

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR PEM YAKIT PİLİ HÜCRESİNİN LABORATUVAR
ORTAMINDA ÇALIŞTIRILMASI ve DENEY
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

HİLAL KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR PEM YAKIT PİLİ HÜCRESİNİN
LABORATUVAR ORTAMINDA
ÇALIŞTIRILMASI ve DENEY
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

HİLAL KAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**OPERATING A PEM FUEL CELL IN A
LABORATORY ENVIRONMENT AND
INVESTIGATION OF EXPERIMENTAL
PARAMETERS**

HİLAL KAYA

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZİ BEDİR**

GEBZE

2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/07/2023 tarih ve 2023/40 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/09/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hilal KAYA'nın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Fevzi BEDİR

ÜYE

: Prof. Dr. Süleyman KARSLI

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KAHRAMAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Fosil yakıtların doğaya verdiği sera etkisi, küresel ısınma, asit yağmurları vb. büyük zararlar nedeniyle ve bu yakıtların tükeneceği endişesiyle insanlık alternatif enerji kaynaklarına yönelmek durumunda kalmıştır. Bu alternatif kaynaklardan birisi ve belki en popüler olanlarından bir tanesi de hidrojen ve onu elektrik enerjisine çeviren yakıt hücresi teknolojisidir. Yakıt hücresi çeşitleri arasında ise yüksek performansları, daha kolay taşınabilmesi ve daha düşük işletme sıcaklıklarında çalışabilmeleri nedeniyle Proton Elektrolit Membran Yakıt Hücresi (PEMYH) başı çekmektedir.

Bu çalışmada 5cm² aktif alana ve çift serpantin akış kanalına ve Nafion NR212 Membrana sahip tek hücreli bir PEM yakıt hücresi ile işletme şartlarındaki stokiyometrik oran, basınç, tork ve farklı bipolar plakalar kullanılarak performans deneyleri yapılmıştır. Deneylerde, malzemeleri; grafit ve diğeri de korozyon direncini arttırmak için PVD yöntemiyle CrN kaplanmış SS 304 kalite paslanmaz olan bipolar plakalar kullanılarak, 1-1,5 ve 2 tork değerlerinde 0-1-1,5 ve 2 bar basınç ve 2-3 ve 4 stokiyometrik oranlarında, kuru hava yani nemlendirici kullanılmadan deneyler yapılmış ve deney sonuçları incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin, literatürde yapılan benzer çalışmalardaki elde edilen verilerle benzer ve tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt pili, Hidrojen, MEA, Bipolar plaka, Tork, İşletme basıncı .

SUMMARY

The greenhouse effect of fossil fuels on nature, global warming, acid rain, etc. Humanity has had to turn to alternative energy sources because of the great damage and the fear that these fuels will run out. One of these alternative sources, and perhaps one of the most popular, is hydrogen and fuel cell technology, which converts it into electrical energy. Among the fuel cell types, the Proton Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) takes the lead due to its high performance, easier transport and operation at lower operating temperatures.

In this study, performance tests were carried out with a single-cell PEM fuel cell with 5cm² active area, double serpentine flow channel and Nafion NR212 Membrane, using stoichiometric ratio, pressure, torque and different bipolar plates under operating conditions. In the experiments, the materials; graphite and the other to increase corrosion resistance, using SS 304 quality stainless bipolar plates coated with CrN by PVD method, 0-1-1.5 and 2 bar pressure at 1-1.5 and 2 torque values and 2-3 and 4 stoichiometric ratios, dry air that is, experiments were carried out without using a humidifier and the test results were examined. It was observed that the data obtained from the experiments were similar and consistent with the data obtained in similar studies in the literature.

Key Words: PEM fuel cell, Hydrogen, MEA, Bipolar plate, Torque, Operating pressure.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansım ve tez çalışmalarım sürecinde bana verdiği bilgilerin yanı sıra, akademik desteği, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Fevzi BEDİR'e teşekkür ederim.

Yine deneylerimi yapmam için bana laboratuvarını açan ve yardımlarını esirgemeyip devamlı motive eden Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, makine mühendisliği öğretim üyesi sayın Dr. Hüseyin KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Yine çalışmamda tecrübe ve bilgileriyle bana yol gösteren ve yardımcı olan İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, mekatronik mühendisliği bölümü öğretim üyesi Dr. Furkan DÜNDAR'a teşekkürlerimi arz ederim.

Türkiye Cumhuriyeti'ne eğitimim boyunca sağladığı karşılıksız olanaklar için şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
1.2. Literatür Taraması	2
2. YAKIT HÜCRELERİ	5
2.1. Yakıt Hücrelerinin Gelişim Süreci	5
2.2. Yakıt Hücrelerinin Türleri	7
2.2.1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMYH)	8
2.2.2. Alkali yakıt hücresi (AYH)	9
2.2.3. Fosforik asit yakıt hücresi (PAYH)	10
2.2.4. Katı oksit yakıt hücresi (SOYH)	10
2.2.5. Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCYH)	11
2.2.6. Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH)	11
2.2.7. Çinko hava yakıt hücreleri (ZAYH)	12
2.2.8. Protonik seramik yakıt hücreleri (PCYH)	13
2.2.9. Biyolojik yakıt hücreleri (BYH)	14
2.3. Yakıt Hücresi Türlerinin Karşılaştırılması	15
2.4. Yakıt Hücreleri Uygulama Alanları	18
2.5. Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları	20
2.5.1. Yakıt Hücrelerinin Avantajları	20
2.5.2. Yakıt Hücrelerinin Dezavantajları	22
3. PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİ	23
3.1. Çalışma Prensibi	23

3.2. PEM Yakıt Hücresinin Temel Kimya ve Termodinamiği	24
3.2.1. Yakıt Hücresinde Meydana Gelen Temel Reaksiyonlar ve Gibbs Serbest Enerjisi	24
3.2.2. Yakıt Hücresinde Sıcaklık ve Basınç Etkisi	25
3.3. PEM Yakıt Hücresinin Teorik Verimi	28
3.4. PEM Yakıt Hücresi Kayıpları ve Gerçek Verim	29
3.4.1. Elektrot Kinetiği	29
3.4.2. Gerilim Kayıpları	29
3.4.3. İç ve Çapraz Akımlar	31
3.4.4. Kinetik Performansı İyileştirme	32
3.4.5. PEM Yakıt Hücresinde Gerçek Verim	33
3.5. PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri	34
3.5.1. Proton Elektrolit Membran	35
3.5.2. Katalizör Tabakası	36
3.5.3. Gaz Difüzyon Tabası	37
3.5.4. Bipolar Plakalar	38
3.5.5. Contalar	39
3.5.6. Akım Toplayıcı Plakalar	39
3.5.7. Sonlandırıcı Plakalar	40
4. PEM YAKIT PİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALARI	41
4.1. DeneySEL Düzenek	41
4.2. DeneySEL Çalışmalar ve Sonuçları	46
4.2.1. Farklı stokiyometri değerlerinin incelenmesi	46
4.2.2. Farklı sıkma torku değerlerinin incelenmesi	49
4.2.3. Farklı operasyon basıncı değerlerinin incelenmesi	51
4.2.4. Farklı bipolar plakaların performansının incelenmesi	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
PEMYH	: Polimer exchange membran yakıt hücresi
GDL	: Gaz difüzyon tabakası
MEA	: Membran elektrolit sssembly
PEM	: Proton elektrolit membran
BPP	: Bipolar plaka
CCP	: Conta ve akım toplama plakaları
CL	: Katalizör katmanı (Catalyst layer)
FCEV	: Hidrojen yakıtlı taşıtlar
NASA	: Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
GTÜ	: Gebze Teknik Üniversitesi
AFC	: Alkaline fuel cell
COPV	: Kompozit basınçlı tank
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
aq	: Suda içinde gerçekleşen tepkime
g	: Gaz içinde gerçekleşen tepkime
YSZ	: Yttria stabilize zirkonya
ppm	: Milyon başına partikül sayısı
ΔG	: Gibbs Serbest Enerjisi Değişimi
BP	: Bipolar Plaka
CrN	Krom Nitrür
TiN	Titanyum Nitrür

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Elektroliz düzeneği.	5
2.2: GE tarafında geliştirilen PEMYH Gemini 7 uzay aracında.	6
2.3: Bir FCEV olan Toyota Mirai modeli.	6
2.4: Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi.	7
2.5: Pem yakıt hücresi.	9
2.6: Toyota'nın geliştirdiği ve uzun yıllardır üretimine devam ettiği Mirai modeli.	18
2.7: Zeraoavia şirketinin geliştirdiği yakıt hücreli bir yolcu uçağı.	19
2.8: Alstom şirketi tarafından yapılmış, yakıt hücreleri ise Cummins tarafından geliştirilen coradia ilint isimli tren.	19
2.9: Thyssenkrupp tarafından inşa edilen hdw yakıt hücresi sistemi.	20
2.10: Yakıt hücrelerinin, pillerin ve içten yanmalı motorların şematik olarak karşılaştırması.	21
3.1: Bir pem yakıt hücresinin temel çalışma prensibi.	26
3.2: Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hidrojen/oksijen yakıt hücresinin entalpi ve gibbs serbest enerjisi.	26
3.3: Çalışma basıncının yakıt hücresi polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisi.	28
3.4: Enerji dönüştürme cihazı olarak bir yakıt hücresi için enerji girdileri ve çıktıları.	28
3.5: Bir yakıt hücresi için genelleştirilmiş polarizasyon eğrisi.	30
3.6: Bir hidrojen pem yakıt hücresi için tipik polarizasyon eğrisi.	31
3.7: Bir pem yakıt hücresi elemanları ve görevleri.	35
3.8: Bir katalizörün iç yapısı.	37
3.9: 0,75 V hücre voltajında katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları.	38
4.1: Pem yakıt hücresi deneysel düzeneği.	42
4.2: Torkmetre ve basınç regülatörü.	42
4.3: Pem yakıt hücresi elemanları de-monte hali.	43
4.4: Pem yakıt hücresinin yarı montaj ve tam montajlanmış hali.	44
4.5: Pem yakıt hücresi deney düzeneği genel görünüm.	44

4.6: Pem yakıt hücresi deney düzeneğın şematik gösterimi.	45
4.7: IVRead programı ekran görüntüsü.	45
4.8: Stokiyometri değeriinin hücre performansına etkisi.	48
4.9: Tork değeriinin hücre performansına etkisi.	50
4.10: Deney düzeneğimdeki basınç emniyet valflerinden biri.	51
4.11: Operasyon basıncının hücre performansına etkisi.	52
4.12: Deneylerde kullanılan bipolar plaka çiftleri.	55
4.13: Farklı bipolar plakaların hücre performansına etkisi.	56



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Yakıt hücresi türlerinin karşılaştırılması.	16
2.1: Yakıt hücresi türlerinin karşılaştırılması. (devamı)	17
3.1: Entalpi, Gibbs serbest enerjisi ve hidrojen/oksijen yakıt pili reaksiyonunun entropisinin sıcaklıkla değişimi ve ortaya çıkan teorik hücre potansiyeli.	26
4.1: Stokiyometri oranı için operasyon koşulları.	48
4.2: Farklı hücre sıkma tork değerleri için operasyon koşulları.	49
4.3: Hücre sıkma torku için operasyon koşulları.	52
4.4: Farklı bipolar plakalar için operasyon koşulları.	55

1.GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Dünyanın güncel enerji ihtiyacının %80'ni hala fosil yakıtlar ile sağlanmaktadır. Çevre kirliliği ve enerji tedariki ise bu fosil yakıtlar için en önemli sorunların başında gelmektedir. Bununla birlikte fosil yakıtlar kullanımının neden olduğu küresel ısınma, sera etkisi tüm dünyanın en önemli ve güncel konularından biri olarak gösterilmektedir. Güneş, rüzgâr ve hidrojen gibi temiz enerji kaynaklarının kullanımıyla, fosil yakıtların kullanımın azaltılması ve neticede de çevreye verdiği zararlar önlenabilir gibi gözükmemektedir. Hidrojen çok düşük kirlilikci emisyonu, üretim döngüsünün tersine çevirilebilirliği, sera etkisinin olmaması, ağırlığına nispeten yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, doğada bol miktarda bulunması, tamamen yenilenebilir olması ve yüksek verimlilik oranıyla elektriğe çevrilmesi gibi benzersiz özelliklere sahip bir maddedir. Bu özelliklerinden dolayı da geleceğin enerjisi olarak görülmektedir [2,4].

Yakıt hücresi teknolojisi elektriği doğrudan kimyasal enerjiden üretir. İçten yanmalı motorlarda ise kimyasal enerji önce ısı enerjisine, ısı enerjisi de mekanik enerjisiye, mekanik enerji de elektrik enerjisine çevrilerek üretilmektedir. Bu yüzden yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlardan daha verimlidir. Aynı zamanda krank biyel gibi hareketli parçalar içermediklerinden sürtünme, titreşim gibi istenmeyen durumlar görülmez. Haliyle sessiz çalışırlar. Ayrıca, insan sağlığına ve çevreye oldukça zararlı olan NO_x , SO_x gibi zararlı partikül emisyonları neredeyse sıfırdır. Ancak, yüksek maliyet yakıt hücrelerindeki en büyük dezavantajdır [3].

Bu deneysel çalışmada 5cm^2 aktif alana, çift serpantin akış kanalına ve Nafion NR212 Membrana sahip tek hücreli bir PEM yakıt hücresi ile deney düzeneği hazırlanmıştır. Burada farklı bipolar plaka malzemesinin etkisinin incelenmesi amacıyla iki farklı bipolar plaka kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi grafit bipolar plaka diğeri de korozyon direncini arttırmak için PVD yöntemiyle CrN kaplanmış SS 304 kalite paslanmaz çelikten yapılmış bipolar plakadır. Hazırlanan deney düzeneğinde farklı tork, basınç ve stokiometri değerlerindeki hücre performansı

incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin literatürdeki verilerle tutarlı olduğu gözlenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

Devletlerin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim ve teşvikiyle geleceğin enerjisi olarak görülen hidrojene ve hidrojeni elektrik enerjisine çevirerek güç üreten PEMYH'lere ilgi artarak devam etmektedir. Bu yüzden PEM yakıt hücrelerinin geliştirilmesi ve optimizasyonu için birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam ediliyor [1,2,3].

Hüseyin Kahraman'ın "Akış kanal tasarımının polimer elektrolit membran yakıt hücresi performansına etkisinin incelenmesi" çalışmasında; operasyon koşullarının etkisi kısmında yaptığı deneylerde stokiyometri, sıkıştırma basıncı, operasyon basıncının etkisi gibi konuları açıklamıştır [11]. Yine Muhammed Çelik ve arkadaşlarının, "Stokiyometri Oranının İki Hücreli PEM Yakıt Pili Yığın Performansına Etkisinin İncelenmesi" isimli çalışmalarında stokiyometri konusunda yaptıkları deneylerden bahsetmektedirler [15]. Yine, Paul Barendse ve arkadaşlarının, "Anot Stokiyometrisi ve Geri Basıncın PEMYH'lerin Performansına Etkisi" başlıklı çalışmasında stokiyometrinin ve basıncın etkisini araştırmışlardır [21]. Yine, Mustafa Esmer'in "pem tipi yakıt hücresinin bilgisayar ortamında modellenerek çalışma parametrelerinin performansa etkilerini ile ısı ve mekanik yükler altında gerilme dağılımının incelenmesi" isimli çalışmasında stokiyometri, basınç ve sıcaklığın etkisini incelenmiştir [22]. Ek olarak Seda Küpeli'nin, "Pem yakıt pillerinde geometrik ve çalışma parametrelerinin performansına etkileri ve yeni bir akış alanı tasarımı" çalışmasında stokiyometrinin performans üzerine etkisi konusuna yer vermiştir.

Hücre performansına etki eden bir diğer önemli parametre de sıkma torkudur. Tork değerinin optimum değeri bulunarak bu optimum değerde olması sağlanmalıdır. Literatürde bu konuda da çeşitli araştırma ve deney vardır. Hüseyin Kahraman ve arkadaşlarının "Beş hücreli pem tipi yakıt pili tasarımı, üretimi ve deneysel analizi" çalışmasında; sıkma torkunun hücre performansına etkisi araştırılmıştır [16]. Yine, Hüseyin Kahraman ve arkadaşlarının bir diğer çalışması olan "Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: analysis & modeling" isimli

alışmalarında sıkıştırma değeri­nin hücre performansına etkilerini açıklamaktadır. Yine Arife Uzundurukan'ın " farklı sıkıştırma yöntemlerinin pem yakıt hücresi performansına etkilerinin incelenmesi" alışmasında pres ve sıra ile civataları sıkarak uygulanan sıkma işlemlerine göre oluşan basıncın performansa etkilerini incelenmiştir. Yine Hüseyin Kahraman'ın "Akış kanal tasarımının polimer elektrolit membran yakıt hücresi performansına etkisinin incelenmesi" alışmasında; operasyon koşullarının etkisi kısmında yaptığı deneylerde stokiyometri, sıkıştırma basıncı, operasyon basıncının etkisi gibi konuları açıklamıştır [11]. Yine, Woo-kum Lee ve arkadaşlarının " Sıkıştırma ve gaz difüzyon katmanlarının bir PEM yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkileri" isimli araştırmaları sıkma torkunun hücre performansına etkilerini incelemektedir [19].

Hücre performansına etki eden bir diğ­er önemli parametre işletme basıncıdır. Tolga Gümüšoğlu'nun "Pem yakıt hücresi performansını etkileyen parametrelerin optimizasyonu" alışmasında; çeşitli çalışma basıncı ve stokiyometrik oranlarda testler yapılmış ve sonuçları değ­erlendirilmiştir [25]. Yine, Xiangchao Meng ve arkadaşlarının yapmış olduğu " Anot devirdaimli proton değ­işim membranlı yakıt hücresinin özellikleri üzerindeki ana çalışma parametre etkilerinin deneysel çalışması" ve Bing Mei ve arkadaşlarının hazırlamış olduğu "Soğutucu kanallarıyla donatılmış bir PEM yakıt hücresinin enerji, ekserji, çevresel ve ekonomik analizleri ve çok amaçlı optimizasyonu" adlı çalışmalarda bir PEM yakıt hücresindeki basınç değ­erleri üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır [4].

Bipolar plakaların da şüphesiz hücre performansına etkisi önemlidir. Bunun yanında hücre maliyetinin önemli bir kısmını oluşturur. Seri üretime uygun, korozyon direnci yüksek, elektrik iletkenliğinin iyi olması, dayanıklı ve verimli olması gibi özelliklere sahip olması istenir. PEM yakıt hücrelerinde yaygın olarak iki tip bipolar plaka malzemesi kullanılır. İlki grafit olup elektrik iletimi iyi, korozyon dayanımı yüksek olup seri üretime çok uygun değildir. Diğ­eri ise kaplamalı metaller grubudur. Seri üretime uygun olmaları yanında korozyon direnci grafit kadar iyi değildir. Bu konuda da performans arttırma üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Grafitler ile performansları kıyaslanabilir seviyededir. Bu konuda çeşitli araştırmalar incelendi. Tabbi Wilberforce ve arkadaşlarının " Effect of Bipolar Plate Material on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance" adlı çalışmasında alüminyum, bakır ve paslanmaz metallerin performansların farklı parametrelerde denenerek performansları

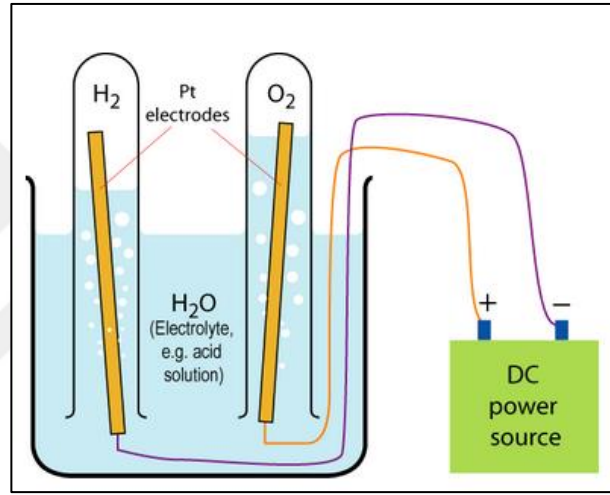
karşılaştırılmıştır. Ayrıca burada üç farklı basınç denenerek basıncın etkisi de test edilmiştir [29]. Yine, Rajeev Gautam ve arkadaşları “ Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application” adlı çalışmalarında farklı malzeme ve kaplamalardan yapılmış bipolar plakaların karşılaştırılmasına genişçe yer vermişlerdir. Yine, S. Shimpalee ve arkadaşları “ Investigation of Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells” adlı çalışmalarında metalik paslanmaz plakalar ile yaptığı deneylerde korozyon direnci, maliyet ve performans parametrelerini incelemişlerdir [34]. Yine, Nguyen Dang Nam ve arkadaşlarının “ Corrosion protection of CrN/TiN multi-coating for bipolar plate of polymer electrolyte membrane fuel cell” adlı çalışmasında CrN ve TiN kaplamalı paslanmaz plakaların kaplamasız olanlara göre performansının belirgin biçimde arttığını vurgulamışlardır. Yine, Allen Hermann ve arkadaşlarının “Bipolar plates for PEM fuel cells: A review” adlı çalışmasında bipolar plakaların fiziksel ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmaktadırlar [38].

2. YAKIT HÜCRELERİ

2.1. Yakıt Hücrelerinin Gelişim Süreci

19. yüzyılda keşfedilen yakıt hücreleri günümüzde dahil büyük bir araştırma ve geliştirme içerisinde.

Yakıt hücreleri fikri ilk defa bir İngiliz fizikçi olan William R. Grove tarafından ortaya atılmıştır. Aşağıdaki şekildeki gibi seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırdığı platin çubuklarla hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır.



Şekil 2.1: Elektroliz düzeneği.

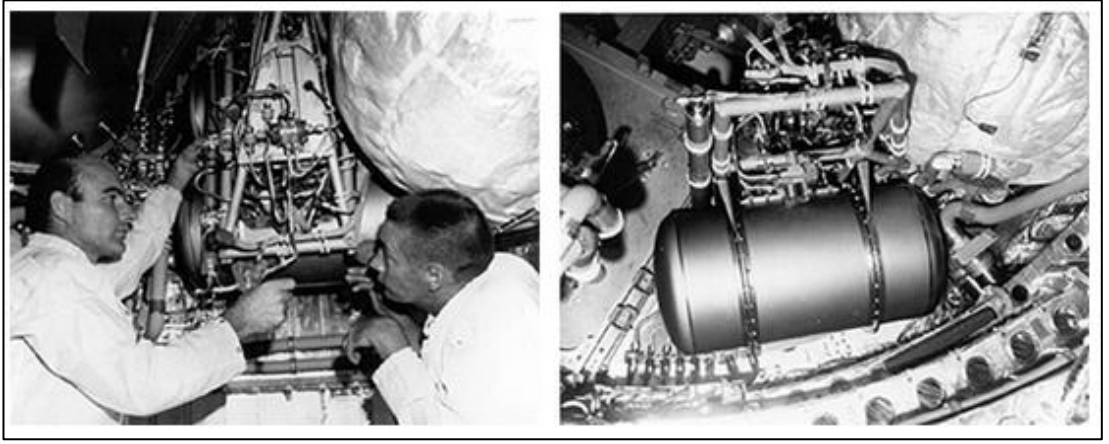
İki elektrot yani platin çubuklara voltaj uygulanarak tüplerde hidrojen ve oksijen elde edilebilir. Bu yöntem elektroliz denir. Bu yöntem ilk defa William Nicholson tarafından 1800 yılında keşfedilmiştir. Yakıt hücresi bu prosesin tersine verilen isimdir. Yani elektroliz tersi yönde çalışacak ve akımın iki elektrolit arasındaki bir devre boyunca akması sağlanacaktır.

Ancak, Charles Langer ve Ludwig Mond'un kömür gazıyla çalışan pratik bir hücre tasarlamaya çalıştığı 1889 yılına kadar kimse William R. Grove tarafından gösterilen konsepti kullanmaya çalışmadı. 1900 yılına kadar birtakım çalışmalar yapıldı. Ancak içten yanmalı motorların geliştirilmesi bu yöndeki çalışmaları azalttı.

Francis Bacon, saf O_2 ve H_2 ile çalışan ve bir alkalin katalizör ve nikel elektrotlar kullanan ilk başarılı yakıt hücresini 1932'de geliştirdi. 1959 yılında Bacon ve

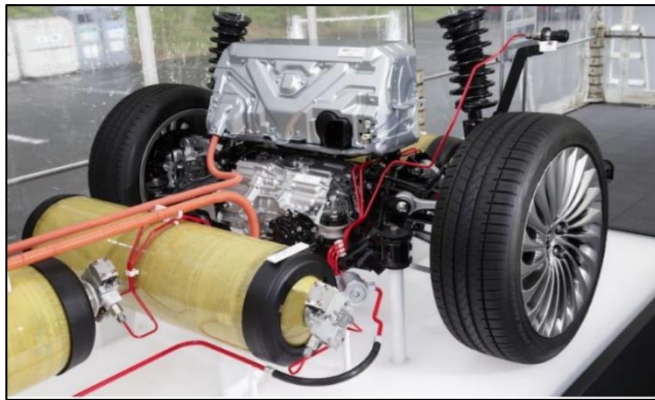
meslektaşları ilk olarak 5 kW'lık bir cihazı gösterdiler. Yine aynı yıl Harry Karl Ihrig, 20 kW'lık güce sahip bir yakıt hücresli traktör sergiledi.

Aynı yıllarda, NASA uzay aracında kullanılmak üzere kompakt bir elektrik jeneratörü üretmek amacıyla yakıt hücresi teknolojisini geliştirmeye başladı. Apollo programında alkalın yakıt hücreleri, daha sonraki Gemini programında ise PEM yakıt hücreleri kullanılmıştır. Bu sistem enerji yanında aynı zamanda astronotların ihtiyaç duyduğu suyu da sağlıyordu. PEM yakıt hücrelerinin birçok teknik avantajına rağmen yüksek maliyet dolayısıyla NASA alkalın yakıt hücrelerini 90'lara kadar kullandı [5,7].

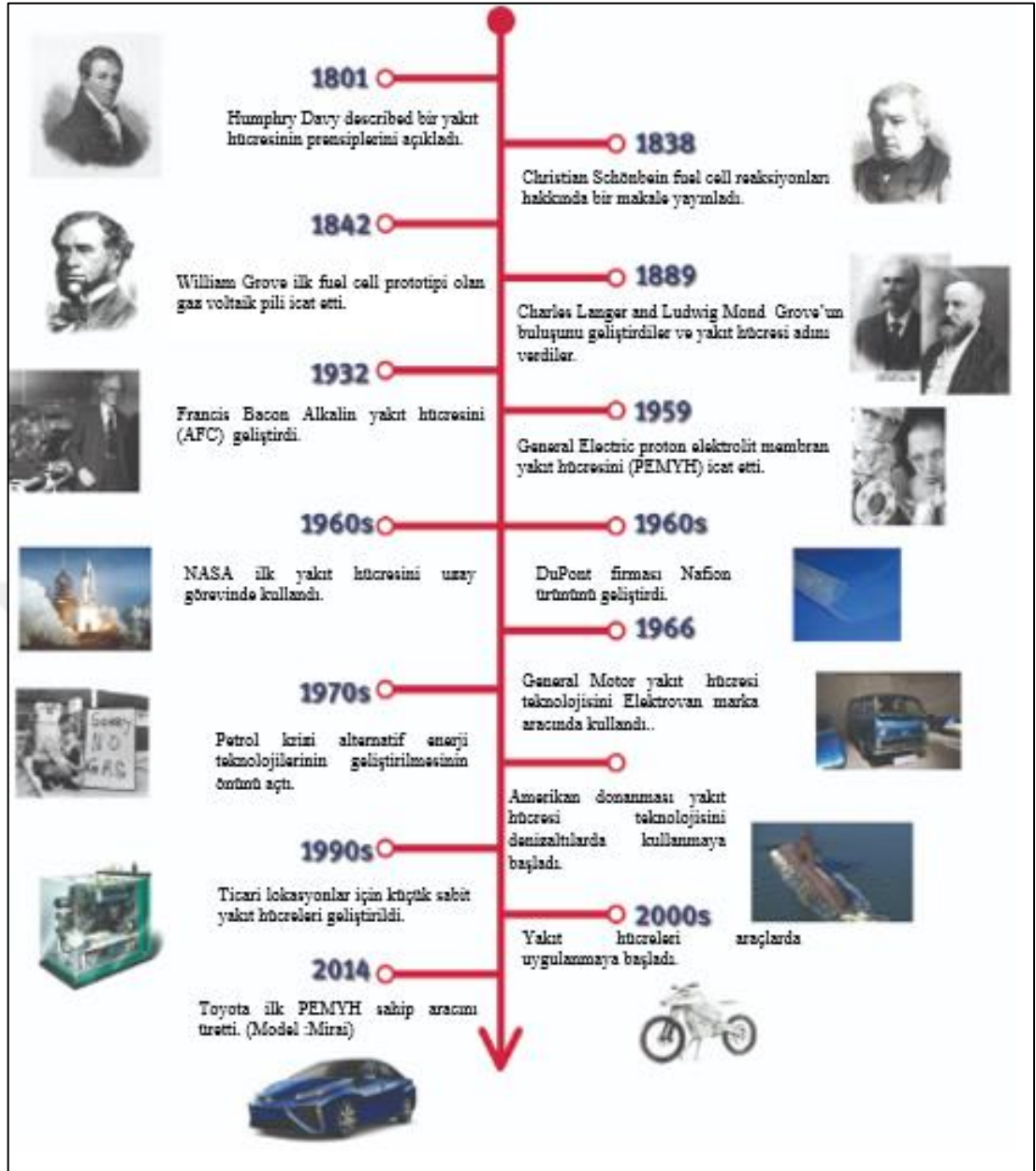


Şekil 2.2: GE tarafında geliştirilen PEMYH Gemini 7 uzay aracında.

Günümüzde de otomotiv firmaları FCEV diye adlandırdıkları Hidrojen ile çalışan araçlar üretmektedirler.



Şekil 2.3: Bir FCEV olan Toyota Mirai modeli



Şekil 2.4: Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi.

2.2. Yakıt Hücrelerinin Türleri

Birçok yakıt hücresi çeşidi olmakla beraber kullanıldıkları elektrolitlere göre en yaygın olan 9 ana tip yakıt hücresi vardır [2].

1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMYH)
2. Alkali yakıt hücresi (AYH)
3. Fosforik asit yakıt hücresi (PAYH)
4. Katı oksit yakıt hücresi (SOYH)

5. Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCYH)
6. Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH)
7. Çinko hava yakıt hücreleri (ZAYH)
8. Protonik seramik yakıt hücreleri (PCYH)
9. Biyolojik yakıt hücreleri (BYH)

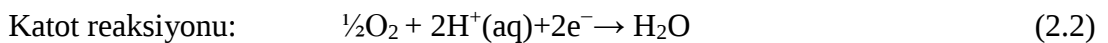
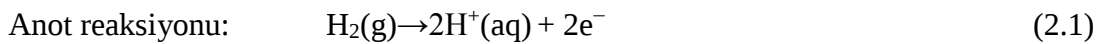
Bu yakıt hücrelerinin tümü elektrokimyasal olarak aynı prensiplere dayanır. Farklı sıcaklık aralıklarında çalışırlar ve farklı malzemeler içerirler. Verimleri farklıdır [3].

2.2.1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMYH)

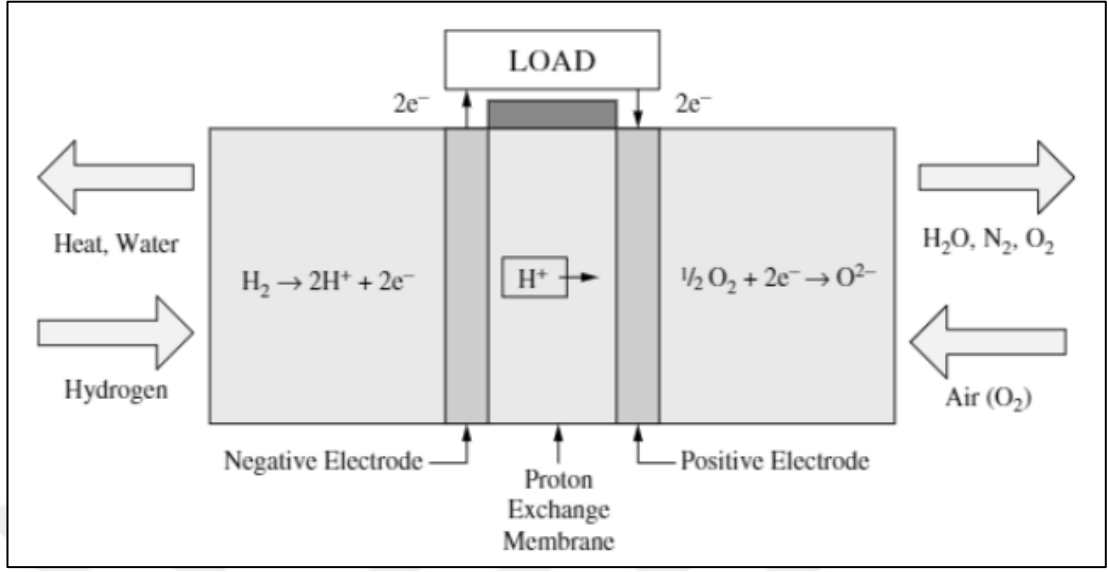
PEM yakıt hücresi, düşük ağırlık, maliyet ve hacim sağlarken, yüksek güç yoğunluğu sağlar. Bir PEM yakıt hücresi, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi negatif yüklü bir elektrot (anot), pozitif yüklü bir elektrot (katot) ve bir elektrolit zarından oluşur. Anotta hidrojen oksitlenir ve katotta oksijen indirgenir. Protonlar anottan katota elektrolit membran yoluyla taşınır ve elektronlar bir dış devre yükü üzerinden taşınır. Katotta oksijen, suyu oluşturan ve ısı üreten protonlar ve elektronlarla reaksiyona girer.

PEM yakıt hücresinde, yakıtın akış kanallarından elektrota ulaşımı, elektroliti her iki taraftan kaplayan, elektriksel olarak iletken bir karbon kâğıdı aracılığıyla gerçekleşir. Bu destek tabakaları tipik olarak 20 ila 80 µm arasında bir gözenekliliğe sahiptir ve reaktanları ve ürünleri çift kutuplu plakalara ve buradan reaksiyon bölgesine taşıma amacına hizmet eder. Anottaki bir elektrokimyasal oksidasyon reaksiyonu, iyonlar elektrolitten karşı tarafa geçerken, çift kutuplu plaka/hücre ara bağlantısı yoluyla dış devreye akan elektronlar üretir. Elektronlar dış devreden geri dönerken, iyonlar elektrolitten karşı elektrota geçer. Elektronlar, katottaki elektrokimyasal indirgeme reaksiyonuna katılmak için dış devreden geri döner [3].

PEM yakıt hücresinde anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Tüm hücre reaksiyonu: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ (2.3)



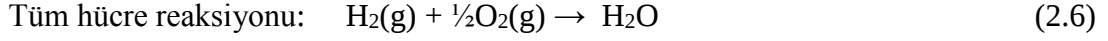
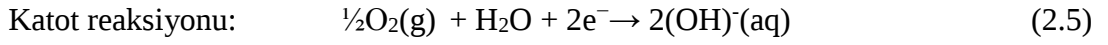
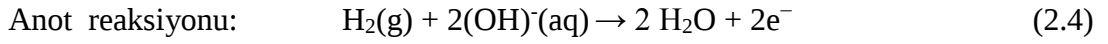
Şekil 2.5: PEM yakıt hücresi.

2.2.2. Alkali yakıt hücresi (AYH)

Alkali yakıt hücreleri, NASA tarafından uzay görevlerinde kullanılmıştır ve %70'e varan güç üretme verimliliği sağlayabilir. Bu hücrelerin çalışma sıcaklıkları oda sıcaklığı ile 250°C arasında değişmektedir. Elektrolit, bir matris içine batırılmış sulu bir alkalin potasyum hidroksit çözeltisidir. Bu avantajlıdır, çünkü katot reaksiyonu alkalin elektrolitte daha hızlıdır, bu da daha yüksek performans anlamına gelir. AYH'ler tipik olarak 300 Watt ile 5 kW arasında bir hücre çıkışına sahiptir.

AYH'lerin bir diğer avantajı da kullanılan elektrolit ve katalizör gibi malzemelerin maliyetinin düşük olmasıdır. Katalizör malzemesi olarak platin ya da nikel gibi nispeten daha ucuz olan metal katalizörler kullanabilir. AYH'lerin bir dezavantajı, atmosferden gelen az miktardaki karbondioksiti tolere edemediği için yakıt hücresine saf hidrojen ve oksijenin beslenmesinin gerekmesidir. Zamanla, karbondioksit önemli sorunlara yol açabilen KOH elektrolitini bozar. Yaygın olarak kullanılan iki çözüm, KOH elektrolitini veya karbon dioksit yıkayıcılarını yenilemektir. Bu sınırlamalar nedeniyle, AYH'ler pek çok güç uygulamasında tercih edilmez [2].

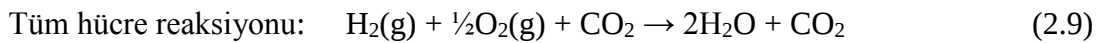
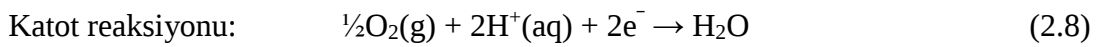
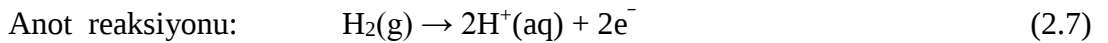
Anot ve katot tarafında oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



2.2.3. Fosforik asit yakıt hücresi (PAYH)

PAYH'ler %40'ın üzerinde verimlilikle elektrik üreten çok verimli yakıt hücreleridir. PAYH tarafından üretilen buharın yaklaşık yüzde 85'i kojenerasyon için kullanılır. Çalışma sıcaklıkları 150 ila 220°C aralığındadır. Düşük sıcaklıklarda, PAYH zayıf bir iyonik iletkenidir ve anottaki platin katalizörün karbon monoksit (CO) zehirlenmesi şiddetli olabilir.

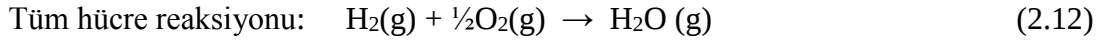
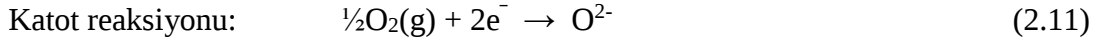
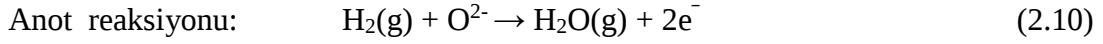
Fosforik asit yakıt hücresinin iki ana avantajı vardır. Bunlar, %85'lik bir kojenerasyon verimliliği ve saf olmayan hidrojeni yakıt olarak kullanabilmesidir. PAYH'ler, kullanılabilecek yakıt türlerinin sayısını artıran yaklaşık %1.5'lik bir karbon monoksit konsantrasyonunu tolere edebilir. PAYH'lerin dezavantajları, platini bir katalizör olarak kullanmaları (diğer birçok yakıt hücresi gibi) ve büyük boyutlara ve ağırlıklara sahip olmasıdır. PAYH'ler düşük akım ve güç üretir. Fosforik asit yakıt hücreleri, en olgun yakıt hücresi teknolojisidir [2]. Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



2.2.4. Katı oksit yakıt hücresi (SOYH)

Katı oksit yakıt hücreleri, endüstriyel ve büyük ölçekli merkezi elektrik üretim istasyonları gibi büyük, yüksek güçlü uygulamalar için umut verici görünmektedir. Katı oksit yakıt hücrelerinin kimyası, iletkenliğe dayalı oksijen iyonları (O_2) ile Y_2O_3 stabilize edilmiş ZrO_2 gibi gözeneksiz bir katı olan bir elektrolitten oluşur. Anot genellikle bir Co-ZrO₂ veya Ni-ZrO₂ seramikten yapılırken, katot Sr katkı

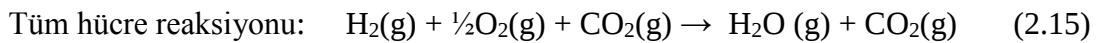
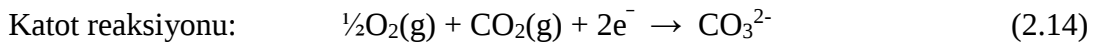
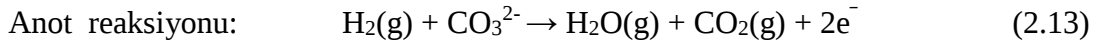
LaMnO₃'ten yapılır. Çalışma sıcaklıkları 1000°C'ye ulaşabilir. Kojenerasyon ile ve hücre çıkışı 100 kW'a kadar olduğunda güç üretme verimliliği %60-85'e ulaşabilir [2]. Anot, katot ve genel hücre reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



2.2.5. Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCYH)

Erimiş karbonat yakıt hücresindeki elektrolit, bir matrise batırılmış sıvı bir lityum, sodyum ve/veya potasyum-karbonat çözeltisi kullanır. MCYH'ler, kojenerasyon ile %60-85 arasında değişen yüksek verimliliğe sahiptir ve yaklaşık 620–660°C'de çalışır. Yüksek çalışma sıcaklığı büyük bir avantajdır çünkü daha yüksek verimlilik ve daha fazla yakıt türü ve ucuz katalizör kullanma esnekliği sağlar. Bu yüksek çalışma sıcaklığı, elektrolitin yeterli iletkenliğini elde etmek için gereklidir.

Erimiş karbonat yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen, karbon monoksit, doğal gaz, propan, çöp gazı, deniz dizeli ve kömür gazlaştırma ürünleri kullanılabilir. Sabit uygulamalar için MCYH'ler dünya çapında çeşitli yerlerde başarıyla kullanılmıştır. MCYH'lerin bir dezavantajı, yüksek sıcaklıkların korozyonu ve hücre bileşenlerinin parçalanmasını arttırmasıdır [2]. Anot, katot ve genel hücre reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



2.2.6. Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH)

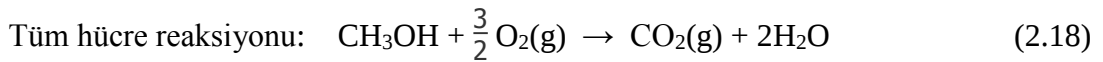
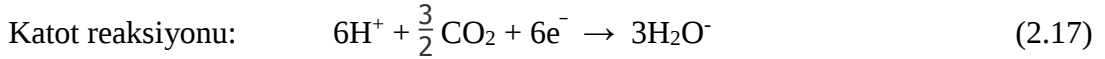
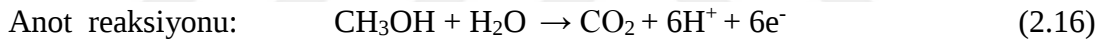
Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH), PEM yakıt hücresi ile aynı polimer elektrolit zarını kullanır. Bununla birlikte, DMYH'nin yakıtı hidrojen yerine metanoldür. Metanol anottan yakıt olarak akar ve protonlara, elektronlara ve suya

ayrılır. Metanolün avantajları, yaygın olarak bulunabilmesi ve benzinden veya biyokütleden kolayca dönüştürülebilmesini içerir. Ağırlıkça hidrojenin enerji yoğunluğunun yalnızca beşte birine sahip olmasına rağmen, sıvı olduğu hidrojene kıyasla hacim başına dört kattan fazla enerji sunar.

DMYH ile ilgili önemli bir sorun, metanolün oksidasyonunun elektrodu zehirleyen ara hidrokarbon türleri üretmesidir. Diğer bir sınırlama, anotta metanol oksidasyonunun oksijen elektrot reaksiyonu kadar yavaş olması ve yüksek güç çıkışı için büyük aşırı potansiyellerin gerekli olmasıdır. Metanolün elektrolit yoluyla yüksek düzeyde çapraz geçişi sorunu da vardır. Yani yakıt molekülleri elektrolit yoluyla doğrudan oksijen elektroduna yayılır.

Doğrudan metanol yakıt hücresinin performansı hava ile 180 ila 250 mW/cm² mertebesinde. Bu, çok küçük portatif yakıt hücreleri dışında mevcut uygulamalar için yetersizdir. Platin yüklemeleri, 4 mg/cm²'dir, hidrojen-hava PEM yakıt hücrelerinden neredeyse on kat daha fazladır [2].

Anot, katot ve genel hücre reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



2.2.7. Çinko hava yakıt hücreleri (ZAYH)

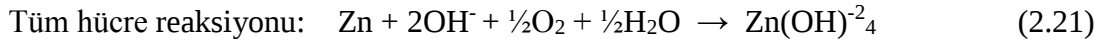
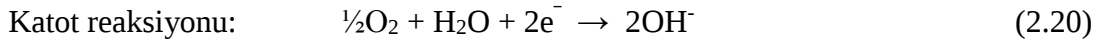
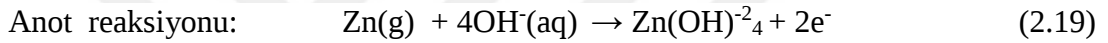
Çinko hava yakıt hücrelerinde (ZAYH), gaz difüzyon elektrotunun (GDE), elektrolitle ayrılmış bir çinko anot ve bir tür mekanik ayırıcı vardır. Diğer yakıt hücresi türleri gibi, GDE de oksidanın içinden geçmesine izin veren geçirgen bir zar vardır. Çinko oksit, anotta çinko ile reaksiyona giren ve böylece bir elektrik potansiyeli oluşturan hidroksil iyonları ve su (oksijenden) tarafından oluşturulur. Çinko-hava yakıt hücreleri, istenen güç gereksinimlerini elde etmek için birbirine bağlanabilir. Bu elektrokimyasal süreç, bir PEM yakıt hücresininkine çok benzer, ancak yakıt ikmali süreci, pillerle ortak özelliklere sahiptir.

ZAYH'ye genellikle "rejeneratif" yakıt hücreleri denir. Rejeneratif yakıt hücresi sistemi, yakıtın eklenmediği ve hiçbir ürünün veya yan ürünün israf edilmediği bir

sistemdir. Yakıt hücresi tarafından kullanılan oksijen, elektrolizör tarafından tekrar havaya salınır. Bu sistemin verimliliği çinko rejeneratif yakıt hücresi (ZRYH) sistemi için %30-50 ve hidrojen rejeneratif yakıt hücresi sistemi için yaklaşık %20 ila 40'tır.

Çinko-hava yakıt hücresi teknolojisi, yakıt hücreleri ve piller altında sınıflandırılır. Çinko-hava teknolojisinin diğer pil teknolojilerine göre en büyük avantajı, yüksek özgül enerjisidir. ZAYH'ler, elektrikli araçlara (EV) güç vermek için kullanılmış ve benzer ağırlıktaki diğer EV pillerinden daha uzun sürüş mesafeleri sağladığı kanıtlanmıştır. Çinko-hava pilleri için malzeme maliyetleri, bir element olarak çinko bolluğu nedeniyle düşüktür. Bu nedenle çinko-hava teknolojisi, EV'ler ve tüketici elektroniği ile askeri uygulamalar gibi çok çeşitli uygulamalar için potansiyel olarak kullanılabilir [2].

Anot, katot ve genel hücre reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



2.2.8. Protonik seramik yakıt hücreleri (PCYH)

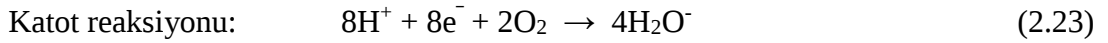
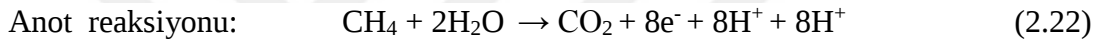
Protonik seramik yakıt hücresi (PCYH), yüksek sıcaklıklarda yüksek protonik iletkenlik sergileyen seramik bir elektrolit malzemeye dayalı yeni bir yakıt hücresi türüdür. Bu tip yakıt hücresi temel olarak diğer yakıt hücrelerinden farklıdır. Çünkü hidrojen iyonlarının (protonlar) elektrolit yoluyla diğer proton ileten yakıt hücresi tiplerinde mümkün olandan çok daha yüksek sıcaklıklarda iletilmesine dayanır. PCYH'ler, yüksek sıcaklıkta yakıt hücresi tipleri çalışması (700°C) nedeniyle erimiş karbonat ve katı oksit yakıt hücreleriyle aynı termal ve kinetik avantajlara sahiptir, ancak bu yakıt hücresi PEMYH'ler ve PAYH'lerde olduğu gibi proton iletiminin faydalarını da gösterir.

Hidrokarbon yakıtlarla çok yüksek elektriksel yakıt verimliliği elde etmek için yüksek çalışma sıcaklığı gereklidir. PCYH'ler yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ve fosil yakıtları elektrokimyasal olarak doğrudan anoda oksitleyebilir. Bu, maliyetli reform süreci yoluyla hidrojen üretme ara adımını ortadan kaldırır. Hidrokarbon yakıt, su

buharı varlığında anotun yüzeyine emilir, daha sonra hidrojen atomları çıkarılır ve elektrolit tarafından emilir. Karbondioksit birincil reaksiyon ürünüdür.

Elektrik enerjisini üreten hidrojen oksidasyon reaksiyonu diğer yüksek sıcaklıktaki yakıt türlerinin tam tersi olan anotta (yakıt tarafı) meydana gelir. PCYH'de, katottaki yakıt, tam yakıt kullanımını mümkün kılan hava akışıyla giderilir. Hidrokarbon yakıtlar kullanıldığında, çeşitli reaksiyon yolları gerçekleşebilir, ancak yakıtın atık su ile seyreltilmesi, yığından çıkan yakıt akışının pahalı bir şekilde sonradan işlenmesi olmadan SOYH'lerde yüksek yakıt kullanımının elde edilmesini zorlaştırır. PCYH'lerde yakıt seyreltilmesi meydana gelmez. Ek olarak, PCYH'ler katı bir elektrolite sahiptir, bu nedenle membran PEM yakıt hücrelerinde olduğu gibi kurumaz ve PAFC'lerde olduğu gibi sıvı dışarı sızmaz [2].

Protonik elektrolitte reaksiyon aşağıdaki gibidir:



Zirkonya elektrolitte ise reaksiyon aşağıdaki gibidir:



2.2.9. Biyolojik yakıt hücreleri (BYH)

Biyolojik yakıt hücresi, biyokimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe dönüştüren bir cihazdır. Biyolojik yakıt hücrelerinde (BYH), katalizör olarak bir mikroorganizma veya enzim kullanılarak glikoz ve metanol gibi bir karbonhidrat substratının redoks reaksiyonu ile enerji üretilir. Temel fark, biyolojik yakıt hücresindeki katalizörün bir mikroorganizma veya enzim olmasıdır. Bu nedenle, katalizör için soy metaller gerek yoktur ve çalışma koşulları tipik olarak nötr çözeltiler ve oda sıcaklığıdır. Yakıt hücresi sıvı ortamda çalışır ve düşük sıcaklık ve nötre yakın bir ortam gibi avantajlar elde edilebilir. Bu tür yakıt hücrelerinin olası potansiyel uygulamaları şunlardır:

- 1) Yeni pratik düşük güçlü enerji kaynakları geliştirmek,
- 2) Doğrudan elektrot etkileşimlerine dayanan özel bir sensör üretmek,
- 3) Bazı kimyasalları elektrokimyasal olarak sentezlemek [2].

2.3. Yakıt Hücresi Türlerinin Karşılaştırılması

Günümüzde pek çok yakıt hücresi vardır. Farklı amaçlarla, farklı çalışma koşullarında çalışan yakıt hücreleri geliştirilmiştir. Genellikle kullanılan yakıt ve zar tipine göre bu çeşitlilik belirlenir. Yukarıda bahsedilen yakıt hücrelerinin karşılaştırılması Tablo 2.1’de verilmiştir.



Tablo 2.1: Yakıt Hücresi Türlerinin Karşılaştırılması.

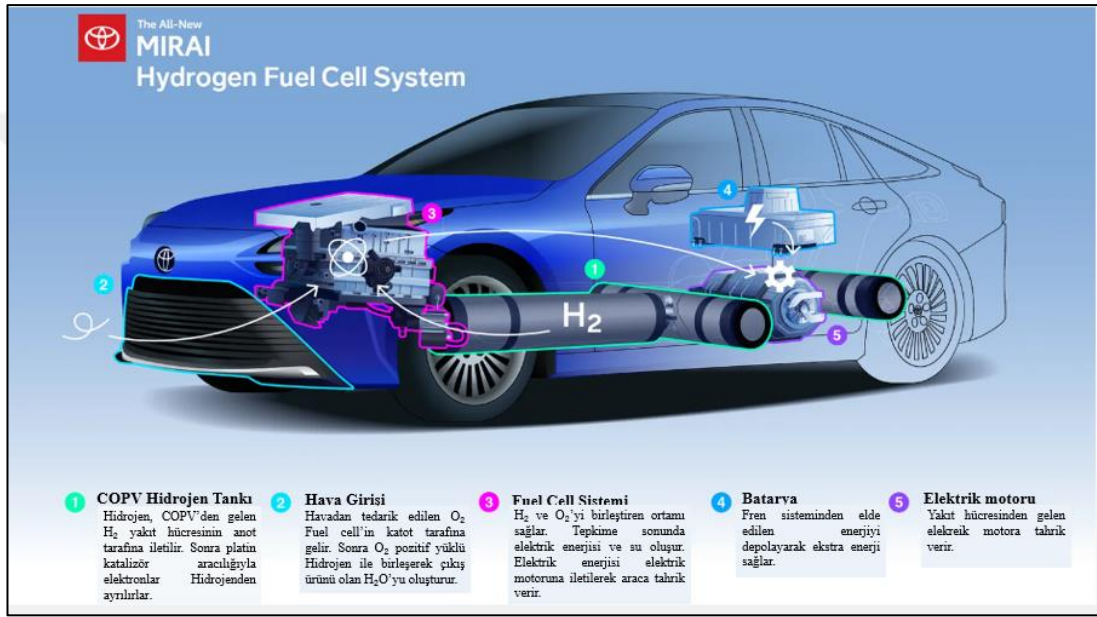
Yakıt hücresi sistemi	Proton Elektrolit Membran (PEMYH)	Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH)	Katı oksit yakıt hücresi (SOYH)	Alkalin yakıt hücresi (AYH)	Fosforikasit yakıt hücresi (PAYH)	Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC)	Çinko hava yakıt hücresi (ZAYH)	Protonik seramik yakıt hücreleri (PCYH)	Biyolojik yakıt hücreleri (BYH)
Yakıt	H ₂	CH ₃ OH+H ₂ O	CO, H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ / CO / Reformat	Çinko oksit	CO, H ₂	Karbonhidrat, hidrokarbon
Oksitleyici	O ₂ , hava	O ₂ , hava	O ₂ , hava	O ₂ , hava	O ₂ , hava	CO ₂ , O ₂ , hava	O ₂ , hava	O ₂ , hava	O ₂ , hava
En yaygın elektrolit	Perflorosülfonik asit membran	Perflorosülfonik asit membran	Yttria stabilize zirkonya	Potasyum hidroksit	Likit fosforik asit	Lityum, sodyum yada bir matrise batırılmış potasyum karbonat	Potasyum hidroksit	%10 itriyum baryum serat protonik seramik	Fosfat çözeltisi
Elektrolit kalınlığı	~50-175µm	~50-175µm	~25-250µm	Yok	Yok	0.5-1 mm arası	Yok	~460µm	Değişir
Mobil iyon	H ⁺	H ⁺	O ²⁻	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	OH ⁻	O ²⁻	H ⁺
En yaygın anot katalizörü	Platin	Platin/Rutenyum	Nikel/YSZ	Platin/ Nikel	Platin	Nikel	Çinko	Platin, Nikel kaplama	Mikroorganizma/ Enzim

Tablo 2.1: Yakıt Hücresi Türlerinin Karşılaştırılması. (Devamı)

Anot katalizörü katman kalınlığı	~10-30µm	~10-30µm	~25-150µm	Yok	~10-30µm	0.2-1.5mm	Yok	Değişir	Değişir
Bipolar plaka malzemesi	Grafit, Titanyum, Paslanmaz çelik, Katkılı polimer	Grafit, Titanyum, Paslanmaz çelik, Katkılı polimer	Katkılı LaCrO ₃ , YCrO ₃ , İnkoneal alaşımı	Yok	Grafit, Titanyum, Paslanmaz çelik, Katkılı polimer	Paslanmaz çelik	Yok	Paslanmaz çelik	Grafit, Elektrik iletken polimer, Paslanmaz çelik
İşletme sıcaklığı (°C)	Oda sıcaklığı - 100°C arası	Oda sıcaklığı - 100°C arası	600-1000°C arası	Oda sıcaklığı - 250°C arası	150-220°C arası	620-660°C arası	700°C	500-700°C arası	Oda sıcaklığı
İşletme basıncı (atm)	1-3	1(Anot tarafı) – 1 ila 3 (Katot tarafı)	1	1-4	3-10	1-10	1	1	1
Büyük kirlenici maddeler	CO <100ppm, sulfur, dust	CO <100ppm, sulfur, dust	<100ppm sulfur	CO ₂	CO <100ppm, sulfur, dust, NH ₃	H ₂ S, HCl, As, H ₂ Se, NH ₃ , AsH ₃ , dust	Yok	CO <100ppm, sulfur, dust	Yok
Verimlilik (%)	~58	~40	~65	~64	~42	~50	Yok	~55-65	~40
Uygulama alanları	Sabit, portatif ve taşıtlarda	Portatif elektronik ve yedek güç ünitelerinde	Sabit ve dağıtılmış güç veya Yedek güç ünitelerinde	Uzay programlarında	Sabit güç uygulamaları	Sabit güç uygulamaları	Sabit ve taşıt uygulamaları nda	Sabit ve dağıtılmış güç veya Yedek güç ünitelerinde	Birçok yararlı uygulamalar

2.4. Yakıt Hücreleri Uygulama Alanları

Yakıt hücresi teknolojisinin temiz ve modüler olması, performans gibi çekici özellikleri nedeniyle, yakıt hücrelerinin çok çeşitli alanlarda geliştirilmesi çalışmaları halen devam etmektedir. Özellikle günümüzde otomobil, raylı sistemler, yük taşıtlarında, deniz taşıtlarında ve hatta havacılık sektöründe bile uygulamalarını çok sık görüyoruz. Bunlardan birkaçı aşağıda gösterilmiştir [26,27,40].



Şekil 2.6: Toyota'nın geliştirdiği ve uzun yıllardır üretimine devam ettiği Mirai modeli



Şekil 2.7: Zeraoavia şirketinin geliştirdiği yakıt hücresel bir yolcu uçağı.



Şekil 2.8: Alstom şirketi tarafından yapılmış, yakıt hücreleri ise Cummins tarafından geliştirilen Coradia iLint isimli tren.



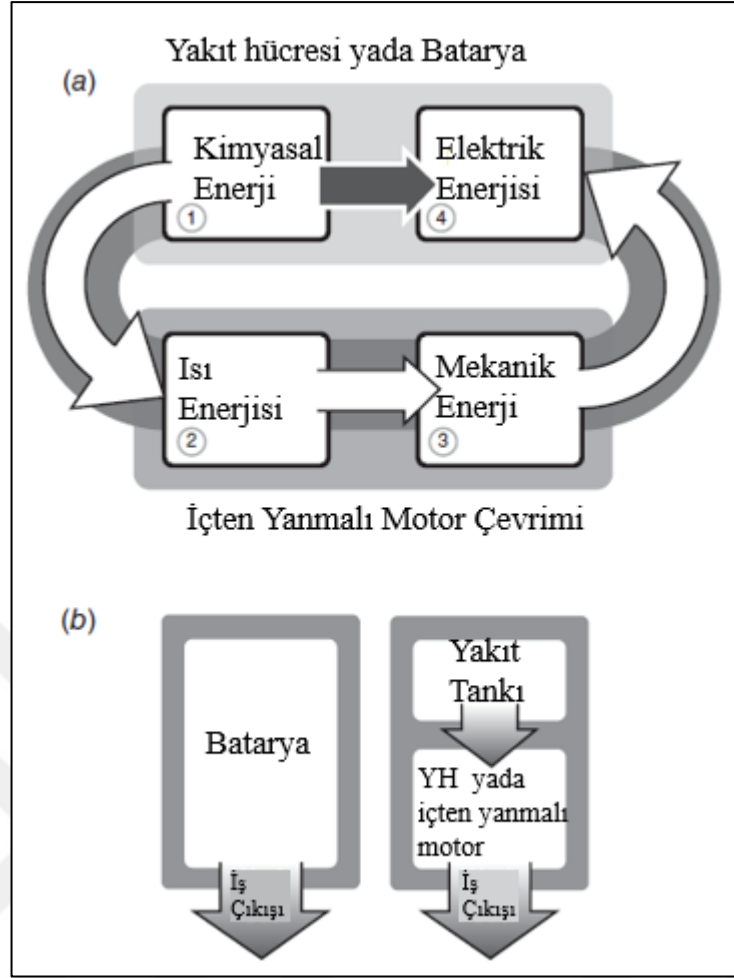
Şekil 2.9: Thyssenkrupp tarafından inşa edilen HDW yakıt hücresi sistemi.

2.5. Yakıt Hücrelerinin Avantaj ve Dezavantajları

2.5.1. Yakıt Hücrelerinin Avantajları

Yakıt hücreleri batarya ve içten yanmalı motorların birçok avantajını birleştirir. Yakıt hücreleri kimyasal enerjiden doğrudan elektrik ürettikleri için içten yanmalı motorlardan daha verimlidir. Yine yakıt hücreleri krank biyel gibi hareketli parçalar içermediklerinden sürtünme vs olmayacağından ötürü daha uzun ömürlü ve sessizdirler. Ayrıca NO_x, SO_x gibi istenmeyen ürünler ve partikül emisyonları neredeyse sıfırdır [3].

Pillerin aksine yakıt hücreleri, güç ve kapasite arasında kolayca bağımsız ölçeklendirme sağlar. Pillerde, güç ve kapasite genellikle karmaşıktır. Piller büyük boyutlarda yetersiz ölçeklenirken, yakıt hücreleri 1 W aralığından (cep telefonu) megavat aralığına (enerji santrali) iyi ölçeklenebilir. Yakıt hücreleri, pillerden potansiyel olarak daha yüksek enerji yoğunlukları sunar ve yakıt ikmali ile hızlı bir şekilde yeniden şarj edilebilirken, pillerin zaman alan bir şarj süreleri vardır.



Şekil 2.10: Yakıt hücrelerinin, pillerin ve içten yanmalı motorların şematik olarak karşılaştırması.

(a) Yakıt hücreleri ve piller doğrudan kimyasal enerjiden elektrik üretir. Bunun tersine, içten yanmalı motorlar önce kimyasal enerjii ısıya, sonra mekanik enerjiye ve son olarak da elektriğe dönüştürür (alternatif olarak, mekanik enerji bazen doğrudan kullanılabilir).

(b) Pillerde, güç ve kapasite tipik olarak iç içe geçmiştir. Pil hem enerji depolama hem de enerji dönüştürme aygıtıdır. Bunun aksine, yakıt hücreleri ve içten yanmalı motorlar, güç ve kapasite arasında bağımsız ölçeklemeye izin verir.

Aynı zamanda yakıt hücreleri, diğer yenilebilir alternatif enerji kaynaklarına nazaran daha fazla akım yoğunluğuna sahiptir ve yüksek voltaj zamanla değişmez ama bataryalarda değişir [3].

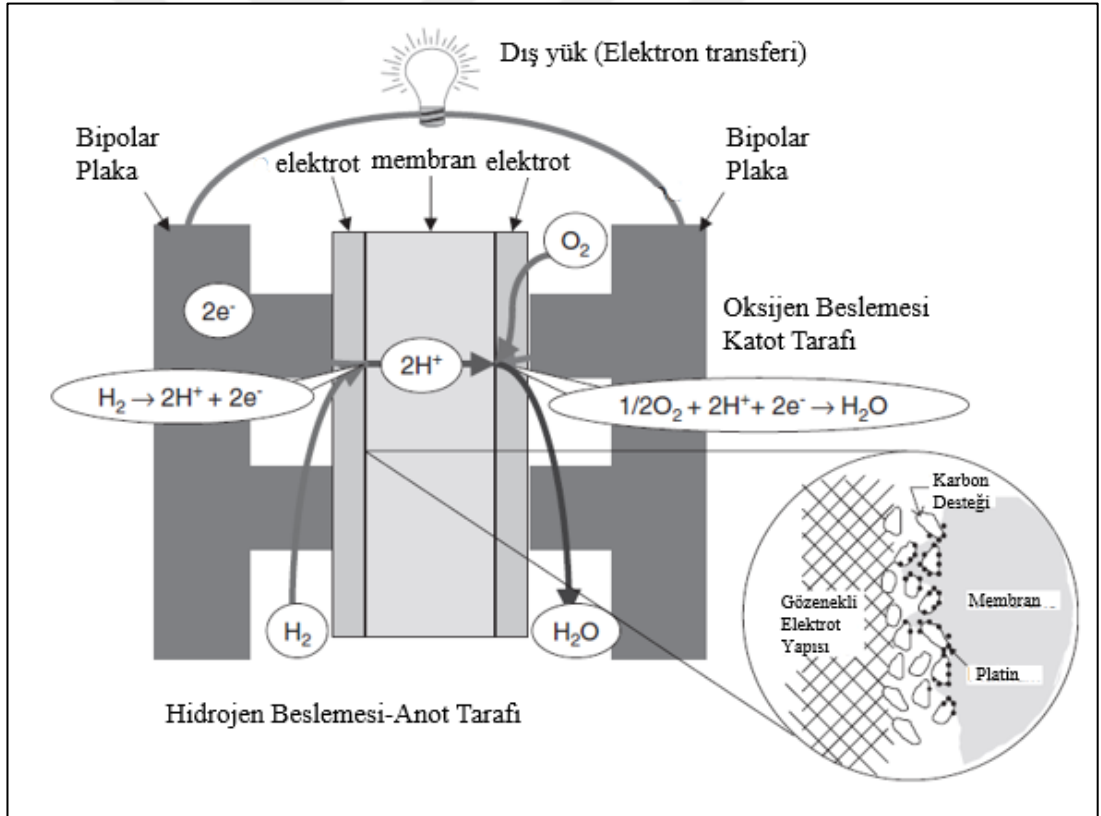
2.5.2. Yakıt Hücrelerinin Dezavantajları

Yakıt hücreleri dikkat çekici avantajlar sunarken, bazı ciddi dezavantajlara da sahiptir. Maliyet, yakıt hücresi uygulamalarının önündeki en büyük engeldir. Engelleyici maliyetleri nedeniyle, yakıt hücresi teknolojisi şu anda yalnızca birkaç yüksek derecede uzmanlaşmış uygulamada (örneğin, Uzay Mekiği yörünge aracında) ekonomik olarak rekabet edebilir. Güç yoğunluğu başka bir önemli sınırlamadır. Güç yoğunluğu, bir yakıt hücresinin birim hacim (hacimsel güç yoğunluğu) veya birim kütle (gravimetrik güç yoğunluğu) başına ne kadar güç üretebileceğini ifade eder. Yakıt hücresi güç yoğunlukları son on yılda önemli ölçüde iyileşmesine rağmen, yakıt hücrelerinin taşınabilir ve otomotiv uygulamalarında rekabet edebilmesi için daha fazla iyileştirme yapılması gerekmektedir. İçten yanmalı motorlar ve piller genellikle hacimsel güç yoğunluğu bazında yakıt hücrelerinden daha iyi performans gösterir [3]. Örneğin Toyota Mirai hacimsel güç yoğunluğu problemini çözmek ve menzilini arttırmak için yakıt tankı miktarını 3'e çıkarmıştır ve menzilini 650 km'den 1000 km'ye kadar arttırmayı başarmıştır [8].

3. PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİ

3.1. Çalışma Prensibi

Bir PEMYH'nin merkezinde gazları geçirmeyen ancak proton geçiren bir polimer membran bulunur. Proton değişim zarı (Proton exchange membran) adını da buradan almaktadır. Elektrolit görevi gören zar, elektriği ileten anot ve katot tarafından ikişer adet gözenekli elektrot arasında sıkıştırılır. Bu elektrotlar tipik olarak karbon kumaştan veya karbon fiber kâğıttan yapılır. Gözenekli elektrot ve polimer membran arasındaki arayüzde, tipik olarak karbon üzerinde platin olan katalizör parçacıkları içeren bir katman bulunur. Hücre konfigürasyonunun ve temel çalışma ilkelerinin şematik bir diyagramı Şekil 3-1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Bir PEM yakıt hücresinin temel çalışma prensibi.

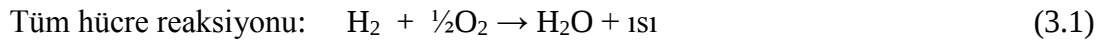
Elektrokimyasal reaksiyonlar, elektrolit ve membran arasındaki arayüzde katalizörün yüzeyinde gerçekleşir. Membranın bir tarafından beslenen hidrojen,

birincil bileşeni olan proton ve elektronlara ayrılır. Her hidrojen atomu bir elektron ve bir protondan oluşur. Protonlar membranın içinden geçerken, elektronlar elektriği ileten elektrotlardan, akım toplayıcılardan ve faydalı iş yaptıkları dış devreden geçerek zarın diğer tarafına geri dönerler. Membran ile diğer elektrot arasındaki katalizör noktalarında, zardan geçen protonlar ve zarın o tarafından beslenen oksijen ile karşılaşır. Bu karşılaşma sonucu oluşan elektrokimyasal reaksiyonda su ve ısı oluşur ve daha sonra aşırı oksijen akışıyla oluşan su hücrenin dışına itilir. Bu eşzamanlı reaksiyonların net sonucu, bir dış devre boyunca elektrik akımı yoluyla bir elektron akımıdır [1]. Elektrik yanında oluşan bu su ve atık ısı iyi kontrol edilmedilir. Bu ikisi yakıt hücresinin verimini etkileyen önemli parametrelerdir. Belli bir değerde tutulmaları gerekmektedir.

3.2. PEM Yakıt Hücresinin Temel Kimya ve Termodinamiği

3.2.1. Yakıt Hücresinde Meydana Gelen Temel Reaksiyonlar ve Gibbs Serbest Enerjisi

Yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyonlar, membranın anot ve katot tarafında aynı anda gerçekleşir ve egzotermik bir reaksiyondur.



Reaksiyon entalpisinin bir yakıt hücresinde elektriğe dönüştürülebilen kısmı Gibbs serbest enerjisine karşılık gelir ve aşağıdaki denklemle verilir:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.2)$$

Denklemdeki negatif kısım entropi oluşumundan dolayı geri dönüşü olmayan enerjiyi gösterir.

Teorik olarak elektriksel işin formülü aşağıdaki gibidir:

$$W_{el} = q.E \quad (3.3)$$

Burada, W_{el} = Elektriksel iş (J/mol)

q = Yük (Coulombs/ mol)

E = potansiyel (Volts)

Burada yük yerine Faraday sabiti kullanılarak türetilmiş aşağıdaki denklemi yazabiliriz.

$$W_{el} = n.F.E \quad (3.4)$$

Faraday sabiti = 96,485 coulombs /elektron-mol

n = Her bir moleküldeki elektron sayısı (Bir Hidrojen molekülü için 2 tane)

Daha önce belirtildiği gibi, bir yakıt hücresinde teorik olarak üretilen maksimum elektrik enerjisi miktarı Gibbs serbest enerjisine karşılık gelir.

$$W_{el} = - \Delta G \quad (3.5)$$

Buradan, bir yakıt hücresinin teorik potansiyeli;

$$E = \frac{-\Delta G}{n.F} \quad (3.6)$$

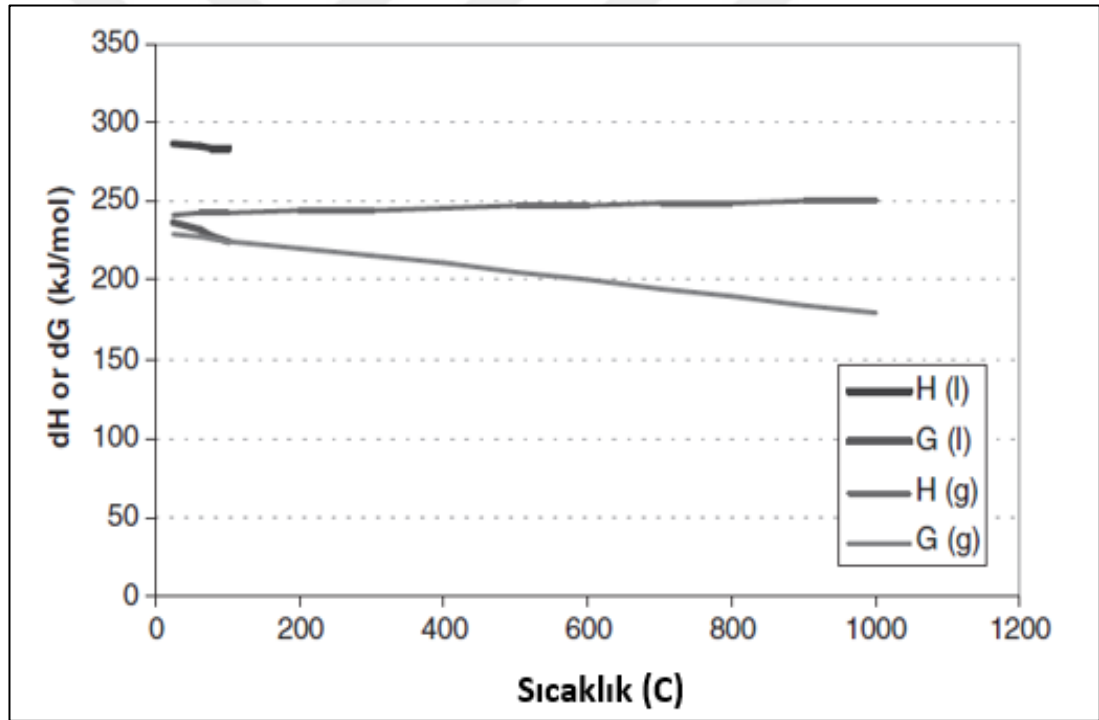
Burada yukarıdaki değerler formülde yerine koyulduğunda, $E = 1.23$ Volts bulunur. Yani 25 °C'de teorik olarak PEM yakıt hücresi potansiyeli 1.23 voltur.

3.2.2. Yakıt Hücresinde Sıcaklık ve Basınç Etkisi

Deneyisel çalışmalardan 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda C_p , ΔH ve ΔS 'deki değişimler çok küçüktür. Tablo 3.1'de bu değişim görülmektedir. Ancak katı oksit yakıt hücreleri gibi daha yüksek sıcaklıklarda dikkatli olunmalıdır. Tablo 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, teorik hücre potansiyeli sıcaklıkla birlikte azalır [1].

Tablo 3.1: Entalpi, Gibbs serbest enerjisi ve Hidrojen/Oksijen yakıt pili reaksiyonunun entropisinin sıcaklıkla değişimi ve ortaya çıkan teorik hücre potansiyeli.

T (K)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	E _{th} (V)
298.15	-286.02	-237.34	-0.16328	1.230
333.15	-284.85	-231.63	-0.15975	1.200
353.15	-284.18	-228.42	-0.15791	1.184
373.15	-283.52	-225.24	-0.15617	1.167



Şekil 3.2: Sıcaklığın bir fonksiyonu ola olarak hidrojen/oksijen yakıt hücresinin entalpi ve Gibbs serbest enerjisi.

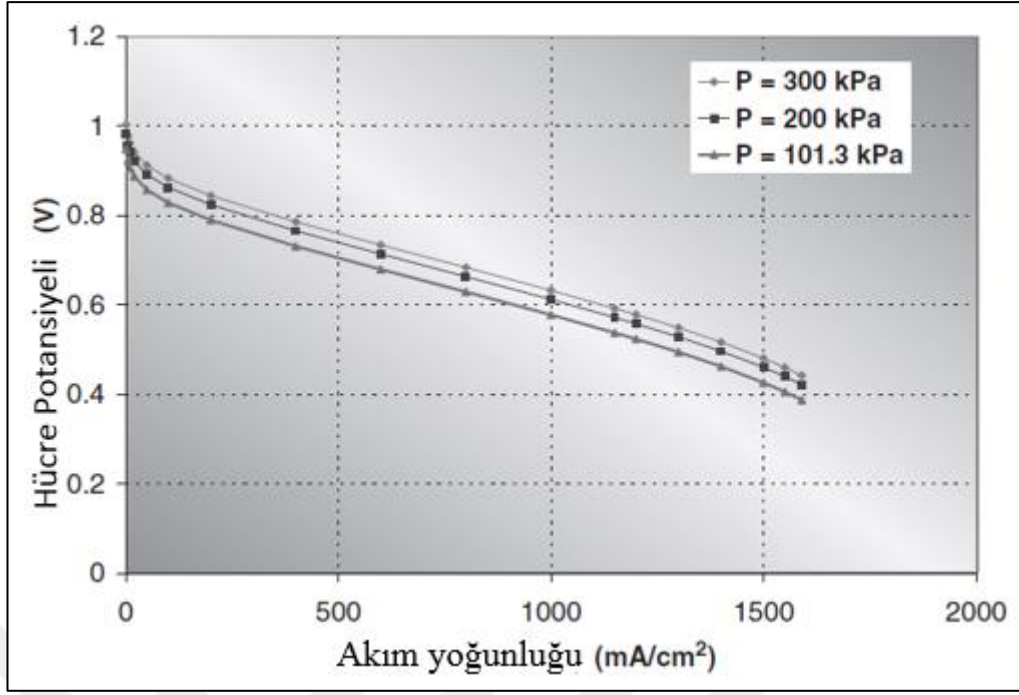
Bununla birlikte, çalışan yakıt hücrelerinde, genel olarak daha yüksek bir hücre sıcaklığı, daha yüksek bir hücre potansiyeli ile sonuçlanır. Bunun nedeni, çalışan yakıt hücrelerindeki voltaj kayıplarının sıcaklıkla azalması ve bunun teorik hücre potansiyelindeki kaybı fazlasıyla telafi etmesidir [1].

Diğer taraftan basıncın artması da $P.V_m = R.T$ ideal gaz denkleminde sabit molar hacimde (V_m) T 'nin artması anlamına geleceği için verim bir miktar artabilir anlamını çıkarabiliriz. Yine yükseltilmiş basınçta beklenen bir hücre potansiyeli kazancı:

$$\Delta V = \frac{RT}{nF} \ln \left[\left(\frac{P_{H_2}}{P_0} \right) \left(\frac{P_{O_2}}{P_0} \right)^{0.5} \right] + \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)^y \quad (3.7)$$

Formülü ile ifade edilebilir [1].

Belirli koşullar için, atmosferik basınçtan 200 kPa'ya kadar bir basınç artışından kaynaklanan beklenen kazanç 34 mV ve atmosferik basınçtan 300 kPa'ya kadarki bir basınç artışından beklenen kazanç 55 mV'dir ($g = 1$ varsayılarak). Bu kazanç, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, yüksek basınçlarda yüksek bir polarizasyon eğrisi ile sonuçlanan herhangi bir akım yoğunluğu için geçerlidir. Ek olarak, yüksek basınç, gaz halindeki türlerin kütle transferini iyileştirerek akım yoğunluğunu sınırlama üzerinde bir etkiye sahip olabilir [1].

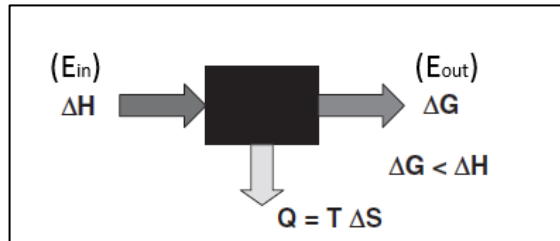


Şekil 3.3: Çalışma basıncının yakıt hücresi polarizasyon eğrisi üzerindeki

3.3. PEM Yakıt Hücresinin Teorik Verimi

Herhangi bir enerji dönüştürme cihazının verimliliği, faydalı enerji çıkışı ile cihaza gelen toplam enerji girişi arasındaki oran olarak tanımlanır.

Bir yakıt hücresi için bu durum, faydalı enerji çıkışı üretilen elektrik enerjisidir ve enerji girişi ise hidrojenin entalpisidir, yani hidrojenin daha yüksek ısıtma değeridir [1]. Tüm Gibbs serbest enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini varsayarsak, bir yakıt hücresinin mümkün olan maksimum (teorik) verimliliği şu şekildedir:



Şekil 3.4: Enerji dönüştürme cihazı olarak bir yakıt hücresi için enerji girdileri ve çıktıları.

$\eta = \Delta G/\Delta H = 237.34/286.02 = \%83$ (Her iki değerde teorik olarak önceki bölümlerde verilmişti.)

Burada ΔH , Hidrojenin entalpi değeri, ΔG ise üretilen elektrik enerjisidir.

3.4. PEM Yakıt Hücresi Kayıpları ve Gerçek Verim

Bir PEMYH’de tüm elektrokimyasal süreçler, Gibbs serbest enerjisinde bir değişikliklerle bir elektrot ve bir kimyasal tür arasında elektron transferini içerir. Elektrokimyasal reaksiyon, elektrot (katalizör ve destek tabakası veya gözenekli elektrot tabakası) ile elektrolit arasındaki arayüzde meydana gelir.

3.4.1. Elektrot Kinetiği

Her bir yükün elektrolit, elektrot ya da çift kutuplu plaka boyunca hareket etmek için aktivasyon enerjisi bariyerini aşması gerekir. Aşılması gereken enerji bariyerinin büyüklüğü, reaktan ve ürün arasındaki Gibbs serbest enerji değişimine eşittir. Elektrokimyasal reaksiyonun hızı, elektronların oluşma veya tüketilme hızına bağlıdır. Bu nedenle akım, elektrokimyasal reaksiyonların hızının doğrudan bir ölçüsüdür. Faraday sabitini de kullanarak akım:

$$i = n \cdot F \cdot \frac{dN}{dt} \quad (3.8)$$

denklemden elde edilebilir [2].

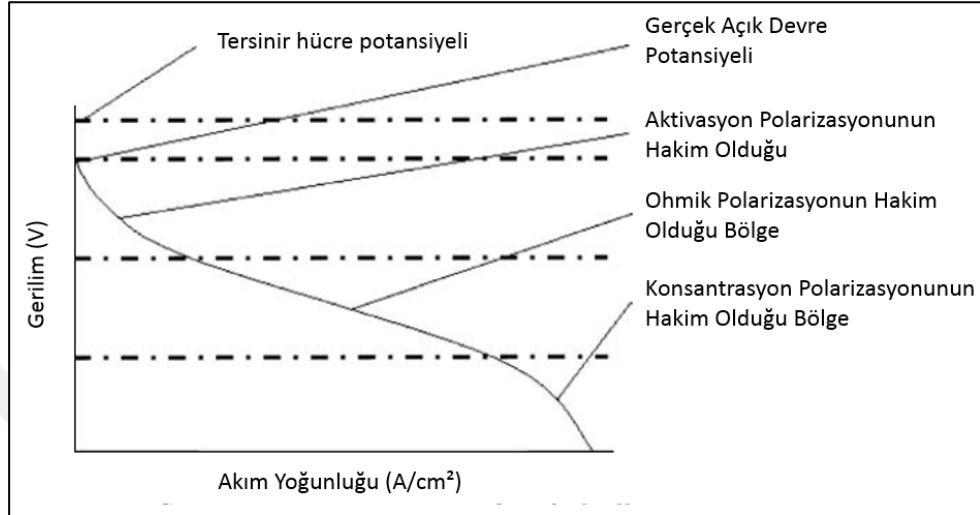
Burada; F Faraday sabiti (96.485 C/mol), dN/dt ise elektrokimyasal reaksiyonun hızı, n ise bir moleküldeki transfer edilen elektron sayısıdır.

3.4.2. Gerilim Kayıpları

Bir yakıt hücresinde görülen tipik voltaj kayıpları Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Tekli yakıt hücresi, sıcaklık, uygulanan yük ve yakıt/oksidan akış hızları gibi çalışma koşullarına bağlı bir voltaj sağlar. Yakıt hücresi sistemleri için standart performans

ölçüsü, çalışma akımı yoğunluğuna karşı hücre voltajı davranışını temsil eden polarizasyon eğrisidir.

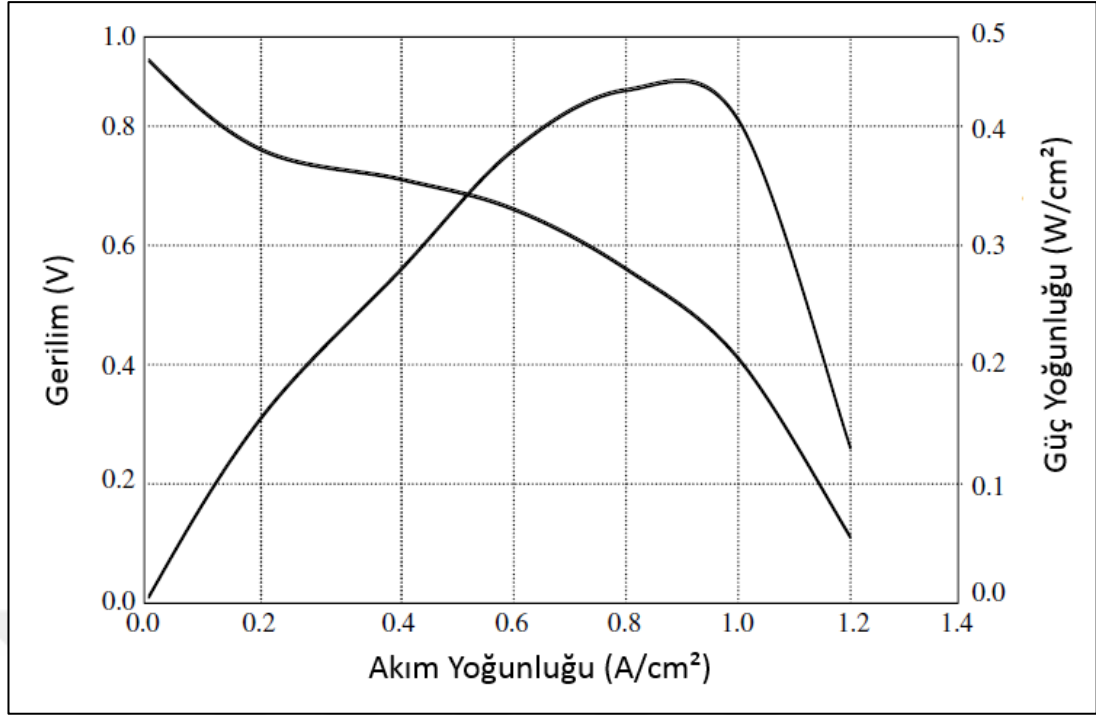
Bir yakıt pilinden elektrik enerjisi ancak akım çekildiğinde elde edilir ve birkaç geri dönüşü olmayan kayıp mekanizması nedeniyle hücre voltajı düşer.



Şekil 3.5: Bir yakıt hücresi için genelleştirilmiş polarizasyon eğrisi.

Bir yakıt hücresinin gerçek açık devre voltajı, bir elektrottan elektrolit ve iç akımlara çapraz geçiş nedeniyle teorik modelden daha düşüktür. Açık devre geriliminde düşüşe neden olan kayıpların üç ana sınıflandırması, aktivasyon polarizasyonu, ohmik polarizasyon ve konsantrasyon polarizasyonudur [2].

$$V(i) = V_{tersinir\ hücre\ potansiyeli} - V_{aktiv.\ pol.} - V_{ohmik\ pol.} - V_{konsant.\ pol.} \quad (3.9)$$



Şekil 3.6: Bir hidrojen PEM yakıt hücresi için tipik polarizasyon eğrisi.

Bu kayıpları, (3.9) denkleminde görüldüğü gibi tersinir hücre potansiyelinden çıkarırsak gerçek hücre potansiyelini elde etmiş oluruz.

Aktivasyon polarizasyonu, katalitik yüzeydeki elektrokimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisinin üstesinden gelmek için gereken voltaj aşırı potansiyelidir. Bu tür polarizasyon, düşük akım yoğunluğundaki kayıplara hâkim olur ve belirli bir sıcaklıkta katalizör etkinliğini ölçer. Gazlı yakıt, katı metal katalizör ve elektrolitin hepsinin temas etmesi gerektiğinden, bu karmaşık bir üç fazlı arayüz problemidir. Katalizör, aktivasyon bariyerinin yüksekliğini azaltır, ancak yavaş oksijen reaksiyonu nedeniyle voltajda bir kayıp kalır. Toplam aktivasyon polarizasyon aşırı potansiyeli 0,1 ila 0,2 V'dir. Bu da maksimum potansiyeli açık devre koşullarında bile 1,0 V'un altına düşürür [2].

3.4.3. İç ve Çapraz Akımlar

Elektrolitin elektriksel olarak iletken olmamasına ve tipik olarak gazlara karşı geçirimsiz olmasına rağmen, bazı hidrojen ve elektronlar elektrolit boyunca yayılır. Elektrolitten yayılan her hidrojen molekülü, dış devreye giden daha az elektron

demektir. Bu kayıplar, yakıt hücresi çalışması sırasında genellikle küçüktür, ancak bazen yakıt hücresi düşük akım yoğunluklarında veya açık devre voltajında çalışırken önemli olabilir. Toplam elektrik akımı, kullanılabilen akım ile kaybedilen akımın toplamı ise:

$$i = i_{\text{kullanılan}} + i_{\text{kaybedilen}} \quad \text{olarak yazılabilir.} \quad (3.10)$$

Hidrojen geçişi ve iç akımların yakıt hücresinde farklı etkileri vardır. Elektrolitten yayılan hidrojen tipik olarak su oluşturacak ve hücre potansiyelini azaltacaktır. Hidrojen geçişi, geçirgenlik, kalınlık ve kısmi basınç gibi elektrolit özelliklerinin bir fonksiyonudur. Çok düşük bir açık devre potansiyeli tipik olarak bir hidrojen sızıntısını veya bir elektrik kısa devresini gösterir [2].

3.4.4. Kinetik Performansı İyileştirme

Kinetik performansı artırmak için kullanılabilecek birkaç yöntem vardır:

- Sıcaklığı artırma,
- Reaktan konsantrasyonunu artırma,
- Aktivasyon engelini azaltma,
- Reaksiyon bölgelerinin sayısını artırma,

Reaksiyon sıcaklığının artırılması, yakıt hücresi performans kinetiğini artıracaktır. Artan bir sıcaklık, sistemdeki moleküllerin titreşmesine ve aktif duruma daha kolay ulaşmasına neden olacak ve bu da reaksiyon hızını artıracaktır. Ancak, yüksek aşırı gerilim seviyelerinde, sıcaklığın artırılması akım yoğunluğunu azaltabilir.

Reaktanların konsantrasyonu, daha saf bir reaktan kullanılarak ve/veya reaktanın basınç/akış hızı artırılarak artırılabilir. Örneğin, çoğu PEM yakıt hücresi katotta saf oksijen yerine hava kullanır. Reaktanlar, kütle transfer sınırlamaları nedeniyle yüksek akım yoğunluklu çalışma altında elektrotlarda hızla azalma eğilimindedir. Bu, katotta geçici bir reaktan eksikliğine neden olur ve bu da daha fazla kinetik kayıplara yol açar.

Yakıt hücresi kinetik performansını iyileştirmenin bir başka yolu, yakıt hücresinin aktivasyon bariyerini azaltmaktır. Bu, oldukça katalitik bir elektrot kullanılarak gerçekleştirilebilir. Kullanılan katalizör tipi, elektrot yüzeyi arasında yeterli bir bağa sahip olmalı ve ne çok güçlü ne de çok zayıf olmalıdır. Çok zayıf olan bir bağ, hidrojen ile yeterli şekilde bağlanmayacaktır ve çok güçlü bir bağ, yüzeye son derece iyi bağlanacaktır ve H^+ iyonları kolayca ayrılmayacaktır.

Reaksiyon bölgelerinin sayısının artırılması, yakıt hücresinin kinetik performansını da iyileştirecektir. Reaksiyonun ilerlemesi için daha büyük bir katalizör yüzey alanı oluşturularak reaksiyon bölgeleri artırılabilir. Bunu başarmanın yaygın bir yöntemi, elektrot yüzeyini pürüzlendirmektir [2].

3.4.5. PEM Yakıt Hücresinde Gerçek Verim

Daha önce bahsedildiği gibi, yakıt kullanım kayıpları ve voltaj kayıpları gibi kayıplardan dolayı bir yakıt hücresinin gerçek verimi her zaman tersinir termodinamik verimden daha az olmalıdır. Gerçek verim aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$\eta_{\text{gerçek}} = \eta_{\text{termal}} + \eta_{\text{gerilim}} + \eta_{\text{yakıt}} \quad (3.11)$$

η_{termal} , tersinir termodinamik verimliliği ifade eder. İdeal koşullar altında bile, yakıtta bulunan entalpinin tamamının yararlı işler yapmak için kullanılamayacağını ifade eder.

η_{gerilim} , yakıt hücresinin gerilim verimliliğini ifade eder. Bir yakıt hücresindeki tersinmez kinetik etkilerden kaynaklanan kayıpları içerir. Bu kayıplar, yakıt hücresinin operasyonel i - V eğrisine bakılarak tespit edilebilir. Bir yakıt hücresinin voltaj verimliliği, yakıt hücresinin gerçek çalışma voltajının (V) yakıt hücresinin termodinamik olarak tersinir voltajına (E) oranıdır.

$$\eta_{\text{gerilim}} = \frac{V}{E} \quad (3.12)$$

Bir yakıt hücresinin çalışma voltajının, i - V eğrisi tarafından verildiği gibi, yakıt hücresinden çekilen akıma (i) bağlı olduğuna dikkat edin. Bu nedenle gerilim hücreden

çekilen akıma bağlı olarak değişecektir. Akım yükü ne kadar yüksek olursa, voltaj verimliliği o kadar düşük olur. Bu nedenle, yakıt hücreleri düşük akımda daha verimlidir. Bu durum, genellikle maksimum yükte en verimli olan içten yanmalı motorların tam tersidir [3].

Yakıt kullanım verimliliği, $\eta_{yakıt}$, bir yakıt hücresine sağlanan yakıtın tamamının elektrokimyasal reaksiyona giremeyeceğini açıklar. Burada, yakıtın bir kısmı, elektrik gücü üretmeyen yan reaksiyonlara girebilir. Yine, yakıtın bir kısmı, hiç reaksiyona girmeden yakıt hücresinden basitçe akacaktır. Yakıt kullanım verimliliği, elektrik akımı üretmek için kullanılan yakıtın, yakıt hücresine sağlanan toplam yakıtı oranıdır.

$$\eta_{gerilim} = \frac{i/n.F}{V_{yakıt}} \quad (3.13)$$

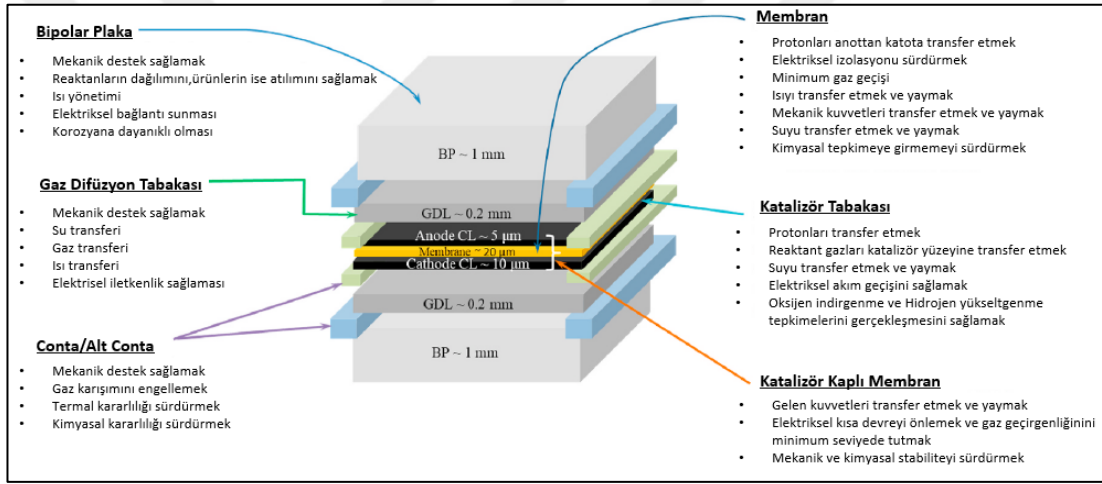
Bir yakıt hücresine gereğinden fazla yakıt verilirse, yakıt boşa harcanmış olacaktır. Yakıt hücreleri tipik olarak ya sabit akış hızı koşulunda ya da sabit stokiyometri koşulunda çalıştırılır. Sabit akış hızı koşulunda, belirli bir akım yoğunluğunda gerçekte ne kadar ihtiyaç duyduğuna bakılmaksızın hücreye sabit miktarda yakıt sağlanır. Tipik olarak, hücrenin maksimum akım yoğunluğunda aç kalmamasını sağlamak için yeterli yakıt sağlanması gerekir. Ancak bu, yakıt hücresi daha düşük akım yoğunluklarında çalışırken önemli miktarda yakıtın boşa harcanacağı anlamına gelir. Bu yüzden, yakıt hücrelerinde daha sık olarak, yakıt beslemesi akıma göre ayarlanır, böylece yakıt hücresine her zaman herhangi bir yükte ihtiyaç duyduğundan biraz daha fazla yakıt sağlanır. Bu şekilde yakıt hücreleri sabit stokiyometride çalıştırılır [3].

3.5. PEM Yakıt Hücresi Bileşenleri

Bir yakıt hücresinin en temel ögesi, proton iletken bir zar olan bir polimerdir denilebilir. Membranın her iki yanında gözenekli birer elektrot bulunur. Elektrotlar gözenekli olmalıdır, çünkü reaktan gazlar arkadan beslenir ve elektrotlar ile membran arasındaki ara yüze ulaşmalıdır; burada elektrokimyasal reaksiyonlar, katalizör yüzeyinde gerçekleşir. Katalizör tabakası imalat sürecine bağlı olarak gözenekli elektrodun bir parçası veya zarın bir parçası olabilir. İki elektrot arasına sıkıştırılmış

membranın çok katmanlı düzeneğine genellikle membran elektrot düzeneği veya MEA denir. MEA daha sonra, elektrik akımını toplayıp ilettikleri için akım toplayıcı/ayırıcı plakalar ve çok hücreli konfigürasyonda bitişik hücrelerdeki gazları ayırdıkları için ayırıcı arasına sıkıştırılır. Ayırıcı plakalar ise çok hücreli konfigürasyonda, fiziksel/elektriksel olarak bir hücrenin katodunu komşu hücrenin anoduna bağlarlar ve bu nedenle bipolar plakalar olarak da adlandırılırlar. Reaktan gazların akışı için üzerinde kanallar vardır ve ayrıca hücrenin yapısal sağlamlığını da sağlarlar. Her bir hücre elemanından beklenen; daha ucuz, daha kaliteli ve daha uzun ömürlü olmasıdır [1,9].

Bir PEM yakıt hücresi bileşenleri kalınlıkları ve bu bileşenlerden beklenen özellikleri şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Bir PEM yakıt hücresi elemanları ve görevleri.

3.5.1. Proton Elektrolit Membran

Membran bir PEMYH'nin en kritik bileşenidir ve PEMYH'nin merkezinde yer alır. Bir membran, nispeten yüksek proton iletkenliğini sağlarken, yakıt ve reaktan gazların karışımına karşı yeterli bir bariyer sunmalı ve bu gazları mümkün mertebe az geçirmeli ve yine yakıt hücresi ortamında kimyasal ve mekanik olarak kararlı olmalıdır [1]. Membran bazı temel özelliklere sahip olmalıdır. Bunlar:

- Yüksek iyonik iletkenlik özelliğine sahip olması

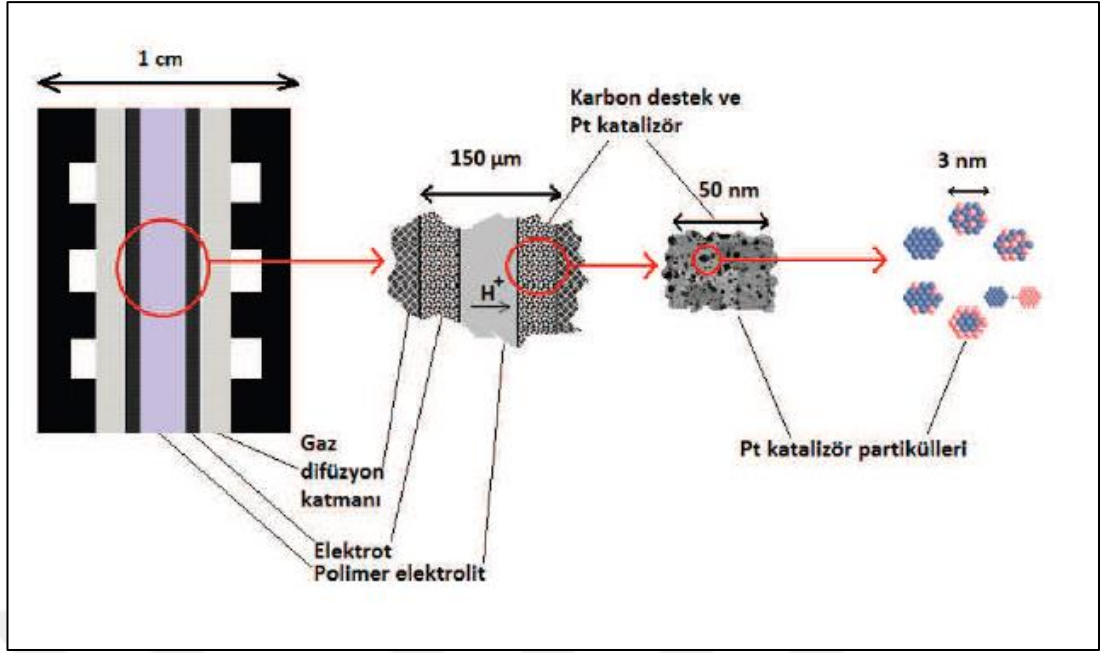
- Hidrojen ve oksijen gazlarının düşük geçişi
- HO• ve HOO• radikalleri ile ortamda iyi kimyasal kararlılık göstermesi
- Tüm alışma sıcaklıkları boyunca yüksek termal kararlılık göstermesi
- Mekanik olarak dayanıklı olmasıdır.

Günümüzde membranların çoğu perflorosülfonik asitten (PFSA) yapılan membranlardır [9].

3.5.2. Katalizör Tabakası

Elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yerdir. Elektrot olarak da isimlendirilir. Membranın her iki tarafında yer alır. Ayrıca tepken gazların reaksiyon bölgelerine gitmesine izin vermek için gözenekli yapıda olmalıdır. Aynı zamanda, ürün olarak oluşan suyu etkili bir şekilde uzaklaştırabilme özelliğine sahip olmalıdır; aksi takdirde elektrot taşar ve oksijen erişimini engeller [1,9].

Katot reaksiyonu anot reaksiyonuna göre daha zor gerçekleşen bir reaksiyondur. Bunun için katot tarafında daha etkili katalizör ya da daha kalın tabakalı katalizör kullanılmalıdır [10]. Reaksiyonların gerçekleştiği yani gaz, elektron ve iyon transferinin sağlandığı elektrot içerisinde bu üçünden herhangi biri transfer edilememesi durumunda o bölgede reaksiyon gerçekleşmez ve bu durumda elektrodun ortalama geriliminin düşmesine neden olmaktadır [11].



Şekil 3.8: Bir katalizörün iç yapısı.

3.5.3. Gaz Difüzyon Tabası

Katalizör tabakası ile bipolar plakalar arasında konumlanmıştır. Elektrokimyasal reaksiyonlara doğrudan katılmamasına rağmen PEMYH'lerin düzgün ve verimli çalışması için gereklidir [1]. Fonksiyonlarından bazıları aşağıda listelenmiştir. Bunlar:

- Akış alanı kanallarından reaktan gazlar için bir yol sağlar.
- Reaksiyon sonucu oluşan suyun katalizör tabakasından akış alanı kanallarına geçişini sağlar.
- Katalizör tabakaları bipolar plakaya bağlayarak elektronların elektrik devresini tamamlamasını sağlar.
- Aynı zamanda, katalizör tabakasındaki elektrokimyasal reaksiyonlarda üretilen ısıyı, bipolar plakalara iletmeye yarar.
- MEA'ya mekanik destek sağlayarak akış alanı kanallarına sarkmasını engeller.

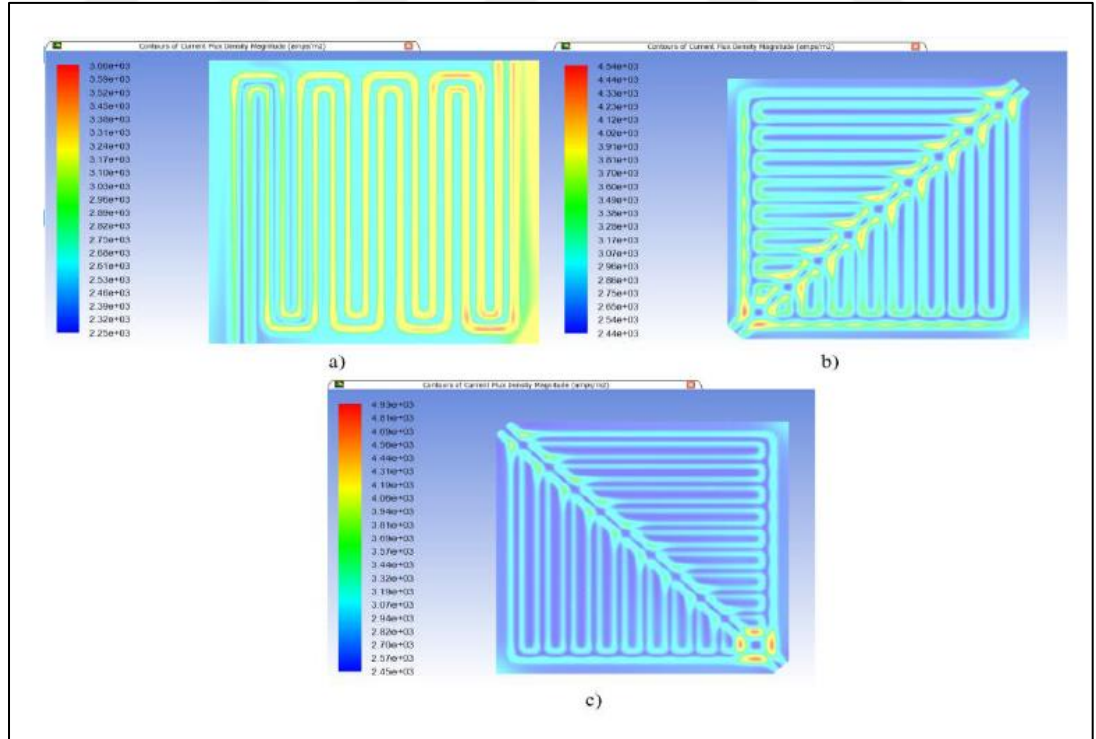
Bu fonksiyonları yerine getirebilmesi için GDT'ler gözenekli ve iletken malzemelerden yapılır. En yaygın kullanılan GDT malzemeleri karbon kumaş veya karbon kağıttır [11].

3.5.4. Bipolar Plakalar

Bir yakıt hücresi yığnında, BP'ler, karmaşıklık ve maliyet açısından MEA'nın ikinci kritik bileşeni olarak kabul edilir. Yığın performansını, dayanıklılığını, ağırlığını, hacmini ve maliyetini önemli ölçüde etkileyebilirler. Yığın ağırlığının neredeyse %80'ni ve maliyetinin %45'i BP'ler tarafından belirlenir. BP yakıt hücresi için mekanik destek, ısı yönetimi gibi çeşitli fonksiyonları vardır [9].

Bipolar plakalar reaktanların aktif alan üzerinde dağılmasını, üretilen suyun tahliyesini ve hücreler birden fazla ise hücreler arası elektriksel bağlantıyı sağlar. Bipolar plakalar iyi bir korozyona sahip olması gerekir. Ayrıca yakıt hücrelerinde malzeme seçilirken, maliyet, dayanıklılık, verim ve seri üretim gibi parametreler arasında bir optimizasyon yapmak gerekir [1,11]. Grafit ve kaplamalı metalik plakalar günümüzde en yaygın kullanılan malzeme tipleridir.

Bipolar plakalar üzerinde çeşitli tip gaz akış kanalları işlenir. Bu akış kanalları da PEMYH'nin verimini etkiler. Aşağıda bazı kanal tipleri ve 0.75 V hücre voltajındaki akım yoğunlukları verilmiştir [12].



Şekil 3.9: 0,75 V hücre voltajında katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları:

- a) Serpantin tasarım,
- b) Yaprak tasarım,
- c) Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

3.5.5. Contalar

Gaz sızıntıları, kullanılmayan reaktant gazlara, kaçaklara bu da zayıf yakıt hücresi performansına yol açar. Bir yakıt hücresi temel olarak mükemmel sızdırmazlık, çalışma sıcaklığında kararlılık, düşük maliyetli olması gibi özelliklere sahip olmalıdır.

Kullanılan başlıca conta malzemeleri silikon ve teflondur. Bir conta temel olarak aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [1,2,3,11]. Bunlar:

- Sızıntıları engellemek
- Titreşim ve şokları absorbe etmesi
- Uzun süre kullanmada dahi kimyasal olarak dayanıklı ve inert olmalı
- Asitlere karşı mukavim olması
- Sıkıştırılmaya karşı dirençli olması
- Hidrojen ve oksijenle kimyasal olarak etkileşime girmemesi
- Çalışma sıcaklığına dayanmak, erime ve kopmalara karşı dayanıklı olmalı
- Katalizörleri zehirleyebilecek malzemeleri yapısında bulundurmamalıdır.

Conta seçiminde dikkat edilecek hususlardan biri de conta kalınlığı ile MEA birbirine uyumlu olmalıdır. Yani aynı kalınlıklara sahip olmalı böylece montaj esnasında birbirine rahatlıkla montaj yapılır ve sızdırmazlığın önüne geçilmiş olur.

3.5.6. Akım Toplayıcı Plakalar

Bir PEMYH'deki akım toplayıcı plakaların görevi adından da anlaşılacağı üzere hücrede oluşan akımı toplayıp iletmektir. Sonlandırıcı plakalar ile bipolar plaka arasına yerleştirilir. Ayrıca sonlandırıcı plakalar ile akım toplayıcı plakanın arasına

elektriksel izolasyonu sağlamak için yalıtkan ince bir malzeme konulmalıdır. Burada da silikon conta tarzı bir eleman konulabilir.

Akım toplayıcı plakalar bakır, titanyum, alüminyum gibi iletken birçok metalden ve grafiol gibi iletkenliği yüksek metal dışı malzemelerden imal edilebilir. Metallerin üzerine altın kaplamalı olan plaka uygulamaları da mevcuttur [11].

3.5.7. Sonlandırıcı Plakalar

Sonlandırıcı plakalar, bazen uç plakalar olarakta literatürde yer almaktadır. Yakıt hücresi yığınının destekleyecek kadar mekanik olarak sağlam olmalı ve sıkıştırma kuvvetlerini, yakıt pili yığınının her bir yakıt hücresinin tüm ana yüzeylerine homojen bir şekilde dağıtabilmelidir [2].

Sonlandırıcı plakaların sahip olması gerek bazı özellikler şunlardır:

- Yüksek basınç dayanımı
- Titreşim ve şok direnci iyi olması
- Gerekli sıcaklık aralığında formunu koruması
- Düşük maliyetli olması
- Mekanik olarak rijit ve sağlam olması

olarak sayılabilir.

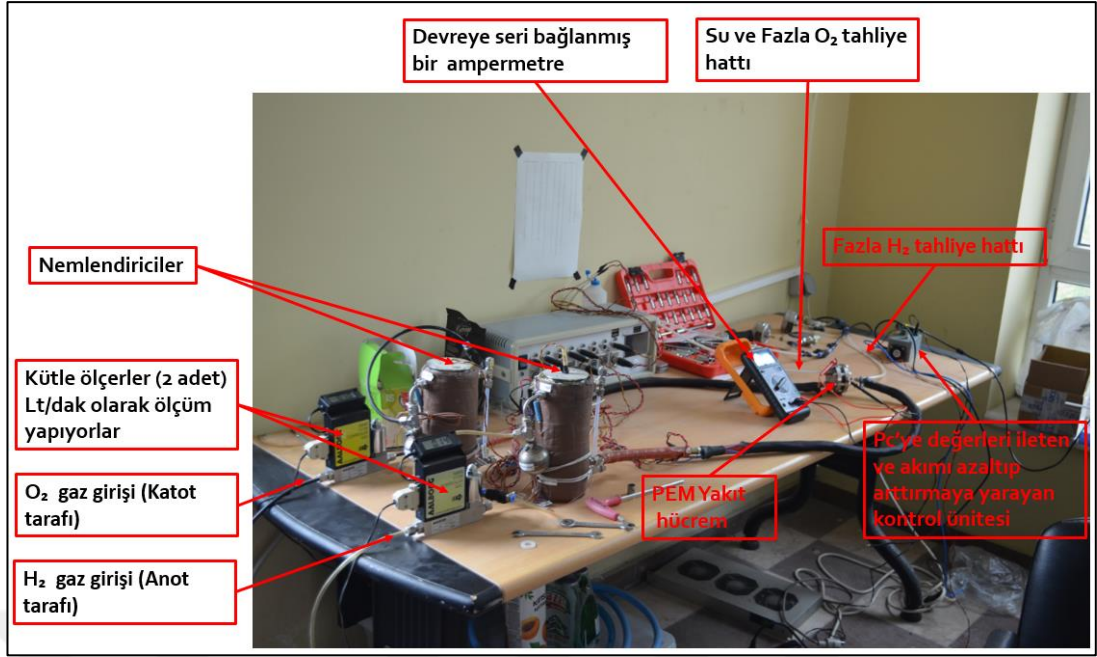
4. PEM YAKIT PİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALARI

Bir yakıt hücresinin performansı, çevresel ve işletme şartlarına, komponentlerinin özellikleri ve yapıları gibi değişik parametrelerine bağlıdır. İşletme şartları dendiğinde başta genel olarak yakıt pili çalışma sıcaklığı ve basıncı, reaktanların stokiyometrisi ve bağıl nem oranları, sıkma torku gibi etkenler başta gelmektedir. Bu parametreleri etkileri genelde tek hücre üzerinde testler yapılarak görmek daha kolaydır.

Deneysel düzenek gerekli standartlar ve literatürden edinilen bilgilere göre yapılmıştır. Ölçümler titizlikle oluşturulmuş ve IVRead programı aracılığıyla PC'ye kayıt edilmiştir. Ayrıca, sistem çalıştırılmadan önce açık devre voltajında 5 dakika kadar çalıştırılıp sonra deney parametrelerine göre deneyler yapılmıştır.

4.1. Deneysel Düzenek

Hidrojen ve oksijen tüplerinden gelen hortumlar kütle ölçerlere girmektedir. Buradan bu kütle akış kontrol ediciler sayesinde istenilen stokiyometrik oran ayarlanabilmektedir. Buradan çıkan hortumlar nemlendiricilere girmekte ve daha sonra da PEM yakıt hücresine bağlanmaktadır. Nemlendiriciler yapılan deneylerde kullanılmamıştır. Burada reaksiyon gerçekleşikten sonra oluşan akım ve gerilim değerleri IVRead programı vasıtasıyla pc'ye kayıt edilmiştir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan su ve fazla H_2 ve O_2 tahliye hatları vasıtasıyla sistemden uzaklaştırılmaktadır. Burada IVRead programında okunan değerleri, gerilim-akım ölçer ile kontrol edildiğinde IVRead programında okunan akım değeri ile ölçülen akım değeri arasında farklılık olduğunu tespit edilmiştir. Bu yüzdem akım değerlerini akım ölçeri devreye seri bağlanarak bu akım ölçer cihazından okunmuştur. Kontrol ünitesi, akım artırma ve azaltma işlemi yapılarak değerleri IVRead programına aktarmaya yarayan bir ünite dir. Yakıt hücresinin akım değeri üst limiti 1 amper olarak sınırlıdır. Daha yüksek değerlerde deneyler yapmaya olanak vermemiştir. Halihazırdaki PEM yakıt hücresi ufak olduğu için 1 amper değerinden fazla yüksek değerlere çıkması da beklenmemektedir. Deney düzeneği şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: PEM Yakıt hücresi deneysel düzeneği.

Ayrıca tork değerlerini ayarlamaya yarayan torkmetre ve H₂ ve O₂ basınçlarını ayarlamaya yarayan basınç regülatörleri şekil 4.2’de gösterilmiştir.



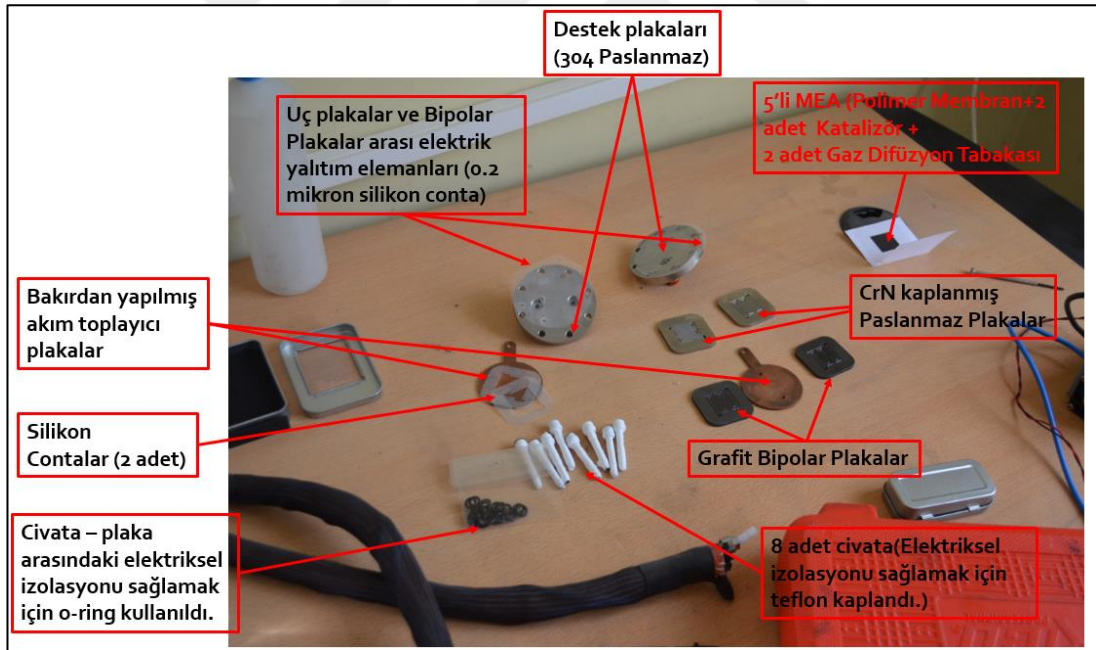
Şekil 4.2: Torkmetre ve basınç regülatörü.

Deney setinde 5cm² aktif alana ve çift serpantin akış kanalına ve Nafion NR212 Membrana sahip tek hücreli bir PEM yakıt hücresi ile deneyler yapılmıştır. Serpantin

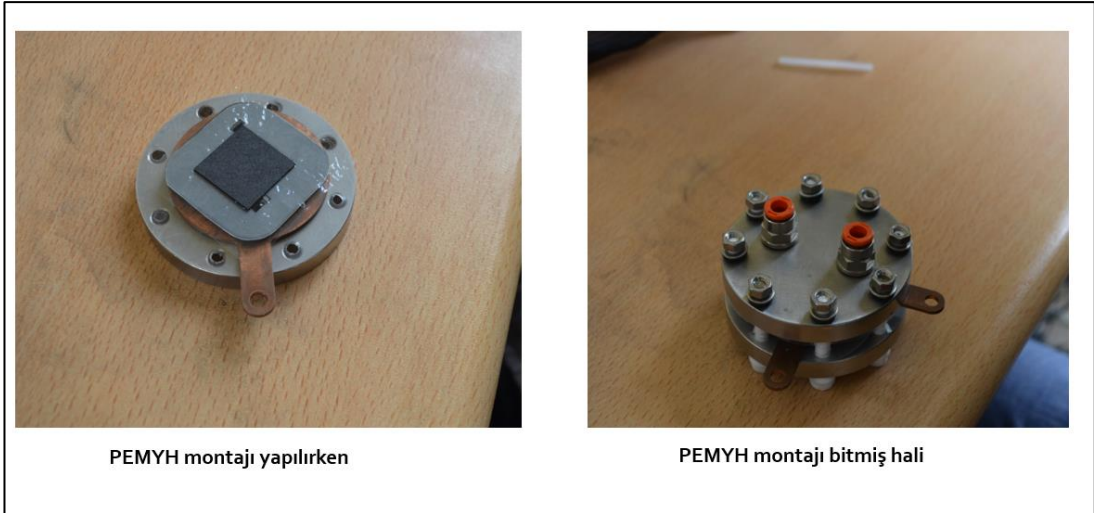
akış kanalları 1,2mm genişliğinde ve 0.75mm derinliğindedir. Ayrıca malzemeleri; hem grafit hem de korozyon direncini arttırmak için PVD yöntemiyle CrN kaplanmış SS 304 kalite paslanmaz bipolar plakalar kullanılarak, değişik tork, basınç ve stokiyometrik oranlarda, kuru hava kullanılarak deneyler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin literatürdeki verilerle tutarlı olduğu gözlenmiştir. Yakıt hücremde membran, katalizör tabakaları ve gaz difüzyon tabakalarından oluşan 5'li diye tabir edilen MEA kullanılmıştır.

İşletme şartları dendiğinde başta genel olarak yakıt pili çalışma sıcaklığı ve basıncı, reaktanların stokiyometrisi ve bağıl nem oranları, sıkma torku gibi etkenler başta gelmektedir.

Ayrıca, bu parametrelerin etkileri genelde tek hücre üzerinde testler yapılarak görmek daha kolay olduğundan tek hücreli bir sistem tercih edilmiştir. Şekil 4.3'te PEM yakıt hücresinin demonte halini göstermektedir.



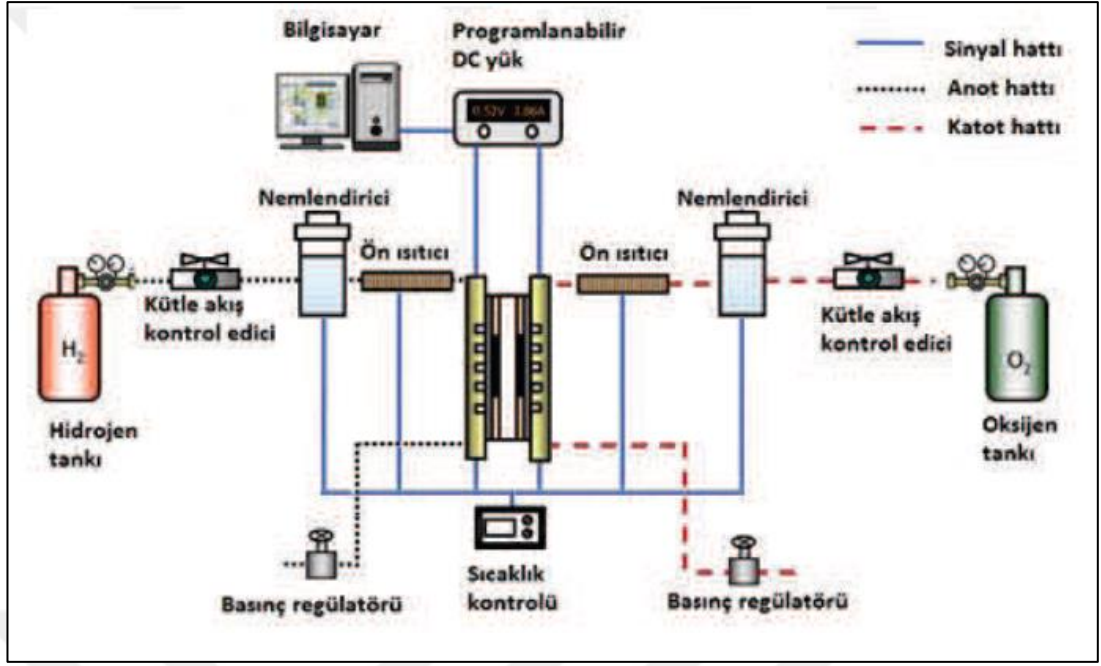
Şekil 4.3: PEM yakıt hücresi elemanları de-monte hali



Şekil 4.4: PEM yakıt hücresinin yarı montaj ve tam montajlanmış hali.



Şekil 4.5: PEM yakıt hücresi deney düzeneği genel görünüm.



Şekil 4.6: PEM yakıt hücresi deney düzeneğinin şematik gösterimi.



Şekil 4.7: IVRead programı ekran görüntüsü.

4.2. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçları

4.2.1. Farklı stokiyometri değerlerinin incelenmesi

Stokiyometri; yakıt hücrelerinde, birim zamanda hücrede tepkimeye giren H₂ ve O₂ miktarlarının birim miktarlarını gösterir. Bu oran, yakıt hücresinin verimliliği, performansı ve ömrü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Stokiyometri, bu gazların ne kadarının yakıt hücresine sağlandığını belirler. İdeal bir stokiyometri oranında, hidrojen ve oksijen gazları tam olarak reaksiyona girecek şekilde verilir.

Stokiyometri oranı genellikle lambda (λ) sembolüyle ifade edilir. Lambda değeri, yakıt hücresine sağlanan yakıt gazının gerçek miktarını ideal bir miktar olan 1'e göre ifade eder. Lambda değeri, yakıt hücresinin çalışma koşullarına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, lambda değeri 2, yakıt hücresine ideal miktardan iki kat daha fazla hidrojen verildiğini gösterirken, lambda değeri 0,5 yakıt hücresine ideal miktarın yarısı kadar hidrojen verildiğini gösterir.

Stokiyometri oranının doğru ayarlanması, yakıt hücresinin verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Yüksek stokiyometri değerleri, yakıt hücresinin daha fazla hidrojen tüketmesine ve daha fazla güç üretmesine neden olabilir, ancak yan ürün olarak daha fazla su üretebilir ve sistemde nem sorunlarına yol açabilir. Düşük stokiyometri değerleri ise daha az güç üretirken daha az su üretme eğilimindedir.

Sonuç olarak, PEM yakıt hücrelerinde stokiyometri, hidrojen ve oksijen gazlarının doğru oranının ayarlanmasıyla ilgili bir kavramdır. Bu oran, yakıt hücresinin verimliliği ve performansı için önemlidir ve optimal çalışma koşullarını sağlamak için dikkatlice ayarlanmalıdır [18,20,21].

Bir PEMYH'de, belirlenen bir akım değeri için gerekli hidrojen ve oksijen miktarları Faraday yasası ile bulunur.

$i \times t \times A = n \times z \times F$ formülünden elde edilir.

i : Akım yoğunluğu (Amper/cm²)

t : zaman (saniye)

A : Elektrot yüzey alanını

n : mol sayısı

$\dot{n}$: mol/saniye

z : Reaksiyondaki elektrot sayısıdır. Bir H_2-O_2 yakıt hücresi için z değeri 2'ye eşittir.

I : Akım (Amper). Yakıt hücresi üst sınırı 1 Amperdir.

F : Faraday sabitini ifade etmektedir. Faraday sabiti ~ 96500 s x A / mol olarak alınabilir. Yukarıdaki denklemde $I = i \times A$ yerine konulursa, Denklem $I \times t = n \times 2 \times 96500$ olarak elde edilir. Burada, $I = 1$ dir. Denklemde yerine konulursa denklem,

$$1 \times t = n \times 2 \times 96500 \text{ olur.}$$

Denklemde gerekli düzenlemeler yapıldığında;

$\dot{n} = 1 / (2 \times 96500) = 5.181 \times 10^{-6}$ mol / saniye olarak elde edilir. Bu değeri akış ölçerlerin birimi olan lt/dakikaya çevirildiğinde 0.0076 lt/dakika elde edilir. Hidrojen ve oksijen arasında 2'ye 1 tepkime oranı olduğu için hidrojen için; $0.0076 \times 2 = 0.015$ elde edilir. Bu değer stokiyometri oranı 1 olarak baz olarak alınır.

Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta gereğinden fazla reaktan gaz verilmesi durumunda tahliye kanallarından yakıtın dışarı atılmasına neden olur. Buda boşa giden yakıt anlamına gelir. Özellikle taşıtlarda hidrojen basınçlı tanklarda depolandığından, oksijen ise havadan alındığından dolayı hidrojenin atılması anlamına gelir. Yakıt hücresi performansının aşırı hava akış hızıyla artmasının en az iki nedeni vardır [1].

Bunlar;

- Daha yüksek akış hızı, reaksiyon sonucu oluşan suyun hücreden uzaklaştırılmasına yardımcı olması,
- Daha yüksek akış hızı, oksijen konsantrasyonunu yüksek tutar. Buda reaksiyon hızını yükseltmesi olarak sıralanabilir [1,2,14].

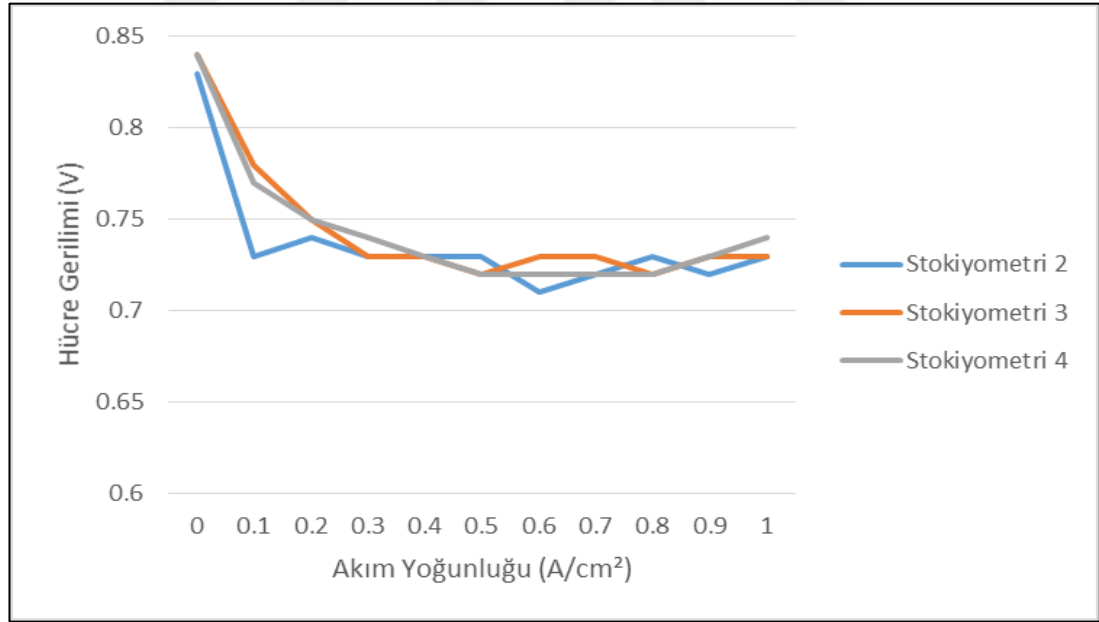
Ancak ilk aşamada optimizasyon iyi bir şekilde yapılmazsa hücreden atılan su miktarı artar ve membranın nemli kalması için gerekli olan su sağlanamazsa membran kurur ve kullanılmaz hale gelir. Bu durumu engellemek için ve verimi arttırmak için stokiyometride optimizasyon yapılmalıdır [1,15,18].

Değerler grafit bipolar plaka ile yapılan deneylerden alınan verilere göre oluşturulmuştur. Ayrıca, test değerleri başta stokiyomeri 1 olarak başlandı ama sonra makalelerde bu değer 1'den büyük ve 4'ten küçük stokiyometrik değerler daha

verimli olduğu vurgulandığından ötürü deneylere 2,3, 4 ve 5 oranlarında devam edilmiştir [1,2,3,4,11,17,19]. Daha sonra 5 değeri ile 4 arasında fark olmadığı tespit edilip 2,3 ve 4 değerleri ile deneylere devam edilmiştir. Aşağıda tablo 4.1 şartlarında elde edilen veriler şekil 4.8’de gösterilmiştir. Deneylerde stokiyometrinin artmasıyla hücre performansının biraz arttığı görülmektedir. Literatürde de benzer sonuçlara rastlanmıştır ve bu beklenen bir durumdur [19].

Tablo 4.1: Stokiyometri oranı için operasyon koşulları.

Operasyon Sıcaklığı (°C)	20
Operasyon Basıncı (Bar)	1,5
Anot Stokiyometrisi	2-3-4
Katot Stokiyometrisi	2-3-4
Sıkma Torku (Nm)	2



Şekil 4.8: Stokiyometri değerinin hücre performansına etkisi.

Yapılan deneylerde stokiyometre 2 ve 3 değerlerinde 1 değerine nazaran daha iyi akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir. 4 ve 5 değerlerinde genel olarak pek bir değişme gözlemlenmemiştir. Genel olarak 2,3 ve 4 değerlerinde birbirine yakın değerler elde edildi.

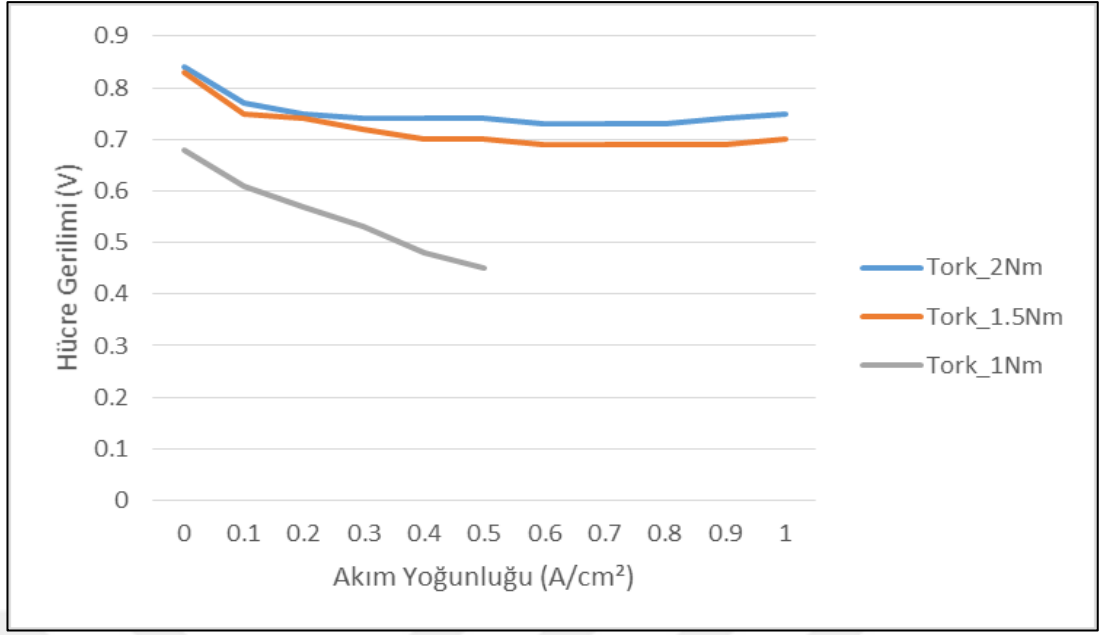
Düşük akım yoğunluklarında stokiyometrik oranı arttırmak hücre performansını çok etkilemezken, yüksek akım yoğunluklarında ise performansı artırır. Bunun sebebi yüksek akım yoğunluklarında oluşan fazla suyu hücreden atılarak oksijenin katalizöre olan difüzyonunu kolaylaştırmaktır. Yine stokiyometrik oranın yüksek olması, oksijen konsantrasyonunun yüksek olması nedeniyle bölgesel akım yoğunluklarının eşit olarak dağılmasını sağlar ve aynı zamanda hücrede lokal sıcaklık farklarının oluşmasını engeller [22].

4.2.2. Farklı sıkma torku değerlerinin incelenmesi

Hücre sıkıştırma değeri hücre performansına etki eden önemli parametrelerden bir tanesidir. Tablo 4.2’de operasyon şartları ve şekil 4.9’da ise sıkıştırma değerinin hücre performansına etkisini göstermektedir. Değerler grafit bipolar plaka ile yapılan deneylerden alınan verilere göre oluşturulmuştur. Sıkıştırma işlemi torkmetre ile makine elemanlarındaki civata sıkma prensibine göre yapılmıştır. MEA’ya zarar vermemek adına 2Nm’den daha yukarı çıkılmamıştır. Farklı stokiyometri (1-2-3-4) ve operasyon basıncı (0-1-1.5-2 bar) parametrelerinde de deneyler yapılmış. Aşağıdaki grafikteki sonuçlar elde edilmiştir. Ancak CrN kaplı metal plakada 3Nm tork değerine çıkılmış, ancak sistem çalışmadığından ötürü burada çalışmalar sonlandırılmıştır. Ayrıca, CrN kaplı metal plakada 2Nm’de, gösterge basıncı 0 barda, 3 stokiyometrik oranda 0.1 amper aralıklarla 0.3 amper kadar değerler alınmış, 0.3 amperde ise hızlı bir şekilde gerilimin 0’a doğru gittiği gözlemlenmiştir. Diğer 2Nm’ye kadar olan tüm basınç ve stokiyometrik oranlarda 0.1 amperde gerilimin sabit kalmayıp hızlıca 0’a gittiği gözlemlenmiştir. Bu durumun korozyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4.2: Farklı hücre sıkma tork değerleri için operasyon koşulları.

Operasyon Sıcaklığı (°C)	20
Operasyon Basıncı (Bar)	2
Anot Stokiyometrisi	2
Katot Stokiyometrisi	2
Sıkma Torku (Nm)	1-1.5-2



Şekil 4.9: Tork değerinin hücre performansına etkisi.

Şekil 4.9'dan görüleceği üzere tork değerinin artması ile hücre performansının arttığı görülmektedir. Ancak daha da arttırmaya devam edilseydi belli bir noktadan sonra performansın azaldığı görülecekti. Bu aşağıdaki sebepler başta olmak üzere beklenen bir durumdur [11,19,24,25,27].

Hücre performansını en iyi duruma getirmek hücre sıkma tork değerini optimize etmek gerekir. Sıkıştırma değerinin iki önemli katkısı vardır. İlki, reaktanların katmanlar arasından sızmasını önlemektir. İkincisi ise bu katmanlar arasındaki temas direncini en aza indirgeyerek elektriksel iletkenliği arttırmaktır. Ancak hücrenin aşırı sıkıştırılması durumunda ise GDT gözenekleri yok olacak ve GDT ana işlevini kaybedecektir [1,9,11]. Bundan dolayı sıkıştırma kuvvetini optimize etmek gerekir. Çünkü düşük sıkıştırma kuvvetlerine sahip hücreler, artan ohmik kayıplara maruz kalabilirken, yakıt sızıntısı, içten yanma ve kabul edilemez temas direnci ve sızdırmazlık sorunları olacaktır. Aşırı sıkıştırma kuvvetlerine sahip hücreler, artan basınç veya konsantrasyon kayıplarına maruz kalabilir yani yakıt hücresi katmanlarına zarar vererek gözenekli yapının bozulmasına ve gaz difüzyon geçidinin tıkanmasına neden olabilir [2,3,16]. Ayrıca her bir civata eşit miktarda sıkılmalıdır. Sıkma torkunu belirlemede çeşitli pratik olmayan ve bazı değerleri ölçülemeyen formüller varsa ise de deneysel olarak parametreleri belirlenen formülleri kullanmak daha pratik ve

yerinde olacaktır [23]. Deneylerde makine elemanları usullerine uygun sıkma yöntemi ile testler gerçekleştirilmiştir.

4.2.3. Farklı operasyon basıncı değerlerinin incelenmesi

Operasyon basıncı yakıt hücresi performansına etki eden önemli parametrelerden biridir. Operasyon basıncı elektrokimyasal reaksiyon hızını etkilediğinden direk yakıt hücresi verimini de etkiler. Genel olarak daha yüksek bir çalışma basıncı daha hızlı gaz difüzyonu ve reaksiyon hızı anlamına gelir. Aşırı yüksek basınçlar membranda aşırı su taşınımına ve membranın suyla dolgun hale gelerek hücre performansını etkilemesine neden olur. Bu durum hücre performansını olumsuz etkileyen, istenmeyen bir durumdur. Yine, yüksek basınçta yakıt hücresi çalıştırmak performansı olumu etkiler ama pompa kayıplarının artmasına neden olur ve aynı zamanda kullanılan ekipmanların özellik ve maliyetlerinin artmasına neden olur. Bu durumda yakıt hücresi performansını optimize etmek gerekir [1,2,3,11,30].

Burada gösterge basıncı 0 bar iken ölçüm yapılmaya başlanmış ve basınç 2 bara kadar artırılarak deneyler yapılmıştır. Gösterge basıncı atmosferik veya barometrik basıncın üzerinde ölçülen basınçtır; ölçülen basınç ile var olan atmosferik basınç arasındaki pozitif farkı belirtir.

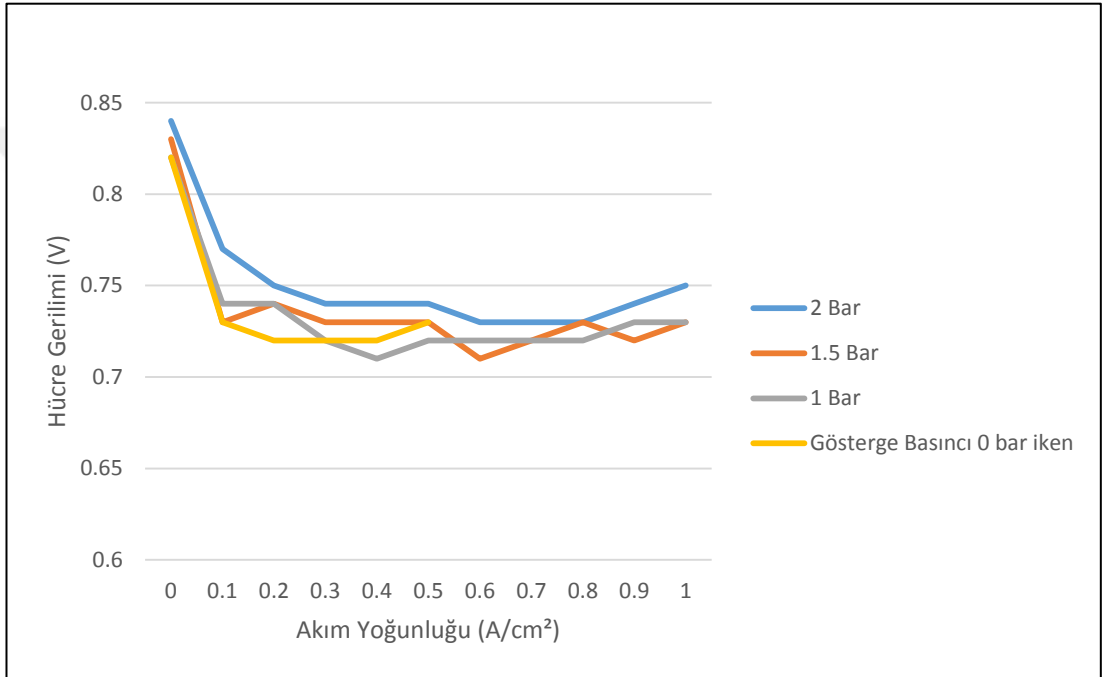
Ayrıca yakıt hücresi sistemlerinde basınç emniyet valfi bulunmaktadır. Böylece oluşabilecek ani basınç yükselmelerine karşı sistem korunmuş olur. Yükselen basıncı düşer.



Şekil 4.10: Deney düzeneğindeki basınç emniyet valflerinden bi

Tablo 4.3: Hücre sıkma torku için operasyon koşulları.

Operasyon Sıcaklığı (°C)	20
Operasyon Basıncı (Bar)	Gösterge Basıncı 0 iken -1-1.5-2
Anot Stokiyometrisi	2
Katot Stokiyometrisi	2
Sıkma Torku (Nm)	2



Şekil 4.11: Operasyon basıncının hücre performansına etkisi.

Gerçekleştirilen deneylerde Şekil 4.11’de görüldüğü üzere basınç yükseldikçe hücre performansının yükseldiği görülmektedir. Bu beklenen bir durum olup literatürdeki deneylerde benzer sonular mevcuttur [11,29,31].

4.2.4. Farklı bipolar plakaların performansının incelenmesi

PEM yakıt hücrelerinde farklı bipolar malzemelerin kullanılması hücre performansını etkileyen başlıca parametrelerden biridir. Bir yakıt hücresinde bipolar plakalar karmaşıklık ve maliyet açısından hücrenin ikinci kritik bileşeni olarak kabul

edilir. Yaklaşık olarak yığın ağırlığının %80'nini ve maliyetin %45'ini bipolar plakalar oluştururlar [9]. Yakıt ve oksitleyicileri üzerindeki akış kanalları vasıtasıyla dağıtmak, oluşan suyu hücreden uzaklaştırmak, gazları nemlendirmek gibi konular bipolar plakaların temel görevleri arasındadır. Bunun yanında bipolar plakaların seçiminde; dayanıklılık, verimlilik ve maliyet gibi parametreler de göz önünde bulundurularak seçim yapılır. Bipolar plakaların bazı özellikleri:

İletkenlik: Bipolar plakalar, yakıt hücrelerinde elektrik akımının iletimini sağlayan önemli bir yakıt hücresi bileşenidir. Daha iyi bir performans için yüksek iletkenli, iç direnci düşük malzemeler seçilmelidir.

Korozyon direnci: Bipolar malzemelerin korozyon direncinin iyi olması hücrenin uzun ömürlü ve yüksek performanslı olmasını sağlar.

Hidrojen ve oksijen geçirgenliği: Bipolar plakalar, hidrojen ve oksijen gazlarının hücredeki elektrotlara geçişini kontrol eder. Düşük hidrojen ve oksijen geçirgenliği, gazların geçişini kontrol ederken yan ürünlerin kaçmasını engeller ve hücre verimliliğini artırır.

Maliyet ve istenen diğer özellikler: Bipolar plakalar ucuz ve seri üretime uygun, dayanıklı, hafif ve ekonomik olmalıdır. Dayanıklılık sayesinde yığına yapısal destek sağlar. Ayrıca ısıl iletken olmalıdır. Böylece ısıyı soğutma hücrelerine ve borulara iletirler. Optimizasyon yaparken bu parametrelerde göz önünde bulundurulmalıdır.

Piyasada en çok tercih edilen plakalar grafit ve PVD yöntemiyle alüminyum ya da paslanmazlar üzerine altın, CrN, TiN, gibi malzemeler kaplanmış bipolar plakalardır.

Grafit malzemeler gözenekli yapısı nedeniyle sızdırmaz hale getirilerek kullanılır. Ayrıca işlenmesi zor ve pahalıdır.

Metalik malzemeler ise kaplanmış alüminyum, paslanmaz, nikel ya da titanyum gibi malzemelerdir. Bu metaller kaplanmazlarsa yakıt hücresi ortamında aşınmaya ve paslanmaya başlarlar ve paslı yüzeylerden kopan metal parçacıkları MEA'ya zarar verir. Bu yüzden bu metaller kaplanarak bu problem aşılma çalışılır. Yine korozyon tabakası bipolar plaka yüzeyindeki elektrik direncini artırır. Ancak kaplama da bizi kısıtlayan bazı parametreler vardır. Bunlardan üç tanesi önemli kısıtlardır. Bunlar:

- Kaplamanın korozyon direnci,

- Kaplamadaki mikro gözenek ve mikro çatlaklar,
- Ana malzeme ile kaplama arasındaki ısı genleşmenin farklı olması durumudur.

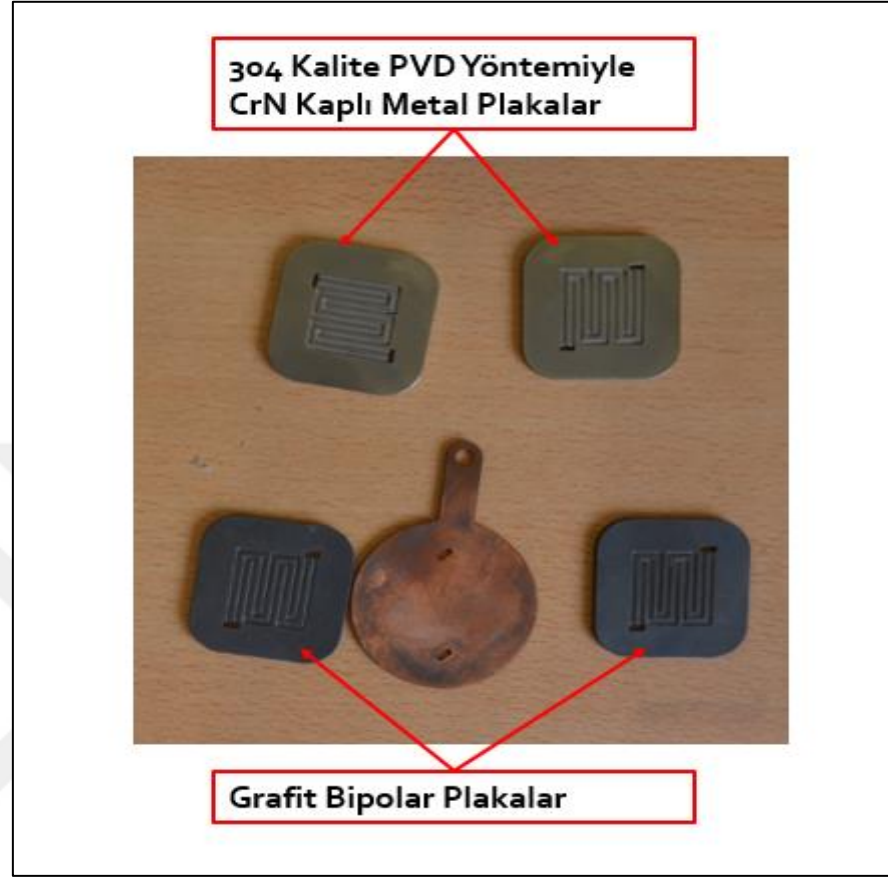
Yukarıdaki kısıtlara rağmen metal bipolar plakalar seri üretime uygun oluşu ve 1 mm'den daha incelikte imal edilişi ile hafif ve kompakt hücre yığınları oluşturabilirler.

Grafit-karbon kompozit plakalar, termoplastikler veya iletken dolgu termosetler kullanılarak yapılmıştır. Bu malzemeler genellikle yakıt hücrelerinde kimyasal olarak stabildir ve seri üretim için uygundur. Bu plakalarda ilgili sorunların başında hafif kırılabilir ve hacimli olmalarıdır. Elektrik iletkenliği metalik plakalardan birkaç kat düşük toplam özdirenç kaybı birkaç milivolt seviyesindedir [1,2,3].

En yaygın kullanılan bipolar plaka malzemesi grafitir. Yakıt hücresi ortamındaki korozyon direncinin yüksek olması, yine çok düşük dirençliliğe sahip olması ve bunların neticesi olarak en yüksek elektrokimyasal güç çıkışına sahip olması onu en çok tercih edilen bipolar plaka malzemesi yapmaktadır [29]. Bununla birlikte, yüksek maliyet, düşük mekanik dayanım ve akış kanallarını oluşturmak için makineyle işleme ihtiyacı gibi sorunlara sahiptir [10]. Bu nedenle, grafit plakalara daha iyi alternatifler için araştırmalar devam etmektedir.

Yapılan çalışmada, kanal genişliği 1,2mm ve derinliği 0.75mm çift serpantin akış kanallı, PVD yöntemiyle kaplanmış 304 kalite paslanmaz çelik ve grafit bipolar plakalar kullanılmıştır. Metal bipolar plakalarda, 2 Tork, 0 bar gösterge basıncında ve stokiyometre 2 ve 3 değerlerinde 0.2 amperde kadar gerilim elde edilmiştir. 0.3 amperde ise gerilimin azalarak 0'a düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı değerlerde 4 stokiyometre oranında, 0.1 amperde değerler alınabilmektedir. Grafit plakadan farklı olarak 3 tork değeri uygulandığında 0 amperde bile gerilimin 0'a doğru düştüğü gözlemlenmiş ve hücre yığını daha çalışmamıştır. Metalik bipolar plakadaki bu ani gerilim düşüş durumunun bipolar plakalardaki korozyondan dolayı olduğu düşünülmektedir. Yani bu durum, membranın iyonik iletkenliğini kaybetmesine neden oluyor. Çünkü membranda H^+ iyonlarının hareket ettiği yerlere + yüklü metal iyonları yapışabiliyor. H^+ hareket ederken Fe^{+2} iyonu orda kalıyor ve kaldığı yeri yani membranı tıkayarak kullanılamaz hale getiriyor ve H^+ ların hareket ettiği yollar tıkanıyor şeklinde kısaca

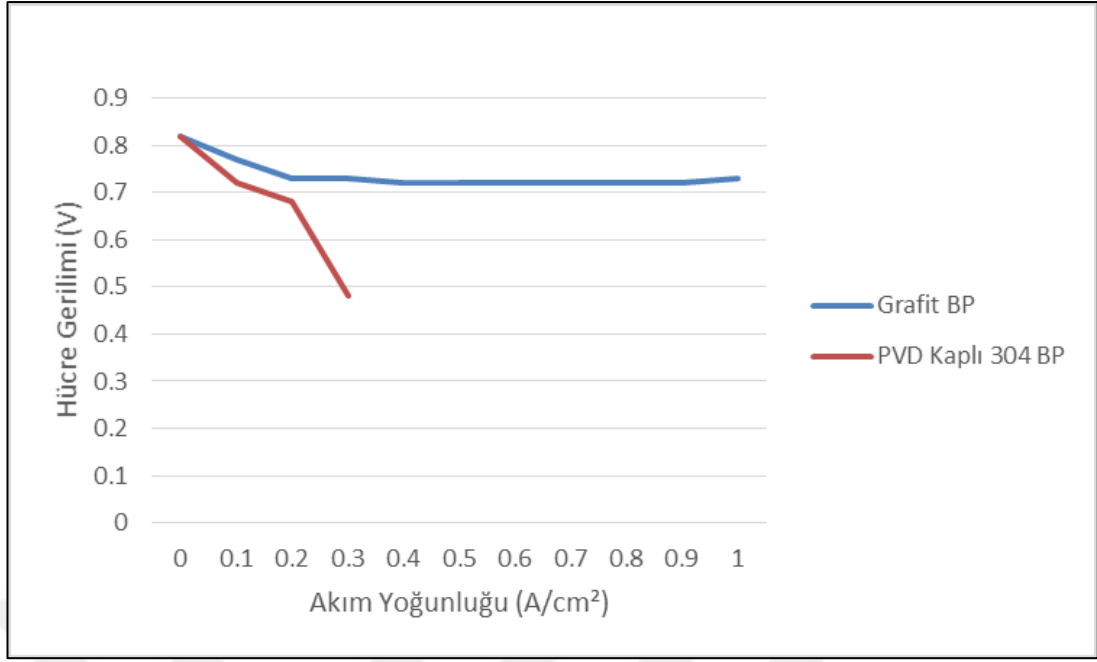
izah edilebilir. Shuo-Jen Lee ve arkadaşları çalışmasında benzer sonuçlar elde etmiştir [41].



Şekil 4.12: Deneylerde kullanılan bipolar plaka çiftleri.

Tablo 4.4: Farklı bipolar plakalar için operasyon koşulları.

Operasyon Sıcaklığı (°C)	20
Operasyon Basıncı (Bar)	0
Anot Stokiyometrisi	2
Katot Stokiyometrisi	2
Sıkma Torku (Nm)	2



Şekil 4.13: Farklı bipolar plakaların hücre performansına etkisi.

Deneyler sonucunda grafit plakaların daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir. CrN kaplı bipolar plakalarda olduğu düşünülen korozyon sebebiyle çok sağlıklı karşılaştırma yapılamamıştır. Ancak 0.2 ampere kadar olan değerlerde grafit plakalara yakın iyi bir verim elde edildiği görülmüştür. Grafit plakaların metalik plakalardan daha yüksek performansa sahip olduğu literatür çalışmalarında araştırıldı. [33,34,35] Dolayısıyla, grafit BP'lerin daha yüksek verim değerlerine sahip olması beklenen bir durumdur. En büyük dezavantajı olan maliyetin düşürülmesi ise önündeki büyük engellerden bir tanesidir. Diğer taraftan CrN kaplı BP'de kaplamanın çok önemli olduğu ve iyi yapılması gerektiği, yapılmadığı takdirde ise MEA'nın zehirlenmesine sebep olan yüzeyden metalik iyon kopmalarının olacağı görülmüştür.

Bununla beraber 0.2 ampere kadar metalik bipolar plakaların grafit bipolar plakalar ile karşılaştırılabilir bir performans gösterdiği ve gelişen malzeme ve kaplama teknikleriyle daha yüksek performanslara erişebileceği öngörülmüş ve literatürde bu konuda birçok araştırma yapıldığı gözlemlenmiştir [1,2,3,34,35,36].

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

PEM yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijen arasındaki elektrokimyasal reaksiyon yoluyla elektrik enerjisi üretir. Bu reaksiyon, PEM hücresinde bir proton değişim membranı (proton exchange membrane) üzerinde gerçekleşir. PEM yakıt hücreleri, düşük çalışma sıcaklıkları ve hızlı başlangıç özellikleri gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca, PEM hücreleri hafif, kompakt ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olabilir, bu da onları taşınabilir ve araç uygulamaları için ideal hale getirir.

PEM yakıt hücreleriyle ilgili yapılan araştırmalar, verimliliklerini artırmak, maliyetlerini düşürmek ve dayanıklılıklarını artırmak gibi hedeflere yoğunlaşmaktadır. Araştırmacılar, katalizör malzemeleri, membran malzemeleri ve hücre tasarımlarında iyileştirmeler yapmak için çalışmaktadır. Ayrıca, yakıt hücrelerinde kullanılan platin gibi pahalı ve nadir metallerin yerine daha ucuz ve yaygın olarak bulunan malzemelerin geliştirilmesi de üzerinde çalışılan konulardan biridir.

Bir PEMYH'nin verimli çalışması birçok faktöre ve bu faktörlerin optimizasyonuna bağlıdır. Yapılan çalışmada grafit ve PVD yöntemiyle CrN kaplanmış çift serpantin kanallı bipolar plakalarda farklı stokiyometri, basınç ve sıkıştırma değerlerinde deneyler yapılmış, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve benzer değerler elde edildiği gözlemlenmiştir.

Farklı değerlerdeki stokiyometrik oranlarda ideal verimin stokiyometri 2 ve 3 oranlarında elde edilmiştir. Farklı sıkıştırma oranlarında ise sıkıştırmanın artmasıyla verimin arttığı müşade edilmiştir. Ancak sıkıştırma değerinin çok fazla yapılması hücreye zarar vereceğinden ötürü tork arttırımında da bir optimizasyon gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yine, farklı basınç değerlerinde ise basıncın artmasıyla verimin arttığı müşahade edildi. Ancak çok fazla basınç arttırımında katot kısmında oluşan su artmasının MEA'ya zarar vereceği için burada da bir optimizasyon yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Grafit ve PVD kaplanmış CrN plakalar ile yapılan deneylerde grafit plakaların daha iyi verime sahip olduğu ancak metalik plakaların veriminin ise dikkatli, hassas imalat ve kaplama süreçlerinin yapıldıktan sonra grafit plakalarla mukayese edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

PEM yakıt hücrelerinin geleceği umut vericidir. Düşük karbon salınımı, enerji verimliliği ve enerji bağımsızlığı gibi avantajları nedeniyle, PEM yakıt hücreleri elektrikli araçlar, taşınabilir elektronik cihazlar ve güç üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Sürekli olarak yapılan araştırmalar ve geliştirmelerle, PEM yakıt hücrelerinin verimliliğinin artması, maliyetlerinin düşmesi ve dayanıklılıklarının iyileştirilmesi beklenmektedir. Bu da onların daha yaygın bir şekilde benimsenmesini ve gelecekte enerji sektöründe önemli bir role sahip olmalarını sağlayacaktır. PEMYH'lerin üzerinde yapılacak daha fazla ARGE çalışmaları ve yakıt hücresindeki en kritik ve pahalı bileşenler olan; membran, katalizör tabakaları ve gaz difüzyon tabakaları gibi kritik bileşenlerin yeni teknolojilerle veriminin artırılmasıyla daha dayanıklı, daha düşük maliyetli ve daha verimli hücre yapısının oluşabileceği düşünülmektedir.

Özetlemek gerekirse, PEM yakıt hücreleri üzerine yapılan araştırmalar ve çalışmalar, temiz enerji üretimi konusunda büyük potansiyele sahiptir. Gelecekteki gelişmeler ve iyileştirmelerle birlikte, PEM yakıt hücrelerinin daha yaygın olarak kullanılması ve enerji sektöründe önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] F. Barbir, (2013) , ‘‘PEM Fuel Cells : Theory and Practice’’, 2nd Edition, Elsevier.
- [2] C. Spiegel, (2007), ‘‘Designing and Building Fuel Cells’’, 1st Edition, McGraw-Hill.
- [3] R.O’Hayre, Suk-Won Cha, W. G. Colella, F. B. Prinz, (2016), ‘‘Fuel Cell Fundamentals’’, 3rd Edition, Wiley.
- [4] Mei B., Bornoon P., Toghraie D., Su Chia-Hung, Nguyen H. C., Khan A. (2011), ‘‘Energy, Exergy, Environmental and Economic Analyzes(4E) and Multi-objective Optimization of a PEM Fuel Cell Equipped with Coolant Channels’’, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112021>.
- [5] Web 1, (2023), <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/history.php>, (Erişim Tarihi: 15/03/2023).
- [6] Web 2, (2023), <https://mag.toyota.co.uk/new-mirai-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicle/> (Erişim Tarihi: 18/03/2023).
- [7] Web 3, (2023), <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/psr-2017-0018/html> (Erişim Tarihi: 20/03/2023).
- [8] Web 4, (2023), <https://www.youtube.com/watch?v=tqi60XX9vP8&t=16s> (Erişim Tarihi: 20/03/2023).
- [9] Xiao-Zi Yuan, Christine Nayoze-Coynel, Nima Shaigan, David Fisher, Nana Zhao, Nada Zamel, Nada Zamel, Pawel Gazdzicki, Michael Ulsh, Kaspar Andreas Friedrich, Francois Girard, Ulf Groos, (2021), ‘‘A Review of Functions, Attributes, Properties and Measurements for the Quality Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Components’’, Elsevier.
- [10] Dündar F., (2011), ‘‘Topaklaşma ve Karbon Korozyonu Sorunlarının Giderilmesi Amacıyla Özgün Yapıda Katalizör Sentezi ve Yakıt Hücresi Çalışma Koşullarının Geliştirilmesi’’, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [11] Kahraman H., (2016), ‘‘Akış Kanal Tasarımının Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi Performansına Etkisinin İncelenmesi’’, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [12] Kahraman H, Özgün İ, (2021), ‘‘PEM Yakıt Hücresi Akış Alanlarının Üç Boyutlu Modellenmesi’’, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı 29, S. 65-69, Aralık 2021.

- [13] Daşdemirli Y., (2019), “Pem Yakıt Pillerinde Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi ”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.
- [14] Küpeli S., (2020), “Pem Yakıt Pillerinde Geometrik ve Çalışma Parametrelerinin Performansına Etkileri ve Yeni bir Akış Alanı Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi.
- [15] Cellek M. S., Bilgili M., (2021), “Investigation of the Effect of Stoichiometry Ratio on Two-Cell PEM Fuel Cell Stack Performance”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji, Şubat 2021.
- [16] Kahraman H, Kolip A, Köroğlu Ç.İ., (2019), “Beş Hücreli Pem Tipi Yakıt Pili Tasarımı, Üretimi ve Deneysel Analizi”, Academic Platform, Kasım 2019. <https://doi.org/10.33793/acperpro.02.03.100>.
- [17] Kabza A., (2013) , ‘Fuel Cell Formulary ’, 2016.
- [18] Xiangchao Meng, Hong Ren, Xiaokang Yang, Tienan Tao, Zhigang, (2022), “Experimental Study of Key Operating Parameters Effects on the Characteristics of Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Anode Recirculation”, Elsevier.
- [19] Woo-kum Lee, Chien-Hsien Ho, J.W. Van Zee, Mahesh Murthy, (1999), “The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell”, Elsevier.
- [20] Hao Yuan, Haifeng Dai, Pingwen Ming, Lei Zhao, Wei Tang, Xuezhe Wei, (2022), “Understanding Dynamic Behavior of Proton Exchange Membrane Fuel Cell in the View of Internal Dynamics Based on Impedance ”, Elsevier.
- [21] Emmanuel Balogun, Paul Barendse, Jessica Chamier, (2018), “Effect of Anode Stoichiometry and Back Pressure on the Performance of PEMFCs”, ResearchGate.
- [22] Esmer M., (2010), “Pem Tipi Yakıt Hücresinin Isıl, Mekanik, Elektro-Kimyasal ve Akış Davranışlarının Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [23] Kahraman H, Orhan M. F., (2017), “Flow Field Bipolar Plates in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Analysis & Modeling”, Elsevier.
- [24] Uzundurukan A., (2019), “Farklı Sıkıştırma Yöntemlerinin Pem Yakıt Hücresi Performansına Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [25] Deligöz H., (2012), “Pem Yakıt Hücresi Performansını Etkileyen Parametrelerin Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [26] Web 5, (2023), [Hydrogen fuel cell aircraft – what for and when? - electrive.com](https://www.electrive.com) (Erişim Tarihi: 05/07/2023).

- [27] Uzundurukan A., Bilgili M., Devrim Y., (2020), “Examination of Compression Effects on PEMFC Performance by Numerical and Experimental Analyses”, ResearchGate, doi:10.1016/j.ijhydene.2020.04.275.
- [28] Web 6, (2023), [Hydrogen fuel cell trains are on the fast track | Cummins Inc.](#) (Erişim Tarihi: 05/07/2023).
- [29] Wilberforce T., Ijaodola O., Baroutaji A., Ogungbemi E., Olabi A.G., (2022), “Effect of Bipolar Plate Material on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance”, Energies, doi: 10.3390/en15051886.
- [30] Güvenli M., (2011), “Pem Tipi Yakıt Pili Prototipinin Hazırlanarak Çalışma Parametrelerinin Performans Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [31] Qin Y., Du Q., Fan M., Chang Y., Yin Y., (2017), “Study on the Operating Pressure Effect on the Performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power System ”, Elsevier.
- [32] Meral P., (2019), “Pem Tipi Yakıt Hücrelerinde Tasarım ve İşletme Parametrelerinin Hücre Performansına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- [33] Gautam R., Banerjee S., Kar K., (2015), “Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application”, ResearchGate, doi: 10.2174/1874464808666150306223104.
- [34] S. Shimpalee, V. Lilavivat, H. McCrabb, Y. Khunatorn, H-K Lee, W-K Lee, J. W. Weidner, (2016), “Investigation of Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, International Journal of Hydrogen Energy.
- [35] Web 7, (2023), https://www.ballard.com/docs/default-source/web-pdf/technical-note_-2019-metal-vs-graphite-bipolar-plates-update.pdf (Erişim Tarihi: 20/06/2023).
- [36] Web 8, (2023), <https://lentatek.com/en/solutions/hydrogen-and-fuel-cell-technologies/proton-exchange-membrane-fuel-cell-pemfc-bipolar-plate-bpp> (Erişim Tarihi: 20/06/2023).
- [37] Nguyen Dang Nam., Deok Su Jo., Jung Gu Kim., Dae Ho Yoon., (2011), “Corrosion protection of CrN/TiN multi-coating for bipolar plate of polymer electrolyte membrane fuel cell”, Elsevier.
- [38] Allen Hermann., Tapas Chaudhuri., Priscila Spagnol., (2005), “Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review ”, Elsevier.

[39] Kahraman H., (2010), “Polimer elektrolitik membrane (PEM) yakıt pillerinde kullanılacak metalik çift kutuplu plakanın geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.

[40] Web 9, (2023), [HDW Fuel Cell AIP System – proven power, simply silent \(thyssenkrupp-marinesystems.com\)](https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com) Erişim Tarihi: 05/07/2023).

[41] Shuo-Jen Lee, Ching-Han Huang, Yu-Pang, (2003), “Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel”, Elsevier.



ÖZGEÇMİŞ

Hilal KAYA, 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2011 yılından bu yana çeşitli firmalarda tasarım, analiz, imalat ve kalite kontrol bölümleinde çalıştı. Halihazırda otomotiv tasarımı üzerine özel bir firmada çalışmaktadır.

