanır, ancak hücre bağlantıları veya bipolar plakalar da bu kayıplarda önemli rol oynar.

Gerilim kaybının diğer denklemlerle tutarlı olması amacıyla denklem akım yoğunluğu cinsinden ifade edilmektedir. Ayrıca, r sembolü hücrenin 1 cm^2'sine karşılık gelen direnç olarak kullanılır. Voltaj düşüşü için denklem şu hale gelir;

$$\Delta V_{ohm} = i\ (mA\ cm^{-2}) \times r\ (k\Omega\ cm^2) \tag{4.30}$$

Denklem (4.30)'da i akım yoğunluğu ifade eder. Eğer akım yoğunluğu i, mA cm^{-2} cinsinden verilmişse, hücrenin o alanına özgü direnç r, $k\Omega cm^2$ olarak verilir.

Hücrede omik kaybı azaltmanın üç yolu vardır. Bunlar;

- Mümkün olan en yüksek iletkenliğe sahip elektrotların kullanımı
- İyi tasarım ve hücre bağlantıları veya bipolar plakalar için uygun malzemelerin kullanımı
- Elektroliti mümkün olduğu kadar ince yapmak. Bununla birlikte, bu genellikle zordur, çünkü elektrotların üzerine montaj sırasında desteklik sağladığı için elektrolitin oldukça kalın olması gerekebilir veya hücre içerisinde dolaşan bir elektrolit akışına izin vermek için yeterince geniş olması gerekebilir. Her durumda, elektrotlardan birinin diğerine elektrolit aracılığıyla kısa devre olmasını engellemek için yeterince kalın olmalıdır, bu da belirli bir seviyede fiziksel dayanıklılık gerektirir (Larminie ve diğ., 2003).

4.2.4.3.Konsantrasyon Kayıpları

Konsantrasyon kayıpları gaz taşınımından kaynaklı kütle transfer kaybı olarak da bilinir. Yakıt pillerinin akım yoğunluklarında, reaktantların elektrokimyasal tepkime bölgesine ve ürünlerin elektrokimyasal reaksiyon bölgesinden dışarıya transferi sırasındaki yavaşlıklar bu kayıplara neden olmaktadır. Ayrıca, katalizör bölgesindeki reaktantlar tüketildikçe reaktantların kısmi basınçları düşmesi ve kısmi basıncın azalmasıyla kütle transfer kayıplarının artması olarak da açıklanmaktadır. Bu kayıplar polarizasyon eğrisinde rahatça gözlemlenmektedir. Akımın yüksek olduğu noktalarda tüketilen reaktantın artması sonucu, polarizasyon eğrisi aşağıya doğru eğimlenir ve bu bölge konsantrasyon kaybı olarak gösterilmektedir. Bu kayıplar, oksijenin ve hidrojenin saf olarak kullanılması, difüzyonun artırılması sonucunda azaltılabilir (Kılıç, 2017)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Yakıt pili performansı incelendiğinde, hücre performansı birçok parametreye (çevre şartları, operasyon koşulları, hücre bileşenlerinin etkisi vb.) bağlıdır ve hücre performansını iyileştirmek için bu parametrelerin optimum noktası belirlenmektedir. Bu parametreleri optimum noktada tutarak hazırlanan ve en iyi performansı vermesi beklenen bir yakıt hücresinin montajı sırasında, kapatma plakasındaki cıvataların uygun şekilde yerleştirilmemesi veya sıkıştırma işleminde gereken torkun uygulanamaması gibi durumlarda yakıt pili istenilen performansı gösterememektedir.

Kapatma plakasına uygulanan sıkıştırma kuvvetinin hücre performansına etkisi ile ilgili iki durum söz konusudur:

i. Sıkıştırma kuvveti yüksek olduğunda, gaz difüzyon tabakasının geçirgenliği veya gözenekliliği azalacaktır. Diğer taraftan bipolar plaka ile GDL arasındaki arayüzey temas direnci azalacak ve sonuç olarak yakıt pili performansı yükselecektir.
ii. Sıkıştırma kuvveti düşük olduğunda bipolar plaka ile GDL arasındaki temas direnci artacaktır ve yüksek temas direnci yüksek omik direnç, düşük akım yoğunluğu anlamına gelmekte ve hücre performansı düşecektir

Sıkıştırma kuvvetinin kapatma plakası üzerindeki etkisini görmek için tek hücreli PEM yakıt pilinde performans testleri yapılmaktadır. Bu tez kapsamında öngörüldüğü üzere tek hücreli bir proton değişim membranlı yakıt pili için deney düzeneği hazırlanmıştır. Deneyin ilk aşamasında hücre içerisine basınç ölçüm kağıtları yerleştirilerek mekanik bir deney gerçekleştirilmiş, hücrenin homojen basınç altında çalışmasını sağlayacak tasarıma ait optimum değer, yüzey cevap yöntemi ile belirlenmiştir. Bu safhalar sırası ile aşağıda anlatılmıştır.

5.1. Mekanik Sıkıştırma Deney Düzeneği

Yakıt pilinin performansını artırabilmek için yakıt ve oksitleyicinin aktif alanda homojen bir şekilde dağılması gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için kapatma plakasının tüm yüzeylerine eşit tork uygulanmalı ve cıvata konumları optimum sıkıştırmayı sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Bu sayede hücrenin aktif alanında homojen bir basınç dağılımı

sağlanmakta ve hücre performansı iyileşmektedir. Şekil 5.1'de tek hücreli PEM yakıt pili modülüne uygulanan sıkma torku ve cıvata yerleşimi görülmektedir.

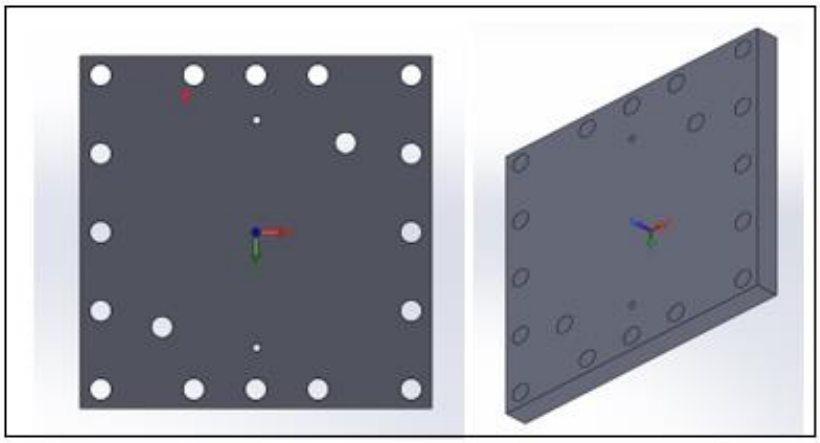


Şekil 5.1. Deney düzeneğinde kullanılan PEM yakıt hücresinde sıkma torku ve cıvata yerleşimi

Şekil 5.1'de görülen yakıt hücresi içerisinde dıştan içe doğru sırasıyla; cıvatalar, kapatma plakaları, akım toplayıcı plakalar ve basınç kağıdı bulunmaktadır. Bipolar plakaların mekanik sıkıştırma deneyi sonucuna kayda değer bir etkisinin olmaması (ince olması) sebebiyle ve plakanın yapılan ilk deneyde zarar görmemesi için mekanik sıkıştırma deneylerinde hücre içerisine yerleştirilmemiştir.

Deneyde 3 farklı malzemeden oluşan kapatma plakalarına ait hem cıvataların hem de sıkıştırma torkunun farklı kombinasyonları ile yakıt pili performansı incelenmiştir. Yakıt pili kapatma plakaları, TÜBİTAK'ın bünyesinde halihazırda bulunan 50 cm^2'lik aktif alan ve akım toplayıcının ölçüleri baz alınarak ölçeklendirilmiştir. Bu ölçülere göre kapatma plakasının geometrik tasarımı SOLIDWORKS 2018 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Kapatma plakasının tasarımına ait CAD model Şekil 5.2'de gösterilmiş olup, plakanın ölçüleri 130mm*130mm*10 mm'dir. Cıvata delik çapları ise 8 mm, sabitleme pimleri için delik çapları ise 3 mm olarak belirlenmiştir.

Oluşturulan 3B tasarım, Özdem Makine A.Ş. tarafından kapatma plakaları 3 farklı malzeme (delrin, alüminyum ve paslanmaz çelik) olacak şekilde tabakalar halinde tedarik edilmiştir. Bu tabakalar, CAD modelinde verilen ölçülere göre Maxmil marka CNC'de işletilmiştir. Şekil 5.3'de tabaka şeklindeki delrin kapatma plakasının işlenmesi gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Kapatma plakalarının CAD modeli



Şekil 5.3. Delrin kapatma plakasının işlenmesi

Aşağıdaki bölümlerde kapatma plakalarında kullanılan ürünlere ait karakteristik özelliklere ve deneylerde kullanılan diğer malzemelere yer verilmiştir.

5.1.1.Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kapatma plakası üzerine uygulanan kuvvetin eşit dağıtılmasını sağlamak amacıyla çeşitli cıvata konfigürasyonları yapılmıştır. Bu konfigürasyonda kritik nokta, moment açısından ağırlık/yük merkezinin kapatma plakasının merkezinde olacak şekilde denk gelmesidir. Ayrıca yapılan konfigürasyonda cıvata delikleri çakışma yapmayacak şekilde ayarlanmış ve Şekil 5.2'deki gibi modellenmiştir. Modeldeki cıvata konumları, bipolar plakanın içerisinden geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda, plakanın içinden cıvata geçirildiğinde sıkıştırmaya bağlı olarak plakanın kırıldığı gözlenmiştir, bu yüzden cıvata konumları plakanın dışında olacak şekilde

belirlenmiştir. Ayrıca modelde, her bir cıvata konfigürasyonu için aynı kapatma plakası kullanmak maksadıyla 16 adet cıvata deliği konumu belirlenmiş ve bu konuma göre kapatma plakası tasarlanmıştır. Daha sonra, yakıt hücresine yakıt ve oksijenin girişini sağlamak için iki adet 8 mm çapında gaz deliği ve ayrıca hücre montajı sırasında hücre bileşenlerini sabit tutmak için iki adet 3 mm çapta sabitleme pim deliği belirlenerek tasarım tamamlanmıştır. Tasarımı tamamlanan bu model, CNC tezgahta işlenmiş ve kapatma plakası malzemesi, sıkma torku ve cıvata yerleşimi kıyaslanmıştır.

Yapılan çalışmada, yakıt pili için kare şeklinde 50 cm^2'lik (7.071 cm x 7.071 cm) bir aktif alan belirlenmiş ve buna göre MEA hazırlanmıştır. Kare şeklindeki aktif alan; elektrokimyasal reaksiyonların homojen şekilde gerçekleşmesi, kullanımının daha pratik olması (kesilmesi, montajı gibi) sebebiyle tercih edilmiştir. 50 cm^2'lik aktif alan ise reaksiyon yüzeyinin fazla olması ve böylece yakıt piline sıkma torku uygulandığında hücre kenarları ve orta noktası arasındaki farkın daha iyi gözlemlenebilmesi için seçilmiştir. Küçük bir aktif alana sahip yakıt pilinde, bu etkiyi görmek daha zor olacağı için tercih edilmemiştir.

Yakıt pili kapatma plakasının performans deneyleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan bipolar plaka, membran, cıvata gibi yakıt hücresi bileşenleri, torkmetre ve deney düzeneğinde kullanılan diğer malzemeler TÜBİTAK MAM tarafından karşılanmıştır.

5.1.1.1.Kapatma Plakası Malzemeleri

Tasarlanmış olan kapatma plakası için literatürde var olan malzemeler incelenmiş ve mukavemet açısından bu malzemeler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Yapılan karşılaştırmada, yakıt hücresindeki kapatma plakası malzemeleri tasarıma, uygulamadaki gereksinime ve isteğe bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Mekanik test deney düzeneğinde ise kapatma plakası malzemesi olarak delrin, alüminyum ve paslanmaz çelik seçilmiş ve bu malzemeler birbirleriyle mukayese edilmiştir. Örneğin; termal iletkenlik açısından alüminyum veya paslanmaz çelik tercih edilirken, delrin tercih edilmez. Metalik malzeme olarak alüminyum ve paslanmaz çelik kullanılırken, ısıl iletkenlik açısından ise alüminyum daha fazla tercih edilir. Bu malzemelere ait karakteristik özellikler aşağıda verilmiştir.

5.1.1.1.1.Delrin (POM)

Delrin, formaldehitten hazırlanmış bir polimer olup polioksimetilen (POM) olarak da adlandırılmaktadır. Bu malzemeler; yüksek mukavemet, düşük sürtünme katsayısı ve iyi yorulma dayanımı göstermesinin yanı sıra nemden etkilenmemektedir. Ayrıca yüksek erime sıcaklığına sahip bu malzemeler, çözücüler tarafından kolay çözülmezler. Bu karakteristik özellikleri sayesinde delrinler, otomotiv sektörü başta olmak üzere birçok alanda metallere alternatif malzeme olarak kullanılmaktadır. Delrin bir termoplastik malzeme olup, piyasada Celcon ve Hostaform olarak da adlandırılmaktadır. Bu malzemelere ait özellikler aşağıda verilmiştir (Turgut, 2012):

- Yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir.
- Yüksek aşınma dayanımı gösterir.
- Yüksek erime sıcaklığına sahiptir.
- Düşük sürtünme katsayısına sahiptir.
- Nemli ortamlardan etkilenmemektedir.
- Kimyasal direnci iyidir.

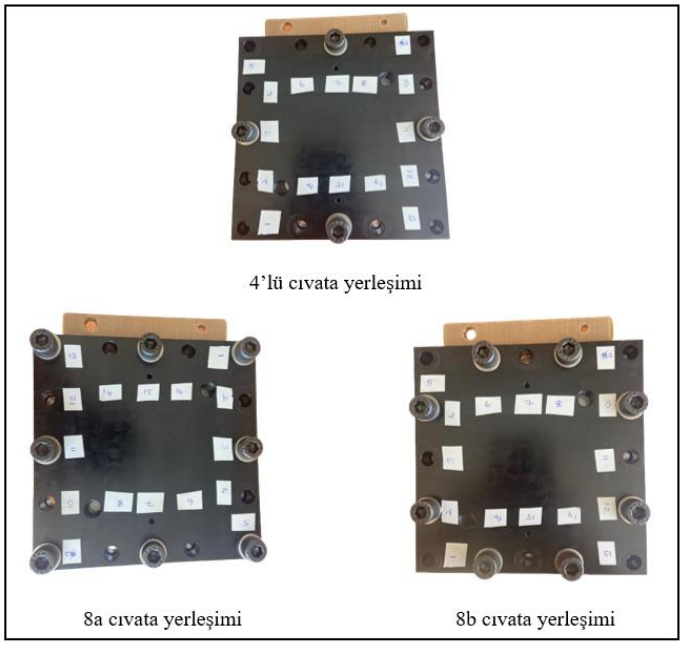
POM malzemelere ait mekanik özellikler ise Tablo 5.1'de verilmiştir (Özvardarlı, 2012).

Tablo 5.1. Delrin malzemelerin mekanik özellikleri

MEKANİK ÖZELLİKLER (ORTALAMA DEĞERLER)	DELRİN MALZEME	BİRİM
Çekme Dayanımı	65.6	MPa
Kopma Uzaması	38	%
Akma Uzaması	17.2	%
Çekme Modülü	3.12	GPa
Eğilme Modülü	2.87	GPa
Eğilme Akma Dayanımı	87.9	MPa
Basınç Akma Dayanımı	49.5	MPa
Pozisyon Oranı	0.3	
Yoğunluk	1.42	g/cc

Bu tez kapsamında 3 farklı cıvata yerleşimine ait delrin kapatma plakalarına 1 Nm, 5 Nm ve 9 Nm tork uygulanmış ve hücre içerisine yerleştirilen basınç kağıdı ile basınç dağılımı

gözlenmiştir. Delrin kapatma plakalarının 3 farklı cıvata yerleşimi Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Delrin kapatma plakasına ait cıvata yerleşimleri

Şekil 5.4'te gösterilen kapatma plakalarında cıvata konumları numaralandırılmış ve cıvata konumları dikkate alınarak sırasıyla tüm cıvatalara sıkma kuvveti uygulanmıştır. Sıkma kuvveti uygulanırken çapraz şekilde numaraya karşılık gelen cıvatalar sıkılmış, böylece homojen basınç dağılımı elde etmek hedeflenmiştir.

5.1.1.1.2.Alüminyum

Alüminyum %8 oranıyla mineralleri halinde tabiatta en çok bulunan metal olarak bilinmektedir. Element olarak bolluk sırasında ise oksijen ve silisyumdan sonra gelmektedir. Alüminyum doğada oksit, sülfat, florür ve silikat halinde çok değişik hallerde bulunabilirse de, kullanılan yegâne alüminyum cevheri, boksit adı verilen, hidratlaşmış bir alüminadır. Bu malzemelere ait özellikler aşağıda verilmiştir (Darıdereli, 2010):

- Hafif bir malzemedir.
- Şekillenmesi ve işlenmesi kolaydır.
- Yüksek mukavemete sahiptir.

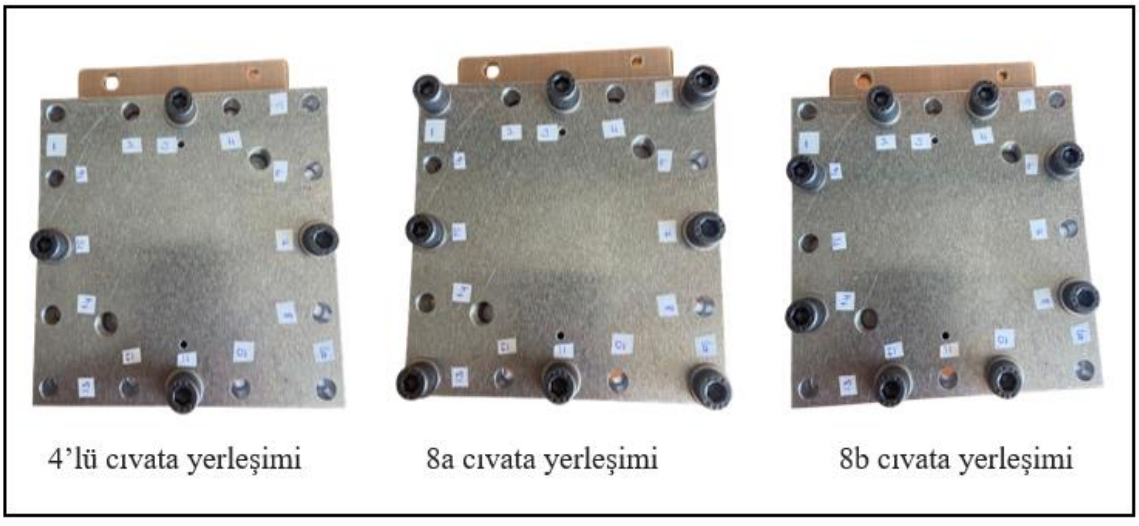
- Yüksek aşınma dayanımı gösterir.
- Isı ve elektrik iletkenliği iyidir.

Alüminyum malzemelere ait mekanik özellikler ise Tablo 5.2'de verilmiştir (Yıldırım, 2006).

Tablo 5.2. Alüminyum malzemelerin mekanik özellikleri

MEKANİK ÖZELLİKLER	DÖKÜM AL.	HADDE AL.	ISIL İŞLEME TABİ TUTULMUŞ AL.	BİRİM
Çekme Mukavemeti	90-120	180-280	70-110	MPa
Akma Mukavemeti	30-40	160-240	50-110	MPa
Uzama	18-25	3-5	30-40	%
Büzülme	40-55	60-85	80-95	%
Sertlik (Brinell)	24-32	45-60	80-95	

Yapılan çalışmada kullanılan alüminyum kapatma plakasına ait 3 farklı cıvata yerleşimi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Alüminyum kapatma plakasına ait cıvata yerleşimleri

5.1.1.1.3.Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelikler kullanım alanına göre farklı özelliklerde üretilmektedir. Çeliğin içerisine; krom, karbon, nikel, titanyum, molibden, bakır, azot, alüminyum gibi elementler belirli oranlarda eklenerek korozyona karşı dayanıklı olması sağlanmaktadır.

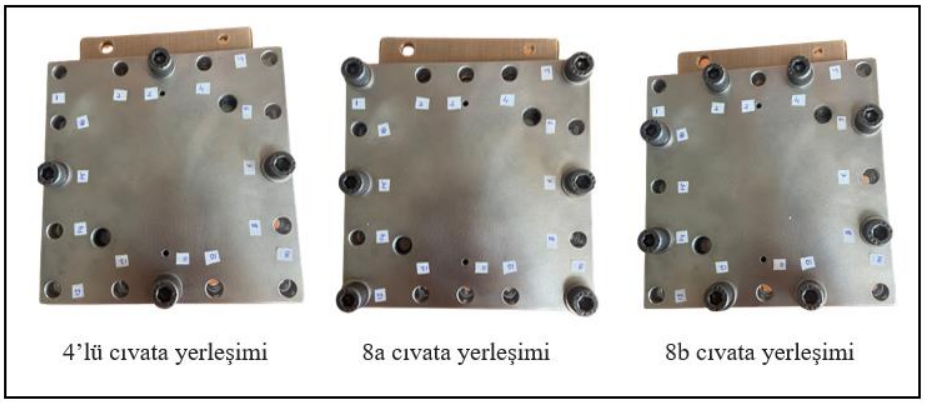
Yüksek mukavemet değerleri, imalat kolaylığı, estetik özellikleri, uzun ömürlü olmaları, kriyojenik özellikleri ve en önemlisi korozyona dayanımları paslanmaz çeliklerin başlıca tercih edilme nedenleridir.

AISI 409L ve 430 kalite ferritik paslanmaz çelikler için EN ISO 1088-2 mekanik özellik standardı Tablo 5.3'teki gibidir (Güraydın, 2022).

Tablo 5.3. Paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özellikleri

	EN 10088- 2	**Çekme Muk. Rm**		**Akma Muk. Rp0,2 (Long)**	**Akma Muk. Rp0,2 (Tr.)**	**Uzama**	
		(MPa)		**(MPa)**	**(MPa)**	**Min. %**	
AISI	**EN**	**Min.**	**Maks.**	**Min.**	**Min.**	**<3 mm**	**≥3 mm**
430	14.016	430	600	260	280	20	20
409L	14.512	380	560	210	220	25	25

Paslanmaz çelik kapatma plakası olarak deneyde kullanılan 3 farklı cıvata yerleşimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Paslanmaz çelik kapatma plakasına ait cıvata yerleşimleri

Kapatma plakası malzemelerine ait karakteristik özellikler ve bu malzemelere ait modeller, şekillerde gösterilmiştir. Deneyde kullanılan kapatma plakası malzemeleri karşılaştırması Tablo 5.4'te özetlenmiştir.

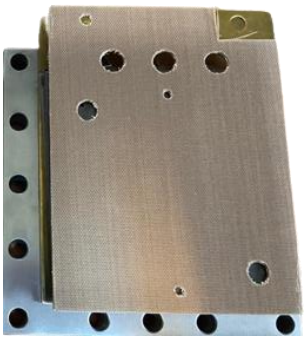
Tablo 5.4. Kapatma plakası malzemelerinin karşılaştırılması

MALZEME	DELRİN	ALÜMİNYUM	PASLANMAZ ÇELİK
Yoğunluk	Düşük	Orta	Yüksek
Mekanik Dayanıklılık	Orta	Orta	Yüksek
Termal İletkenlik	Orta	Yüksek	Orta
Elektriksel İletkenlik	Düşük	Yüksek	Yüksek
Kimyasal Dayanıklılık	İyi	Düşük	Yüksek
Korozyon Direnci	İyi	Düşük	Yüksek
İşlenebilirlik	İyi	İyi	Orta
Fiyat	Uygun	Uygun	Yüksek

Tablo 5.4'te kapatma plakasına ait genel özelliklere ait bir karşılaştırma tablosu verilmiştir. Malzeme seçimi yapılırken tasarım gereksinimi ve uygulama alanı dikkate alınarak yapılır ve her bir malzemenin uygulama alanına göre avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Bu bölümde kapatma plakası, mekanik dayanıklılık açısından karşılaştırma yapılmış ve yakıt hücresinde homojen bir basınç dağılımı elde etmek istenmiştir.

5.1.1.2.Akım Toplayıcı Plaka

Akım toplayıcı plaka olarak bakır malzeme kullanılmıştır. Ayrıca plakanın temas direncini azaltmak amacıyla yüzeyine altın kaplama yaptırılmıştır. Bakır plaka Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.7. Akım toplayıcı plaka

5.1.1.3.Basınç Ölçüm Filmleri

Yakıt hücresine uygulanan sıkma torkunun etkisi basınçlı kağıt (film) ile gözlenmiştir. Yapılan deney düzeneğinde akım toplayıcı plakaların arasına, 100mm*100mm ebatlarında basınç ölçüm filmleri yerleştirilmiş ve her bir basınç testi için ayrı film kullanarak sıkma torkunun etkisi birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu teste göre, basınç uygulanan yerde basınç kağıdı renginin koyulaştığı, az kuvvet uygulanan yerde ise kağıdın beyazlaştığı gözlemlenmiştir. Basınç kağıdı testleri ile homojen bir basma elde edilmesi hedeflenmiştir. Basınç ölçüm filmlerine ait görsel Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Basınç ölçüm filmleri

5.1.1.4.Cıvatalar

Bağlantı elemanı olarak kullanılan cıvatalar; uygulama alanları ve kullanım amaçlarına bağlı olarak çeşitli özelliklere sahiptir. Örneğin kalın çaplı cıvataların mukavemeti daha yüksek, dolayısıyla yük taşıma kapasitesi daha fazladır. Bu nedenle kalın çaplı cıvatalar büyük aktif alana sahip yakıt pillerinde kullanılmaktadır. İnce çaplı cıvatalar ise daha az yer kaplar ve hafif uygulamalar için tercih edilir. Bu çalışmada, kapatma plakası ve aktif alanın boyutları dikkate alınmış ve literatürde de yaygın olarak karşılaşılan standart metrik 8 çaptaki paslanmaz çelik cıvatalar kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada, cıvata deliklerinin konumları başlangıçta fazla açık (dörtlü cıvata yerleşimi) seçilmiş, daha sonra ise kapatma plakası üzerine uygulanan yükü eşit dağıtmak amacıyla cıvata sayısı arttırılmış ve buna göre cıvata yerleşim konfigürasyonları belirlenmiştir. Son olarak, kapatma plakasında yer alan 16 adet cıvata deliği numaralandırılmış ve her bir cıvata kombinasyonunda eş değer sıkma torku uygulayarak deneyde daha etkili sonuca ulaşmak

hedeflenmiştir. Yakıt pili montajı sırasında ise cıvata sıkma işlemi için çapraz sıkma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasının amacı ise cıvataların eşit ve dengeli bir şekilde sıkılmasını sağlamak ve böylece uygulanan yük dağılımını eşit şekilde gerçekleştirmek için yapılır.

5.1.1.5.Torkmetre

Torkmetre, tork miktarını belirlemek için kullanılan bir ölçüm cihazıdır ve birimi Newton metre (Nm) cinsinden ifade edilir. Yaptığımız deneyde, cıvataları sıkarken öncelikle tork ayarı yapılmıştır. Yakıt hücresine uygulanan tork miktarı, gaz difüzyon tabakasındaki gözenekliliğe zarar vermeyecek ve yakıt hücresinden gaz kaçağı olmayacak şekilde 1 Nm, 5 Nm ve 9 Nm seçilmiştir ve torkmetre bu değerlere göre sırasıyla ayarlanmıştır. Daha sonra tüm cıvatalar numaralandırılarak cıvata ve somunları yerleştirilmiş, ardından torkmetre ile çapraz sıkma işlemi yapılarak her bir cıvata eşit ve dengeli bir şekilde sıkılmıştır.

5.1.2.Yakıt Hücresinde Homojen Basınç için Optimum Koşulların Belirlenmesi

Bu bölümde yakıt hücresinde homojen basınç uygulanmasını etkileyen faktörler belirlenmiş ve yapılan mekanik testte maksimum verim alabilmek için parametreler optimum koşulları sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Bu koşullar oluşturulurken, Design-Expert 6.0 programı deneme sürümünde yer alan Yüzey Cevap Yöntemi (YCY) kullanılmıştır.

Design-Expert 6.0 programı, deneyden alınan sonuçları kullanarak matematiksel bir modelin oluşturulmasını sağlar ve programa girilen parametrelerin optimum koşullarını belirlemek amacıyla kullanılır. Bu program sayesinde deney sayısı azalır ve bu sebeple deney gerçekleştirilirken hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmiş olur.

Bu çalışmada, yakıt pili kapatma plakasının performansına etki eden bağımsız değişkenler; plaka malzemesi (delrin, alüminyum, paslanmaz çelik), cıvata konfigürasyonları (4a, 8a, 8b) ve sıkma torku (1 Nm, 5 Nm ve 9 Nm) olarak belirlenmiştir. Değişkenlerin cevaba etkisinin incelenmesi amacıyla Merkezi Karma Tasarım Design–Expert programına uygulanmıştır. Belirlenen değişkenlerin matematiksel modeline ait polinomiyal denklem 5.1'de verilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{3} \sum_{J=i+1}^{3} \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (5.1)$$

Burada

X_i ; değişken,

β_0 ; sabit (katsayı),

β_i ; lineer kesişim katsayısı,

β_{ii} ; quadratik kesişim katsayısı,

β_{ij}; ikinci derece kesişim katsayısıdır.

e ; kalan ve 5.2 eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.2)$$

y_i ; deneysel cevap,

$\hat{y}_i$; tahmin edilen cevaptır.

Programdaki veriler; bağımsız parametreler (kapatma plakası malzemesi, tork ve cıvata yerleşimi) ve bağımlı parametreler (basınçlı kağıt sıkıştırma oranı) olarak belirlenmiş ve bu veriler Design Expert programına işlenmiştir. Merkezi Karma Tasarımına göre toplam deney sayısı 20 olarak belirlenmiştir. Buradaki deney sayısı, bağımsız değişken sayısını temsil eden k değeri için $2^k + 2k + 6$ formülüne dayanmaktadır. Bu durumda üç adet bağımsız değişken olduğu için $2^3 + (2x3) + 6 = 8+6+6 = 20$ olarak hesaplanmıştır. 20 deneyin 6 adeti merkez noktasında gerçekleştirilmiş, yani bağımsız değişkenler orta aralık değerinde (0,0,0) ayarlanmıştır. Geri kalan 14 deney ise merkezin dışında gerçekleştirilmiş olup, bağımsız değişkenler verilen aralık içinde farklı seviyelere göre belirlenmiştir.

Merkezi noktadaki deneyler tekrar eden deneylerdir ve genellikle modelin hatasını tahmin etmek ve modelin doğruluğunu kontrol etmek için kullanılırlar. Ancak yapmış olduğumuz deneyde, tekrar eden deney sayısı minimize edilerek merkez noktasındaki deney sayısı 6'dan 3'e düşürülmüştür. Böylece 20 deney yapmak yerine deney sayısı 17'ye düşürülmüş ve buna göre deney planı yapılmıştır. Tablo 5.5'te deneysel tasarım koşulları ve karşılık gelen sonuçlar yer almaktadır.

Tablo 5.5. Optimizasyon deney koşulları ve deney sonuçları

Sıra Nu.	Faktör 1 A:Malzeme	Faktör 2 B:Tork (Nm)	Faktör 3 C:Vida Sayısı	Cevap 1 R1:Basınçlı Kağıt Sıkıştırma Oranı
1	0	0	0	23.61
2	0	0	0	23.61
3	-1	0	0	14.3
4	0	1	0	35.08
5	1	-1	-1	6.01
6	-1	-1	-1	1.1
7	-1	1	1	14.44
8	-1	-1	1	6
9	1	0	0	27.79
10	1	1	1	63.44
11	0	-1	0	13.59
12	-1	1	-1	6.27
13	0	0	0	23.61
14	0	0	-1	20.09
15	1	1	-1	62.53
16	0	0	1	28.21
17	1	-1	1	18.88

YCY yanıt değişkeninin optimize edilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, yanıt değişkeni normalize edilir ve normalize edilmiş aralık -1 ile +1 arasında bir değer olarak ifade edilir. Yanıt değişkeninde en kötü değer olarak -1 değeri, en iyi değer olarak ise +1 değeri atanır. Bu şekilde, optimizasyon süreci için bir referans noktası belirlenmektedir. Ayrıca bu yöntemde, modelin doğruluğunu artırmak ve doğru sonuca ulaşmak için yanıt değişkeninin aralık değerlerinin eşit olması istenmektedir. Bu sebeple yakıt hücresine uygulanan sıkma torku değerlerinin aralıkları eşit tutulmuş ve 1 Nm, 5 Nm ve 9 Nm olarak belirlenmiş ve analiz yapılmıştır.

Tablo 5.5'te ilk sütunda (Factor 1) kapatma plakası malzemeleri delrin, alüminyum ve paslanmaz çelik için karşılık gelen numerik rakamlar sırasıyla -1, 0 ve 1 verilmiştir. İkinci sütunda tork parametreleri için 1 Nm yerine -1, 5 Nm yerine 0 ve 9 Nm yerine 1 yazılmıştır. Son olarak üçüncü sütunda cıvata yerleşimleri veya cıvata sayısı için 4'lü

yerleşime -1, 8a yerleşime 0, 8b yerleşime 1 değeri verilmiştir. Daha sonra Tablo 5.1'de yer alan 17 deney yapılmış ve bu deneylere karşılık gelen basınç kağıdı ile belirlenen yakıt hücresi sıkıştırma oranları yazılmıştır.

Yakıt hücresi kapatma plakasının 8a cıvata konumunda 5 Nm Tork ile sıkılması durumunda 3 farklı malzemeye göre basınç kağıtlarının görünümleri Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Basınç ölçüm filmlerinin görünüşü

Şekil 5.9'da yer alan basınçlı kağıtların sıkıştırma oranı ise CANVA programı ile ölçeklenmiştir. CANVA programı, görsel olarak tasarım yapan bir grafik tasarım programıdır. Bu programa veri aktarımı yapabilmek için öncelikle basınç kağıdı sıkıştırma görüntüleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Daha sonra HSL (hue, saturation ve luminosity) renk modeline göre veri tabanı kütüphanesi oluşturulmuştur. HSL renk modeli üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar: Hue (Ton), Saturation (Doygunluk) ve Lightness (Açıklık).

Ton; renk çemberi içerisindeki rengin konumunu ifade etmek için kullanılır ve 0 ile 360 derece arasında bir açı ile ölçülür. Bu açıda temel renkler (kırmızı, yeşil, mavi) ve ara renkler (sarı, turuncu gibi) bulunur. Doygunluk; renklerin canlılığını ifade eder ve 0 ile 100 arasında bir yüzde değeri ile gösterilir. Düşük doygunluk değeri soluk renk yani gri tondaki renkleri temsil ederken, yüksek doygunluk değeri canlı görünümü yani zengin renk tonlarını temsil etmektedir. Açıklık ise renklerin parlaklığını gösterir ve 0 ile 100

arasında bir yüzde değer olarak ifade edilir. %0 değeri siyahı, %100 değeri ise beyazı ifade etmektedir.

Yaptığımız mekanik test deneyinde, yakıt hücresine sıkma torku uygulanmış ve hücre içerisinde yer alan basınç kağıdında tork etkisiyle birlikte baskı olan yerde, kağıdın beyaz renkten kırmızı renge dönüştüğü gözlemlenmiştir. Basınçlı kağıttaki baskı rengi Şekil 5.9'da görüldüğü gibi kırmızı renktedir ancak veri kütüphanesinde basınçlı kağıdın rengi herhangi bir karışıklığı önlemek için yeşil renk kodu ile tanımlanmıştır. Bahse konu olan basınçlı kağıda ait görsel Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Basınç ölçüm filmlerin analizi

Yakıt hücresine basınç uygulandığında basınç kağıdında bulunan mikro kapsüller patlar ve böylece basınç kağıdının üzerinde kırmızı renk oluşumları gözlenir. Görsel olarak basınç kağıdı, basınç uygulanan bölge ve bu bölgeye etki eden basıncın büyüklüğü hakkında bilgi verir. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi basınçlı kağıtta, basınç uygulanan bölgede renk yoğunluğu daha koyu iken, temasın iyi olmadığı yerde ise renk yoğunluğunun daha az olduğu gözlenmiştir. Temasın hiç olmadığı yerde ise herhangi bir renk değişimi olmamış, bu bölgenin beyaz renkte kaldığı gözlenmiştir. Basınçlı kağıttaki baskı oranının sayısal analizini gerçekleştirmek için HSL renk kodlarının matematiksel olarak tanımlandığı veri kütüphanesinden yararlanılmış ve milimetre kare başına düşen baskı oranını bulabilmek için bir yazılım yapılmıştır. Bu yazılımda, yeşil alanın beyaz alana oranı şeklinde yüzdelik ifade ile basınçlı kağıdın baskı oranı elde edilmiş ve Tablo 5.4'teki 17 deney yapılarak karşılıklarına bu değer yazılmıştır.

Design Expert programına deneysel veriler işlendikten sonra küçük kareler metodu ile bu verilerin analizi yapılmıştır. Verilere ait model denklemlerinin kodlanmış faktörler cinsinden ifadesi:

Basınçlı kağıt sıkıştırma oranı, R1:

$$R1 = +23.94 + 8.22*A + 9.73*B + 4.12*C + 4.15*AB + 2.62*AC - 0.3113*BC - 3.15*A^2 - 2.54*B^2 - 0.0442*C^2$$

olarak bulunmuştur. YCY'de deneysel verilerle matematiksel model arasında bir benzerlik yakalanmak istenmektedir. Bu benzerliği yakalayabilmek için istatistiksel ifadeler kullanılır ve bu ifadelere göre tasarımın deney verileriyle uyumu veya yapılan tahminlerin doğruluğu belirlenmektedir. Tablo 5.6'da yapılan modele ait istatistiksel değerler verilmiştir.

Tablo 5.6. İstatistik değerler

Standart Sapma	1.53	**R^2**	0.9922
Ortalama	20.57	**Düzeltilmiş R^2**	0.9822
Katsayı Varyasyonu %	7.43	**Tahmin Edilen R^2**	0.9148
		Ortalama Sapma Hassasiyeti	37.663

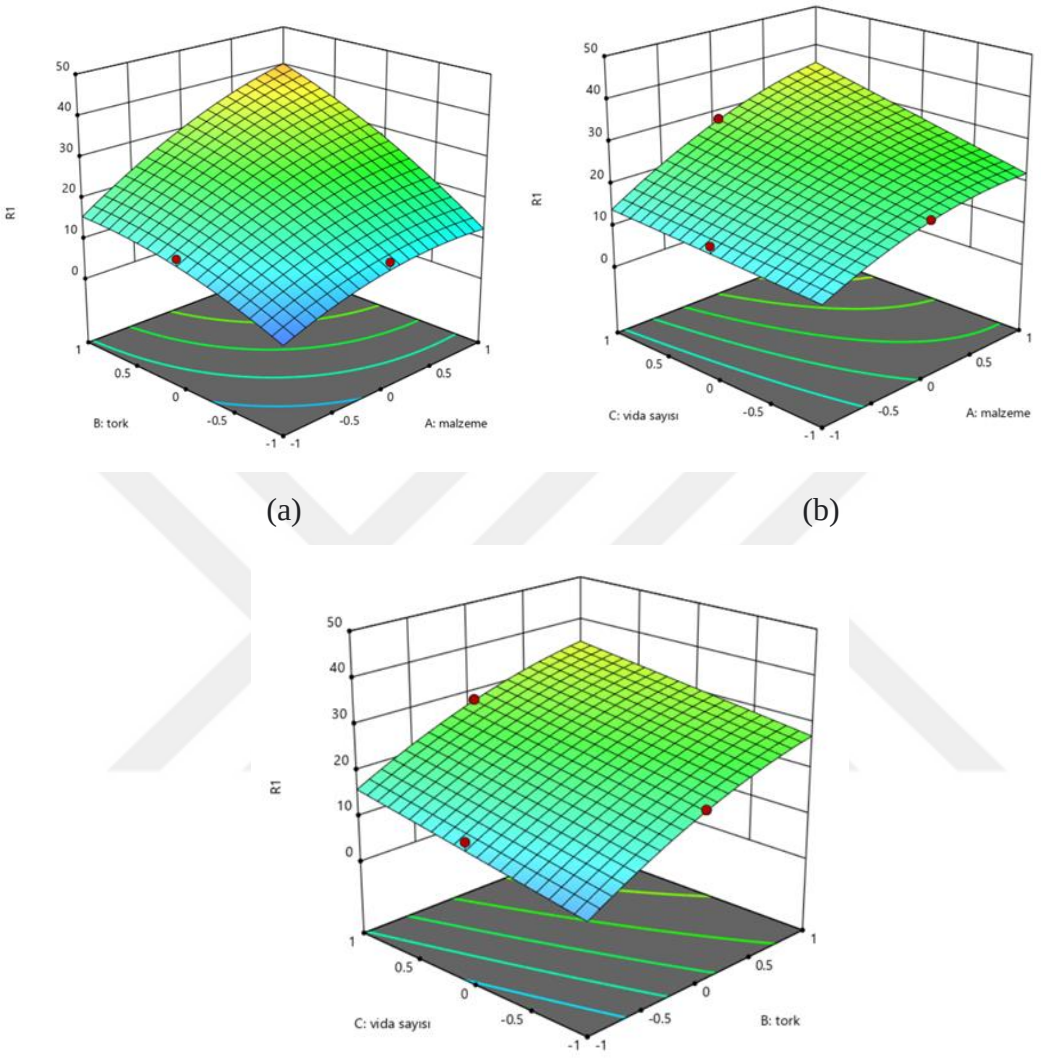
Standart sapma, programdaki verilerin ortalamadan ne kadar uzaklaştığını gösterir. Ortalama değer, verilerdeki tüm değerlerin toplanarak veri sayısına bölünmesiyle elde edilir. Katsayı varyasyonu ise standart sapmanın ortalama değere bölünmesiyle elde edilen ve yüzdelik cinsinden ifade edilen bir varyasyon çeşididir.

Tablo 5.6'da görüldüğü gibi istatistiksel analiz ve katsayı belirleme (R^2) değeri 0,9922 olarak verilmiştir. R^2 değeri 1'e yaklaştıkça modeldeki verinin açıklanabilirlik oranı artmaktadır ve % 99 güvenirlikte regresyon analiz sonucu oldukça iyi bir sonuçtur. Ancak yüksek bir R^2 değeri her zaman iyi bir model anlamına gelmemektedir. Çünkü R^2 değeri, modele hem ilgili hem de ilgisiz değişkenlerin eklenmesiyle oluşmaktadır. Dolayısıyla R^2 değeri, modelin tahmin edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Düzeltilmiş R^2 değeri de modelin karmaşıklığına bağlı olarak regresyon modelinin açıklanabilirliğini incelemektedir ve modeldeki bağımsız değişkenlerin sayısını dikkate almaktadır. Ayrıca

bu değer, modele katkısı olmayan terimlerin modelden çıkartılmasıyla elde edildiği için ölçüt olarak daha doğru sonuç verir. Tahmin edilen R^2 değeri ise modelin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılır. Yapılan tasarıma ait değerlendirmelerde, Düzeltilmiş R^2 ve Tahmin edilen R^2 değerlerini birlikte maksimize eden model dikkate alınmaktadır ve bu değerlerin %100'e yakın olması istenmektedir. Ortalama sapma hassasiyeti ise modelin tahminlerinin gerçek değer ile uyumunu yani verideki sinyal-gürültü oranını ölçmek için kullanılır. İstatistiksel analize göre modeldeki gürültü-sinyal oranı 4'ten büyük olması gerekir ve yapmış olduğumuz analizde bu oranın 37.663 olduğu gözlenmiştir. Ayrıca istatistik analizinde düzeltilmiş R^2 değeri ile tahmin edilen R^2 arasındaki farkın 0.2'den az olması istenmektedir. Eğer bu değer 0.2 değerinden büyük ise modeldeki veya deneydeki verilerde bir sorun olduğu varsayılır ve deneysel modeldeki verilerin kontrol edilmesi gerekir. Tablo 5.5'e göre bu değer 0.0674 (0.9822-0.9148 = 0.0674) olarak hesaplanmıştır. Son olarak, bu yöntem kullanılırken regresyon analizi değerinin (R^2) %90'ın altında olması istenmemektedir. Çünkü bu değer, modelin veriyle uyumunu gösterir ve bu uyumun açıklanabilirlik oranını temsil eder. Eğer tasarladığımız model ile gerçek olan bir sistem uyum sağlamazsa optimizasyon sonucumuz yanlış çıktığı anlamına gelmektedir.

Yapılan ilk mekanik test deneyinde 10 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik kapatma plakasına 9 Nm tork uygulandığında, paslanmaz çeliğin bombe şeklini alarak büküldüğü yani sadece kenarlardan bastığı ve orta noktanın temas etmediği gözlenmiştir. Dolayısıyla, basınçlı film kağıdında homojen dağılım gözlenmemiş ve bu deney sonucunda regresyon değeri düşük çıkmıştır. Daha sonra, aynı kapatma plakasına 13 Nm tork ile sıkma işlemi tekrar yapılmış; bu tork değerinde dahi basınçlı kağıttaki sıkıştırma oranı değişmemiştir. Buna istinaden paslanmaz çeliğin mukavemeti, belirli bir sıkma değerini karşılamak için yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, paslanmaz çelik kapatma plakasının kalınlığının yetmediği ve daha kalın bir plaka seçilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Ardından, plaka kalınlığı 10 mm'den 16 mm'e çıkartılarak deneyler tekrar yapılmıştır. Bu durumda regrasyon değeri Tablo 5.5'te görüldüğü üzere %99 olarak bulunmuş ve 16 mm plaka kalınlığının yapılan deney için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneyde, polimer malzemede de bu etki (bombeleşme) net bir şekilde gözlemlenmiştir; ancak bu plaka için plakaların kalınlığının 16 mm'e çıkarılması

durumunda bile yeterince iyileşme olmayacağı öngörülerek kalınlık artırma yolu tercih edilmemiştir.



(a) (b)

(c)

Şekil 5.11. YCY'ye göre basınçlı kağıt sıkıştırma oranının 3B görünümü

Şekilde 5.11'de basınçlı kağıt sıkıştırma oranının yüzey cevap yöntemine göre analizi 3B olarak gösterilmiştir. YCY'ye göre basınçlı kağıt sıkıştırma oranı üzerine malzeme ve torkun etkisinin daha fazla olduğu gözlenmiştir. Daha sonra malzeme ve cıvata yerleşimi arasındaki ilişki gelmektedir. Ancak tork ile vida sayısı arasındaki ilişkinin sıkma kuvvetini çok az etkilediği görülmüştür.

Yapılan çalışmada, 8b civata yerleşimine göre paslanmaz çelik kapatma plakasına 9 Nm tork uygulandığında hücreye homojen basınç uygulandığı görülmüştür. YCY sonucuna göre maksimum basınçlı kağıda baskı yapma oranı %63,512 bulunmuştur.

5.2.Test Sistemi

Bir önceki mekanik deneyde en iyi performans gösteren yakıt pili kapatma plaka malzemesi ve cıvata yerleşimi yüzey cevap yöntemiyle optimize edilerek deney tasarımı belirlenmiştir. Tasarımı belirlenen plaka içerisine MEA yerleştirilerek yakıt hücresi montajı yapılmıştır ve bu hücreye ait görsel Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Test hücresi

Yakıt hücresinde kullanılan MEA, TÜBİTAK MAM tarafından sağlanmış ve daha sonra bu MEA'ya uygun conta seçimi yapılmıştır. Yakıt hücresinde conta seçimi yapılırken, contanın malzemesi ve kalınlığına dikkat edilmiştir.

Conta kalınlığı, MEA'nın düzgün bir şekilde sıkıştırılmasını ve sızdırmazlığını sağlamak için yeterli olmalıdır. Çünkü conta kalınlığı fazla ise, yakıt hücresinde başlıca elektriksel temas sorunuyla karşılaşılır; ince olması durumunda ise GDL'deki gözenekli yapı azalarak gazın hücre içinde dağılımı güçleşir, hatta bileşenlerin zarar görme durumları ile karşı karşıya kalınır. Conta kalınlığı hesaplanırken; MEA'nın beş noktadaki kalınlığı mikrometre ile ölçülmüş (0.458, 0.464, 0.451, 0.462 ve 0.461 mm) ve bu noktaların ortalaması alınarak membran kalınlığı bu değerden çıkarılmıştır. Daha sonra bulunan değerden aktif alan da çıkartılarak ikiye bölünmüştür. Böylece conta kalınlığı, 0.170 mm olarak hesaplanmış ve bu kalınlığa yakın olan conta seçimi yapılmıştır. Buna göre, TÜBİTAK MAM'dan temin edilen 0.185 mm kalınlıktaki conta kullanılmış ve bu conta

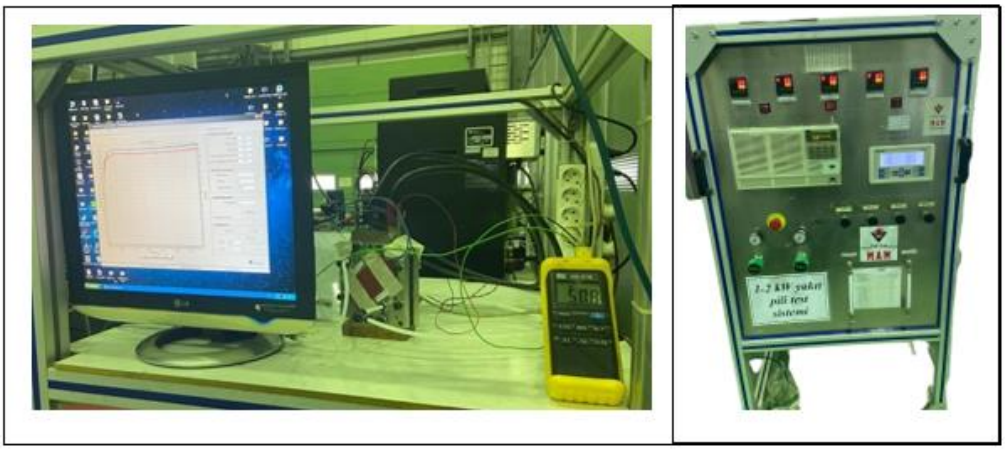
membran boyutuna göre kesilmiştir. Daha sonra kesilen contanın yüzeyinde herhangi bir şekilde kot farkı olmaması için (conta yüzeyi ile hücre yüzeyinin düzgün bir şekilde temas etmesini sağlamak amacıyla) alkol ile temizlenmiştir. Ayrıca, contanın hücreye montajını gerçekleştirebilmek için delme işlemi yapılmış ve conta delme işlemi, sabitleme pimi delikleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Son olarak hazırlanan contanın, test hücresi sisteminde montajı yapılmıştır. Test hücresinde bulunan sabitleme pimi ise, hücre bileşenlerini sabit tutmak için kullanılmıştır.

Test hücresi montajı yapılırken, M8 uzun cıvatalar kullanılmış ve cıvatanın üzerine M6 pul ve somun yerleştirilerek temas eden yüzey alanı arttırılmıştır. Somunlar, hücre bileşenlerini bir arada tutmak için kullanılmıştır. Pullar ise cıvata ve somunun altında yer alıp, sıkıştırma kuvvetinin daha geniş bir yüzeye yayılmasını sağlayarak daha iyi bir teması sağlamak için kullanılmıştır. Her bir cıvata için iki pul ve bir somun kullanılarak test hücresinin montajı tamamlanmıştır. Test hücresi sistemini oluşturan bileşenler ve bu bileşenlerin malzeme özellikleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Test hücresi bileşenleri ve materyal özellikleri

TANIMLAR	MALZEME	ELASTİSİTE MODÜLÜ (GPa)	POISSION ORANI	YOĞUNLUK (g/cm^3)
Kapatma plakası	Delrin	2.7-3.0	0.35-0.4	1.41-1.43
	Alüminyum	68-78	0.33	2.7
	Paslanmaz Çelik	193-200	0.30-0.33	7.9-8.0
Akım Toplayıcı	Bakır	117-130	0.34	8.9
Bipolar Plaka	Grafit	10-40	0.2-0.3	1.5-2.3
Gaz Difüzyon Tabakası	Karbon Kumaş	50-400	0.2-0.3	1.5-2.2
Membran	Nafion* (212)	0.02-0.04	0.4-0.5	1.9-2.3
Somun	PTFE (Teflon)	0.4-0.5	0.45-0.5	2.1-2.3
	Silikon Kauçuk	0.01 - 0.1	0.4 - 0.5	1.1 - 1.3
Cıvata	Paslanmaz Çelik	190 - 210	0.3 - 0.33	7.8 - 8.1
Conta	PTFE (Teflon)	0.4-0.5	0.45-0.5	2.1-2.3
Pul	Paslanmaz Çelik	193 - 200	0.3 - 0.33	7.8 - 8.1

Bu kısımda tasarımı tamamlanan 50 cm^2 aktif alana sahip yakıt hücresinin hücre performansına etki eden parametreleri (çalışma sıcaklığı, akış hızı ve tork etkisi) Yakıt Pili Performans Test Sistemi'nde incelenmiştir. Test Sistemi Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Test Sistemi

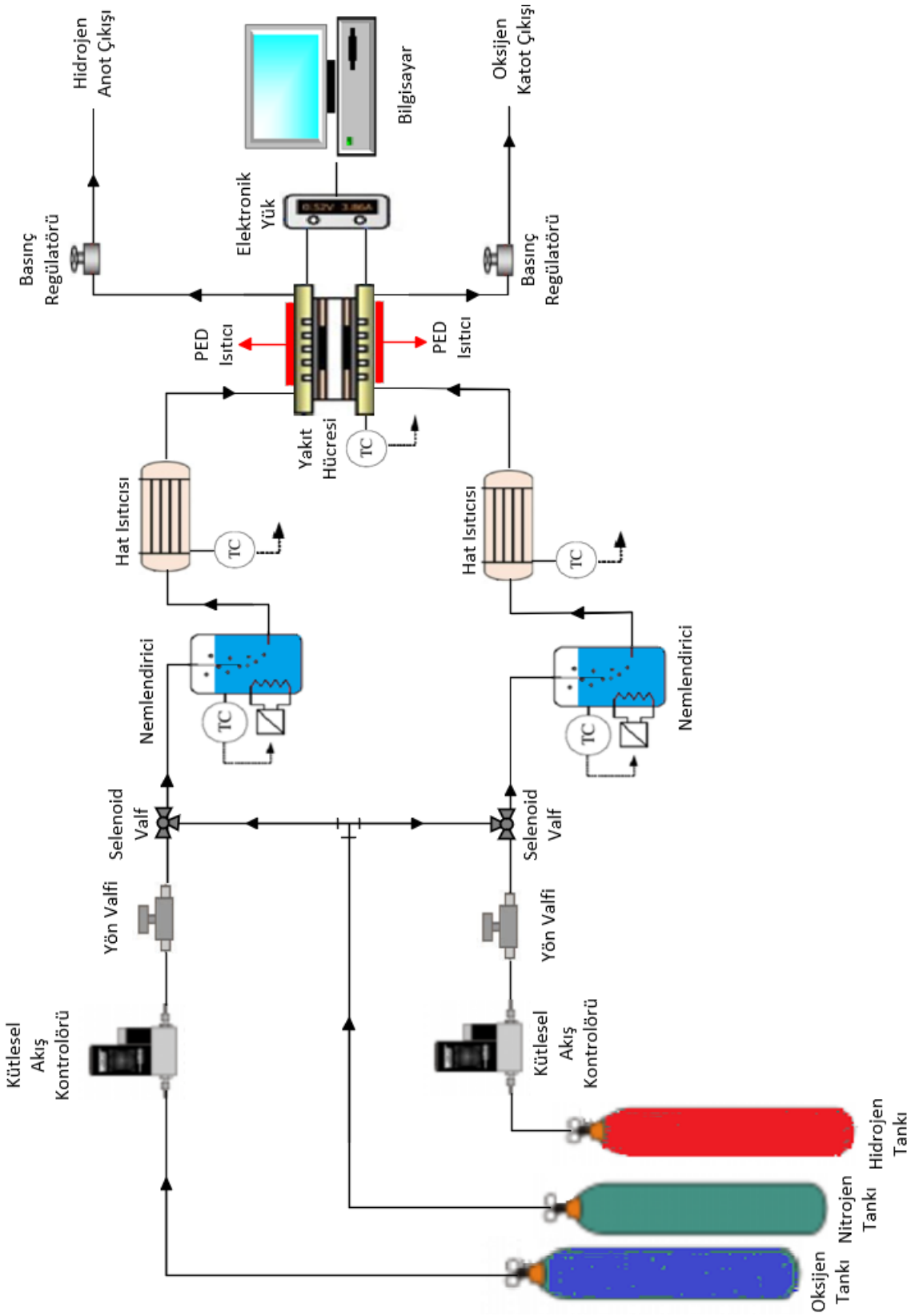
Test Sistemi başlıca gaz besleme/akış kontrol modülleri, anot ve katot nemlendiriciler, sıcaklık kontrol ediciler, elektronik yük ve diğer bileşenlerden oluşmaktadır. Sistemde azot hattı sistemin belli aralıklarla veya gereken durumlarda süpürme (gazlardan arındırma) amacıyla kullanılmaktadır. Test Sisteminde gaz hatlarında, hat sıcaklıklarını kontrolde kullanılan rezistans bulunmaktadır. Gaz hatlarından gelen yakıt ve oksitleyici, kütlesel akış kontrollerinden geçtikten sonra nemlendirici tanklara sonrasında ise yakıt pili modülüne iletilmektedir. Kütlesel akış kontrolörünün temel görevi yakıt hücresine istenilen oranda gazı iletmektir (İstenilen miktarda gazı ayarlamayı ise üzerinde bulunan bir valf ile sağlamaktadır). Gaz, kütlesel akış kontrolöründen geçtikten sonra nemlendiriciye gelir ve oradan hat ısıtıcıya geçer. Hidrojen (anot) ve oksijen (katot) tarafta ayrı olarak bulunan nemlendiriciler, reaktant gazları istenilen oranda nemlendirir ve nemli gazı hücre içerisine iletir. Bu test sistemi elemanın temel görevi, hücrenin kurumasını önlemektir. Nemlendirici ile hücre arasında bulunan hat ısıtıcı ise gelen gazın sıcaklığını, istenilen sıcaklık değerinde sabit tutmayı sağlamaktadır. Bu test sistemi elemanının görevi, hücre içerisinde yoğuşma olmasını önlemektir. Hattın çıkışında bulunan basınç regülatörleri ise yakıt hücresinin çalışma basıncının ayarlanmasını sağlamaktadır. Elektronik yük ise arzu edilen maksimum güç yoğunluğuna ulaşmak için yakıt piline uygulanacak güç miktarını ayarlamaktadır. Ayrıca test sisteminde kütlesel

akış kontrolöründen hemen sonra yön valfi gelmektedir. Bu yön valfinin görevi, test sisteminin çalışmadığı durumlarda su akışının geriye doğru akması sonucu kütlesel akış kontrolörünün zarar görmesini engellemektir. Selenoid valf ise normal durumda kapalı pozisyondadır ve kapalı pozisyondayken oksijen veya hidrojen tankından gelen gaz, hattı takip ederek sisteme dağılır. Ancak azot tankından gelen azot gazının kullanılması durumunda, selenoid valfler açılır ve gaz hattan geçer. Tasarladığımız 50 cm^2 aktif alana sahip yakıt pilinin iki yüzeyinde ped ısıtıcılar bulunmaktadır. Bu ısıtıcılar ise yakıt hücresini istenilen sıcaklıkta tutmaktadır.

Test Sistemine ait şematik gösterim Şekil 5.14'teki gibidir. Şekildeki test hücresinde, membranın bir tarafı anot, diğer tarafı ise katottur. Sistemin çalışma prensibi incelendiğinde öncelikle sisteme anot taraftan hidrojen, katot taraftan ise oksijen beslenir. Bu gazlar düşük basınçta (2 bar) ayarlanarak gönderilir ve rezistanslı hattan geçerek sisteme iletilir. Hidrojen anot taraftan beslendiğinde ilk olarak kütlesel akış kontrolöründen geçer. Kütlesel akış kontrolöründen geçen hidrojenin akış hızı (l/dk olarak) ölçülür veya Test Sisteminden bu değer set edilir. Daha sonra kütlesel akış kontrolöründen hidrojen çıkar ve rezistanslı hattan geçerek su dolu olan bir nemlendiriciye girer. Burada hidrojen nemlendirilerek bağıl nem %60 ile %80 arasında tutulur. Bunun sebebi ise Nafion membranın proton iletkenliğinin düşmesini önlemektir. Yaptığımız deneyde bağıl nem %78 olarak ölçülmüştür. Ayrıca nemlendiricide ultra saf su kullanılmıştır. Bu suyun içerisinde hiçbir şekilde iyon bulunmamaktadır, böylece hücre içindeki bileşenlerin zarar görmesinin önüne geçilmiştir. Nemlendiriciden çıkan hidrojen, daha sonra ısıtılmış hattan geçirilerek hatta yoğuşma önlenmiş olur. Hat sıcaklığı hem anot hem de katot tarafı için belirlenmektedir.

Sisteme ait şema Şekil 5.14'te gösterilmiş olup şematik gösterim için Microsoft Visio programı kullanılmıştır.

Şekil 5.14'teki Test Sisteminde öncelikle hidrojen ve oksijen gazı yerine azot gazı verilerek süpürme işlemi yapılmıştır. Bunun sebebi ise hattın içerisindeki olası yoğuşmuş su, oksijen ve hidrojen gazları sistemden arındırılmıştır.



Şekil 5.14. Test Sistemi şematik gösterimi

Azot gazı inert bir gaz olduğu için herhangi bir kimyasal tepkime gerçekleştirmeyecek ve diğer gazlar gibi aktif bir şekilde reaksiyona girmeyecektir. Bu sebeple, sistemi gazlardan temizlemek için azot gazı kullanılmıştır.

Süpürme işlemi sırasında, oksijen ve hidrojen gazları kapatılarak yerlerine azot gazı hem anot hem de katot taraftan beslenmiştir. Bu işlem sonucunda, yakıt hücresinde herhangi bir gaz kaçağı olmamıştır. Sistemde gaz kaçağı olmaması, süpürme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermiştir. Böylece sistem temiz bir şekilde çalıştırılmaya hazır hale getirilmiştir.

Süpürme işlemi tamamlandıktan sonra azot gazı kapatılmış ve ardından oksijen ve hidrojen gazları sistemde kullanılmak üzere sisteme beslenmiştir. Gazların sisteme doğru bir şekilde beslenmesini sağlamak için öncelikle Test Sistemine Set Point değerleri girilmiştir. Set Point değerleri, anot ve katot taraftaki gazların miktarını belirlemek için kullanılmış ve Test Sisteminde Set Point 1 değeri anotu, Set Point 2 değeri ise katodu ifade etmektedir. Başlangıçta Set Point 1 için hidrojen miktarı 0.36 l/dk, Set Point 2 için oksijen miktarı 0.55 l/dk olarak girilmiş ve gazlar sisteme beslenmiştir.

Gazların beslemesi gerçekleşirken hücrenin açık devre voltajını ölçmek için sisteme multimetre cihazı bağlanmış ve bu ölçüm sonucunda sistemdeki voltajın 0 V'tan 0.978 V'a arttığı gözlemlenmiştir. Test Sisteminde yapılan bu ilk çalıştırmada hücreden yaklaşık olarak 1 A akım ve 0.6 V gerilim ile 0.6 W'lık bir güç elde edilmiştir. Deneysel çalışmalara başlayabilmek amacıyla, yapılan ilk çalıştırmadan hemen sonraki adımda gazların akış hızı ayarı için akış hızı hesabı yapılmıştır.

$$H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O \qquad (5.3)$$

Denklem 5.3'e göre 2 mol hidrojen gazının 1 mol oksijen gazıyla tepkimeye girmesi gerekmektedir. Gaz akış hızları, her bir santimetrekarelik aktif alana hidrojen için 7 ml/dk/cm^2, oksijen için ise 3.5 ml/dk/cm^2 değerleri olarak verilmiştir. Stokiyometrik oran ise hidrojen için 1.2, oksijen için 2 olarak seçilmiştir. Stokiyometrik oran yakıt hücresinde çekilen anlık yük miktarı için ihtiyaç duyulan yakıt miktarını ifade eden değerdir. Bu değerler, sistemdeki yakıt hücresinin verimli şekilde çalışabilmesi ve istenen

performansın elde edebilmesi için diğer çalışmalardan elde edilen tecrübelere dayanarak seçimi uygun görülmüştür.

Yakıt hücresinde verilen gazların akış hızını ayarlamak için kullanılan formül aşağıdaki gibidir;

Hidrojen Akış Hızı = Aktif Alan (cm^2) x Stokiyometrik Oran x
Hidrojen Akış Hızı ($ml/cm^2/dk$)

Hidrojen Akış Hızı = 50 (cm^2) x 1.2 x 7 ($ml/cm^2/dk$)
Hidrojen Akış Hızı = 420 (ml/dk)

Oksijen Akış Hızı = Aktif Alan (cm^2) x Stokiyometrik Oran x
Oksijen Akış Hızı ($ml/cm^2/dk$)

Oksijen Akış Hızı = 50 (cm^2) x 2 x 3.5 ($ml/cm^2/dk$)
Oksijen Akış Hızı = 350 (ml/dk)

Oksijen ve hidrojen akış hızı hesaplanmış ve bu değerlere yakın olarak Set Point değerleri belirlenmiştir. Test Sisteminde 1 bar basınç altında beslenmesi gereken 420 ml/dk akış hızındaki hidrojenin 1 A/cm^2 akım yoğunluğundaki Set Point 1 değerine karşılık gelen değer olarak 0.5 gösterilmiştir. Benzer şekilde, oksijen için 1 A/cm^2 akım yoğunluğundaki beslenmesi gereken 350 ml/dk akış hızına karşılık gelen Set Point 2 değeri 0.03 olarak belirlenmiştir. Böylece, oksijen için Set Point 2 değeri 0.03 olarak ayarlanmış, hidrojen için ise Set Point 1 değeri 0.5 olarak ayarlanmıştır. Bu değerler sisteme girildikten sonra yakıt hücresinde akım çektikçe performans değerinde salınım yaptığı programdan gözlemlenmiştir. Hücrenin performansını artırmak ve istenilen sonuçları elde etmek amacıyla gaz akış hızları teorik olarak hesaplanan değerlerin üstüne çıkacak şekilde kontrollü olarak arttırılmıştır. Bu şekilde, hücre performansında bir iyileştirme sağlamak maksadıyla noktasal olarak değerler incelenmiştir.

Yakıt Pili Test Sisteminde deneye başlamadan önce yapılanlar özetlenecek olursa, bu sistem ilk çalıştırmada şartlandırılmış yani yüksüz biçimde çalıştırılmıştır. Daha sonra açık devre gerilimine ulaşana kadar beklenmiş, düşük seviyede hat sıcaklıkları (45°C), nemlendirme sıcaklıkları (40°C) ve hücre sıcaklığı (40°C) değerleri ayarlanmıştır. Ayrıca tüm valfler kapalı iken yani tüpten gaz gelmiyorken su seviyesi kontrol edilmiş ve nemlendiricilerin yakıt piline girmeden önceki su seviyelerine de bakılmıştır. Son olarak

gaz akış hızları düşük olarak verilmiş ve yakıt hücresinin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Kararlı hale geldikten sonra ise bu hücreye yük uygulanmıştır. Son olarak, sistem kararlı hale geldikten sonra gaz giriş değerleri belirlenmiştir.

5.2.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Yakıt pilinde sıkma torku sonucu olarak bileşenlerin teması arttıkça yakıt pili performansında artış gözlemlenmektedir. Deney tasarımında parametrelerin etkisinin gözlenebilmesi için minimum, maksimum ve orta değerler belirlenmiştir. Yakıt pili performansına sıkıştırma kuvvetinin etkisinin belirlenmesi için mekanik sıkıştırma test düzeneğinde en az teması sağlayan sıkma torku olan 1 Nm minimum değer olarak seçilmiştir. Bu sıkma torkuna göre, sadece kullanacağımız parametreler noktasal olarak belirlenmiştir.

Deneydeki parametrelerden biri olan hücre sıcaklığı; PEM yakıt hücresinin optimum çalışma aralığındaki sıcaklık değerine (50°C) göre belirlenmiştir. Hücrenin sıcaklığını arttırırsak hücre kurumaya başlayacaktır. Bu sebeple deneyde kullanılan hücre sıcaklıkları; 35°C, 50°C ve 65°C olarak belirlenmiştir. Ayrıca suyun yoğuşması veya hücrenin nemlenmesi gibi durumların yakıt pili performansına etkisi istenmediğinden, deney aşamalarında hücre sıcaklığı sabit tutulmuştur. Bununla birlikte, hattan geçen suyun yoğuşmaması için hat sıcaklığı, hücre sıcaklığından minimum 5 °C fazla ısıtılmış; nemlendirici sıcaklığı ise hücre sıcaklığı ile eşit tutulmuştur.

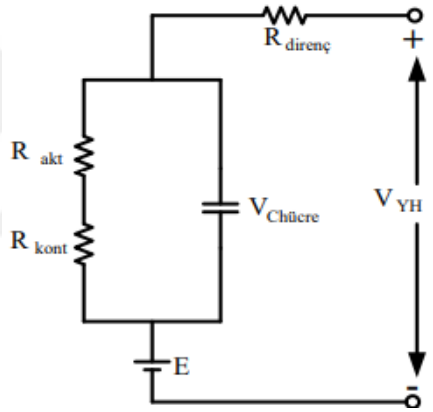
Yakıt pili performansına etki eden bir diğer parametre ise anot akış hızıdır. Aktif alan, hücre akım yoğunluğu da dikkate alınarak 1.2 stokiyometri için anot akışı minimum, maksimum ve orta noktalar sırasıyla 0.9, 0.6 ve 0.3 l/dk olarak belirlenmiştir. Anot akış değerinin 0.9 l/dk olduğu durumda performansın arttığı, 0.3 l/dk'da ise azaldığı gözlemlenmiştir.

Yakıt pili performansına etki eden bir diğer parametre ise katot akış hızıdır. Anot akış hızı optimum nokta olan 0.6 l/dk'da, katot tarafındaki akış hızının etkisi daha kolay gözlemlenmiştir. Hücre performansına göre alınan değerlerde katot akış hızı alt limiti 0.01 l/dk, üst limiti 0.1 l/dk gözlemlenmiştir. Buna göre katot akış hızı parametreleri 0.01, 0.05 ve 0.1 l/dk olarak belirlenmiştir.

Normalde performansı artırmak için akım değeri arttırıldığında, gazların akış hızının artması gerekir veya gazların akış hızı hücre içerisindeki suyun veya sıcaklığın dağılımına etki eder. Ancak bu çalışmanın başlıca amacı yakıt pili performansını iyileştirmekten öte noktasal olarak belirlenen parametrelerdeki yakıt pili performansını belirlemek olduğu için her bir akım değerinde gaz akış hızlarının değiştirmek yerine özellikle orta ve maksimum parametre değerlerinde de veri alınmasını sağlayabilecek şekilde seçilmiştir. Bununla birlikte her bir parametreye karşılık gelen hücre polarizasyon eğrisi grafikleri oluşturulmuş ve gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

5.2.2. Deney Parametrelerinin Analizi

Yapılan deney düzeneğinde Yakıt Pili Test Sistemi yazılımına uygun elektriksel devre yapısı Şekil 5.15'teki gibidir.



Şekil 5.15. PEM yakıt piline ait elektriksel eşdeğer devre modeli (Bilhan, 2020)

Şekil 5.15'te belirtilen elektriksel eşdeğer devrede; $R_{direnç}$ yakıt hücresinin bir fonksiyonunu, R_{kont} yoğunlaşma direncini ve R_{akt} aktivasyon gerilimini göstermektedir. Ayrıca devrede V_{YH} tek bir hücre için çıkış gerilim değerini, E yakıt hücre için açık devre gerilimini, V_{akt} aktivasyon gerilim kaybını, V_{kont} yoğunluk veya kütle gerilim kaybını ve $V_{direnç}$ elektrotlar ve membran üzerindeki gerilim kaybını göstermektedir.

Yapılan deney düzeneğinde; sisteme beslenen hidrojen ve oksijen akışı ve güç çıkışı gözlenir. Yakıt Pili Test Sisteminde öncelikle yük pasif durumuna alındığında açık devre gerilim değeri okunur. Daha sonra yakıt pili test sistemine 0,8 V-0.3 V değerleri aralığında yük uygulanır. Devreye uygulanan yük değeri sistemdeki dirence etki eder ve

voltajı o değerde sabit tutmaya çalışır. Multimetre cihazı ile devredeki yüke karşılık gelen gerçek gerilim değerleri ölçülür. Yakıt Pili Test Sistemi yazılımda ise okunan gerilim değerine karşılık gelen akım değerleri yer almaktadır. Yakıt pili test hücresinde güç akım yoğunluğuna göre; omik, aktivasyon ve konsantrasyon kayıplarına ait hücre karakteristik eğrileri oluşturulmuştur. Bu grafiklerde gözlenen sapmalar anlık olarak alınan değerlerin kararsız davranmasından kaynaklıdır.

5.2.3. Yakıt Pili Optimum Koşulların Belirlenmesi

Bu çalışmada, yakıt pili performansına etki eden bağımsız değişkenler; sıcaklık (35 ^{o}C, 50 ^{o}C, 65^{o}C), anot akış hızı (0.3 l/dk, 0.6 l/dk, 0.9 l/dk), katot akış (0.01 l/dk, 0.05 l/dk, 0.1 l/dk) ve sıkma torku (1 Nm, 5 Nm ve 9 Nm) olarak belirlenmiştir. Değişkenlerin cevaba olan etkisini incelemek amacıyla Merkezi Karma Tasarım Design–Expert programına uygulanmıştır ve Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. Optimizasyon deney koşulları ve deney sonuçları

Sıra Nu.	Faktör 1 A:Hücre Sıcaklığı (^{o}C)	Faktör 2 B:Anot Akış (l/dk)	Faktör 3 C:Katot Akış (l/dk)	Faktör 4 D:Tork (Nm)	Cevap 1 Akım Yoğunluğu (A/cm^2)	Cevap 2 Güç Yoğunluğu (W/cm^2)	Cevap 3 Direnç (Ω)
1	1	1	-1	-1	275.97	160.87	2.64
2	-1	-1	-1	-1	0.0098	0.0068	3.5
3	-1	-1	-1	1	40.89	24.52	2.9
4	1	-1	1	-1	510.26	304.99	2.65
5	1	1	1	-1	479.5	287.01	2.87
6	0	-1	0	0	184.65	110.76	2.49
7	-1	-1	1	1	469.04	280.63	2.96
8	0	0	1	0	466.75	280.44	2.52
10	-1	1	1	1	456.36	272.57	2.85
11	0	0	0	0	263.69	156.83	2.58
12	0	1	0	0	289.97	173.58	2.54
13	0	0	0	0	285.1	170.63	2.53
14	1	-1	-1	-1	24.31	14.57	2.54
15	0	0	-1	0	96.15	57.58	2.56

Tablo 5.8. (Devam) Optimizasyon deney koşulları ve deney sonuçları

Sıra Nu.	Faktör 1 A:Hücre Sıcaklığı (°C)	Faktör 2 B:Anot Akış (l/dk)	Faktör 3 C:Katot Akış (l/dk)	Faktör 4 D:Tork (Nm)	Cevap 1 Akım Yoğunluğu (A/cm2)	Cevap 2 Güç Yoğunluğu (W/cm2)	Cevap 3 Direnç (Ω)
16	-1	1	1	-1	470.68	283.26	3.11
17	0	0	0	1	219.46	131.75	2.63
18	1	1	1	1	502.67	299.81	2.68
19	-1	1	-1	-1	0.0179	0.0111	4
20	-1	0	0	0	157.63	94.22	2.87
21	-1	-1	1	-1	473.03	282.9	3.09
22	1	1	-1	1	139.51	83.32	2.59
23	1	0	0	0	216.09	129.78	2.93
24	-1	1	-1	1	48.68	29.21	2.96
25	0	0	0	0	273.32	160	2.52
26	0	0	0	-1	217.62	130.01	2.8
27	1	-1	1	1	439.84	279.7	2.92

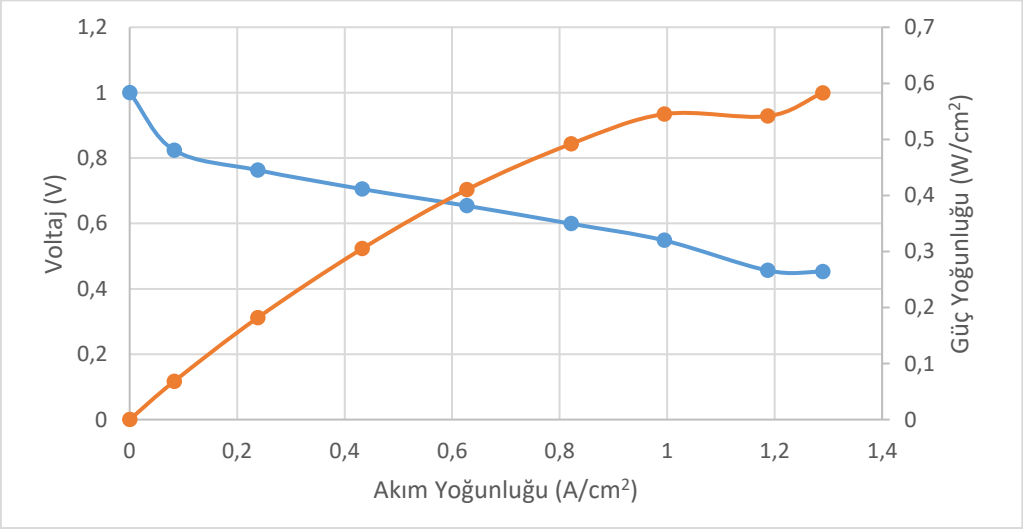
Tablo 5.8'de yer alan 27 deney yapılmış ve bu deneyler sonucunda alınan değerler hesaplanarak akım yoğunluğu, güç yoğunluğu ve direnç değerleri yanıt olarak yazılmıştır. Tablo 5.8'de ilk sütundaki (Factor 1) sıcaklık 35, 50 ve 65 °C değerlerine karşılık gelen numerik rakamlar sırasıyla -1, 0 ve 1 olarak verilmiştir. İkinci sütunda anot akış hızı parametreleri için 0.3 l/dk yerine -1, 0.6 l/dk yerine 0 ve 0.9 l/dk yerine 1 yazılmıştır. Üçüncü sütunda katot akış hızı parametreleri için 0.01 l/dk yerine -1, 0.05 l/dk yerine 0 ve 0.1 l/dk yerine 1 yazılmıştır Son olarak dördüncü sütunda tork parametreleri için minimum orta ve maksimum değerler sırasıyla 1 Nm , 5 Nm ve 9 Nm olarak kaydedilmiştir.

Tabloda yer alan akım yoğunluğu, güç yoğunluğu ve direnç değerleri ise Yakıt Pili Test Sisteminden alınan verilerin Excel programına aktarılmasıyla incelenmiş ve bu verilere göre her bir deneyin polarizasyon eğrisi oluşturulmuştur.

Tablo 5.9’da yakıt pili test sisteminden alınan veriler gösterilmiş olup, bu verilere ait polarizasyon eğrisi grafiği Şekil 5.16’daki gibidir.

Tablo 5.9. Yakıt Pili Test Sistemi'nden alınan veriler

Anot akış hızı	0.9	l/dk
Katot akış hızı	0.1	l/dk
OCV	0.961	V
Aktif Alan	50	cm^2
Tork	3	Nm
Yakıt Pili Sıcaklığı	65	°C
Anot Nemlendirme	65	°C
Anot Hat Sıcaklığı	70	°C
Katot Nemlendirme	65	°C
Katot Hat Sıcaklığı	70	°C
Gerçek Yakıt Pili Sıcaklığı	57.4	°C
Akım	41.05	A
Gerilim	0.6	V



Şekil 5.16. Yakıt pili polarizasyon eğrisi

Deneyler sırasında gaz transferi esnasında akım değerinin anlık olarak pik değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu anlık olarak ölçülen pik değerler grafiklerde sapmalara yol açtığından güç hesaplamalarında bu pik değerler dikkate alınmamıştır.

Şekil 5.16'daki yakıt pili polarizasyon eğrisi grafiği incelendiğinde, hücre voltajının düşmesine bağlı olarak akım yoğunluğunda artış gözlemlenmiştir. Yakıt pili en yüksek güç yoğunluğuna 0.45 V geriliminde ulaşmış ve bu durumda elde edilen güç yoğunluğu değeri 0.57 W/cm^2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca grafikte, en yüksek akım yoğunluğu 1.29 A/cm^2 olarak kaydedilmiştir.

Grafik incelendiğinde, 1 V'tan 0.75 V'a kadar olan bölgede aktivasyon kaybının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek voltajlarda, katalizör performansı daha düşük olduğu için bu bölgede reaksiyon hızı düşüktür. Grafikte, 0.75-0.35 V aralığındaki bölgede ise omik kayıplar baskındır.

En yüksek güç yoğunluğundan sonra konsantrasyon kaybı başlayacağı için 0.35-0.25 V aralığında konsantrasyon kaybı baskındır. Bu bölgede hücre içinde daha fazla reaksiyon gerçekleşir, bu da üretilen su miktarının artmasına ve konsantrasyon kaybının (kütle taşınım kaybı) gözlenmesine neden olur.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Test Hücresi Parametrelerinin Akım Yoğunluğuna Etkisi

Test hücresine ait sıcaklık, anot akış hızı, katot akış hızı ve tork gibi parametrelerin akım yoğunluğuna etkisi yüzey cevap yöntemi ile modellenmiştir. Akım yoğunluğu indeksi için Design Expert programına deneysel veriler işlenmiş ve daha sonra küçük kareler metodu ile bu verilerin analizi yapılmıştır. Verilere ait model denkleminin kodlanmış faktörler cinsinden ifadesi:

Akım yoğunluğu:

$$= +239.33 + 32.50*A + 22.67*B + 196.08*C - 1.21*D + 19.83*AB - 25.01*AC - 10.38*AD - 16.80*BC - 8.39*BD - 6.72*CD - 35.12*A^2 + 15.33*B^2 + 59.47*C^2 - 3.44*D^2$$

şeklindedir. Kodlanmış faktörler cinsinden yukarıdaki direnç denklemi, her faktörün verilen seviye değerleri için sistemdeki bağımsız değişkenlere karşılık gelen yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılmaktadır. Bu denklemde; minimum seviyedeki faktör -1, maksimum seviye ise +1 olarak kodlanmıştır.

Tablo 6.1'de görüldüğü gibi akım yoğunluğu için istatistiksel analiz ve katsayı belirleme (R^2) değeri 0.9666 olarak verilmiştir. % 97 güvenirlikte regresyon analizine göre bu modelin büyük ölçüde gerçekçi olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Tablo 6.1. Akım yoğunluğu için istatistiksel değerler

Standart Sapma	46.80	**R^2**	0.9666
Ortalama	263.50	**Düzeltilmiş R^2**	0.9276
Katsayı Varyasyonu %	17.76	**Tahmin Edilen R^2**	0.7736
		Ortalama Sapma Hassasiyeti	15.8659

Tablo 6.1'de görüldüğü üzere 0,7736 olarak Düzeltilmiş R^2, 0.9276 Tahmin Edilen R^2 ile bir uyum içindedir. Bu analiz yöntemine göre R^2'ler arasındaki farkın 0.2'den az olması gerekmektedir. Bu modele göre fark 0.2'den azdır. Ayrıca Ortalama Sapma Hassasiyeti, sinyal gürültü oranı ölçümünü temsil etmektedir ve bu oranın 4'ten büyük

olması beklenir. 15.8659 oranı ise yeterli oranda sinyali göstermektedir ve bu modeldeki değerler tasarım için oldukça iyidir. Modele ait varyans analiz sonuçları Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Akım yoğunluğu varyans analiz sonucu

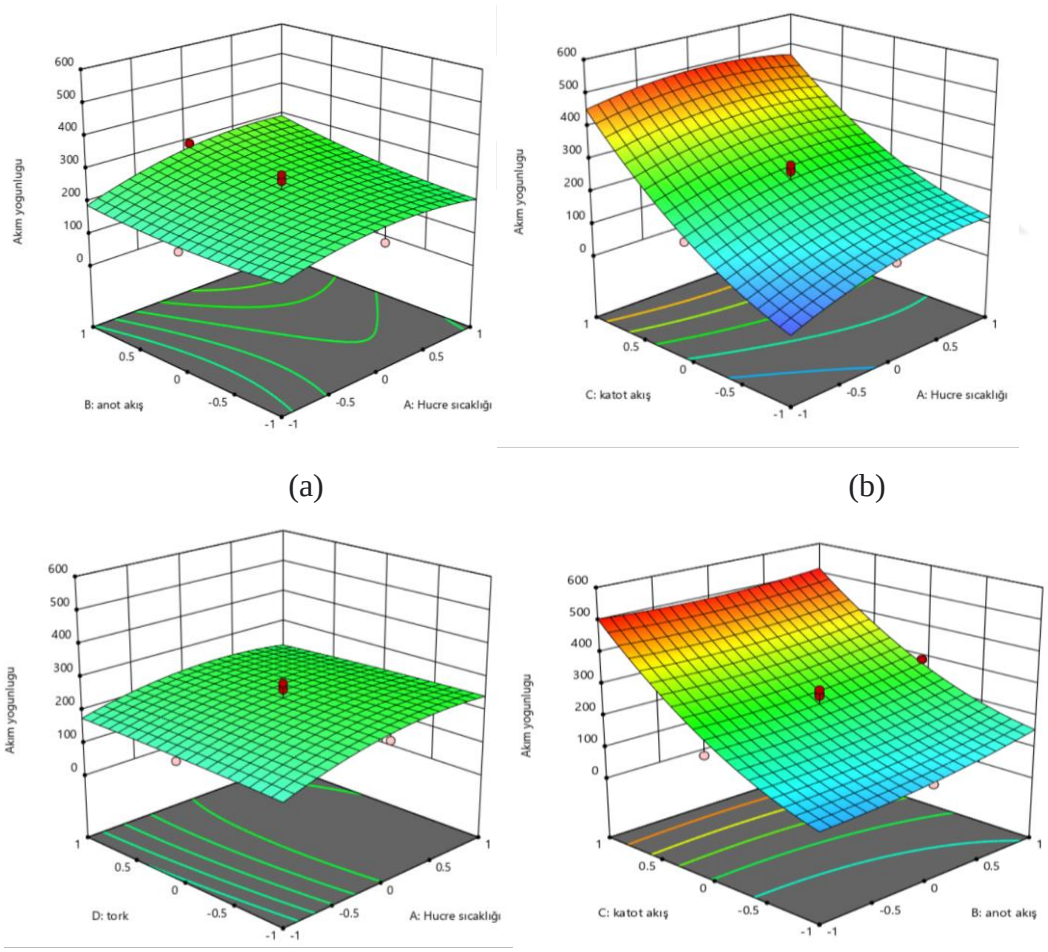
Kaynak	Karelerin Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
Model	7600E+05	14	54286.47	24.78	<0.0001	önemli
A-Hücre Sıcaklığı	19012.65	1	19012.65	8.68	0.0122	
B-Anot Akış Hızı	9254.26	1	9254.26	4.22	0.0623	
C-Katot Akış Hızı	6.920E+05	1	6.920E+05	315.91	<0.0001	
D-Tork	26.30	1	26.30	0.0120	0.9146	
AB	6291.74	1	6291.74	2.87	0.1159	
AC	10011.12	1	10011.12	4.57	0.0538	
AD	1723.54	1	1723.54	0.7868	0.3925	
BC	4513.76	1	4513.76	2.06	0.1767	
BD	1127.25	1	1127.25	0.5146	0.4869	
CD	722.57	1	722.57	0.3299	0.5764	
A^2	3171.31	1	3171.31	1.45	0.2521	
B^2	604.45	1	604.45	0.2759	0.6089	
C^2	9094.88	1	9094.88	4.15	0.0643	
D^2	30.40	1	30.40	0.0139	0.9082	
Kalan	26287.02	12	2190.59			
Uyum Eksikliği	26057.06	10	2605.71	22.66	0.0430	önemli
Saf Hata	229.96	2	114.98			
Toplam	7.863E+05	26				

Tablo 6.2'ye göre modele ait F değerinin 24.78 olması, modelin anlamlı bir model olduğunu göstermektedir. Ayrıca tabloda yer alan p değerlerinin 0.05 küçük olması bu

model teriminin akım yoğunluğu üzerindeki etkisinin fazla olduğunu göstermektedir. Bu durumda hücre sıcaklığı ve katot akış hızı, bu model için anlamlı parametrelerdir.

Tabloda yer alan p değerinin 0.1'den büyük olması ise modelde geçen bu parametrenin pek bir anlamı olmadığını yani akım yoğunluğu üzerindeki etkisinin az görüldüğünü ifade eder ve varyans analizine göre tork etkisinin akım yoğunluğu üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı saptanmıştır. Bu durum mekanik sıkıştırma test verileriyle elde edilen uygun malzeme ve kapatma konfigürasyonu çıktılarının sağlıklı olması ve bu sonuçların performans deney setine başarılı bir şekilde yansıtılmasının sonucudur.

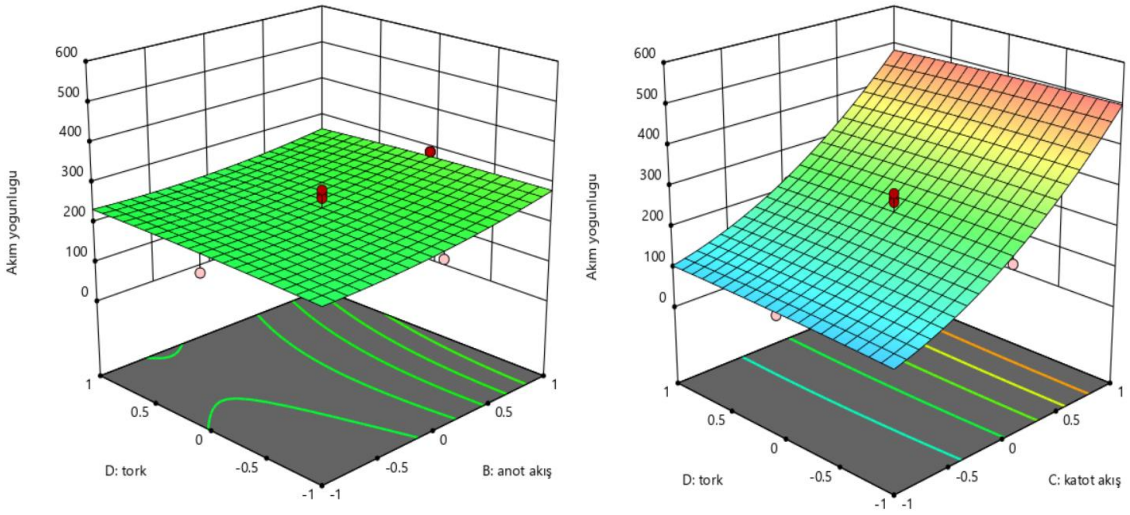
Şekil 6.1'de test hücresine ait sıcaklık, anot akış, katot akış ve tork gibi parametrelerin akım yoğunluğuna etkisi yüzey cevap yöntemi ile modellenmiş 3B görünümleri verilmiştir.



(a) (b)

(c) (ç)

Şekil 6.1. YCY'ye göre akım yoğunluğunun 3B görünümü



(d) (e)

Şekil 6.1. (Devam) YCY'ye göre akım yoğunluğunun 3B görünümü

Şekilde 6.1'de akım yoğunluğunun YCY'ye göre analizi 3B olarak gösterilmiştir. YCY'ye göre hücre sıcaklığı ve katot akış hızı arasındaki ilişki, akım yoğunluğunu diğerlerinden daha fazla etkilemiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere katot akış hızının artmasıyla en düşük tork dahil olmak üzere hücre performansının arttığı gözlenmiştir. Yani katot akış hızının artması performansı arttırmış, bu da modelde yüksek oksijen hızlarında çalışmamız gerektiğini göstermiştir. Ayrıca grafikler incelendiğinde hücre sıcaklığının bir optimum değeri olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık yükseldikçe membranın kuruması nedeniyle performans düşmekte, bu yüzden grafik trendinde bir eğim olduğu gözlenmiştir. Son olarak tork ile anot akış hızı arasındaki ilişkinin akım yoğunluğunu çok az etkilediği, özellikle de torkun etkisinin neredeyse önemsiz olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmada, 65°C hücre sıcaklığında iken anot akış hızı 0.3 l/dk ve katot akış hızı 0.1 l/dk olduğunda, paslanmaz çelik kapatma plakasına 1 Nm tork uygulandığında hücre optimum akım yoğunluğuna ulaşmıştır. YCY sonucuna göre maksimum akım yoğunluğu 513.93 A/cm^2 bulunmuştur.

6.2. Test Hücresi Parametrelerinin Güç Yoğunluğuna Etkisi

Test hücresine ait sıcaklık, anot akış hızı, katot akış hızı ve tork gibi parametrelerin güç yoğunluğuna etkisi yüzey cevap yöntemi ile modellenmiştir. Güç yoğunluğu indeksi için Design Expert programına deneysel veriler işlenmiş ve daha sonra küçük kareler metodu ile bu verilerin analizi yapılmıştır. Verilere ait model denkleminin kodlanmış faktörler cinsinden ifadesi aşağıda verilmiştir.

Güç yoğunluğu:

$$= +142.66 + 20.03*A + 12.43*B + 118.52*C + 0.3168*D + 10.43*AB - 13.79*AC - 4.85*AD - 10.75*BC - 6.03*BD - 3.43*CD - 20.75*A^2 + 9.42*B^2 + 36.26*C^2 - 1.87*D^2$$

Tablo 6.3'te görüldüğü gibi güç yoğunluğu için istatistiksel analiz ve katsayı belirleme (R^2) değeri 0.9690 olarak verilmiştir. % 97 güvenirlikte regresyon analizine göre bu modelin büyük ölçüde gerçekçi olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Tablo 6.3. Güç yoğunluğu için istatistiksel değerler

Standart Sapma	27.16	**R^2**	0.9690
Ortalama	158.03	**Düzeltilmiş R^2**	0.9328
Katsayı Varyasyonu %	17.19	**Tahmin Edilen R^2**	0.7914
		Ortalama Sapma Hassasiyeti	16.3297

Tablo 6.3'te güç yoğunluğu için istatistiksel analiz ve katsayı belirleme (R^2) değeri 0.9690 olarak verilmiştir. R^2'ler arasındaki fark 0.2'den az, sinyal gürültü oranı ise 4'ten büyüktür. Bu tasarım model sonucu da oldukça iyi olduğu görülmektedir. Modele ait varyans analiz sonuçları Tablo 6.4'te verilmiştir.

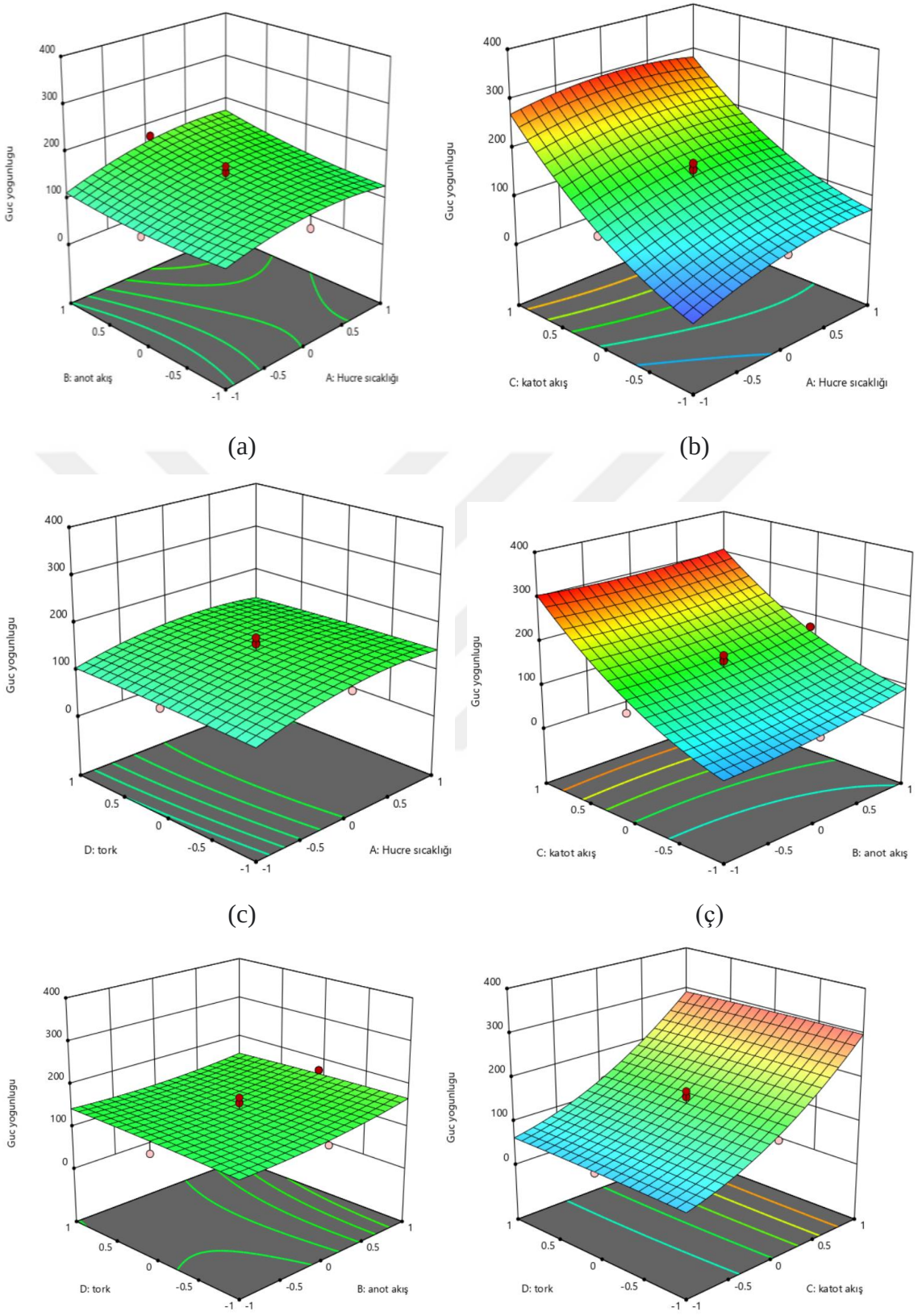
Tablo 6.4'e göre modele ait F değerinin 26.77 olması, modelin anlamlı bir model olduğunu göstermektedir. Ayrıca tabloda, hücre sıcaklığı ve katot akış hızı parametrelerinin güç yoğunluğu üzerindeki etkisinin fazla olduğu gösterilmiştir. Bu durumda hücre sıcaklığı ve katot akış hızı, bu model için anlamlı parametrelerdir.

Tablo 6.4. Güç yoğunluğu varyans analiz sonucu

Kaynak	Karelerin Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
Model	2.764E+05	14	19745.79	26.77	<0.0001	önemli
A-Hücre Sıcaklığı	7221.70	1	7221.70	9.79	0.0087	
B-Anot Akış Hızı	2781.20	1	2781.20	3.77	0.0760	
C-Katot Akış Hızı	2.529E+05	1	2.529E+05	342.79	<0.0001	
D-Tork	1.81	1	1.81	0.0024	0.9613	
AB	1741.72	1	1741.72	2.36	0.1503	
AC	3043.79	1	3043.79	4.13	0.0650	
AD	375.80	1	375.80	0.5095	0.4890	
BC	1850.38	1	1850.38	2.51	0.1392	
BD	581.34	1	581.34	0.7881	0.3921	
CD	188.12	1	188.12	0.2550	0.6227	
A^2	1107.52	1	1107.52	1.50	0.2440	
B^2	228.02	1	228.02	0.3091	0.5884	
C^2	3380.25	1	3380.25	4.58	0.0535	
D^2	9.02	1	9.02	0.0122	0.9138	
Kalan	8851.77	12	737.65			
Uyum Eksikliği	8747.27	10	874.73	16.74	0.0576	önemli değil
Saf Hata	104.50	2	52.25			
Toplam	2.853E+05	26				

Tabloda yer alan p değerinin 0.1'den büyük olması ise modelde geçen bu parametrenin pek bir anlamı olmadığını yani güç yoğunluğu üzerindeki etkisinin az görüldüğünü ifade eder ve varyans analizine göre tork etkisinin güç yoğunluğu üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı saptanmıştır.

Şekil 6.2'de test hücresine ait sıcaklık, anot akış hızı, katot akış hızı ve tork gibi parametrelerin güç yoğunluğuna etkisi YCY ile modellenmiş 3B görünümleri verilmiştir.



Şekil 6.2. YCY'ye göre güç yoğunluğunun 3B görünümü

Şekilde 6.2'de güç yoğunluğunun yüzey cevap yöntemine göre analizi 3B olarak gösterilmiştir. YCY'ye göre hücre sıcaklığı ve katot akış arasındaki ilişki, güç yoğunluğunu diğerlerinden daha fazla etkilemiştir. Grafiklerde görüldüğü üzere katot akış hızının artmasıyla en düşük tork dahil olmak üzere hücre performansının arttığı gözlenmiştir.

Güç yoğunluğu grafiğinde de görüldüğü üzere katot akış hızının artması performansı arttırmış, hücre sıcaklığının ise bir optimum değeri olduğunu göstermiştir. Son olarak tork ile anot akış hızı arasındaki ilişkinin güç yoğunluğunu çok az etkilediği, özellikle de torkun etkisinin neredeyse önemsiz olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmada, 65°C hücre sıcaklığında iken anot akış hızı 0.3 l/dk ve katot akış hızı 0.1 l/dk olduğunda, paslanmaz çelik kapatma plakasına 1 Nm tork uygulandığında hücre optimum güç yoğunluğuna ulaşmıştır. YCY sonucuna göre maksimum güç yoğunluğu 307.20 W/cm^2 olarak bulunmuştur.

6.3. Test Hücresi Parametrelerinin Dirence Etkisi

Test hücresine ait sıcaklık, anot akış hızı, katot akış hızı ve tork gibi parametrelerin direnç üzerindeki etkisi yüzey cevap yöntemi ile modellenmiştir. Direnç indeksi için Design Expert programına deneysel veriler işlenmiş ve daha sonra küçük kareler metodu ile bu verilerin analizi yapılmıştır. Verilere ait model denkleminin kodlanmış faktörler cinsinden ifadesi aşağıda verilmiştir.

Direnç:

$$= +2.57 - 0.2289*A + 0.0494*B - 0.0189*C - 0.1339*D - 0.0063*AB - 0.1500*AC +0.1137*AD - 0.0663*BC - 0.0525*BD + 0.1012*CD - 0.3181*A^2 + 0.0669*B^2 - 0.0419*C^2 + 0.1331*D^2$$

Tablo 6.5'te görüldüğü gibi direnç için istatistiksel analiz ve katsayı belirleme (R^2) değeri 0.9666 olarak verilmiştir. % 97 güvenirlikte regresyon analizine göre bu modelin büyük ölçüde gerçekçi olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Tablo 6.5. Direnç için istatistiksel değerler

Standart Sapma	0.1542	**R^2**	0.9099
Ortalama	2.80	**Düzeltilmiş R^2**	0.8048
Katsayı Varyasyonu %	5.51	**Tahmin Edilen R^2**	0.4353
		Ortalama Sapma Hassasiyeti	12.6970

Tablo 6.5.'te direnç için istatistiksel analiz ve katsayı belirleme (R^2) değeri 0.9099 olarak verilmiştir. R^2'ler arasındaki fark 0.2'den fazladır. Bu durum verilerin dikkatlice incelenmesi ile ilgili bir soru işaretidir. Test hücresi sonucunda ampirik modeller, doğrulama çalışması yapılarak test edilebilir. Sinyal gürültü oranı ise 4'ten büyük yani 12.690'dır. Bu tasarım modelinin kullanılmasının analiz programına göre sakıncası yoktur. Modele ait varyans analiz sonuçları Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Direnç varyans analiz sonucu

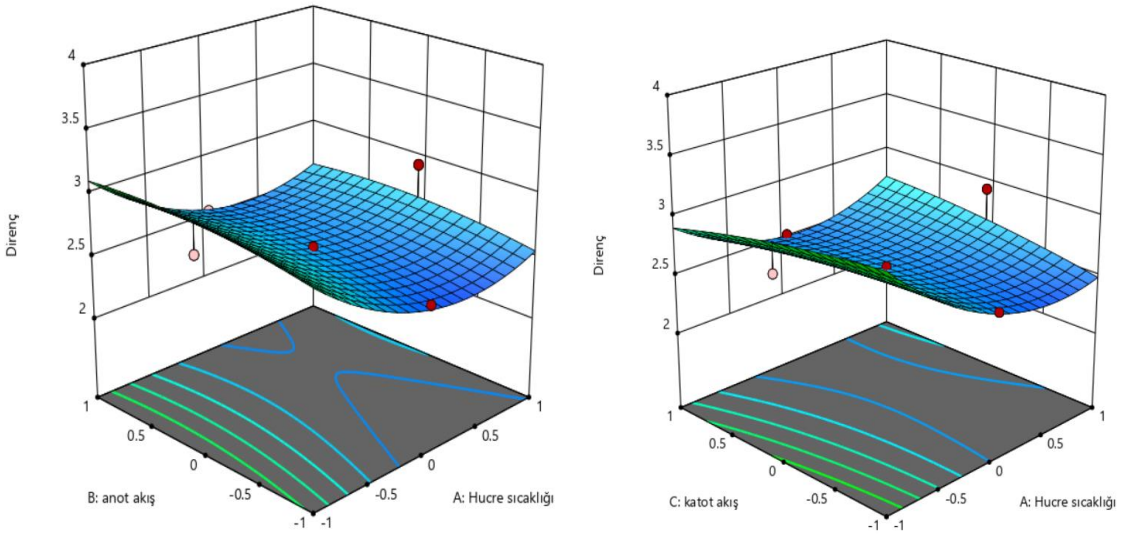
Kaynak	**Karelerin Toplamı**	**df**	**Ortalama Kare**	**F-değeri**	**p-değeri**	
Model	2.88	14	0.2059	8.66	0.0003	önemli
A-Hücre Sıcaklığı	0.9430	1	0.9430	39.65	<0.0001	
B-Anot Akış Hızı	0.0440	1	0.0440	1.85	0.1987	
C-Katot Akış Hızı	0.0064	1	0.0064	0.2700	0.6128	
D-Tork	0.3227	1	0.3227	13.57	0.0031	
AB	0.0006	1	0.0006	0.0263	0.8739	
AC	0.3600	1	0.3600	15.14	0.0021	
AD	0.2070	1	0.2070	8.71	0.0121	
BC	0.0702	1	0.0702	2.95	0.1114	
BD	0.0441	1	0.0441	1.85	0.1983	
CD	0.1640	1	0.1640	6.90	0.0221	
A^2	0.2603	1	0.2603	10.94	0.0062	
B^2	0.0115	1	0.0115	0.4832	0.5002	
C^2	0.0045	1	0.0045	0.1894	0.6711	
D^2	0.0456	1	0.0456	1.92	0.1914	
Kalan	0.2854	12	0.0238			

Tablo 6.6. (Devam) Direnç varyans analiz sonucu

Kaynak	Karelerin Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
Uyum Eksikliği	0.2833	10	0.0283	27.42	0.0357	önemli
Saf Hata	0.0021	2	0.0010			
Toplam	3.17	26				

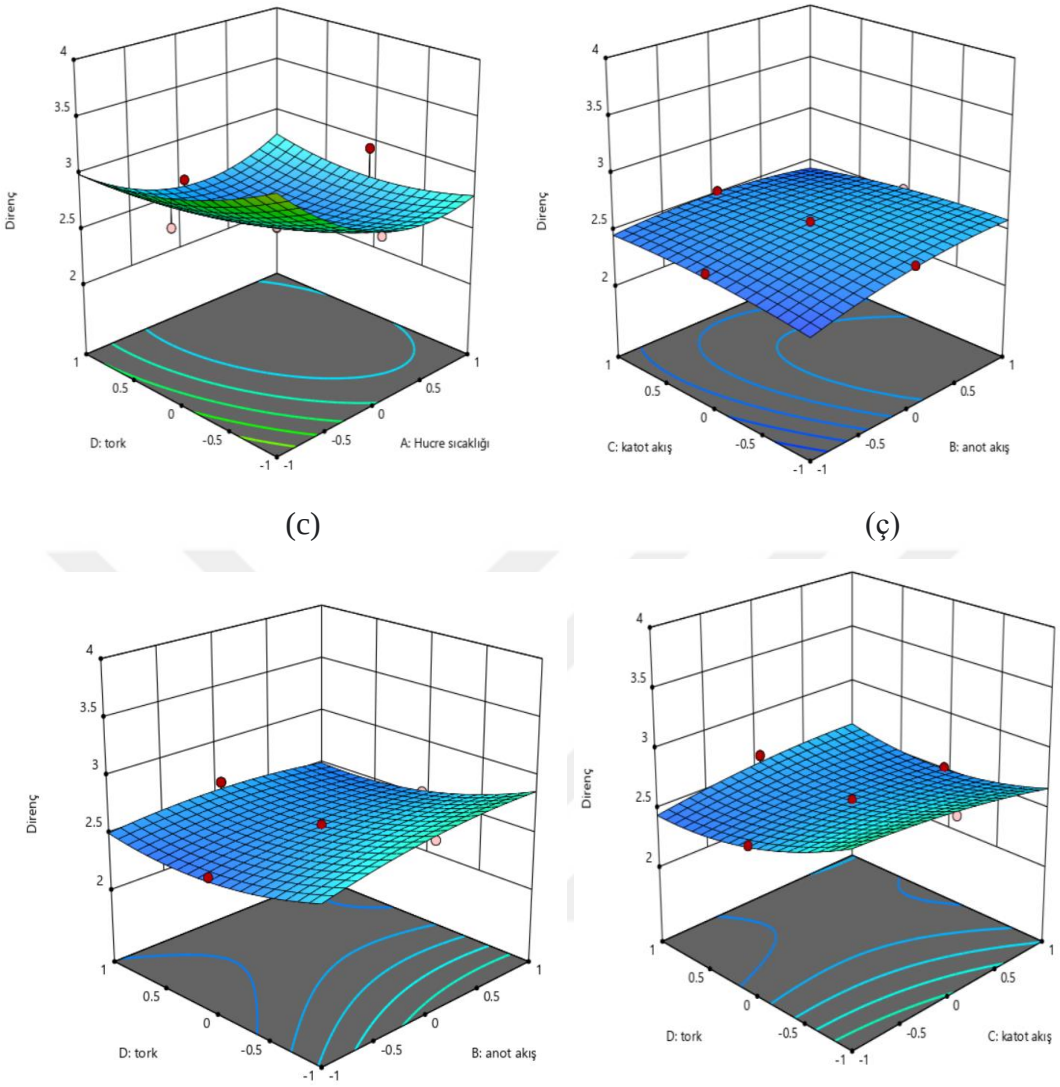
Tablo 6.6'ya göre modele ait F değerinin 8.66 olması, modelin anlamlı bir model olduğunu göstermektedir. Ayrıca tabloda, hücre sıcaklığı ve tork parametrelerinin direnç üzerindeki etkisinin fazla olduğu gösterilmiştir. Bu durumda hücre sıcaklığı ve tork, bu model için anlamlı parametrelerdir. Tabloda yer alan p değerinin 0.1'den büyük olması ise modelde geçen bu parametrenin pek bir anlamı olmadığını yani direnç üzerindeki etkisinin az görüldüğünü ifade eder ve varyans analizine göre akış parametrelerinin direnç üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı saptanmıştır.

Şekil 6.3'te test hücresine ait sıcaklık, anot akış hızı, katot akış hızı ve tork gibi parametrelerin dirence etkisi YCY ile modellenmiş 3B görünümleri verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.3. YCY'ye göre direncin 3B görünümü



Şekil 6.3. (Devam) YCY'ye göre direncin 3B görünümü

Şekilde 6.3'de direncin yüzey cevap yöntemine göre analizi 3B olarak gösterilmiştir.

Direnç grafiğinde görüldüğü üzere tork değerinin artması hücre direncinin düşmesine neden olmuştur. En düşük tork değerinde ise direnç değeri en fazla görülmüştür. Ancak grafiği yorumlayacak olursak, 1 Nm tork değerinden 9 Nm tork değerine çıktığında dahi direnç aralığındaki fark oldukça azdır. Bu durum, yapmış olduğumuz mekanik sıkıştırma test deneyindeki konfigürasyon tasarımını anlamlı hale getirmiş, seçtiğimiz malzemenin, kapatma plakası kalınlığı, cıvata yerleşimi gibi parametrelerin optimizasyonunun doğru olduğunu göstermiştir.

7. TEZİN ÖZGÜNLÜĞÜ

Mevcut literatür çalışmalarının incelenmesi sonucunda, yakıt pili kapatma plakasının performans analizinde birden fazla parametrenin aynı anda incelenmediği ve genellikle optimizasyon tekniklerinin, özellikle YCY gibi yöntemlerin kullanılmadığı gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında ise yakıt pili kapatma plakasının performansı, daha geniş bir perspektifle değerlendirilerek birden fazla parametre eş zamanlı olarak incelenmiş ve optimizasyon yöntemiyle deney sayısı azaltılarak çalışmanın çeşitliliği artırılmıştır.

Tez çalışmasında iki aşamalı bir parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizin ilk aşamasında, mekanik sıkıştırma deneyleri yapılmış ve bu çalışma sonucunda hücre temasını en iyi sağlayacak şekilde bir plaka tasarımı ve kapatma konfigürasyonu belirlenmiştir. Daha sonra, tasarımı belirlenen plakanın içerisine MEA yerleştirilerek test hücresi montajı gerçekleştirilmiştir. Analizin ikinci aşamasında ise tasarlanan test hücresi, test sistemine bir girdi olarak atanmış ve deney tasarımı ile yakıt pili çalışma koşullarının performans üzerine etkisi incelenmiştir. Bu analiz sonucunda, mekanik sıkıştırma deneyleri ile en uygun olduğu belirlenen konfigürasyon, ikinci aşamada girdi olarak kullanıldığından test hücresinde sıkıştırma torku parametresinin direnç üzerinde ihmal edilebilir bir etkisinin olduğu gözlenmiştir. Bu durum birinci aşamadaki tasarım sonuçlarının oldukça başarılı olduğunu göstermiştir. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde, tez çalışmasında ele alınan nitelikte yakıt pili kapatma plakalarının yakıt pili performansı üzerine etkisinin iki aşamadan oluşan ve hatta ilk deneysel analiz sonuçlarını, ikinci deneysel analizde kullanan bir çalışmanın literatürde yer almadığı görülmektedir. Bu sebeple tez çalışması, yakıt pili kapatma plakası performansını daha ayrıntılı bir şekilde anlama ve geliştirme konusunda önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Ayrıca mekanik sıkıştırma deneylerinde, yakıt piline sıkma torku uygulanmış ve hücre içerisinde yer alan basınç kağıdında tork etkisiyle birlikte baskı olan yerde, kağıdın beyaz renkten kırmızı renge dönüştüğü gözlenmiştir. Mevcut literatür çalışması incelenmesi sonucunda, basınçlı kağıdın sayısal analizine dair herhangi bir çalışmanın bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla tez çalışmasında, CANVA programı kullanılarak basınç kağıdın sıkıştırma oranı ölçeklendirilmiş ve milimetre kare başına

düşen baskı oranını bulabilmek için bir yazılım yapılmıştır. Bu yazılımda, basınçlı kağıdın baskı oranı yüzdelik olarak ifade edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, yakıt pili kapatma plakasının performansını anlamak ve geliştirmek adına önemli bir katkı sunmuştur. Deney tasarım yöntemi kullanarak çok sayıda parametreyi aynı anda daha az sayıda deneyle inceleyip önceki literatür çalışmalarının kapsamını genişletmiş ve basınç kağıdı analizine yeni bir bakış açısı getirilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde yakıt pili kapatma plakasının hücre performansına etkileyen parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyin ilk aşamasında hücre içerisine basınç ölçüm kağıtları yerleştirilerek mekanik sıkıştırma deneyleri gerçekleştirilmiş, hücrenin homojen basınç altında çalışmasını sağlayacak tasarıma ait optimum değer, yüzey cevap yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yönteme göre; kapatma plakası malzemesi, tork ve cıvata yerleşimi bağımsız parametreler olarak, basınçlı kağıt sıkıştırma oranı ise yanıt olarak seçilmiş ve bu parametreler programa işlenmiştir. Bu programda kullanılan deney tasarım yöntemi ile deney sayısı azaltılmış ve deneyler bu tasarıma göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, paslanmaz çelik kapatma plakasına 8b cıvata yerleşimindeyken 9 Nm tork uygulandığında hücrede homojen basınç dağılımı gözlenmiştir. YCY'e göre maksimum basınç kağıdına baskı yapma oranı ise %63.51 bulunmuştur.

Deneyin ikinci aşamasında ise mekanik sıkıştırma deneylerinde en iyi performans gösteren test hücresinin montajı yapılmış ve yakıt pili performansına etki eden parametrelerin (çalışma sıcaklığı, akış hızı ve tork etkisi) etkisi Yakıt Pili Performans Test Sistemi'nde YCY ile incelenmiştir. ANOVA programına göre yakıt pili performans incelemesi için 27 deney yapılmış ve bu deneyler sonucunda akım yoğunluğu, güç yoğunluğu ve hücre içi direnç değerleri analiz edilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- ✓ Katot akış hızının artmasıyla yakıt pili performansının arttığı gözlenmiştir.
- ✓ Hücre sıcaklığı için bir optimum değer olduğu gözlenmiştir. Sıcaklık yükseldikçe membranın kuruması nedeniyle performans düşmektedir. Bu yüzden grafiklerde sıcaklık arttıkça önce performans artmış, daha sonra ise düşmüştür.
- ✓ İncelenen aralıkta anot akış hızının etkisi az görülmüştür. Hidrojen her yerden rahat bir şekilde nüfuz edebildiği için performans grafiğinde etkisi katot akış hızına göre daha az görülmüştür. Anot kinetiği katottan daha iyi olduğu için incelenen aralıkta anot akış hızı performansı olumsuz yönde etkilenmemiştir.
- ✓ Birinci aşamadaki mekanik sıkıştırma test deneyinde malzeme ve cıvata konfigürasyonu parametrelerinin omik kayıpları minimize edecek şekilde belirlenmesiyle tasarlanan test hücresi, ikinci aşamada gerçekleştirilen test sistemine

bir girdi olarak atanmış ve bunun sonucunda tork etkisi yakıt pili performans testinde kritik bir parametre olarak öne çıkmamıştır. Ancak hücre içi direnç değerinin cevap olarak dikkate alındığı çalışma sonuçlarına göre sıkıştırma torku arttıkça, hücre içi direnç değerinde az miktarda da olsa azalma olduğu gözlenmiştir. Ancak bu azalma yakıt pili performansını etkileyecek nitelikte olmamıştır. Bu durum tasarım sonucunun oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Son olarak, yapmış olduğumuz çalışmadaki yakıt hücresi (boyutunun kare şeklinde olması) ticari yakıt pillerine alternatif olarak gelecekteki çalışmalara katkı sağlayabilir. Genel olarak ticari yakıt pillerinde homojen basınç dağılımını sağlamak ve mekaniksel dayanıklılığı artırmak amacıyla daha kalın bir kapatma plakası tercih edilir. Ancak, bu durum hücre ağırlığı açısından dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, tasarımda paslanmaz çelik yerine titanyum gibi hafif ancak dayanıklı bir malzeme kullanılarak daha ince kapatma plakası da tercih edilebilir. Sonuç olarak, tasarladığımız yakıt pilinin performans üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda ticari yakıt pillerine alternatif olacağı, titanyum gibi malzemelerin potansiyel olarak kullanılabileceği ve gelecekteki çalışmalara katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

Alizadeh, E., Barzegari, M. M., Momenifar, M., Ghadimi, M., Saadat, S. H. M. (2016). Investigation Of Contact Pressure Distribution Over The Active Area Of PEM Fuel Cell Stack. *International journal of hydrogen energy*, *41*(4), 3062-3071.

Alkaya, L., Behçet, R., İlkılıç, C. (2008). Yakıt Pilleri ve Uygulama Alanları. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, *6*(3), 67-71.

Aydın, M. (2007). PEM Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 185605.

Barzegari, M. M., Ghadimi, M., Momenifar, M. (2020). Investigation of Contact Pressure Distribution On Gas Diffusion Layer Of Fuel Cell With Pneumatic Endplate. *Applied Energy*, *263*, 114663.

Bazylak, A., Sinton, D., Liu, Z. S., Djilali, N. (2007). Effect of Compression on Liquid Water Transport and Microstructure of PEMFC Gas Diffusion Layers. *Journal of Power Sources 163*(2), 784-792.

Bıyıkoğlu, A. (2003) Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu. *GU Journal of Science 16*(3), 523-542.

Bilhan, A. (2020). Yakıt Pili Uygulamaları için Kademeli Yükseltici DA/DA Dönüştürücü Devresinin Tasarımı. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, *11*(1), 29-37.

Çakanyıldırım, Ç. (2019). *Alternatif Enerji Kaynakları*. Hitit Üniversitesi, http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/cetincakanyildirim/hititedutr_36598_14112019_5L2W.pdf/,(Ziyaret tarihi:01 Mayıs 2023)

Çavuşoğlu, A. (2006). Yakıt Pilleri ve Kullanım Alanları. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 183819.

Chang, W. R., Hwang, J. J., Weng, F. B., Chan, S. H. (2007). Effect of Clamping Pressure on the Performance of a PEM Fuel Cell. *Journal of Power Sources 166*(1), 149-154.

Chung, T. T., Shiu, H. R., Chen, C. C., Lin, C. T., Chen, K. H., Lu, C. Y. (2009). Endplate Design and Analysis of Fuel Cells. In *International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology* (Vol. 48814, pp. 371-378).

Çukurçayır, M.A., Sağir, H. (2008). Enerji Sorunu, Çevre ve Alternatif Enerji Kaynakları. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (20), 257-278.

Darıdereli, Y. (2010). Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı, Mekanik Özellikler ve Aşınma Direncine Yaşlanmanın Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 254973.

Daş, E. (2018). Süperkritik Karbondioksit Depozisyon Tekniği İle Hazırlanan Grafen Bazlı Platin Katalizörlerin Sentezi, Karakterizasyonu ve PEM Yakıt Pilinde Kullanımı. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 498378.

Dey, T., Deshpande, J., Singdeo, D., Ghosh, P. C. (2019). Study of PEM Fuel Cell End Plate Design By Structural Analysis Based On Contact Pressure. *Journal of energy, 2019*.

Eker, E. (2012). PEM Tipi Yakıt Hücrelerinde Isı ve Su Yönetiminin Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 318350.

Handbook, F. C. (2004). 7th edn., eG & G Technical Services, inc., morgantown. West virginia, 427.

Gatto, I., Urbani, F., Giacoppo, G., Barbera, O., Passalacqua, E. (2011). Influence of The Bolt Torque on PEFC Performance with Different Gasket Materials. *International Journal of Hydrogen Energy 36*(20), 13043-13050.

Güraydın, B. (2022). Paslanmaz Çeliklerin Sürekli Isıl İşlem Hatlarında Elektro Yüzey Temizleme Proseslerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 753519.

İlkılıç, C., Öner C., İlkılıç, Aytaç, Z., Deviren, H., Hazar, H. (2017). Yakıt Pillerinin Yapısı, Çalışma Prensibi ve Çeşitleri. *1st International Conference on Energy Systems Engineering*, Karabuk, Turkey, November 2-4, 2017.

Karvonen, S., Hottinen, T., Ihonen, J., Uusalo, H. (2008). Modeling Of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack End Plates. *Journal of fuel cell science and technology, 5*(4).

Kaya, K., Şenel, M.C., Koç, E. (2018). Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebillr Enerji Kaynaklarinin Değerlendirilmesi. *Technological Applied Sciences 13*(3), 219-234.

Kılıç, M. (2017). Çalışma Parametrelerinin Tek Hücreli PEM Yakıt Pili Performansına Etkilerinin Had Metodu İle Üç Boyutlu İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 494750.

Köroğlu, Ç.İ. (2019). Beş Hücreli PEM Tipi Yakıt Pili Tasarımı, Üretimi ve Deneysel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, 592308.

Kumar, A., Reddy, R. G. (2004). Materials and Design Development for Bipolar/End Plates in Fuel Cells. *Journal of Power Sources, 129*(1), 62-67.

Lai, X., Peng, L., Ni, J. (2008). A Mechanical–Electrical Finite Element Method Model for Predicting Contact Resistance Between Bipolar Plate and Gas Diffusion Layer in PEM Fuel Cells. *Journal of Power Sources 182*(1), 153-159.

Larminie, J., Dicks, A., McDonald, M. S. (2003). Fuel cell systems explained (Vol. 2, pp. 207-225). Chichester, UK: J. Wiley.

Lin, P., Zhou, P., Wu, C. W. (2009). A High Efficient Assembly Technique for Large PEMFC Stacks: Part I. Theory. *Journal of Power Sources 194*(1), 381-390.

Liu, J., Tan, J., Yang, W., Li, Y., Wang, C. (2021). Better Electrochemical Performance of PEMFC Under A Novel Pneumatic Clamping Mechanism. *Energy, 229*, 120796.

Lee, S. J., Hsu C. D., Huang, C. H. (2005). Analyses of The Fuel Cell Stack Assembly Pressure. *Journal of Power Sources 145*(2), 353-361.

Lee, W. K., Ho, C. H., Zee J. W. V., Murthy M. (1999). The Effects of Compression and Gas Diffusion Layers on The Performance of a PEM Fuel Cell. *Journal of Power Sources 84*(1), 45-51.

Mason, T. J., Millichamp, J., Shearing, P. R., Brett, D. J. L. (2013). A Study of The Effect of Compression Cn The Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cells Using Electrochemical Impedance Spectroscopy and Dimensional Change Analysis. *International journal of hydrogen energy, 38*(18), 7414-7422.

Mikkola, M., Tingelöf, T., Ihonen, J. K. (2009). Modelling Compression Pressure Distribution in Fuel Cell Stacks. *Journal of Power Sources 193*(1), 269-275.

Mortazavi, M., Santamaria, A. D., Chauhan, V., Benner, J. Z., Heidari, M., Médici, E. F. (2020). Effect of PEM Fuel Cell Porous Media Compression On In-Plane Transport Phenomena. *Journal of Power Sources Advances*, 1, 100001.

Özdemir, Z.Ö., Mutlubaş, H. (2019). Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences 2*(1), 16-34.

Özvardarlı, Z. S. (2012). Ülkemizde İmal Edilen Bazı Ekim Makinalarında Kullanılan Tohum Hücrelerinin İmalat Yöntemlerine Dayalı Tarımsal ve Malzeme Karakteristiklerinin Ortaya Çıkarılması. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 305274.

Peker, M. F., Cora, Ö. N., Koç, M. (2011). Investigations on The Variation of Corrosion and Contact Resistance Characteristics of Metallic Bipolar Plates Manufactured

Under Long-run Conditions. *International journal of hydrogen energy*, *36*(23), 15427-15436.

Revankar, S. T., Majumdar, P. (2014). Fuel cells: principles, design, and analysis. CRC press.

San, F. G. B., Okur, O. (2017). The Effect of Compression Molding Parameters on the Electrical and Physical Properties of Polymer Composite Bipolar Plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*(36), 23054-23069.

Shinde, U., Koorata, P. K. (2021). Numerical Investigation On The Sensitivity Of Endplate Design And Gas Diffusion Material Models In Quantifying Localized Interface And Bulk Electrical Resistance. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(33), 17358-17373.

Taymaz, I., and Benli, M. (2010). Numerical Study of Assembly Pressure Effect on The Performance of Proton Exchange Membran Fuel Cell. *Enegy*, *35*, 2134-2140.

Turgut, D. (2012). Farklı Tür Sıvı Ortamlarda Tutulan Kestamid Malzemelerde Darbe Dayanımının Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 326992.

Türkmen, A.C. (2018). Gaz Difüzyon Tabakalarında Termal İletkenlik Katsayısı Tayini ve Proton Değişim Membran Yakıt Pilinin İzotermal Olmayan Modelinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 535693.

Ulaş, B. (2021). PEM Yakıt Pilleri İçin Anot Katalizör ve Membran Sentezi, Karakterizasyonu ve Yakıt Pili Performans Testleri. Doktora Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 676389.

Yıldırım, H. (2006). Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 172165.

Yılmaz, B. (2006). Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri İçin Anot Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4082.

Zhang, L., Liu, Y., Song, H., Wang, S., Zhou Y., Hu, S. J. (2006). Estimation of Contact Resistance in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources 162*(2), 1165-1171.

Zhao, C., Xing, S., Liu, W., Chen, M., Wang, Y., Wang, H. (2020). An Experimental Study On Pressure Distribution and Performance Of End-plate With Different Optimization Parameters For Air-cooled Open-Cathode LT-PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(35), 17902-17915.

Zhou, P., Wu C. W., Ma, G. J. (2006a). Contact Resistance Prediction and Structure Optimization of Bipolar Plates. *Journal of Power Sources 159*(2), 1115-1122.

Zhou, P., Wu C. W., Ma, G. J. (200b6). Influence of Clamping Force on the Performance of PEMFCs. *Journal of Power Sources 163*(2), 874-881.

Zhou, Y., Lin, G., Shih, A. J., Hu, S. J. (2007). A Micro-scale Model For Predicting Contact Resistance Between Bipolar Plate and Gas Diffusion Layer in PEM Fuel Cells. *Journal of Power Sources 163*(2), 777-783.

Zhou, Y., Lin, G., Shih, A. J., Hu, S. J. (2009a). Multiphysics Modeling of Assembly Pressure Effects on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance. *Journal of Fuel Cell Science and Technology 6*(4).

Zhou, Y., Lin, G., Shih, A. J., Hu, S. J. (2009b). Assembly Pressure and Membrane Swelling in PEM Fuel Cells. *Journal of Power Sources 192*(2), 544-551.

Wen, C. Y., Lin Y. S., Lu, C. H. (2009). Experimental Study of Clamping Effects on The Performances of a Single Proton Exchange Membrane Fuel Cell and A 10-Cell Stack. *Journal of Power Sources 192*(2), 475-485.

Xing, X. Q., Lum, K. W., Poh, H. J., Wu, Y. L. (2010). Optimization of Assembly Clamping Pressure on Performance of Proton-Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources 195*(1), 62-68.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yilgin B., Türkmen A.C., Keles F.B., Tikiz İ., Celik C. (2021). Use of Waste Heat Emitted from A Fuel Cell in Thermoelectric Modules. *11th International %100 Renewable Energy Conference,* (20-23 Mayıs 2021):185.

ÖZGEÇMİŞ

İlk öğrenimini Malatya Abdulkadir Eriş İlköğretim Okulunda, orta öğrenimini İstanbul Silivri Turgut Reis İlköğretim Okulunda, lise öğrenimini ise Tekirdağ Namık Kemal Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Makine Mühendisliği programında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2019 yılından beri Milli Savunma Bakanlığına bağlı Gölcük Tersanesi Komutanlığında Makine Mühendisi olarak görev yapmaktadır.