



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAKIT HÜCRESİNDE HİDROJEN TÜKETİMİNİN ZAMANA BAĞLI
DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

Yunus ZENGİN
YÜKSEK LİSANS
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2019
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yunus ZENGİN tarafından hazırlanan “**YAKIT HÜCRESİNDE HİDROJEN TÜKETİMİNİN ZAMANA BAĞLI DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması **18.06.2019** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** Tezi olarak Kabul / Red edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğretim Üyesi Abdülkadir KOÇER

.....

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ

.....

Üye

Dr. Öğretim Üyesi Reşat ÇELİKEL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Şahnaz TİĞREK

FBE Müdürü

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Araştırma Projesi (BAP) tarafından **BTÜBAP-2017** nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Tarih: 18.06.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

YAKIT HÜCRESİNDE, HİDROJEN TÜKETİMİNİN ZAMANA BAĞLI DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Yunus ZENGİN

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ

2019, 87 Sayfa

Jüri

**Başkan Dr. Öğretim Üyesi Abdülkadir KOÇER
Danışman Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ
Üye Dr. Öğretim Üyesi Reşat ÇELİKEL**

Günümüzde gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların giderek azalması ve fosil yakıtların enerji üretiminde kullanılmaları neden olduğu olumsuz çevresel etkiler nedeniyle artık yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması kaçınılmaz bir duruma gelmiştir. Yakıt pili bir elektrolit ve iki elektrottan oluşur. Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir cihaz olup elektrotlarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile elektriği üretir. Yanma olmaksızın elektrik üretildiği için daha az kirlilik meydana gelmektedir.

Bu çalışmada 3x3cm ebatlarında ve 8 adet hücreden oluşan yakıt pili kullanılmıştır. Yakıt hücresi çeşidi olarak Polimer Elektrolit Mebran Yakıt Hücresindeki (PEMYP) kütleli olarak kullanılan hidrojenin zamana bağlı olarak ürettiği güç ve enerji ölçüm cihazlarıyla tespit edilmiştir. Deneyler esnasında nem %60, hat sıcaklığı 70°C, hücre sıcaklığı 41°C’de sabitlenerek deneyler yapılmıştır. Çalışmada yakıt hücresinin H₂ ve O₂ değerleri ayrı ayrı 0,1 - 1ml/dk aralığında değiştirilerek elde edilecek güç hesaplanmıştır. Tek hücreden H₂ debisi 0,2ml/dk, O₂ ise 0,4ml/dk değerinde 1,065W değerinde güç elde edilmiştir. Veriler ışığında denklemlerden elde edilen bulgular kullanılarak grafikler çizilip, yorum ve tartışmaya sunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Yakıt Pili, Hidrojen, PEM, Hidrojen Enerjisi, Yenilenebilir Enerji.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF TIMELY CHANGE OF HYDROGEN CONSUMPTION IN FUEL CELL

Yunus ZENGİN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER IN AUTOMOTIVE ENGINEERING**

Advisor Assist. Prof. Dr. Adem YILMAZ

2019, 87 Pages

Jury

Assist. Prof. Dr. Abdülkadir KOÇER

Assist. Prof. Dr. Adem YILMAZ

Assist. Prof. Dr. Reşat ÇELİKEL

Nowadays, renewable energy sources are inevitable due to the increasing need for energy, the diminishing of fossil fuels and the negative environmental impacts of fossil fuels used in energy production. The fuel cell consists of an electrolyte and two electrodes, which converts chemical energy into electrical energy and generates electricity through chemical reactions in the electrodes. Since electricity is produced without combustion, less pollution occurs.

In this study, a 3x3cm fuel cell consisting of 8 cells was used. Polymer Electrolyte Mebrane Fuel Cell (PEMYP) as the fuel cell type is determined by the time and power produced by the hydrogen used massively. During the experiments, the humidity was 60%, the line temperature was 70°C and the cell temperature was fixed at 41°C. In this study, H₂ and O₂ values of the fuel cell were calculated separately by changing the power in the range of 0,1 - 1ml/min. A single cell H₂ output of 0,2ml/min, O₂ of 0,4ml/min of 1,065W power was obtained. In the light of the data, graphs were drawn by using the findings obtained from the equations and presented for interpretation and discussion.

Keywords: Fuel cell, Hydrogen, PEM, Hydrogen Energy, Reneable Energy

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresince yardım ve desteğini esirgemeyen, sabırla bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, maddi ve manevi anlamda destek olan ve tez çalışmamda çok fazla emeği olan değerli Danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ' a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans tezimi yaptığım Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalının başta Dr. Öğretim Üyesi Selman AYDIN' a olmak üzere tüm değerli öğretim üyelerine ve benimle birlikte yüksek lisans öğrenimini gören Berat Fırat DALGIÇ arkadaşşıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte moral ve motivasyonumu yüksek tutmak için çaba harcayan, güvenlerini ve desteklerini her an hissettiğim en değerli varlıklarım Aileme sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Yunus ZENGİN

BATMAN-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
TABLoların LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
3.1. Yakıt Pili Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi	10
3.2. Yakıt Pili Teknolojisi.....	12
3.2.1.Yakıt Pilinin Avantajları ve Dezavantajları	12
3.3. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi.....	13
3.4. Yakıt Pili Çeşitleri	15
3.4.1. Doğrudan Metanollü Yakıt Pili (DMYP)	16
3.4.2. Alkali Yakıt Pili (AYP)	16
3.4.3. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP).....	17
3.4.4. Erimiş Karbon Yakıt Pilleri (EKYP)	18
3.4.5. Katı Oksitli Yakıt Pilleri (KOYP)	18
3.4.6. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)	19
3.5. PEM Yakıt Pili Bileşenleri ve Avantajları.....	21
3.5.1. Elektrolit Membran.....	22
3.5.2. Gaz Difüzyon Katmanı	23
3.5.3. Elektrotlar	23
3.5.4. Akış Alanı Plakaları.....	23
3.5.5.PEMYP Avantajları	24
3.6. Hidrojen Enerjisi.....	25
3.6.1. Hidrojen Enerjisinin Avantajları.....	27
3.6.2. Hidrojen Enerjisinin Dezavantajlar	28
3.6.3. Hidrojenin Tarihçesi	28
3.6.4. Hidrojen Gazı.....	32
3.6.5. Hidrojen Gazının Özellikleri	32
3.6.6. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri	32
3.6.7. Hidrojenin Kimyasal Özellikleri.....	33
3.6.8. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı	34
3.6.9. Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	36
4.1. Deney Düzenekinin Hazırlanması	38
4.2.Deneyin Yapılış Aşamaları.....	38
4.3. PEMYH Kurulumunda Kullanılan Ekipmanlar.....	39
4.3.1. Datalogger.....	39
4.3.2. Ampermetre	40
4.3.3. Voltmetre	40
4.3.4. Termometre.....	41
4.3.5. Nemölçer.....	41
4.3.6. Debimetre.....	41
4.3.7. Nemlendirme kabı.....	42

4.3.8. Isıtma Borusu	42
4.3.9. Sıcaklık Ayar Rölesi	43
4.3.10. Fan	43
4.3.11. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi	44
4.3.12. Oksijen Tüpü	44
4.3.13. Hidrojen Tüpü	45
4.4. PEMYH Verim Hesabı ve Performansı	48
4.4.1. Teorik Analiz	48
4.4.2. Verim Hesabı	49
4.4.3. Yakıt Hücresi Enerji Üretimi	50
4.4.4. Yakıt Hücresi Açık Devre Enerji Gerilimi	51
4.4.5. Gerçek Yakıt Hücre Potansiyeli - Polarizasyon Eğrisi	52
4.5.6. Gerçek Hücre Verimliliği	53
EKLER	70
KİŞİSEL BİLGİLER.....	74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3. 1 W. R. Grove' nin geliştirdiği ilk yakıt pili (A. Bıyıkoglu, 2003).....	10
Şekil 3. 2 . Gemini Uzay Gemisinde Kullanılmış Olan Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2005)	11
Şekil 3. 3 Yakıt Hücresi' nin Çalışma prensibi (URL 2).....	14
Şekil 3. 4. Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Hücresi (URL 8)	16
Şekil 3. 5 Alkali Yakıt Hücresi (URL 9)	17
Şekil 3. 6.Fosforik Yakıt hücresi (URL 10)	17
Şekil 3. 7.Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (Applebyve Foulkes, 1989).....	18
Şekil 3. 8.Katı Oksitli Yakıt Pili (Applebyve Foulkes, 1989).....	19
Şekil 3. 9.PEMYP Üzerinde Gerçekleşen Reaksiyonlar (URL 11)	19
Şekil 3. 10. PEMYP.....	20
Şekil 3. 11.PEMYP Yakıt Pili Diziliş ve Akış Şeması.....	22
Şekil 3. 12.PEMYP Sisteminin Diğer Motor Tipleri İle Karşılaştırılması (K., Haraldsson, 2005)	25
Şekil 3. 13. Hidrojen Enerji Sisteminin Şematik Gösterimi (Gedik, 2015)	27
Şekil 3. 14. Hidrojen İle Çalışan Bir Otomobil (URL 14)	35
Şekil 3. 15. Yakıt Hücresi İle Çalışan Bir Otobüs (URL 14)	35
Şekil 3. 16. Yakıt Pili İle Çalışan Uçak (URL 15)	36
Şekil 4. 1. PEMYP Sisteminde Kullanılan Datalogger	40
Şekil 4. 2. PEMYP Sisteminde Kullanılan Dijital Voltmetre ve Ampermetre.....	40
Şekil 4. 3. PEMYP Sisteminde Kullanılan Termometre	41
Şekil 4. 4. PEMYP Sisteminde Kullanılan Nemölçer ve Termometre.....	41
Şekil 4. 5. PEMYP Sisteminde Kullanılan Debimetre	42
Şekil 4. 6. PEMYP Sisteminde Kullanılan Hidrojen ve Oksijen Nemlendirme Kaplar. 42	
Şekil 4. 7. PEMYP Sisteminde Kullanılan Oksijen ve Hidrojen Gaz Hatlarının Isı Bandı	43
Şekil 4. 8. PEMYP Sisteminde Kullanılan Oksijen ve Hidrojen Sıcaklık Ayar Rölesi . 43	
Şekil 4. 9. PEMYP Sisteminde Kullanılan Fan	44
Şekil 4. 10.PEMYP Sisteminde Kullanılan PEMFC	44
Şekil 4. 11. PEMYP Sisteminde Kullanılan Oksijen Tüpü	45
Şekil 4. 12. PEMYP Sisteminde Hidrojen Tüpü ve Deney Standının Önden Görünümü	45
Şekil 4. 13. PEMYP Deney Standının Önden Görünümü	46
Şekil 4. 14. PEMYP'in Çalışma Şeması.....	47
Şekil 4. 15. Yakıt Hücresindeki Voltaj-Akım Polarizasyon Eğrisi (Pourmovahed, 2009)	52
Şekil 5. 1. PEMYP Hidrojen (H ₂) 0,6 ml/dk -Oksijen (O ₂) 1,0 ml/dk	55
Şekil 5. 2. PEMYP Hidrojen (H ₂) 0,8 ml/dk -Oksijen (O ₂) 1,2 ml/dk	55
Şekil 5. 3.P.E.M Hidrojen (H ₂) 1,8 ml/dk -Oksijen (O ₂) 2,0 ml/dk	56
Şekil 5. 4. PEMYP Hücre Akım (A)	56
Şekil 5. 5. PEMYP Hücre Voltajı (V)	57
Şekil 5. 6.PEMYP Hücre Sıcaklığı (°C)	57
Şekil 5. 7. PEMYP Hidrojen ve Oksijen Debilerin Zamana Bağlı Grafiği	58
Şekil 5. 8. PEMYP Volt-Amper-Watt Grafiği	58
Şekil 5. 9. PEMYP Watt-Sabit Hücre Sıcaklığı Grafiği.....	59
Şekil 5. 10. PEMYP Watt-Voltaj Karşılaştırma Grafiği	59

Şekil 5. 11. PEMYP Watt-H ₂ Grafiği.....	60
Şekil 5. 12. PEMYP Watt-O ₂ Grafiği.....	60
Şekil 5. 13. PEMYP V -O ₂ Grafiği	61
Şekil 5. 14. PEMYP V -H ₂ Grafiği.....	61
Şekil 5. 15. PEMYP Zaman- Amper Grafiği.....	62
Şekil 5. 16. PEMYP H ₂ -O ₂ Debi Değişim Grafiği	62
Şekil 5. 17. PEMYP H -O ₂ -V-A, Grafiği	63
Şekil 5. 18 PEMYP Hidrojen(H ₂), Oksijen(O ₂), Watt (W) Grafiği	63

TABLoların LİSTESİ

Tablo 3.1. Yakıt Pili Çeşitlerinin Karşılaştırılması (URL 11)

Tablo 3.2. Hidrojenin Bazı Özellikleri (URL 13).

Tablo 3.3. Hidrojen Ve Diğer Yakıtların Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri (Ültanır, 1997)

Tablo 4.1. Hidrojenin Fiziksel Özleikleri (URL 16).

Tablo 4.2. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri (URL 16).

Tablo 4.3. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri (URL 16).

SİMGELER**Simge****Açıklama**

H₂O	: Su
CO₃	: Karbonat
CO₂	: Karbondioksit
O₂	: Oksijen
H₂	: Hidrojen
OH	: Hidroksit
Al	: Alüminyum
N₂	: Azot
H⁺	: Hidrojen İyonu
Ni	: Nikel
Pt	: Platin
CH₃OH	: Metanol
W	: Watt
kW	: Kilowatt
MW	: Megawatt
V	: Volt
mA	: Miliamper
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
mW	: Miliwatt
Atm	: Atmosfer
KPa	: Kilo paskal
Mm	: Mikrometre
g/cm³	: Gram/Santimetreküp
W/cm²	: Watt/Santimetrekare
W/ cm°K	: Watt/Santimetre Kelvin
°C	: Santigrat Derece
e⁻	: Elektron
%	: Yüzde
<	:Küçük
≥	:Büyük Eşi
Pt	: Platinyum

KISALTMALAR

Kısaltma

Açıklama

PEMYP	: Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili
DMYP	: Doğrudan Metanol Yakıt Pili
AYP	: Alkali Yakıt Pili
FAYP	: Fosforik Asit Yakıt Pili
EKYP	: Erimiş Karbonat Yakıt Pili
KOYP	: Katı Oksitli Yakıt Pili
YH	: Yakıt Hücresi
LPG	: Likit Petrol Gazları
OİR	: Oksijen İndirgenme Reaksiyonu
MATLAB	: Bilgisayar programı
DC	: Doğru Akım
DA	: Alternatif Akım
NaBH₄	: Sodyum Borhidrür
THEME	: The Hydrogen Economy Miami Energy Conference
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
HTAP	: The Hydrogen Technical Advisory Panel
PNGV	: The Partner ship for a New Genaration of Vehicles
NECAR	: New Electric CAR
USCAR	: US Councilfor Automotive Research
IHPE	: International Partnership for the Hydrogen Economy
NASA	: National Aeronautics and Space Administration

1. GİRİŞ

Bir toplumun refah seviyesinin armasının ve zengin olmasının en önemli sebeplerinden birisi enerji kaynaklarıdır ve bu kaynaklarının başında fosil yakıtlar gelmektedir. Ağır sanayinin oluşmasında kullanılan kaynakların başında petrolden önce kömür gelmektedir. Bu nedenle fabrikaların çalışması, ağır sanayinin gelişmesi ve makineleşmenin artmasının en önemli etkenlerinin başında fosil yakıtlar gelmektedir. Lakin bu sorunlar sürekli arka plana itilmiştir. Bu sorunların önemli derecede önde geleni çevreye verdiği zarardır.

Kaynakların içeriğinde ağırlıklı olarak karbon içerikli olması ve bu yakıtların yanması ile meydana gelen atık maddelerin zehirli olması, atmosferde bu maddelerin oranlarının artması, sera etkisini ve asit yağmurları gibi çevreye zarar veren olumsuz hava olaylarına neden olmaktadır. Bu olumsuz hava olayları günümüzde daha da fark edilir bir boyut kazanmıştır. Küresel olarak en önemli etken sera etkisi olarak önümüze çıkmaktadır. Bu etki genellikle Karbon Dioksit (CO_2) gazlarının artmasıyla meydana gelen ve atmosferi bir doğal sera gibi kapatarak atmosfere gelen güneş ışınlarını atmosfer içerisine hapsederek ısınmaya ile sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Sıcaklık artışındaki değer küçümsenecek kadar küçük değerlerde olsa da, bu yerküre için çok önem arz eden bir durumdur. Bu durum yerkürenin ısısal anlamda dengesini bozmakta buzullardaki buzların erimesi ve o bölgedeki dengenin bozulması (yağış miktarındaki artış, ısınmadan kaynaklı kuraklık, rüzgârların artması ve kasırga türü hava olaylarının çoğalması) olumsuz doğa olaylarını beraberinde getirmektedir. Petrol ve petrol türevlerin kullanımı sonrası oluşan diğer bir problem ise fosil kökenli yakıtların doğadan elde edilmesi ve bu nedenle bu fosil kaynakların tükenmek üzere olmasıdır. Günümüzde insanlar enerji ihtiyacının %88'i fosil kaynaklı yakıtlardan (bunlar doğalgaz, kömür, petrol ve petrol türevleri) elde etmektedir. Bu fosil kaynakların %38'ini petrol ve türevleri, %30'unu kömür ve %20'sini de doğalgaz oluşturmaktadır (Yılmaz Ulu, 2010).

Dünya nüfus artışı ile birlikte tüketim hızının artması sonucu mevcut fosil yakıtlarını gün geçtikçe tüketmektedir. Araştırmacılara göre bu rezervlerin 50 veya 60 yıllık bir süre içerisinde tükeneceği ileri sürülmektedir. Bu öngörülen zaman dilimi ise yeni bir enerji sisteminin kurulması ve kurulacak sistemlerin artırılması için yetebilecek bir süredir. Enerji ihtiyacını karşılayacak olan alternatif bir yakıtta aranan en önemli karakteristikleri şöyle sıralayabiliriz; zehirli olmama, ısısal değer

yüksek olması, farklı enerji türlerine dönüştürülebilmesi, çevreci olması ve en önemlisi ekonomik olması olarak ifade edilebilir. Bu yönüyle hidrojen yakıtı saymış olunan karakteristiklere sahip ve dünyada sınırsız olarak bulunabilen bir alternatif yakıttır. Bu hidrojen yakıtını yakıt pili üniteleri sayesinde enerjiye dönüştürebiliriz. 20. yüzyılın ikinci yarısında hızlı bir gelişim süreci göstermiş yeni bir enerji üreticisi durumuna gelmiştir. Isı makinelerinde söz konusu olan “yakıt kimyasal enerjisi-ısı enerjisi mekanik enerji” dönüşümü yerini yakıt pilinde, “yakıt kimyasal enerjisi-elektrik enerjisi mekanik enerji” dönüşümüne yer vermektedir. Yakıt hücresinde yanma olayı olmaksızın, reaktanların elektrokimyasal bir reaksiyonla ile elektrik enerjisi üretilmektedir (Yılmaz Ulu, 2010).

Bu elektrik enerjisi ise ihtiyaca göre, istenilen herhangi bir gaye ile kullanılabilir. Mesela bir elektrik motoru vasıtasıyla araca hareket vermesi mümkündür. Yani yakıt pilinin içten yanmalı motorlar yerine kullanılması halinde mekanik enerji, krank-biyel-piston mekanizması yerine, elektrik motoru ile sağlamak mümkün olup, günümüze göre hantal denilebilecek içten yanmalı motorların, pek çok kompleks mekanizmaları ortadan kalkmaktadır. Motorlardaki Bu mekanizmaların yol açtığı gürültü, titreşim, karışık yapı, yüksek sıcaklık, mekanik kayıplar ve atmosfere saldıgı NO_x gazlarından kurtulmak mümkün olacaktır. Pek çok yakıt kullanımı için uyumlu olan yakıt pilinde hidrojenin yakıt olarak kullanımı, kimyasal reaksiyon sonrası atık madde olarak sadece su meydana gelmektedir. Verimliliğin üst değerlerde olması, yakıt pili cinsine bağlı olarak çalışma sıcaklığının düşük olması (ortalama 100°C ve altı), hareketli parça barındırmaması ve bu nedenle sesiz çalışması titreşim oluşturmaması, anında dönüşüm sağlaması ve mekanik aksamaların az olması sayabileceğimiz üstünlükleri olarak ön plana çıkmaktadır.

Ulusal ve uluslararası raporlara göre gelişmiş ülkelerin bu konuya verdikleri önem az değildir. Yakıt pillerinin kullanımı ve geliştirilmesine yönelik hazırlanan pek çok çalışma ve araştırma bulunmaktadır. Bununla birlikte yakıt pilinin sabit olarak değil de taşınabilir olması ve taşınabilir cihazlarda kullanılmasının artırılmasına yönelik çok çalışma bulunmaktadır. Benzer uygulamalar sivil kullanım dışında askeri uygulamalar için de uygun olduğu görülmektedir.

Mobil uygulamalarda kullanılan yakıt pilleri özellikle hava, kara, uzay ve deniz araçlarına mevcut kullanımlara göre daha etkili olabilir. Verimli olması, çevre dostu olması, çevreye uyumlu olması, sessiz ve gürültüsüz çalışması bizlere birçok avantaj sağlamaktadır. Sabit uygulamalar kullanılmasında da benzer yenilikler

kazandırabilir. Yerleşim yerlerinde enerji kaynaklarını sağlanması merkezlerden uzakta devasa santraller dışında bölgesel ya da yerel enerji santrallerinin kurulması kullanım kolaylıkları sağlamaktadır. Santrallerin merkezi hale gelmesi iletim hatlarındaki kayıpların daha da azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca yerleşim alanlarının dışındaki kalan yerlerde özel enerji ihtiyacına gereksinim duyulması halinde yakıt pilleri kolaylıklar sağlamaktadır.

Alternatif enerjilerden olan yakıt pillerinin çalıştırılmasında yakıt olarak hidrojen gazının kullanılması üzerine son zamanlarda çok çalışmalar yapılmaktadır. Yakıt pillerinin çalışması diğer sistemlere göre farklı ve basittir. Çalışmasında hidrojen gazı yanma işlemine gerek kalmadan hidrojenin kimyasal reaksiyonu sonucunda doğrudan elektrik akıma dönüşmektedir. Hidrojen ve oksijen gazları arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon ile elde edilen enerjinin verimliliği yüksek, devamlı halde çalışan piller veya elektrokimyasal cihazlar olarak tanımlayabiliriz.

Yakıt hücreleri teknolojisinin gelişmesi karşılaşılan sorunların çözümü yeni tasarımlar sayesinde yeni teknolojilerin elde edilmesinde ve yakıt hücresinin üst sıralara çıkmasında önemli rol oynamaktadır. Bu tasarımlar içerisinde Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi (PEMYH), enerjinin taşınabilir güç haline gelmesi, ulaşım ve sabit güç üretimi için ideal bir enerji üretici olarak avantajlı bir hale gelmiştir. PEMYH, diğer yakıt hücresi tasarımlarıyla karşılaştırıldığında PEMYH daha düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Az yer kaplamaları, hafif olmaları, hareketli parçalarının olmayışı ve işletimlerinin basit olmaları ön plana çıkmaktadır. Bu sebeplerden dolayı son yıllarda hidrojen yakıtı ile çalışan araçların çoğu PEMYH teknolojisi kullanmaktadır. Yakıt hücreleri üzerine yapılan Araştırma Geliştirme (AR-GE) çalışmalarının büyük bir kısmı PEMYH üzerinde durmaktadırlar.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yılmaz Ulu (2010) çalışmasında güneş paneli destekli, hibrit karma bir sistem kurmuştur. Sistemde kullanılan ekipmanlar, üretilen enerji analizini hesaplamaları deneyden alınan veriler doğrultusunda incelemiştir. Çalışma sonucunda elektrolizörün verimi %54 olarak enerji verimi ise %28 ile %42 arasında değiştiği gözlem yoluyla tespit etmiştir. Çenk (2006) yılında bor madenin çeşitli kimyasal işlemlerden sonra elde edilen sodyum borhidrür'ü doğrudan kullanılmasıyla elektrik enerjisi üreten yakıt hücresini, laboratuvar ortamında kurmuştur. Hafif dayanıklı ve iletkenliği yüksek olan pipo ve plaka üretimi incelenmesi hususunda öneride bulunmuştur. Biliroğlu (2019) bu çalışmada, seri hibrit elektrikli bir otobüs için modelleme ve benzetim çalışmaları ile birlikte, aracın kontrolüne yönelik algoritma çalışmaları tamamlamıştır. İçten yanmalı motorun, yol ile mekanik bağlantısının kesilmesi ve bir elektrik motoru ile jeneratör seti olarak kullanılması durumunda, uygun değer tork-hız noktasında kontrolü sonucunda ortalama olarak daha verimli noktalarda çalıştığı sonucuna ulaşmıştır.

Kaplan (2010) yapmış olduğu çalışmada, Nafion 115 malzemesi kullanarak membran, anot ve katot malzemesi için 304 paslanmaz metalik tel, katalizör için iletkenliği daha yüksek olması için bakır plaka kullanılarak PEMYH elde etmiştir. Yakıt hücresinden elde ettiği verimi incelemiş olup, katalizör olarak kullanmış olduğu bakır katalizörün enerji değeri platine göre düşük olduğu gözlemlemiştir. Özbasan (2009) çalışmasında saatte 3kg hidrojen gazı üretebilen ve depolayabilen hidrolik sistem destekli bir sistemin termodinamik modellenmesi ve enerji sürdürülebilirlik analizini sunmuştur. Çalışmasında şu parametreler dikkate almıştır. Hidrojen gazının kütleli debisi (3kg/saat), Hidrojenin sisteme giriş basıncı (1-200 bar), depolama basıncı (200-900 bar), çevre sıcaklığı (25°C), Elektrik motoru verimi (0,9), Mekanik verim (0,95), Kompresörün politropik verimi (0,90). Hidrojen gazı sıkıştırma ve depolama sisteminde teorik olarak minimum enerji tüketimi için çok aşamalı ara soğutmalı kompresör sistemi seçilmeli ve hidrojen gazının sisteme giriş basıncı yüksek olması gerektiğini belirtmiştir. Kireç (2009) ve İçingür, (2011) benzer çalışmalar yapmış olup Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili'nin (PEMYP) taşıtlarda yaygın olarak kullanılması performansına etki eden (sıcaklık, nem ve basınç) parametreleri incelemiştir. Çalışmasında membran malzemesi için Nafion 115 ve paslanmaz çelik ss316 malzemesi kullanarak iki farklı yakıt hücresi elde etmiştir.

Kireç çalışmasında alüminyum membran'dan maksimum 2,19V, paslanmaz çelik ss316 membranda ise maksimum 3,12V enerji elde etmiştir. İcingür ise aynı çalışmasında Nafion115 için maksimum 2,98V, paslanmaz çelik ss316 membranda ise 3,12V elde etmiştir. Urul (2012) yakıt hücresi ve bir enerji depolama sisteminin hibrit olarak kullanımı ve en iyi verimi almak için bulanık mantık kontrol kullanmıştır.

Akfidan (2010) yürütmüş olduğu projede güç kaynağı 2kW'lık yakıt pilinde ve yardımcı enerji kaynağı olarakta 1,5kW'lık bataryaya sahip ve hidrojen gazını %99 saflıkta 17 bar basınçta depolayabilen 6 adet metal hidrür tanka sahip olan yolcu taşıma aracının, MATLAB ortamında modelin sonuçları kıyaslamıştır. Köse (2012) çalışmasında yakıt hücresinde reaksiyon sonucu ortaya çıkan karbondioksit oksijen ve hidrokarbonlarda azalma meydana gelmiştir. Moment 1250d/dk da %75 hidrojen gazı dizelere göre %8,3 artmış olup güç değeri ise 2250d/dk hidrojen oranı %17 artmıştır. Termik verim %2,5 ve hidrojen değeri ise %24 artmıştır. En düşük CO, CO₂, HC ve NO_x emisyonları dizel çalışmasına göre sırasıyla 2250 d/dk'da %0,013 ile %2,5 hidrojen oranında, 2500 d/dk' da %7,46 ile %7,5 hidrojen ilave oranında, 1250d/dk'da 10 ppm ile %2,5 hidrojen ilave oranında ve 1000d/dk'da 1092ppm ile %7,5 hidrojen ilave oranında elde edilmiştir.

Ateş (2008) yaptığı tez çalışmasında, yapay sinir ağları tabanlı bir kontrol algoritması kullanarak, hibrit bir yakıt hücresi/ultra-kapasitör taşıt sisteminin enerji yönetimi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen kontrol algoritması ile birlikte yakıt hücresinin yapısı için uygun bir sürekli hal yüklenmesinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte ultra-kapasitörün şarj seviyesinin kontrolünün sağlanması, bu sayede de taşıt performansının ve enerji tasarrufunun artırılması hedeflenmektedir. Akansel (2012) yaptığı çalışmada LiNH₂/MgH₂ karışımına farklı katalizörler kullanarak, kullanmış olduğu katalizörlerin, örneklerin hidrojen gazının depolama performansı üzerindeki etkileri inceledi. 2/1,1sitokiyometrik oranında karıştırılan LiNH₂/MgH₂ karışımına katalizör olarak ağırlık olarak %5 Ca(BH₄)₂ eklenerek öğütüldü ve aynı öğütme koşulları ile katalizörsüz olarak öğütülen karışıma göre 16°C daha düşük sıcaklıkta hidrojen salım reaksiyonunu gerçekleştirdiği gözleidi. Eker (2012) tez çalışması, tek hücreden oluşturduğu PEMFC türünü kullanılarak simülasyon ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasını içermektedir. PEMYP'nin sıcaklığının artışıyla beraber, yakıt hücresinin de performansı arttığını görmüştür. Keskin (2014) çalışmada da enerji yönetim

stratejisinin PEMYP taşıt sistemine adapte edilmesini içeren bir uygulama gerçekleştirmiştir. Yapılan sistemde batarya ise anlık yük değişimlerini karşılamak ve frenleme enerjisini kazanmak amacıyla kullanmıştır. Çift yönlü DA-DC dönüştürücü ek bir maliyet getirmekle birlikte sistemin performansını ve verimliliğini arttırdığı görülmüştür.

Bilen (2015) çalışmasında saf hidrojen elde edebilmek için katalizör tasarlamıştır. Elektrolizör ünitesinde elektrotlar arası yüzey alanı ve elektrot arası mesafeyi artırarak üretilen hidrojen miktarının da bununla paralel olarak arttığını gözlemlemiş, bununla ilgili teorik hesaplamalar yapmıştır. Doğu (2014) yaptığı çalışmada hidrojen üretimi için güneş paneli destekli PEM elektroliz sistemi tasarlamıştır. Yapılan ilk deneyde ışınlam şiddeti 810W/m^2 ölçülürken daha sonraki süreçte güneşin pozisyonundan dolayı ışınlam şiddeti 897W/m^2 ye kadar çıktığı gözlemlemiştir. Bu gözlenen değerler 3,17-3,2A arasında ölçülmüş, akıma bağlı olarak gerilim 4,6 ve 4,7V arasında ölçümler yapmıştır. Cihaz maksimum 2A akım çektiğinde $65\text{cm}^3/\text{dak}$ debisinde hidrojen üretebilmektedir. Burada 3,1-3,21A arasında akım çekilmiştir. Panel sıcaklığı arttıkça panel gücü düşmüş ve üretilen hidrojen miktarı başlangıçta $51,6\text{cm}^3/\text{dak}$ iken deney sonunda sıcaklığın da etkisiyle $40\text{cm}^3/\text{dak}$ seviyelerine düştüğü görülmüştür. Demirci (2010) tezinde, içten yanmalı bir motorun ve bir hibrit aracın motoru MATLAB ortamında modelleme ile denetimi yaparak, içten yanmalı motorun ve hibrit elektrik motorun yakıt tüketimi karşılaştırılması amaçlamıştır. Sonuç itibarıyla modellenen hibrit araç hem dur-kalk, hem çıkış-iniş koşullarında önemli bir yakıt tasarrufu yapıldığı görülmüştür. Efendioğlu (2013) deney için gerekli verilere bağlı kalarak "Merkezi Bileşik Tasarım Yanıt Yüzey Yöntemi" nin çeşitlerinden olan "Yüz Merkezli Bileşik Tasarım Yöntemi" ne uygun bir şekilde veriler programda yerine koymuştur. Netice olarak burada $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde "Oran" faktörünün "Güç Yoğunluğu" nu maksimum şekilde etkilediğine dair elimizde yeterli kanıt elde etmiştir.

Türe (2006) çalışmasında, hidrojen üretimi için, fotovoltaik sistemin ve %10 verim ile çalışan bir elektroliz hücresi karşılaştırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakların içinde halen en ucuz ve en verimli yöntem olarak foto elektroliz, hidrojen enerjisi görülmektedir. Alniak ve Ark (2008) yaptıkları araştırmalar sonucunda hidrojen depolama tanklarının imalatı ile ilgili yurtdışında birçok çalışma yapıldığını görmüşlerdir. Çalışmalarında ise alüminyum malzemeden üretilen basınca dayanıklı hidrojen depolama tankının imalatını incelemişler ve tankların

imalat yöntemleri ve kullanım alanları ile ilgili örnekler verilmişlerdir. Alüminyumun 6000 serisinin üç farklı çeşidini kullanarak farklı ebatlarda tanklar imal etmişlerdir. En ideal malzeme, ısıtma işlem durumu, tank formu, sargı ekli ve malzemesi konularında çalışmalara devam edilmesi hususunda öneride bulunmuşlardır.

Silver (2008) çalışmasında PEMYP katodundaki Oksijen İndirgeme Reaksiyonunun (OİR) elektro katalizinde kullanılabilmek için ucuz ve etkin katalizörlerin araştırılması amaçlamıştır. Sonuç olarak yapılan bu çalışmada sentezlenen katalizörlerden PtCuFe/C-611 ve PtAgFe/C-611 katalizör türlerinin yakıt hücresindeki katotta alternatif katalizörler olarak kullanılabileceğine tespitine varmıştır. Alteneh (2012) çalışmasına bataryalı golf arabasının güneş paneli ve hidrojen ile çalışan yakıt pillerinden beslenebilmesi için gerekli tasarımlar yapmıştır. Batarya belirlenen akım değerinden aşağıya düşünce 36V'luk yakıt pilli devreye girer. Bu sistemde ilk olarak yakıt pili çıkışını araçtaki bataryaların gerilimini 36 V'a kadar yükseltebilen bir DA/DC dönüştürücü kullanılmıştır. Geliştirilen bu devreler araç üzerinde test edilmiştir. Üzerinde çalışılan araç üzerinde 6V'luk 6 adet batarya barındırmaktadır. Araç üzerinde kullanılan 3Kw gücünde seri bir şekilde sargılara sarılmış, bir doğru akım motoruna sahiptir. Türkmen (2006) tezinde nikel alüminyum kaplı yumuşak çelik, nikel kaplı yumuşak çelik, nikel-çinko karışım kaplı yumuşak çelik ve çıplak yumuşak çelik elektrotlarında %3,5'luk NaCl çözeltisinde hidrojen gazı incelemiştir. Sonuçta yumuşak çelik yüzeyinin nikel ile çalışma koşullarda, aşırı gerilim ve daha düşük direnç ile daha az elektrik tüketerek daha fazla hidrojen gazı ürettiğimiz Fe/NiZn elektrotu elektroliz sistemine uygun elektrot olarak görmüştür. Çalışkan (1995) çalışmasında altın elektrotun asidik ortamda krotil alkol (2-buten-1-ol) içindeki elektrokimyasal özellikleri dönüşümlü voltametri metodu ile incelemiştir. Alkol oksidasyonuna derişim, potansiyel tarama hızı, sıcaklık ve pH gibi parametrelerin etkisi incelemiş, elektroliz ürünleri belirlenmiş ve reaksiyon mekanizması önermiştir.

Üçler (2008) Entegrasyonlu yakıt hücresi sıcaklığı, çalışma basıncı, değişik besleme gazlarının ve karbon/buhar oranı, kullanılması parametrelerinin etkileri incelemiş. Ayrıca belirtilen parametreler için enerji ve maliyet analizleri yapmıştır. Çalışılan aralıkta karbon/buhar oranı ve reform er sıcaklığı artışına bağlı olarak yıllık toplam maliyetin azaldığı, çalışma basıncının artmasına ve buna bağlı bir oranda arttığını tespit etmiştir. Oral (2005) tez çalışmasında, seçilen bazı temel parametrelerin

PEMYP etkilerinin; oluşturulan teorik model üzerinde belirlenerek ve sonuçlar dikkate alınarak modelin uygun değer çalışma aralığının iyi belirlenmesi amaçlamıştır. Sonuç itibariyle elde edilen bulgulara göre özellikle hava basıncı model performansında en etkili parametre olmuş, ancak kompresörün devrede olmadığı 1 bar basınçta performansta önemli düşüşler görmüştür. 1 bar'dan sonraki basınç değerlerinde ise performansta %54 - %75 seviyesinde bir artış meydana gelmiştir. Akbulut (2007) Yakıt hücreleri ve yakıt pilli hibrit sistemlerle elektrik üretimi konusu üzerine çalışmıştır. Yakıt pilleri barındıran bir hibrit santraller sistemi incelenmiş ve örnek hibrit santralin MATLAB programında benzetimi yapılarak sonuçlar incelemiştir.

Şenaktaş (2005) Hidrojen gazı ve özellikleri, hidrojen gazının depolanması, araçlarda kullanılmasını araştırmıştır. Çalışmada, hidrojen gazının yakıt hücresinde kullanımı ve doğrudan elektrik enerjisi üretimi üzerinde durulmuş; bu nedenle sayısal bir örnek yapmıştır. Bu incelemede hidrojen miktarı $5,97\text{cm}^3/\text{s}$ tüketim sonucunda, 23,4W elektrik gücü üretildiğini bulmuştur. Aynı zamanda 90 BG gücündeki bir içten yanmalı motorun motoru dikkate alınarak bunun için gerekli dizel, LPG, benzin, hidrojen ve doğalgaz, yakıtların tüketimi maliyet hesaplamaları belirlenmiştir. 90BG' lik araç için doğalgazda $1,409\text{kg/s}$, hidrojen $0,563\text{kg/s}$, benzinde $1,568\text{kg/s}$, dizelde $1,849\text{kg/s}$, LPG' de $1,551\text{kg/s}$, ve olduğu görülmektedir. Buna göre aynı güç için hidrojene göre diğer yakıtların tüketim miktarları, benzine 2,785 kat, LPG 2,7549 kat, doğalgaz 2,5 kat ve dizelde de 3,284 kat daha fazla kullanması gerektiğini tespit etmiştir. Ankaralı (2004) Hidrojen Enerjisi ve Hidrojen Pilleri adlı yüksek lisans tezinde, hidrojen gazı üretim maliyetleri karşılaştırmış olup, yakıt pillerinin günümüzde ulaşılmış olduğu teknolojiyi özet olarak sunmuştur.

Strahl (2017) PEMYP'nin çalışması için uygun sıcaklık kontrolü, yakıt hücresi performansını optimize etmek için çok önemli bir parametre olduğu tespit etmiştir. Karahan (2014) Hücre sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Anot ve katot taraflarında saf hidrojen ve oksijen kullanılmıştır. Tüm deneyler için 5 santimetrekare aktif tek hücreli bir yakıt pili kullanmıştır. Sonuçlar farklı sıkıştırma basınçlarının performans üzerindeki etkilerini göstermiştir. Choi (2017) Yakıt hücresinin nemliliğini kontrol etmek için yeni tesisat dengesi birisi olan bir kabarcık nemlendiricisi kurmuştur. Sonuç olarak, önerilen bulanık kontrol cihazının PEMYP'nin çıkış gücünü etkin bir şekilde arttırdığını göstermiştir. Obut (2010) Bir PEMYP geliştirilmekte ve geliştirilen yakıt

hücresi modeli, kütle, momentum ve enerji korunumu ile birlikte elektrokimyasal reaksiyonlar, membran içerisindeki suyun taşınımını ve sıvı fazdaki suyun oluşumu ve taşınımını gibi olayları içermektedir. Yapılan sayısal analiz çalışmalarının sonucunda, hücre özellikleri ve çalışma koşullarının hücre performansını ve sıcaklık, reaktant derişimi, sıvı fazdaki su gibi değişkenlerin yakıt hücresi içerisindeki dağılımlarını nasıl etkilediği gösterilmiş ve hücre performansının iyileştirilmesine yönelik bilgiler ortaya konulmuştur.

Zendehelehshekarasht (2016) çalışmasında fotovoltalıklarden elde edilen elektrik kullanılarak sudan elektroliz yöntemiyle elde edilen hidrojenin yakıt pilinde kullanılması ile tekrar enerjiye dönüştürölmesine yönelik sistemin matematik modellemesi ve sayısal analizini yapmıştır. Yılmaz ve arkadaşları (2016-2017) Yakıt pillerinin çalışması hakkında bilgi vermiş olup, kullanılan malzemelerin özelliklerini ve yakıt hücresinde meydana gelen voltaj kayıplarını anlatmışlardır. Yakıt hücreli araç teknolojisi ve PEMYP'nin araçlarda kullanılabilirliğinin karşılaştırmasını yapmış olup örnekler ile değerlendirmişlerdir. NaBH₄ kullanılan bir yakıt hücresi tasarlayıp, hücredeki gerilim değeri DC olarak 5,6V ve akım değeri 0,3A ölçmüşlerdir. Güce ve ideal voltaja göre ortalama verim değeri sırasıyla % 41,5 ve % 82,2 olarak bulmuşlardır.

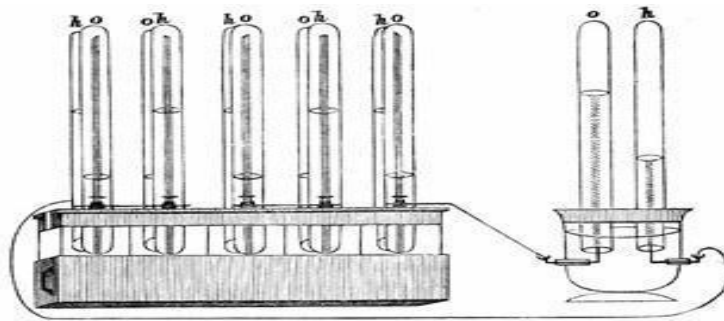
3. YAKIT HÜCRELERİ

Hücrenin anot ve katot bölmelerinde reaktanların kimyasal tepkimeler sonucu açığa çıkarmış olduğu elektrik enerjisi üreteçlere yakıt hücresi denir. Bunları seri halde bağlanması halinde yakıt pili meydana gelmektedir.

3.1. Yakıt Pili Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

Yakıt pillerinin teorik altyapısı 1838 yılında Alman bilim adamı Christian Friedrich Shönbein tarafından bulunmuştur. William Robert Groven'in 1843 yılında yapmış olduğu ters elektroliz işlemi sonucunda ıslak hücre adını verdiği daha sonraki yıllarda yine William Robert Grove tarafından yakıt pilli adını vermiştir. Yeni bir teknoloji görünümüne sahip olmasına rağmen yaklaşık olarak 170 yıllık bir geçmişe sahiptir. İlk yakıt pili 12 Amperlik akım üretirken, volt değeri ise 1,8 gerilim üretmektedir (Bıyıkoglu, 2003).

1800 yılında, bilim insanları William Nikolas ve Anthoney Carlisle, elektriği kullanarak suyun atomlara oksijen ve hidrojen olarak ayrılabilceğini kanıtlamışlardır. Ancak su ve elektrik üretmek için iki reaktanın birleştirilmesi gerektiğinin farkına varamamışlardır. Birkaç elektrotu seri olarak birbirine bağlayan Grove, bileşimi doğru bir şekilde ayarlandığı takdirde suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini bulmuştur. Grove, ıslak bataryası ismini verdiği, ilk YP olarak tanımlanabilecek Şekil 3.1'de gösterilen mekanizma ile ortaya koymuştur. (Bıyıkoglu, 2003).



Şekil 3. 1 W. R. Grove' nin geliştirdiği ilk yakıt pili (A. Bıyıkoglu, 2003)

Grove'un yapmış olduğu çalışmalardan sonra birçok araştırmacı yakıt pilinin gelişmesi için çalışmalar yapmışlardır. Lord Rayleigh 1882 yılında platin elektronların performansını artırmak için elektrot gözenekleri arasında gaz ve sıvı işlem kesitini artırmış, yakıt olarak hidrojen dışında kömür gazı da kullanmıştır. Kimyacı olan Ludwing Mond ve Carl Langer 1889 yılında grovenin yapmış olduğu çalışmaları tekrarlamıştır. Bu çalışmalar sonucu yakıcı reaktanı oksijen yerine havayı, yanıcı reaktanın yerine kömür gazını kullanarak %50 verimle ve 1,5W gerilim üreten yakıt pilini geliştirmiştir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2005).

NASA 1950 yılında yakıt hücresi teknolojisine önemli yatırımlar yaparak gelişim sağlamasında önemli cabalar sarf etmiştir. Yakıt pillerinin hafifliği, sesiz ve titreşimsiz çalışması, yüksek verim ve emisyon olarak sadece su üretmelerinden dolayı uzay çalışmalarında kullanılması düşünölmeye başlamıştır. Bu tür avantajlar göz önünde bulundurulduğunda ilk olarak uzay çalışmalarında General Elektriğin üretmiş olduğu proton elektrolit membranlı yakıt pili Geminin uzay aracında kullanılmıştır. Şekil 3.2.'de NASA'nın Gemini uzay aracında kullanmış olduğu proton değişim zarlı yakıt hücresi görölmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2005).



Şekil 3. 2 . Gemini Uzay Gemisinde Kullanılmış Olan Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2005)

Friedrich Wilhelm Ostwald 1893 yılında yakıt pilleri üzerine çalışmalar yapmış. Yakıt pillerinin teorik olarak çalışması üzerine yakıt pili birleşenlerinin (anot, katot, elektrot, elektrolit ve reaktanlar) işlevleri deneysel yöntemlerle belirlenmiştir. 1984 yılına gelindiğinde kömür türevi yakıtlarla çalışan yakıt pili yapmıştır. Francis Tomas Bacon ise 1932 yılında yakıt olarak oksijen yakıcı olarak oksijen elektrolit olarakta alkalın kullanmıştır. Maliyeti yüksek olmasına rağmen

Pratt&Whitney firması Bacon'un üretmiş olduğu alkali yakıt pilini Apollo uzay aracında kullanılması için lisans vermiştir. (Yıldızbilir, 2006).

3.2. Yakıt Pili Teknolojisi

Yakıt pilleri, kullandıkları yakıtın, kimyasal reaksiyon sonucu elektriğe çevirebilen cihazlardır (Brouver, 2010). Yakıt pilleri; temiz olması, doğaya zarar vermeyen ve verimi yüksek yenilenebilir enerji teknolojileridir. Hidrojen ve oksijen reaktanları arasındaki kimyasal reaksiyon sonucunda elde ettiği yüksek enerjiye ulaşabilen Yakıt pilleri, elektrokimyasal piller olarak da tanımlanır. Her hangi bir işleme ihtiyaç duyulmadan bataryada herhangi bir zayıflama durumu olmaması, içerisine çeşitli yakıtlar (N, CH₄, H ve LPG) doğrudan beslendiği sürece kesintisiz şekilde çalışan cihazlardır. Türbin ve buhar kazanı kullanmadan elektrik üreten üreteçleridir. Bir buhar kazanı veya türbin kullanılmadan, sadece kimyasal madde kullanılarak elektrik enerjisi üretmektedirler. Prensip olarak bir yakıt pili batarya işlevi görmektedir. Yakıt pilleri, petrol ve türevi yakıtların yanması sonucu doğaya zarar vermezler. Yakıt pillerinin tümü çalışma sıcaklıklarına göre emisyonları su veya buhar olarak açığa çıkar. Yakıcı madde olarak oksijen kullanılıyorsa reaksiyon sonucunda su, eğer hava kullanılıyorsa azot ve su açığa çıkmaktadır. Yakıt pillerinin çalışması esnasında meydana gelen ısıyı hücre içinde oluşabilecek suyu buharlaştırarak sistemin tıkanmamasını sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda çalışan yakıt hücreleri için soğutucu fanlar kullanılması gerekmektedir.

3.2.1. Yakıt Pili Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt pilleri diğer üreteçlere (örneğin akü) göre birçok olumlu yönü vardır.

Bu avantajların bazıları aşağıdaki gibidir:

- Enerji olarak yüksek verime ulaşırlar, sınırsız yakıt kaynaklarla sahiptirler.
- Sessiz ve bağımsız elektrik enerjisi üretirler.
- Yakıt pillerinin şarj edilmeye ihtiyacı yoktur.
- Tepkime sonucu su ve ısı vermeleri nedeni ile doğaya zarar vermezler.

Yakıt pilinin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

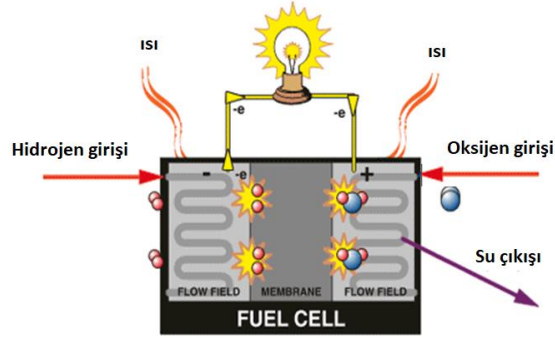
- Yakıt Pilleri DC gerilim üretmektedirler. Ev cihazlarında kullanılabilmesi için DC- AC çeviricilere ihtiyaç duyarlar.
- Yakıt Pilleri hava pompası, yakıt pompası gibi kontrol elemanları ile çalıştılarından ürettikleri gerilimin bir kısmını bu elemanları çalıştırmak için kullanırlar.
- Yakıt pili içerisindeki membran pahalı olduğundan maliyeti yükseltmektedirler.

3.3. Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi

Yakıt pilleri, yüksek verime sahip olan ve aynı zamanda doğaya zarar vermeyen elektrokimyasal bir reaksiyon sonucunda doğrudan elektrik enerjisi üreten enerji dönüşüm teknolojileridir. Doğrudan yanama olayı olmadığı için emisyon olarak temiz enerji kaynağıdır (Yılmaz ve arkadaşlar, 2017).

Yakıt hücresi, iki elektrot arasına (anot ve katot) elektrotları sıkıştırılmış bir elektrolitten meydana gelmektedir. Anot elektrotuna yakıt elektrotu katot elektroduna hava elektrotu olarak tanımlanabilmektedir. Hidrojen anot elektrodan, oksijen ise katot elektrodan elektron alışverişi sonucunda su ve ısı üretimi oluşur. Dışardan yakıt olarak kaynak sağladığı sürece Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi elektrik enerjisi üretmeye devam ederler. Yakıt pillerindeki gerilimi yükseltmek için yakıt hücreleri yüzey alanları artırıp, birbirlerine seri bir şekilde bağlanması halinde yüksek enerji elde edilir.

Elektroliz reaksiyonunda suya doğru akım uygulanmakta ve bunun sonucunda su, oransal hacimlerde oksijen ve hidrojene ayrışmaktadır. Yakıt pillerinin çalışma prensibi de bu reaksiyonun tersi bir kimyasal reaksiyondur. Suyu elektroliz ederken elektrik enerjisi uygulanarak oksijen ve hidrojene ayrıştığına göre, mantıksal olarak bu işlem ters yönde düzenlendiği takdirde, yani hidrojen ve oksijen reaksiyonu sonucunda su ve ısı elde edilirken, elektrik enerjisi de ortaya çıkmaktadır. Saf hidrojen bulunmadığı takdirde yakıt pillerinde kendisinden hidrojen elde edilen hidrokarbonlar da kullanılabilir. Fakat bunlar kullanıldığı takdirde verim düştüğünden dolayı tercih edilmemektedir.



Şekil 3. 3 Yakıt Hücresi' nin Çalışma prensibi (URL 2)

Hidrojen yakıtı, yakıt hücresinin anot kısmında girerken, oksijen veya hava katot bölümünden girer. Katalizör yardımıyla, hidrojen atomu, katoda farklı yollardan gidecek olan bir proton ve bir elektron olarak ayrılır. Proton, elektrolitin içerisinden geçerken elektronlar, katoda dönüp hidrojen ve oksijen ile birleşerek su molekülü oluşturmadan önce bir elektrik akımı oluştururlar. Yakıt hücresinde anotta bulunan hidrojenin katalitik oksidasyonu ve katotta bulunan oksijenin indirgenmesi ile elektrotlar arasında potansiyel fark oluşur. Eğer elektrotların arasında bulunan ve yalıtımı sağlayan elektrolit, iyonik kütle ve Şarj aktarımına izin verirse, bu oluşan potansiyel fark dış bir devrede kullanılabilir.

Kullanıldığı takdirde, ürün olarak su elde edilir ve bu reaksiyonun kimyasal enerjisi, kutuplaşma ve direnç kayıpları dolayısıyla, elektrik ve ısı olarak serbest bırakılır. Yakıt hücresinin iki elektrotuna dış devreden bağlanan iletken yardımıyla oluşan elektrik hücreden alınır. Bu iletkeniden geçen elektronların yarattığı elektrik enerjisi DC karakterlidir. Bunun sonucunda ise toplam verim yüksek olduğu gibi elektriksel verim de yüksek olabilir. Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen gazı, doğalgaz, metanol veya etanol kullanılabilirken, oksidan olarak oksijen gazı veya hava kullanılabilir. Eğer yakıt ile oksidan çifti hidrojen ve oksijen gazlarından oluşturulursa, yan ürün olarak saf su elde edilir. Yakıt pillerinin hareketli kısımları bulunmamaktadır. Bu sebeple gürültü ve titreşim seviyelerinin çok düşük olmasının yanı sıra güvenilirlikleri yüksek ve maliyetleri düşüktür.

3.4. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri yakıt türüne, çalışma sıcaklığına ve kullandıkları elektrolit cinsine, göre farklı isimlendirilirler. Yakıt hücresi çeşitleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

Yakıt hücreleri, yakıta göre:

- Proton elektrolit yakıt hücresi
- Alkali yakıt hücresi
- metanol yakıt hücresi
- Erimiş karbonatlı yakıt hücresi
- Fosforik asit yakıt hücresi
- Katı oksitli yakıt hücresi

Sıcaklıklarına göre:

- Yüksek sıcaklıkta çalışan hücreler (500 – 1000 °C)
- Orta sıcaklıkta çalışan hücreler (100 – 500 °C)
- Düşük sıcaklıkta çalışan hücreleri (0 – 100 °C)

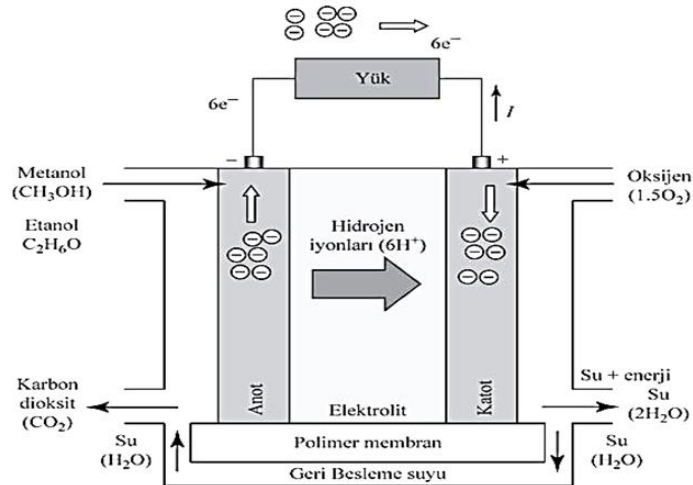
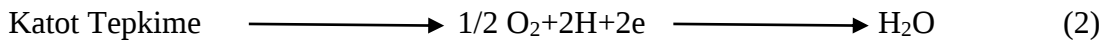
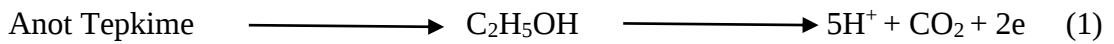
Elektrolite çeşidine göre:

- Fosforik asit yakıt hücreleri
- Alkali elektrolit yakıt hücresi
- Katı polimer yakıt hücresi
- Katı oksitli yakıt hücreleri
- Erimiş karbonatlı yakıt hücreleri

Olarak sınıflandırılmaktadır (Oğuz, 2006).

3.4.1. Doğrudan Metanollü Yakıt Pili (DMYP)

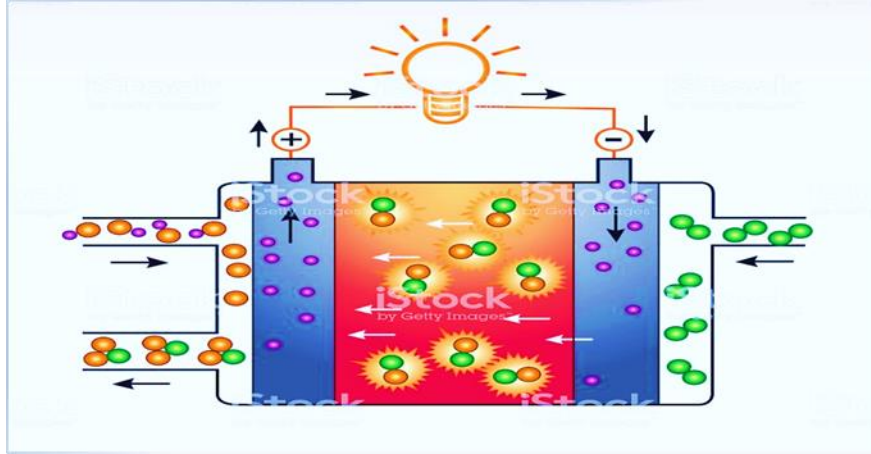
Bu pillerde membran polimer malzemeden imal edilip, basit yapıdadırlar. Çalışma sıcaklıkları 50°C-90°C arasındadır. Verimleri %40' a kadar çıkabilmektedirler. Şekil 3.4.'de çalışma şekli verilmiştir. Anot elektrotta sulu metanol çözelti, Hidrojen protonları ile birlikte polimer zardan katot elektroda doğru geçiş yapar. Bu geçiş olayı yaşanırken anot elektrot tarafından hidrojenlerinden ayrılmış olan metanol CO₂ 'ye dönüşür ve anotu terkeder. Hidrojen iyonları dışardan bağlanan tel aracılığıyla anot tarafından katot tarafına geçer ve böylelikle elektrik üretimi meydana gelir.



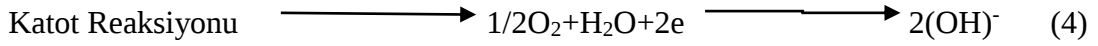
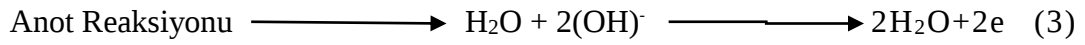
Şekil 3. 4. Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Hücresi (URL 8)

3.4.2. Alkali Yakıt Pili (AYP)

Nasa'nın tarafından (Apollo) uzay aracında kullanılan en eski yakıt pillidir. Elektrot türü olarak KOH kullanılır. Alkali yakıt pili verimleri %70'leri bulmaktadır. Bu pillerin dezavantajları membranda CO₂ birikimidir. Çünkü alkali ortamda CO₂ KOH ile reaksiyona girerek karbonat oluşumuna neden olmaktadır. Düşük sıcaklıktaki alkali piller oda sıcaklığında uzun süre çalışabilir ve yüksek verim yüzdesi sağlanabilir. Alkali yakıt hücresi çalışması aşağıdaki Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

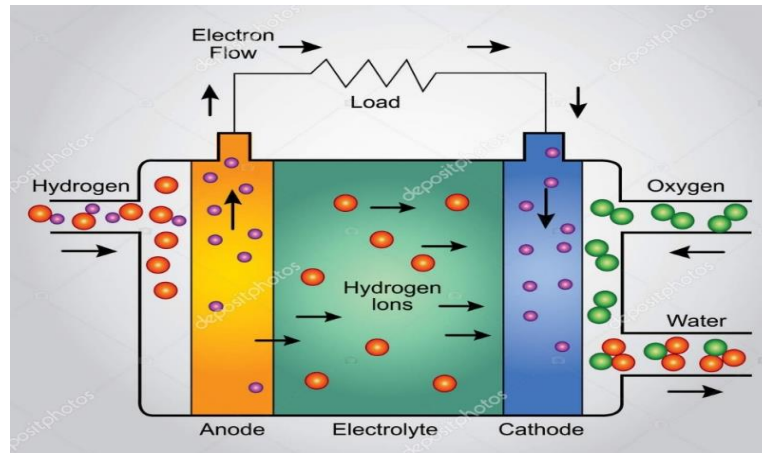
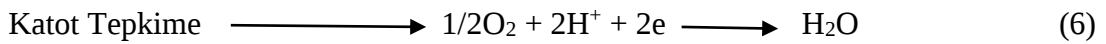
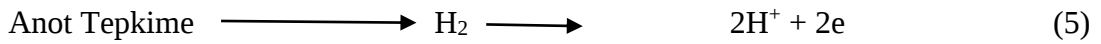


Şekil 3. 5 Alkali Yakıt Hücresi (URL 9)



3.4.3. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)

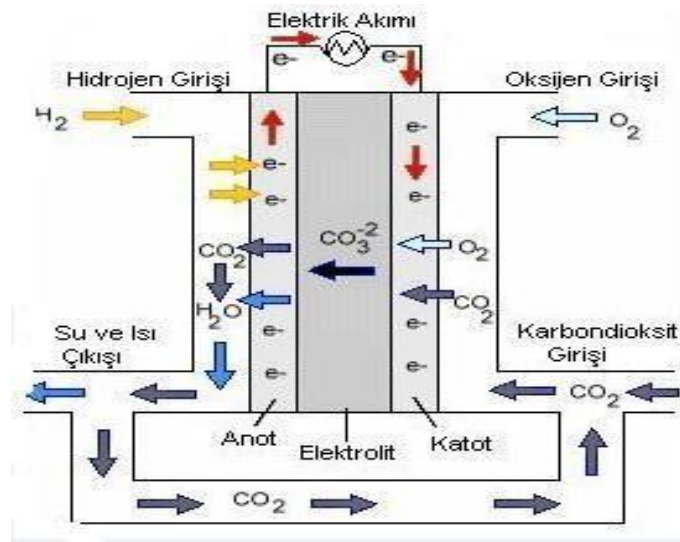
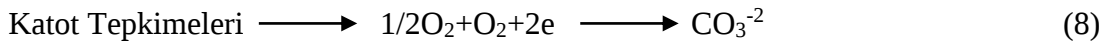
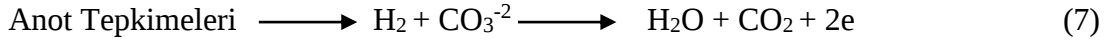
Bu yakıt pili türünde sıvı fosforik asit elektrot olarak kullanılmaktadır. Verimleri yaklaşık olarak %41 civarındadır. Çalışma sıcaklıkları 150°C - 200°C arasındadır. Katalizör malzemesi olarak platin kullanılır. Bu pil çeşitlerinde CO birikimi problemi yaşanmaktadır. Yakıt olarak LPG ve doğalgaz kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da fosforik yakıt hücresi reaksiyon ve elektrik üretimi verilmiştir.



Şekil 3. 6.Fosforik Yakıt hücresi (URL 10)

3.4.4. Erimiş Karbon Yakıt Pilleri (EKYP)

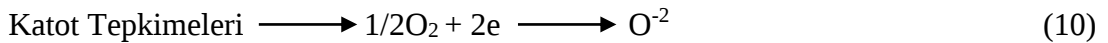
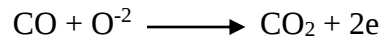
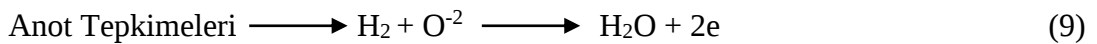
Bu piller çalışma sıcaklıkları 600°C-650°C arasında olan pillerdir. Elektrolit malzemesi olarak katot kısmında ise nikel oksit ve anot kısmında nikel kullanılır. Hidrojen iyonları ve karbonat iyonları ve ile elektrolite birleşerek su ve CO₂ meydana getirirler. Maksimum verimleri %50 seviyesine kadar ulaşabilmektedir. Aşağıda Şekil 3.7.de erimiş karbonat yakıt hücresinin çalışması verilmektedir.

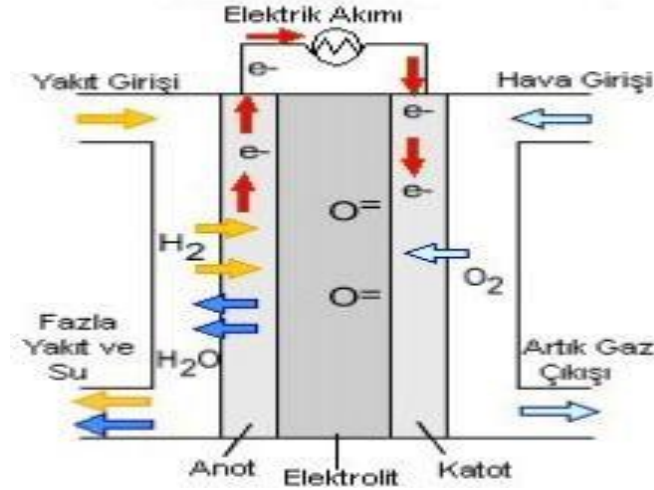


Şekil 3. 7.Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (Appleby ve Foulkes, 1989)

3.4.5. Katı Oksitli Yakıt Pilleri (KOYP)

Bu pil çeşidi çalışma sıcaklığı 1000 °C ye ulaşabilen pillerdir. Elektrolit olarak katı gözeneksiz Y₂O₃ barındıran zirkonyumdan meydana gelmektedir. O⁻² iyonları katı bir elektrolit üzerinden anota transfer edilir. Bu iyonlar anotta H₂ ve CO barındıran yakıt ile bir araya gelerek elektron oluştururlar. Şekil 3.8’de katı oksitli yakıt hücresinin reaksiyonu ve çalışması verilmektedir.

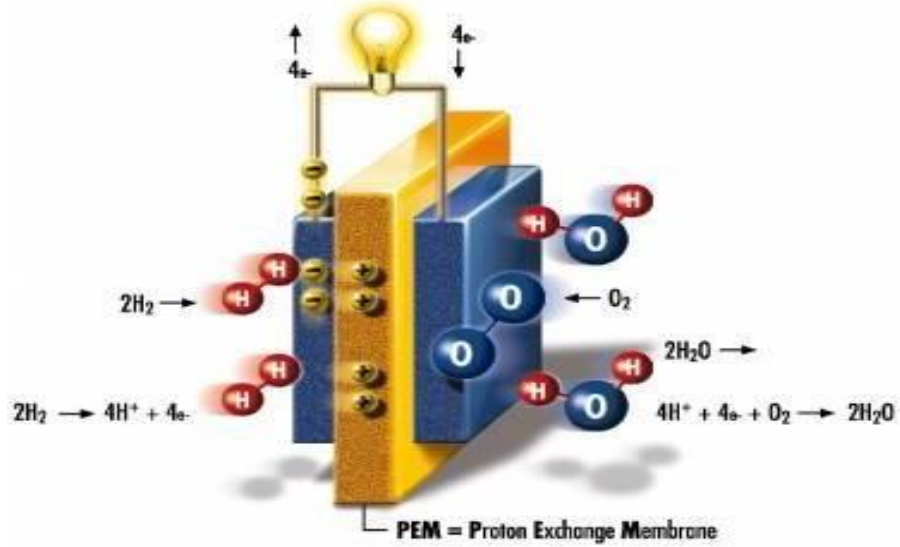




Şekil 3. 8.Katı Oksitli Yakıt Pili (Appleby ve Foulkes, 1989)

3.4.6. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMYP)

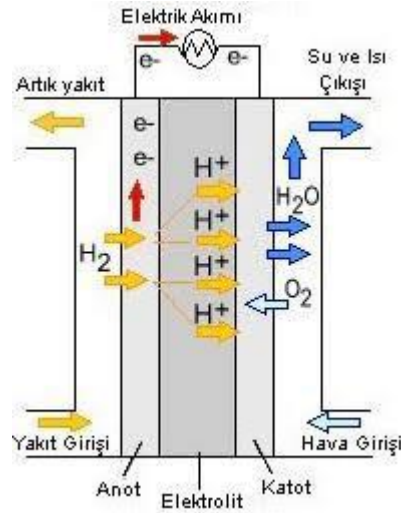
PEMYP 1960'lı yılların başlarında General Elektrik tarafından keşfedilmiştir. Aynı yüzyılın ortalarında PEMYP NASA'nın Gemini programında kullanılmıştır.



Şekil 3. 9.PEMYP Üzerinde Gerçekleşen Reaksiyonlar (URL 11)

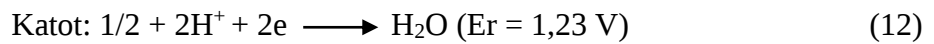
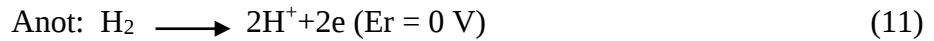
Yukarıda Şekil 3.11'de de görüldüğü gibi hidrojen, yakıt hücresinin anot kısmında bulunan kanaldan geçerek gözenekli elektrot yüzeyine ulaşır. Hidrojen, gözenekli elektrot yüzeyinden geçiş yaparken, platinin aktif yüzeyine temas etmesi sonucu tepkime ile bir elektronunu kaybederek iyon halini alır (Sarıdemir, 2003).

İyon halini alan hidrojen, elektrottan elektrolite geçerek katotta ulaşır. Bu sırada platin yüzeyinde hidrojenin gazının vermiş olduğu elektronlar, dış devreden katotta giderken elektrik enerjisini meydana getirir. Yakıt pilinin katot tarafındaki kanaldan geçerek gözenekli elektrotla ulaşan oksijen buradan elektrolit elektrot ara yüzeyine ulaşır. Elektrolit -elektrot ara yüzeyinde, dış devreden gelen elektronlarla elektrolitten geçen hidrojen iyonları ve oksijen birleşerek aşağıdaki Şekil 3.10.reaksiyonla su oluşturur (Sarıdemir, 2003).



Şekil 3. 10. PEMYP

Anotta ve katotta elektrotta gerçekleşen kimyasal tepkimeler;



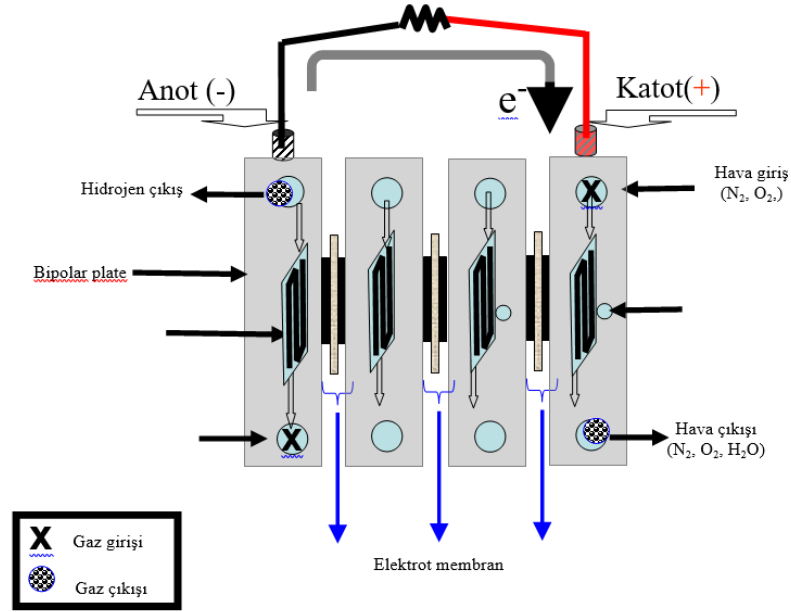
Meydana gelen su katot elektrot tarafındaki kanal yardımıyla pilden dışarı atılır. PEMYP'nin yapısında elektrolit olarak flor bulunur. Yapısında sülfonik asit gibi iyon değiştirebilen asidik membranlar tercih edilmektedir. Polimer elektrolit membranın yakıt hücresindeki görevi, proton elektronunun anottan katoda geçişini sağlamak ve katoda meydana gelen suyun anota geçmesini engellemektir. Yakıt hücresinde kullanılan bu membranlar, anot ve katot elektrot arasında gaz geçişini engellemelidir. Aynı zamanda yalıtkan malzeme imal edilmelidir. Ayrıca membranlar yüksek kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık için ince olmalıdırlar (Sarıdemir, 2003).

Tablo 3. 1. Yakıt pili çeşitlerinin karşılaştırılması (URL 11)

	PEMYP	DMYP	AYP	FAYP	EKYP	KOYP
Elektrolit	Katı Polimer Membran	Katı Polimer, sıvı alkalın	KOH	Sıvı fosforik asit	Sıvı erimiş karbonatlar	Y_2O_3 içeren zirkonya
Çalışma Sıcaklığı	80°C	50°C-90°C	65°C- 220°C	150°C-220 °C	650 °C	600°C-1000°C
Katalizör	Platinyum	Pt veya Pt/Ru	Platinyum	Platinyum	Nikel	Perovskites
Transfer edileniyon	H^+	H^+	H^+	H^+	CO_3^{-2}	O^{-2}
Yakıt ıslahı	Pil dışı	Gerekmez	Pil dışı	Pil dışı	Pil içi	Pil içi
Anot Gazı	Hidrojen	Su içinde metanol	Gerekmez	Hidrojen	Hidrojen Metan	Hidrojen-Metan
Katot Gazı	Saf Oksijen yada hava	Havadan oksijen	Saf oksijen	Havadan oksijen	Havadan oksijen	Havadan oksijen
Isı yönetimi	Soğutucu	Soğutucu	Soğutucu	Kojenerasyon	Kojenerasyon	Kojenerasyon
Verim	%35-60	%35-40	%50-70	%35-50	%40-55	%45-60

3.5. PEM Yakıt Pili Bileşenleri ve Avantajları

Polimer Elektrolit Membranlı yakıt pilini meydana getiren elemanlar Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Yakıt piline ait her bir bileşenin farklı görevleri bulunmaktadır. Yakıt pilli bileşenleri, gaz difüzyon katmanı, polimer membran, katalizör ve gaz difüzyon katmanındaki elektrotlardan meydana gelmektedir.



Şekil 3. 11. PEMYP Yakıt Pili Dizilişi ve Akış Şeması

3.5.1. Elektrolit Membran

Yakıt pillerinde kullanılan elektrolit membran 1959 yılında William T. Grubb tarafından tasarlanmıştır. Bu tasarım sonucunda bugünkü yakıt pili sistemlerinde kullanılan “perfluorosulfonic” asit polimer yapının gelişmesi sağlanmıştır (DOE, 2004). Membran, proton iletimini engelleyerek dış çevrim vasıtasıyla elektronların iletimini sağlar. Hidrojenin ve oksijenin pil içerisinde doğrudan karışmasını engeller. En geniş kullanılan membran materyali Dupont üretimi olan Nafion’dur (DOE, 2004). Kalınlıkları 25,4-254 *cm* arasında olmaktadır (Öğüt, 2005). Proton membranının yüksek iletkenliğine sahip olması, yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı ve uzun süreli çalışmaya elverişli olması istenir. Maliyetin yüksek olması ve çalışma sıcaklıklarının sınırlı olmaları dezavantaj olarak görülmektedir. Membran proton iletken olması için sulandırılmalıdır. PEM yakıt hücrelerinde transferinin önemi; göç eden iyonların, suyu membranın bir ucundan diğerine taşımasından kaynaklanmaktadır. Bu durum suyun az olduğu bölgelerde daha yüksek dirence sebep olmaktadır. İyon değiştiren membranların, yakıt hücrelerinde elektrolit olarak kullanılmasında, membranın dehidrasyon özelliğinin membranın fiziksel boyutları ve elektrolit direnci üzerindeki etkisi çok önemlidir (Amerika Enerji Departmanı (DOE) "High-Efficiency, Direct-Hydrogen Fuel Cell System For Automobiles")

3.5.2. Gaz Difüzyon Katmanı

Gaz difüzyon katmanlarının görevleri, sistemdeki suyun iletimini sağlamak ve akış alanı plakaları arasında ısıl temas sağlamaktır. Bu katmandan asıl istenen yüksek ısıl iletkenlik, gözeneklilik, mekanik uyum ve düşük maliyetli olmasıdır. Bu katman su geçirmeyen politetrafluoroetilen denilen bir materyal içerir. Bu katman sayesinde su birikintileri önlenir. Gaz difüzyon katmanlarında sinter veya ağ tipi materyaller de kullanılabilir (Aydın, 2007).

3.5.3. Elektrotlar

Gaz difüzyon katmanı, bağlayıcı ve katalizör katmanı ile beraber elektrotları oluştururlar. Reaksiyonlar anot ve katot katalizör yüzeylerinde gerçekleşir. Elektrotlar farklı materyallerden üretilebilir. Özellikle saf hidrojen kullanılması durumunda platinyum çok iyi bir başarımlı göstermektedir. Bunun haricinde farklı gazların kullanılması durumunda Rutenyum da iyi bir başarımlı sağlamaktadır. Elektrotların tasarımlarındaki asıl nokta iletkenlik konusudur. Elektrot kalınlığının ince olması iletkenlikte kolaylık sağlar (Aydın, 2007).

3.5.4. Akış Alanı Plakaları

MEA'lar ve gaz difüzyon katmanları akış alanı plakaları arasına yerleştirilir. Üretilen suyun pil dışına atılmasını ve mekanik destek sağlamanın yanı sıra, elektriksel olarak pilleri birbirine bağlar. Ayrıca bitişik hücrelerin tepken gazlarını ayırır. İki ayrı yüzeye sahip olduğu için çift kutuplu plakalar olarak da isimlendirilir, (Aydın, 2007).

Genel kanal konfigürasyonları;

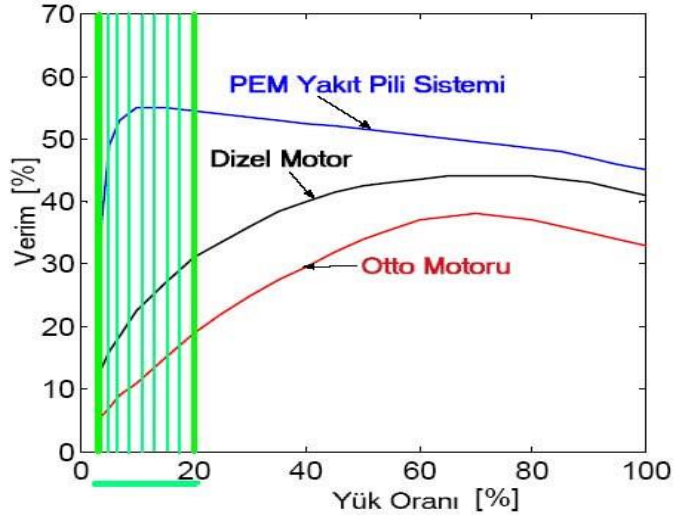
- a) Paralel gaz kanalları,
- b) Serpantin tipi akış kanalı,
- c) "Mirrored" akış alanı,
- d) Parçalı akış alanı,
- e) Akış kanalsız gaz difüzyon katmanı,
- f) Metal ağ akış alanı olmak üzere 6 çeşittir. (Aydın, 2007).

Serpantin tipi akış kanalları ise “Ballard Power Sistemi” tarafından patenti alınan bir akış alanı konfigürasyonudur. Serpantin tipi akış kanalı başlangıçtan sona kadar süreklidir. Serpantin plakanın bir avantajı, yol üzerinde su zerresi gibi bir engelin akışı engellememesidir. Tıkanık bir serpantin kanalında tepken gazlar, akım toplayıcı plakaların altındaki akışla kanalı geçmeye zorlanır ve gözenekli alana doğru geçer ve yan kanal ile birleşir. Bu yan geçiş ile gazlar tıkanıklığın olduğu bölgeye doğru difüze olabilir. Bu tıkanıklığın net etkisi ile artan bir basınç düşümü olacak fakat aktif alan kaybı olmayacaktır. Serpantin akış kanalının aksine paralel akış kanalı durumunda bir kanaldaki engel, tıkanıklığın alt bölgesinde bir ölü bölge oluşturacaktır. Bu ölü bölge içerisinde tepken bulunmayacak ve etken olmayacaktır (Aydın, 2007).

3.5.5.PEMYP Avantajları

PEM yakıt pilleri katı bir elektrolite sahip olduğu için sıvı elektrolitlerde görülen problemler görülmez. Membran, ayırıcı bir polimer film olduğundan dolayı damgalama, bir arada tutma ve el teması kaynaklı problemler diğer tiplere göre daha azdır. Düşük sıcaklıklarda çalışması sebebiyle hızlı ilk çalışma ve yük değişimlerine kolay uyma avantajına sahiptir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda çalışan pillerde görülen ve sıvı elektrolite sahip pillerde görülen materyal problemleri ortaya çıkmaz. Düşük emisyon değerlerine sahiptir. Dönüşümde ortaya çıkan gürültü ve titreşimler oldukça azdır. Taşımacılık sektöründe kullanılması durumunda diğer geleneksel sistemlere göre yüksek verime sahiptir. Yakıt tankından tekerleklerle verim %60 seviyelerindedir. Geleneksel motorlar ise bu verim yaklaşık olarak %40 (dizeller) ve %30 (benzinli) civarındadır. Hibrid tiplerinde ise hibrid konfigürasyonuna bağlı olarak %40–60 arasında değişir. Ayrıca Şekil 3.5.5.1’de görülebileceği gibi kısmi yüklerde yüksek performans gösterirler (Haraldsson, 2005).

Şehir içinde motor gücünün %10–20 si kullanılması sebebiyle yakıt pilli araçların kullanımı daha ekonomiktir. Yakıt pili sisteminde saf hidrojenin yerine geleneksel yakıtlar kullanılması durumunda bir yakıt dönüştürücüye ihtiyaç vardır. Bu durumda bile araç alacağı mesafeyi daha az yakıtla alır ve sonuç olarak daha az emisyon değerine sahip olur (Haraldsson, 2005).



Şekil 3. 12. PEMYP Sisteminin Diğer Motor Tipleri İle Karşılaştırılması (K., Haraldsson, 2005)

Boyutlandırma avantajının olması, yakıt esnekliğine sahip olması sebebiyle evsel ve diğer durağan uygulamalar için kullanılabilir. Mikro seviyeye indirme çalışmaları ile cep telefonu ve dizüstü bilgisayar üreticilerinin dikkatini çekmektedir.

3.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen enerjisi arayışı, 1776 yılında İngiliz bilim adamı Henry Cavendish tarafından keşfedildi. Evrendeki tüm elementlerden biri olan hidrojen, doğada en bol olandır. Hidrojen gazı, renksiz, tatsız ve görünmez gibi dikkat çekici özelliklere sahiptir. Ayrıca yenilenebilir, kirlenici olmayan ve sıfır emisyonlu bir enerji kaynağına dönüştürülebilir. Yeni enerji ekonomisinin temel taşı olarak kabul edilir.

İlk olarak, çinko metali hidroklorik aside maruz bırakarak hidrojen gazı geliştirdikten sonra onu ayrı bir element olarak tanımladı. Henry Cavendish, Londra Kraliyet Cemiyeti'ne yapılan bir gösteri sırasında, süreçte su üreten hidrojen gazıyla bir kıvılcım çıkmasıyla dikkatleri üzerine çeken bir keşif yaptı. Bu tarihi gelişme, suyun (H_2O) hidrojen ve oksijenden oluştuğu sonucuna yol açtı. O zamandan beri, hidrojen bir enerji kaynağı olarak kullanılıyor.

Hidrojen, evrendeki en basit ve en bol bulunan elementtir. Doğal olarak oluşmaz. Her yerde hemen hemen var olsa da havada, uzayda, yerde, nadiren yalnızdır. Su gibi diğer elementlerle birlikte elde edilebilir. Su, hidrojen ve oksijenden oluşur. Bu, genellikle kullanılabilir bir enerji kaynağı olması için çıkarılmasını ve dönüştürülmesini gerekli kılan, genellikle başka bir element ile birleştirildiği anlamına gelir. Hidrojen ayrıca birçok doğal bileşiklerde, örneğin doğal

gaz, benzin, propan ve metanol gibi yakıtlarla sonuçlanan hidrokarbonlarda da ortaya çıkar. Hidrojeni kullanmak için en büyük zor olanı ise saf hale getirebilme işlemidir.

Hidrojenin kimyası çok basittir, tek bir atom sadece bir proton ve bir elektrondan oluşur. Gaz halinde, yakıt olarak yakılabilir. Patlayıcı enerji üreten ve roketleri ve uzay gemilerini iten güç hücrelerinde depolanabilir. Uçucu ve yanıcı ve çok, çok güçlüdür.

Hidrojen, kriyojenik (donmuş) veya basınçlı hava kaplarında bir gaz halinde depolanabilir. Önemli miktarda hidrojen barındırmak için çok fazla depolama alanına ihtiyaç duyar. Bunun nedeni, moleküllerin birbirinden çok uzak olması ve gazın hafif olması çok yayılmasıdır. Hidrojen depolamak için daha ağır kaplara ihtiyaç duyulur.

Hidrojeni enerjiye dönüştürmenin en etkili yolu bir yakıt hücresi kullanmaktır. Bir yakıt hücresi kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bir yakıt hücresi, hidrojen ve oksijenin bir elektrokimyasal reaksiyonda karışmasını sağlar. Sonuç elektrik, su ve ısı üretimidir. Yakıt hücreleri, elektrokimyasal reaksiyonun ürettiği enerjiyi yararlı elektrik enerjisine dönüştürür. Bununla birlikte, yakıt hücresi, yakıt, özellikle hidrojen olduğu sürece, elektrik enerjisi üretecektir (URL17).

Son tüketiciye enerji "yakıt" ve/veya "elektrik" biçiminde sunulmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji yalnızca elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da gerektiren biçimde gelişmiştir. Bunun nedeni, genel enerji tüketiminin %60'ının ısı biçiminde gerçekleşmesidir. Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesi ile elde olunan ikincil enerjilere, "Enerji Taşıyıcısı" denir. Elektrik 20. yüzyıla damgasını vuran bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen ise 21. yüzyıla damgasını vuracak bir diğer enerji taşıyıcısıdır (Haraldsson, 2005)

Endüstri devrimi ile 1750 yılından bu yana, teknik yeniliklere dayalı olarak dünya genelinde ekonominin gelişmesi, peş peşe beş ayrı dalgalanma biçiminde sürmüştür. 1750-1825 yılları arasındaki birinci dalgalanmanın en önemli enerji kaynağı kömürdür. 1825-1860 arasındaki ikinci dalgalanmada, ekonomiye ivme kazandıran elektrik olmuştur. 1860-1910 yılları arasındaki üçüncü dalgalanmada elektrik etkisini sürdürmüş, ama yeni kaynak olarak petrol ortaya çıkmıştır. 1910-1970 arasındaki dördüncü dalgalanmada ekonomiyi büyüten yeni enerji kaynağı nükleer enerjidir.

Hidrojen, kullanım verimi yüksek bir yakıttır ve çevre dostudur. Teknolojik gelişim, çevre etkisini de içeren efektif maliyetinin diğer yakıtlardan düşük olmasını sağlar duruma gelmiştir. Hidrojenin kullanılmasını gerektiren başlıca iki neden olup, biri fosil yakıtların yanma emisyonu karbon dioksitin artmasından kaynaklanan, küresel ısınmaya neden olan çevre sorunu, diğeri petrol ve doğal gaz gibi akışkan hidrokarbonların bilinen üretilebilir rezerv ömürlerinin insan ömrü ile kıyaslanabilecek boyuta düşmüş olmasıdır. Şekil 3.13’de hidrojen enerji sistemi dönüşümünün şematik olarak gösterilmektedir (Ültanır, 1998).



Şekil 3. 13. Hidrojen Enerji Sisteminin Şematik Gösterimi (Gedik, 2015)

3.6.1. Hidrojen Enerjisinin Avantajları

- Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları da dâhil olmak üzere herhangi bir enerji kaynağı kullanılarak üretilebilir.
- Hidrojen elektrik kullanılarak üretilebilir ve nispeten yüksek verimle de elektriğe çevrilebilir. Hidrojenin güneş enerjisi ile doğrudan üretim süreçleri de geliştirilmiştir.
- Fosil yakıtlar son kullanımda sadece bir süreç ile dönüştürülürken, hidrojen kullanılacak enerji şekline beş farklı süreç ile dönüştürülmektedir.
- Son kullanımda hidrojen kullanılacak enerji şekline dönüşürken en yüksek verime sahiptir. Hidrojen fosil yakıtlardan %39 daha verimlidir. Kısaca hidrojen birincil enerji kaynaklarını korur.
- Hidrojen gaz şeklinde (büyük ölçekli depolamada), sıvı şeklinde (hava ve uzay ulaşımında) veya metal hidrit şeklinde (araçlar ve diğer küçük ölçekli depolamada) depolanabilir.

- Hidrojen boru hatları veya tankerler ile büyük mesafelere taşınabilir (birçok durumda elektrikten daha ekonomik ve verimlidir).
- Hidrojen diğer yakıtlardan farklı güvenlik ekipmanı ve prosedürü gerektirse de onlardan daha fazla tehlikeli değildir. Hidrojen güvenlik sıralamasında propan ve metanın (doğal gaz) arasındadır. Yangın tehlikesi ve zehirlilik dikkate alındığında hidrojen en güvenilir yakıttır.
- Hidrojen elektrikten veya güneş enerjisinden üretilirken, taşınırken veya depolanırken ve son kullanımda herhangi bir kirletici üretmez veya çevreye zararlı herhangi bir etkisi yoktur. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NOx oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir.
- Çevresel hasarlar ve yüksek kullanma verimi dikkate alındığında solar hidrojen enerji sistemleri en düşük etkin maliyete sahiptir (Ütanır, 2003).

3.6.2. Hidrojen Enerjisinin Dezavantajlar

Hidrojen enerjisinden yararlanılırken uygulamada birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Örneğin enerjinin üretildiği yakıt hücreleri ve hidrojenin depolandığı tankların hacmi geniş yer kaplamaktadır. Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kaplar; hidrojenin kapladığı hacmi küçültmek için hidrojeni sıvı halde depolamak gereklidir. Bunun içinde yüksek basınç ve soğutma işlemine gerek vardır. Öte yandan bu iki sorunla yakından ilgili bir başka temel problem yakıt hücresi ile çalışan araçlar yakıt takviyesi yapmak istedikleri zaman ortaya çıkacaktır. Petrol istasyonlarında yakıt hücreleri için hidrojen, yani yakıt malzemesi bulmak bir sorun olabilir veya bu tip enerji kaynaklarına yatırım yapmanın yatırımcı açısından müşteri bulamama yani ölü yatırım yapma gibi riskleri mevcuttur. Bu tip sorunların çözümü de belli bir ekonomik maliyet ve zaman gerektirir. Petrol ile çalışan motorlar içten yanmalı motorlardır. Bu motorların yakıt hücresi ile çalışmalarında çeşitli zorluklar vardır. Dolayısıyla yakıt hücresi ile uyumlu çalışacak motorların geliştirilmesi zarureti vardır.

3.6.3. Hidrojenin Tarihçesi

Hidrojenin gayrı resmi keşfi, paracelsus (simyacı) Robert Boyle (1671) kabarcık üretimini gözlemlediğinde 1500'lere kadar çıkar. Ancak, hidrojenin resmi

keşfedildiği, kabarcıkları analiz eden ve hidrojenin yanmasının su üretimine yol açtığını gösteren Henry Cavendish (1766) tarafından bildirilmiştir. Bu nedenle, gazın “gencin” sözcüğü olan hidro-genler (1783, Antoine Lavoisier tarafından) olarak adlandırıldı. 1898'de James Dewar başarıyla hidrojeni sıvılaştırdı. 1783'te, hava balonlarında, hidrojenin gücünü ve güvenilirliğini gösteren Jacques Charles tarafından hidrojen gazı kullanıldı. Ve sonra, Henri Giffard (1852), ilk hidrojen kaldırma gemisini yaptı. Hidrojenle çalışan hava gemileri, Birinci Dünya Savaşı'nda bulundu, burada insanları transfer etmek için kullanıldılar, gözlem platformları ve bombardıman uçakları olarak kullandılar. Hidrojen ayrıca adıyla ilgili bilinen bir olaya sahiptir; Hindenburg hava gemisi (1937), hidrojenin yanmasıydı.

1845 – İngiliz bilim insanı ve hakim Sir William Grove, Schonbein'in keşfini pratik ölçekte bir “Gaz Pili” yaratarak göstermiştir. Bu başarısından ötürü “Yakıt Pili'nin Babası” ünvanını almıştır.

1920'ler – Alman mühendis Rudolf Erren, kamyonların, otobüslerin ve denizaltıların içten yanmalı motorlarını, hidrojen ya da karışımlarını kullanacak şekilde değiştirmiştir.

1937 – Hidrojen gazı ile doldurulmuş bir zeplin, “Hindenburg”, Birleşik Devletler'den Almanya'ya 10 başarılı trans-Atlantik uçuşundan sonra, Lakewood'a inerken patlamıştır.

1958 – Amerika Birleşik Devletleri, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi'ni (NASA) kurmuştur. NASA'nın uzay programı, roket kalkışlarında ve yakıt hücrelerinde yakıt olarak dünya genelinde birincil olarak en fazla sıvı hidrojeni kullanmaktadır.

1959 – Cambridge Üniversitesi'nden Francis T. Bacon, ilk pratik hidrojen-hava yakıt pilini yapmıştır. Bu 5kW'lık sistem, kaynak makinesine güç sağlamıştır. Yakıt hücresi dizaynına “Bacon Cell” adını vermiştir. Aynı yıl, Harry Karl Ihrig, “Chalmers Manufacturing Company” için çalışan bir mühendis, ilk yakıt hücreli araç olan 20BG'ndeki traktörü göstermiştir. Bacon'un tasarımına dayanan hidrojen yakıt hücreleri, ünlü Apollo uzay aracı ve sonraki tüm uzay mekiği görevlerinde astronotlar için elektrik, ısı ve su üretmek için kullanılmaktadır.

1970 – Elektro kimyager John O'M. Bockris, “Hidrojen Ekonomisi” terimini ortaya atmıştır. Daha sonra, ABD'ndeki şehirlerde güneş enerjisi ile sağlanabileceğini öngördüğü hidrojen ekonomisini tanımladığı “Energy: The Solar – Hydrogen Alternative” adlı eserini yayınlamıştır.

1972 – California Üniversitesi tarafından değiştirilmiş 1972 model bir Gremlin, 1972’deki Kentsel Araç tasarım yarışmasına katılmış ve en düşük egzoz emisyonuna sahip olduğundan birincilik ödülünü kazanmıştır. Öğrenciler, Gremlin’in içten yanmalı motoruna depodan sağlanan hidrojenle çalışacak şekilde değiştirmiştir.

1973 – OPEC petrol ambargosu ve sonucundaki arz şoku, ucuz petrolün çağının sona erdiğini ve dünyanın alternatif yakıtlara ihtiyacı olduğunu göstermiştir.

1974 – Miami Üniversitesi’nden Profesör T. Nejat Veziroğlu, hidrojen enerjisi uluslararası olarak ilk kez tartışıldığı “The Hydrogen Economy Miami Energy Conference” (THEME) organize etmiştir. Konferans sonrasında, bu konferansa katılan bilim insanları ve mühendisler, “Uluslararası Hidrojen Enerjisi Birliği” (IAHE)’yi oluşturmuştur.

1977 – Küresel petrol piyasasının bozulmasına cevap olarak, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) kurulmuştur. IEA faaliyetleri arasında hidrojen enerjisi teknolojisinin araştırılması ve geliştirilmesi yer almaktadır. Ayrıca ABD enerji Departmanı kurulmuştur.

1978 – Ulusam Bilim Vakfı, Federal Hidrojen Ar-Ge programını Birleşik Devletler Enerji Departmanı’na devretmiştir.

1988 – Sovyetler Birliği Tupolev Dizayn Bürosu, 164 yolcu kapasiteli TU-154 ticari jetinin üç motorundan birini sıvı hidrojenle çalışacak şekilde değiştirmiştir. İlk uçuşu 21 dakika sürmüştür.

1989 – Birleşik Devletler’de 10 üyeyle Ulusal Hidrojen Birliği kurulmuştur. Ayrıca “Uluslararası Hidrojen Teknolojileri için Standardizasyon Teknik Komitesi” kurulmuştur.

1990 – Dünyanın ilk güneş enerjili hidrojen üretimi, Güney Almanya’daki bir araştırma ve test tesisi olan Solar-Wasserstoff-Bayern’de faaliyete geçirilmiştir. Birleşik Devletler Kongresi’nde, 5 yıllık bir yönetimin oluşturulmasının ve Birleşik Devletler için hidrojen araştırma ve geliştirme uygulama planının öngörüldüğü Spark M. Matsunaga Hidrojen Araştırma, Geliştirme ve Demonstrasyon Yasası (PL 101-566) kabul edilmiştir. The Hydrogen Technical Advisory Panel (HTAP)’ine, Matsunaga Yasası ile hidrojen araştırması üzerine istişare ve koordinasyon sağlaması için yetki verildi.

1991 – Washington’daki Georgetown Üniversitesi, 1. Nesil Otobüs Programı kapsamında, 3 adet 300-foot’luk Yakıt Hücreli Test Otobüsü geliştirdi. 2001’de,

Georgetown 100 kW'lık yakıt hücresi “motoruna” enerji sağlamak için metanolden hidrojen üreten 2. nesil otobüsü bitirmiştir.

1992 – Ar-Ge programının destekçisi olan The Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV), yeni araç teknolojilerinin ve hidrojeni de içeren alternatif yakıtların araştırılması ve geliştirilmesi için otomobil firmaları ve hükümet arasında ortak bir çaba olması için Clinton yönetimi tarafından kurulmuştur.

1994 – Daimler Benz, ilk hidrojen yakıt hücreli araçları olan NECAR'ı (New Electric CAR) Ulm/Almanya'da görücüye çıkardı.

1995 – Chicago Transit Authority, 3 hidrojen yakıt hücreli otobüslerinden ilkinin açıkladı. Küçük deneme filosu, bir sonraki sene faaliyete geçmiştir.

1997 – Emekli NASA mühendisi Addison Bain, hidrojenin Hindenburg kazasına sebep olduğu görüşüne meydan okudu. Bain, hidrojen bu felaket yangına sebep olmadığı, buna sebep olanın statik elektrik ve zeplin üzerindeki son derece yanıcı madde birleşiminin olduğunu gösterdi.

1998 – İzlanda, 2030 yılında ilk hidrojen ekonomisini oluşturmak için hazırladığı planı açıkladı.

1999 – Avrupa'nın ilk hidrojen yakıt istasyonları Almanya'da Hamburg ve Münih'te açıldı. Royal Dutch/Shell şirketi, hidrojen bölümü oluşturarak hidrojen geleceğine kendini hazırlamıştır. Ayrıca, mali grup New Business Venture Fund başkanlığında, Royal Dutch/Shell Group, Daimler Chrysler (Daimler Benz ve Chrysler birleşmesi) ve Norsk Hydro ortaklığıyla, İzlanda'daki hidrojen ekonomisini ileri taşımak için Icelandic Hydrogen and Fuel Cell Company Ltd, adı altında bir şirketler birliği oluşturuldu.

2001 – Ballard Power System, endüstriyel ve tüketici nihai ürün uygulamalarına uyumu için hazırlanmış, dünyanın ilk Proton Exchange Membran (PEM) yakıt hücresi sistemini üretmeye başladı.

2002 – Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company ve General Motors Corporation yöneticileri Enerji Sekreteri Spencer Abraham ile birlikte U.S. Department of Energy and the U.S. Council for Automotive Research (USCAR) arasındaki ortaklığı açıkladı. "FreedomCAR" isimli bu program, petrolsüz araçlar ve hafif kamyonlar için hidrojen yakıt hücreleri gibi teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanmıştır.

2003 – Başkan George W. Bush, 2003 yılında “Bugün doğan bir çocuk tarafından kullanılacak ilk araç hidrojen enerjili ve çevre dostu olabilir” sözleriyle

ticari olarak uygun hidrojen enerjili yakıt hücresi teknolojisinin geliştirilmesi için 1,2 milyar dolarlık hidrojen yakıt girişimini açıkladı. Birleşik Devletler Enerji Sekreteri Spencer Abraham, hidrojen teknolojisinin geliştirilmesi için küresel işbirliğinin teşvik edilmesi için International Partnership for the Hydrogen Economy (IHPE) ortaklığını başlattı.

2004 – Birleşik Devletler Enerji Sekreteri Spencer Abraham, hidrojen araştırması ve araç gösteri projeleri için neredeyse Başkan Bush'un açıkladığının 1/3'ü kadar olan 350 milyon doların ayrıldığını duyurdu. Fon, 30 lider organizasyonu ve rekabetçi bir gözden geçirme sonrasında seçilen 100'den fazla ortağı kapsamaktadır (Fact Sheet Series – The History of Hydrogen).

3.6.4. Hidrojen Gazı

Hidrojen periyodik cetvelin ilk elementidir. Hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve kristalinde bir elektron vardır. Hidrojen evrende en çok bulunan ve çevreye uyumlu olan elementtir (Sarıtış, 2004).

3.6.5. Hidrojen Gazının Özellikleri

İnsan vücudunu oluşturan moleküllerin üçte ikisini, evreni oluşturan atomların da %90'ını oluşturur. Suyun %11,2'sini hidrojen oluşturur. Kömür ve ham petrolün içinde, karbonla birleşmiş halde bulunur. Bunun yanında, kil ve minerallerde genelde oksijenle birleşmiş halde önemli ölçüde hidrojen bulunur. Bütün nebati ve hayvani maddelerin içinde karbon, kükürt, azot, oksijenle bileşik halde bulunur. Hidrojen, kütle başına enerji yoğunluğu en yüksek olan maddedir. Yüksek sıcaklık değerlerinde 141,9MJ/kg ile benzinden hemen hemen 3 kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir (Sarıtış, 2004).

3.6.6. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Hidrojen molekülü, birbirinden 0,75 Angstrom uzaklıktaki iki atomun birleşmesinden oluşur. Aradaki bağ, iki elektronun ortaklaşa kullanılmasından meydana gelir ve çok yüksek olan ayrışma enerjisi, molekülün çok kararlı olduğunu gösterir. Hidrojen, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Havaya göre yoğunluğu 0,07'dir ve bu bakımdan elementlerin en hafifidir. Dolayısıyla gözenekli çeperlerden diğer gazların tümünden daha hızlı geçer. Aynı şekilde kızıl derecedeki demir, platin ve

iridyum gibi metallere de sızar. Hidrojen helyumdan sonra sıvılaştırılması en zor olan gazdır. Dönüşüm sıcaklığı $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan hidrojen atmosfer basıncında $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kaynar, $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'da katılaşır (Sarıtış, 2004).

3.6.7. Hidrojenin Kimyasal Özellikleri

Hidrojen, etkinleştirilmiş biçimleri dışında soğukta pek etkili değildir. Sıcakta ya da katalizörler eşliğinde pek çok tepkimeye girer. Değerli bir element olması nedeniyle çok belirgin elektropozitif bir özellik taşır. Orta kuvvette bir indirgendir. Alkali metal oksitler (Al_2O_3) gibi çok kararlı bileşikler indirgeyemez. Bununla birlikte NiO , CuO , vb. gibi pek çok metal oksidi indirger. Bu yolla katalizör olarak kullanılan çok ufaltılmış metaller elde edilir. Hidrojen alkali ve toprak alkali metallere olduğu gibi ametallerin çoğu ile doğrudan birleşir. Halojenlerin dördüyle de tepkimeye girerek hidrasitleri verir, flor dan iyoda doğru gittikçe hem tepkime hızında hem de açığa çıkan ısı miktarında azalma görülür. Oksijenle kırmızı derecede ya da düşük sıcaklıkta bir katalizör eşliğinde birleşerek su verir. Mavi bir alevle yanar, oksijenle karışımı oksi-hidrojen hamlacında kullanılır. Kükürtle $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de birleşir. Azotla yüksek basınçta, bir katalizör eşliğinde birleşerek amonyak elde edilmesini sağlar (Toprak, 2006).

Tablo 3.2. Hidrojenin bazı özellikleri (URL 13)

Özellikler	Değer	Birimi
Molekül Ağırlığı	2,016	Kg/Kmol
Yoğunluğu	0,0838	Kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141,9	MJ/Kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11,89	Mj/m
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119,9	MJ/Kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10,05	Mj/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20,3	K
Sıvı Yoğunluğu	70,8	Kg/m ³
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32,94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12,84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31,40	Kg/m ³
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4–75	% Hacimsel
Havadaki Stokiyometrik Karışım	29,53	% Hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0,61	Cm ² /s
Özgül Isısı	14,89	KJ/Kg.K

3.6.8. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı

Bir yakıtın her yerde örneğin sanayide, evlerde ve taşıtlarda kullanılabilmesi büyük önem taşımaktadır. Diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında, bunları birçoğunun ancak belirli uygulamalar için kullanılabildiğini görmekteyiz. Kömürü, otomobiller de veya uçaklarda kullanmak pratik açıdan uygun değildir. Hidrojen ise, hemen her yerde kolaylıkla kullanılabilir. Evlerde, ısıtma amacı ile kalorifer, fırın ve şofbenlerde doğal gaz yerine rahatlıkla kullanılabilmektedir. Hidrojen yakıtlı piller içinde elektriğe dönüştürülmesi ile üretilen elektriğin de, evlerde olduğu gibi, sanayide de bölgesel olarak üretilip kullanılabilir. Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda, yani otobüs, kamyon, otomobil, traktör ile tarım makineleri gibi tüm taşıtlarda kullanılabilmesi, sınırlı rezerve sahip petrol ürünlerinin yerini alması ve çevreye dost bir enerji olması, son yıllarda özellikle araç üreten şirketlerin büyük ilgisini çekmektedir. Hidrojen yakıtlı motorların, benzinli motorlara göre birçok üstünlüğü bulunmaktadır. Bunlardan biri, hidrojenli motorların yüksek verimi, diğeri,

belki de en önemlisi, atık ürün olarak sadece su buharı olmasıdır. Hidrojen ile çalışan bir otomobil şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3. 14. Hidrojen İle Çalışan Bir Otomobil (URL 14)

Taşıtlarda, içten yanmalı motorlar yerine, yakıtlı piller ile elektrik üretmek ve elektrik motorları ile taşıta güç sağlamak da mümkündür. Bu tür taşıtlarda havaya atılan zararlı ürün hiç olmayacağı için bunlara, sıfır salınlı taşıtlar da denmektedir. Bazı sorunlara rağmen, hidrojenin özellikle, otobüs, kamyon ve traktör gibi ağır taşıtlarda kullanımı gittikçe artmakta ve gelişen teknoloji ile birlikte sorunlar giderek çözülmektedir. Petrolün sınırlı ömrü ve artan çevre kirliliği, hidrojen yakıt kullanımının yaygınlaşmasına yol açmaktadır.



Şekil 3. 15. Yakıt Hücresi İle Çalışan Bir Otobüs (URL 14)



Şekil 3. 16. Yakıt Pili İle Çalışan Uçak (URL 15)

Hidrojen yakıtının ilk kullanım alanlarından biri jet uçakları olup, Şekil 3.16'da gösterilmektedir. Bu konuda ilk olarak 1957 yılında yapılan denemelerden sonra yapılan çalışmalar artık ticari uygulama aşamasına gelmiştir.

3.6.9. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Doğal halde gaz hidrojen oldukça az miktarlardır; atmosferde, yükseklikle değişen oranlarda, 15000-20000 kısımda sadece 1 kısım bulunur. Doğal hidrojen volkanlardan, kömür yataklarından petrol kuyularından meydana gelir. Hidrojen evrenin en temel maddesidir, güneş ve yıldızlarda bulunan ana bileşiktir. Yeryüzündeki hidrojenin genellikle tamamı diğer elementlerle bileşik halindedir. Su molekülü iki atom hidrojenin bir atom oksijenle olan bileşiğidir; dolayısıyla tüm okyanuslar çok büyük hidrojen depolarıdır. Ayrıca, bitkiler, hayvanlar ve fosil maddelerini de kapsayan tüm organik maddelerin önemli bir parçası hidrojendir. Volkanik gazların bulunduğu yerlerde hidrojen serbest halde, yani H_2 halindedir; fakat çok hafif olduğundan hemen dağılır, kazanılamaz. Hidrojen, ayrıca alkali metallerle kimyasal olarak birleşmiş halde bulunur örneğin $NaBH_4$ gibi Hidrojen üretiminde kullanılan çeşitli kaynaklar ve teknolojiler vardır; doğal gaz, kömür, benzin, metanol veya biokütleden ısıyla; bakteriler ve alglerden fotosentezle; elektrik veya güneş ışığıyla suyu parçalayarak hidrojen üretilir. Hidrojenin yakıt olarak özellikleri ve diğer yakıtlar ile karşılaştırması Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.3. Hidrojen ve diğer yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri
(Ültanır, 1997)

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk (kg/m ³)	4.4	0.65	0,0838
Hava içindeki difüzyonu (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kg.K)	1.20	2.22	14.89
Havada ateşlenme sınırı (% hacim)	1.0-7.6	5.3-15	4-75
Havada ateşlenme enerjisi (mJ)	0.24	0.29	0.02
Ateşlenme sıcaklığı (°C)	228-471	540	585
Havada alev sıcaklığı (°C)	2197	1875	2045
Alev yayılması (emisivitesi) (%)	34 -43	25-33	17-25
Isı kapasitesi (MJ/kg)	45.5	50	141.9
(MJ/m)	38.65	23	11.89
Patlama enerjisi (grTNT/kJ)	0.25	0,19	0.17

Bugün hidrojen üretiminin çoğu fosil hammaddelerden yapılır. Dünya hidrojen üretiminin %48'i doğal gazdan (%90'dan fazlası metandır), %30'u rafineri ürünlerinden, %18'i kömürden ve kalan %4'ü de suyun elektroliziyle elde edilmektedir. Bunların dışında geliştirilmiş ve geliştirilmekte olan yeni hidrojen üretim prosesleri vardır (Beşergil, 2009). Hidrojen üretim metotları hammaddeye, elde edilmek istenen hidrojen miktarına ve saflık derecesine göre değişir. Yeni geliştirilmekte olan yöntemler de dikkate alındığında hidrojen üretim teknolojileri üç grup altında toplanabilir, bunlar;

a) Fosil Hammaddelerden: Buhar reformasyonu, oto termal reformasyon, kısmi oksidasyon, kömürün gazlaştırılması, termal dissosiasyon,

b) Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından: Suyun elektrolizi, foto elektroliz, suyun termal parçalanması, biokütle gazlaştırılması,

c) Atık Gaz Akımlarından Hidrojen Kazanma: Rafineriler (buhar veya metanol deformasyon fabrikaları proses gazı gibi) ve kimyasal madde fabrikaları (amonyak veya metan ol sentezi gibi) (Beşergil, 2009).

4. METERYAL METOD

4.1. Deney Düzeneginin Hazirlanmasi

Son yıllarda Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücreleri ile ilgili yapılan çalışmalar hızla artış göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı PEMYP'nin sıcaklık, nem, basınç gibi hücre performansına etki eden işletme parametreleri gibi pek çok parametrenin de günümüzde ve gelecekte ne gibi sonuçlara sebep olacağı bilgisayar üzerinde elde edilebilmektedir. Dolayısıyla, meydana gelen sonuçlar yapılan deney verileriyle karşılaştırılabilmektedir. Yakıt pili bir elektrolit ve iki elektrottan oluşup, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Yakıt pilleri, elektrotlarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile elektriği üretir. Yanma olmaksızın elektrik üretildiği için daha az kirlilik meydana gelmektedir.

Polimer Elektrolit Membran yakıt hücresindeki kütleli olarak kullanılan hidrojenin zamana bağılı olarak ürettiği güç ve enerji ölçüm cihazlarıyla tespit edilmiştir. Bu aşamadaki yakıt sarfiyatı ile ilgili incelemeler yapılarak performansa etki eden faktörler deneysel olarak incelenip tablo veya grafik şeklinde sunulmuştur. Deneysel çalışmamız Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Mühendisliği Laboratuvarlarında yapılmıştır. Öncelikli olarak PEMYH kurulumu yapılan, kurulan hücrenin özelliklerine göre uygun miktarlarda reaktanlar, Hidrojen ve Oksijen debimetre vasıtasıyla yakıt hücresine bağlantılar kanalıyla gönderilmiştir. Yakıt hücresinin kararlı bir hale gelmesi için yaklaşık olarak sekiz saat çalıştırılmıştır. Daha sonra kimyasal reaksiyon sonucu zamana bağılı olarak veriler ölçülecek bu verilere göre grafikler oluşturulmuştur. Grafikler ve tablolar göz önünde bulundurularak veriler ışığında maksimum ve minimum verim için uygun hidrojen ve oksijen değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın desteği, Batman Üniversitesi Araştırma Projesi (BAP) tarafından BTÜBAP-2017 nolu proje ile desteklenmiştir.

4.2.Deneyin Yapılış Aşamaları

- 1- Malzeme, bağlantı elemanları ve ölçü aletleri temin edildi.
- 2- Hidrojen ve Oksijen tüpünden Hidrojen ve Oksijen debimetrelerindeki pnomatik hortumlarla bağlantılar yapıldı.

- 3- Hidrojen ve Oksijen debimetre çıkışlarından hortumlar vasıtasıyla hidrojen ve oksijen nemlendirme kaplarından geçecek şekilde hidrojen ve oksijen gazları nemlendirildi.
- 4- Hidrojen ve Oksijen gazı nemlendirme kabı öncesi girişlerine elektronik nemölçer ölçüm cihazları montajı yapıldı.
- 5- Hidrojen ve Oksijen gazı nemlendirme kabı sonrası çıkışlarına elektronik nemölçer ölçüm cihazı montajı yapıldı.
- 6- Hidrojen ve Oksijen nemlendirme kabından çıkan hidrojen ve oksijen gazı çelik hortumlarla çıkışları çelik hortumlarla bağlantı yapıldı.
- 7- Hidrojen ve Oksijen çelik hortumları giriş ve çıkışlarına elektronik termometreler ve aynı zamanda sıcaklığı sabitlemek için çelik hortumun orta kısmına sıcaklığı sabitlemek ayarlamak için role takıldı. Çelik hortumun üzeri ısı bandı ve ısı kaybını önlemek için üzeri yalıtkan malzeme ile kaplandı.
- 8- Çelik hortumların çıkışındaki hidrojen ve oksijen gazı bağlantı elemanlarıyla PEMYP sisteme bağlandı.
- 9- PEMYP girişlerine verilen hidrojen ve oksijen gazı yakıt hücresinin içinde tepkimeye girerek elektrik enerjisi ortaya çıkardı.
- 10- PEMYP çıkışlarına PEMYP'nin ortaya çıkarmış olduğu gerilimi ölçmek için elektronik voltmetre ve ampermetre takıldı.
- 11- Sistem devir daim yapması için ortaya çıkan bu elektrik akımını uygun ekipman vasıtasıyla dışarı verildi.

4.3. PEMYH Kurulumunda Kullanılan Ekipmanlar

4.3.1. Datalogger

Datalogger seçilmiş verileri belirli bir süre boyunca, belirli aralıklarla kaydeden cihazlardır. Datalogger sıcaklık, nem, basınç, su seviyesi, rüzgâr hız ve yönü, güneşlenme değerleri, birçok fiziksel veriyi ve çevresel koşulları kaydeden cihazlardır. Kaydetme başlama talimatı verildikten sonra otomatik olarak verileri kaydeder belirtilen süre bittiğinde kayıt işlemini durdurur. Bu yazılım ayrıca kaydedilen verileri analiz ederek karşılaştırmalı olarak sunar ve tablo, grafik gibi yöntemlerle daha iyi bir anlayış sağlamaya olanak sağlar. Datalogger; nem, basınç, iç hava kalitesi, sıcaklık ve çok fonksiyonlu dataloggerlar gibi kategorileri

ayrılmaktadır. Kullanılacak alana ve ihtiyaçlara göre farklı özellikte dataloggerlar bulunmaktadır.



Şekil 4. 1. PEMYP Sisteminde Kullanılan Datalogger

4.3.2. Ampermetre

Elektrik akım şiddetini ölçmede kullanılan ölçü aletlerine ampermetre denir. Ampermetrelerin elektrik devrelerindeki sembolü, daire içinde A ile ifade edilir. Ampermetreler devreye seri bağlanır, çünkü alıcı veya alıcılardan geçecek akımın ölçülebilmesi için akımın tamamının ampermetreden geçmesi gerekmektedir. Sistemde ölçüm aralığı DC 0-100V 0-10A olan ampermetre kullanılmıştır.

4.3.3. Voltmetre

Gerilim ölçme aracıdır. Elektrik devrelerinin iki noktası arasındaki gerilimi ölçmek için bu cihazlar kullanılır. Devreye paralel şeklinde bağlanır. Sembolü V ile gösterilir. Sistemde Çalışma gerilimi: 4,5-30V DC olan voltmetre kullanılmıştır. Şekil 4.2’de sistemde kullanılan bir Ampermetre ve Voltmetre verilmiştir.



Şekil 4. 2. PEMYP Sisteminde Kullanılan Dijital Voltmetre ve Ampermetre

4.3.4. Termometre

Sıcaklık ölçüm cihazıdır. Deneyde yakıt hücresinin ve ısıtma borusunun sıcaklığını gözetmek ve sıcaklığı kontrol etmek maksadıyla kullanılmıştır. Şekil 4.3’de PEMYP sisteminde kullandığımız bir termometre ve termokupl verilmiştir.



Şekil 4. 3. PEMYP Sisteminde Kullanılan Termometre

4.3.5. Nemölçer

Hidrojen ve oksijeni nem oranını ölçmek ve sabitlemek için kullanılan ölçme cihazıdır. Dijital nemölçerin uç kısmı nemlendirme kaplarının içine yerleştirilir. Sistemde kullandığımız nemölçer ve aynı zamanda gazların sıcaklıklarını ölçen termometre Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 4. PEMYP Sisteminde Kullanılan Nemölçer ve Termometre

4.3.6. Debimetre

Debi, bir kesit alanından birim zamanda geçen akış miktarıdır. Akışkanların akış miktarını tespit etmek için tasarlanmış cihazlara da debimetre denir. Gaz veya sıvıların debilerini ölçmek ve istenilen debide sisteme akışkan göndermek için kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan debimetrenin, Debi Aralığı 0,1-1 ile

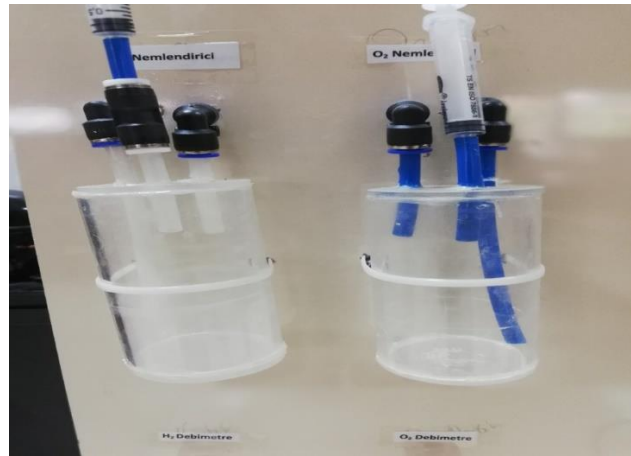
Hassasiyet %4 F.S 7, Maksimum Sıcaklık 70°C. Teknik özelliklerini saydığımız ve sisteme entegre ettiğimiz debimetre Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4. 5. PEMYP Sisteminde Kullanılan Debimetre

4.3.7. Nemlendirme kabı

Hidrojen ve Oksijen gazını nemlendirme maksadıyla mika malzemeli, silindir şeklindeki tüp, havalandırma boşluğu olacak şekilde silikon ile sızdırmazlık yapmayacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 4. 6. PEMYP Sisteminde Kullanılan Hidrojen ve Oksijen Nemlendirme Kaplar

4.3.8. Isıtma Borusu

10mm çapındaki 100cm uzunluğundaki bakır boru, üzerine ısı bantları ile sarılıp, ısı kaybı olmaması için üzeri yalıtkan malzemesi izole edilmiştir. Tam ortasına sıcaklığı algılamak için bir termokupl yerleştirilmiştir. Böylelikle boru içerisinde geçen gazın sıcaklığını tespit edebileceğiz. Isı bandı ile de sıcaklığın istenilen değere çıkarılması sağlanmıştır. Yapmış olduğumuz ısıtma borusu şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4. 7. PEMYP Sisteminde Kullanılan Oksijen ve Hidrojen Gaz Hatlarının Isı Bandı

4.3.9. Sıcaklık Ayar Rölesi

Isıtma borusunun göbeğine termometre teli bağlanıp istenilen sıcaklıkta sabitlemek için kullanılan kontrol cihazıdır. Bu sayede ısı borusundan geçen gazın sıcaklığını ekrandan gözleyip istenilen değere getirebileceğimiz sıcaklık ayar rölesi Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4. 8. PEMYP Sisteminde Kullanılan Oksijen ve Hidrojen Sıcaklık Ayar Rölesi

4.3.10. Fan

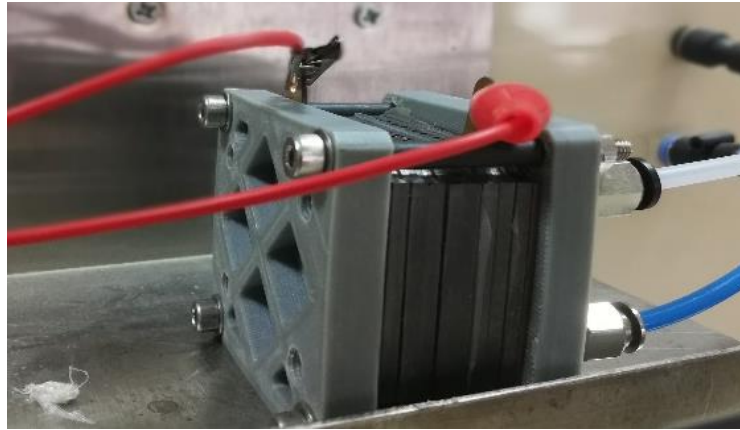
Elektrokimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen elektrik enerjisinin sistemden atılması için 8-24W luk fanlar deneyler esnasında sisteme entegre edilmiştir. Aslında 1 ile 30W arasında değişik dirençler kullanılabilir. Fan sayesinde daha kolay kontrol yapılmaktadır.



Şekil 4. 9. PEMYP Sisteminde Kullanılan Fan

4.3.11. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi

PEMYP anot, katot, elektrolit tabaka ve gaz kanallı akım kolektörlerinden meydana gelmektedir. H_2 ve O_2 yakıtları gaz kanallarından geçerek sırasıyla anot ve katota ulaşır. Reaktif gazlar difüzyon tabakadan geçtikten sonra proton geçirgen membrana ulaşmaktadır. Çalışmada Şekil 4.10’da görülen, boyutları 3x3 cm 8 adet Elektrot Alanı: 72 cm² PEMYP kullanılmıştır.



Şekil 4. 10. PEMYP Sisteminde Kullanılan PEMFC

4.3.12. Oksijen Tüpü

Atmosferde en çok olan oksijenin simgesi “O”, atom numarası 8’dir. Ergime noktası -218°C ve kaynama noktası -183°C ’ tür. Peryodik cetvelin 16-A grubunda yer alır. Yakıcı özelliği olan ametal elementidir. Renksiz, kokusuz bir gazdır. Katı ve sıvı hali soluk mavi rengindedir. Oksijen elementi, sıvı hale getirilmesi zor olan bir gazdır. Sıvı oksijen, sıvılaştırılmış havadan elde edilir. Oksijen, basınçla

sıvılaştırılmaz. Kaynama noktasının altında bir dereceye soğutulduğunda açık mavi sıvı halini alır. Soğutulma işlemi devam edilirse katı halini alır. Sıvı haldeki oksijen elementi kuvvetli bir manyettiktir. Oksijen tehlikeli olup, göze ve cilde temas halinde dondurabilir (URL 17).



Şekil 4. 11. PEMYP Sisteminde Kullanılan Oksijen Tüpü

4.3.13. Hidrojen Tüpü

Hidrojen, sudan elektroliz yöntemiyle veya metan ve amonyak gazlarının ayrıştırılmasıyla elde edilir. Hidrojen elementi sıvı veya gaz halde bulunur; Gaz halde, 150 bar basınca dayanıklı çelik tüplerin içine sıkıştırılarak tedarik edilir. Sıvı halde ise, üç cidarlı, vakum ve perlit malzemesi ile yalıtılmış özel tanklar ile nakledilir ve depolanır (URL 17).



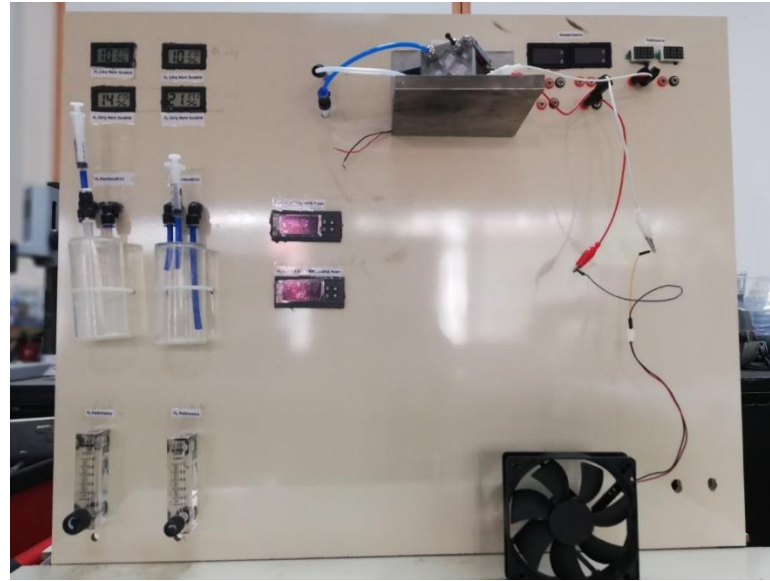
Şekil 4. 12. PEMYP Sisteminde Hidrojen Tüpü ve Deney Standının Önden Görünümü

Tablo.4.1. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri (URL16)

Maddenin fazı	Gaz
Yoğunluğu	(0 °C ve 101.325 Kpa'da) 0,00008988 g/cm ³
Sıvı yoğunluğu	2,267 g/cm ³
Ergime noktası	-252,77 °C
Kaynama noktası	-252,87 °C
Ergime ısısı	0,117 kJ/mol
Buharlaştırma ısısı	0,904 kJ/mol
Isı kapasitesi	28,836 J/(mol-K)

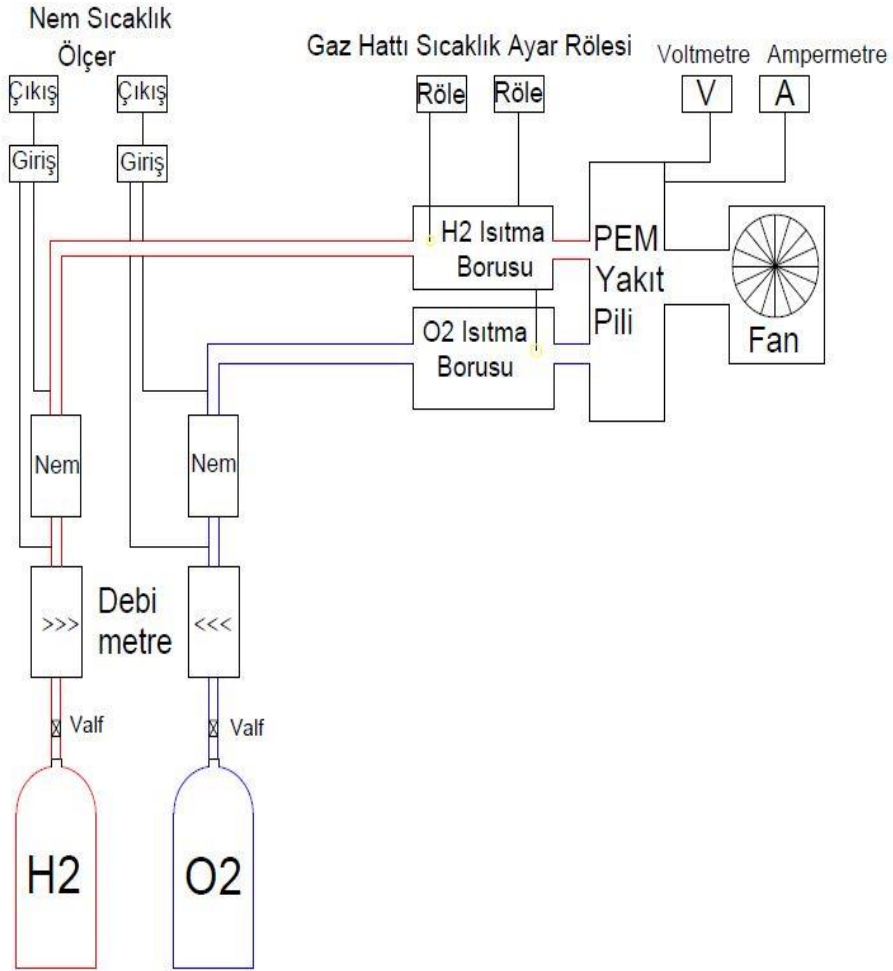
Tablo.4.2. Hidrojenin Kimyasal Özellikleri (URL16)

Kristal yapısı	Kübik
Yükseltgenme Seviyesi	1, -1
Elektronegatiflik derecesi	2,20 Pauling ölçeği
İyonlaşma Enerjisi	1312,0 kJ/mol
Atom Yarıçapı	25 pm
Atom Yarıçapı	53 pm
Kovalent Yarıçapı	37,3 pm
Van Der Waals Yarıçapı	120 pm

**Şekil 4. 13.** PEMYP Deney Standının Önden Görünümü

PEMYP için Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Laboratuvarında Prototip bir sistem tasarlanmıştır. Yukarıda saymış olduğumuz malzeme ve ölçüm aletleri oluşturulan prototip sistem üzerine monte edilmiştir. Tasarlanan sistemin şeması Şekil 4.14'de gösterildiği gibidir. Yapılan sistem sayesinde herhangi bir yakıt hücresinin çalıştırılması ve testi yapılabilmektedir. Hücresinin çalışması esnasında gazların debileri, sıcaklıkları, nem değerleri ayrı ayrı

ölçülebilmektedir. Aynı zamanda bu değerler kontrol edilebilmektedir. Yakıt hücresinin çalışması esnasında ise elde edilen enerjinin akım, voltaj ve güç değerleri tespit edilebilmektedir. Tasarladığımız sistemin resmi ise Şekil 4.13’de görüldüğü gibidir. Bu şekilde gazlar aşağıdaki debimetrelerden geçerek istenilen debiye göre ayarlanmaktadır. Debimetrelerden geçen gazlar bir üstteki nemlendirme kaplarına girerek istenilen nem oranları sağlanmaktadır. Daha sonra panonun arka kısmında bulunan ısıtma borularında istenilen değerlerde ısıtılmaktadır. Bu evreden sonra ise gazlar yakıt hücresine ayrı ayrı (H_2 ve O_2 olarak) girmektedir. Elde edilen enerji verileri dijital göstergelerden okunabilmektedir.



Şekil 4. 14. PEMYP'in Çalışma Şeması

4.4. PEMYH Verim Hesabı ve Performansı

PEMYH hidrojen ve oksijen gazını katalizör kullanarak içerisinde kimyasal tepkimeye sokan ve bu tepkime sonucunda elektrik ve ısı enerjisinin yanında ürün olarak su üreten sistemlerdir. Böyle bir yakıt hücresinin çalışma performansını incelemek için, sistem değişken bir yük direncinin bulunduğu bir devreye bağlanmış ve değişik direnç değerleri için devreden geçen akımlar ile yakıt hücresinin bu direnç değerlerinde oluşturabileceği gerilim değerleri kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak sistemin farklı akım ve voltaj değerleri için sağladığı güç değerleri hesaplanmıştır. Son olarak sistemin kullanılabilir gerilim değerleri ürettiği bölgeler yakıt hücresinin akıma karşı voltaj grafiğinden tespit edilerek bu voltaj değerleri için sistemin veriminin azami ve asgari değerleri hesaplanmıştır.

4.4.1. Teorik Analiz

Yakıt hücresi ile yapılan güç sistemlerinde çoğunlukla temel güç kaynağı yakıt hücresidir. Bu nedenle de sistem hareketleri üzerinde oldukça önemli bir etkiye sebep olmaktadır. Dolayısıyla sistemin çıkış durumunu etkilemektedir. Yakıt hücresi yapısının çok iyi bir şekilde incelenip tanımlanması, sistemin etkin bir biçimde çalışması için çok önemlidir. Sistem çalışmasının kontrolü esnasında konulması gereken sınırlar görülmekte ve sistemi etkileyen parametrelerin etkileri de belirlenebilmektedir. Ayrıca sistem kurulumundan önce matematiksel modelin yapılması sistemin test edilmesi ve sistemi etkileyen parametrelerin davranışlarının belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bundan dolayı PEMYH'nin denetim amaçlı matematiksel modeli ele alınmıştır.

PEMYP modellemesinde ilerleme kat edilse de halen bazı ele alınması gereken problemlere sahiptir.

Bu problemler:

- Modelin uygulanması ve modelin gerçekliğinin (çözüm zamanı) kompleksliği
- Modelin detaylı doğruluğunun kanıtlanma zorluğu
- Özellikle gerçek zamanlı ölçüm tekniklerinin eksikliği
- Gerçek yakıt hücresi sistem ve performans verilerinin eksikliği (Gelfivd, 2003).

Bu sebeple de bu problemlerin sağlanması için yakıt hücresini ayrıntılı bir biçimde çözümlmeye olanak sağlayan yakıt hücresinin matematiksel modelinin belirlenmesi gereklidir. Matematiksel modelin oluşturulmasında yakıt hücresi 4 alt sistem olarak ele alınır:

- 1) Gerilim alt sistemi
- 2) Anot alt sistemi
- 3) Katot alt sistemi
- 4) Membran alt sistem

Her bir alt sistem dinamik olarak ve birbiriyle etkileşimli bir biçimde modellenir. Anot alt sistemi hidrojen kısmi basıncını, katot alt sistemi ise katot kısmi basıncı ve katot toplam basıncını hesaplar. Membran alt sistemi membran içi su içeriğini hesaplar. Gerilim alt sistemi hesaplanan dinamikler ile akım ve sıcaklık ölçüm değerlerini kullanıp, Yakıt hücresi çıkış gerilimini hesaplar (Pukrushpan vd, 2002).

4.4.2. Verim Hesabı

Herhangi bir yakıt hücresinin verimi, Eşitlik 13’ de gösterildiği üzere her ikisi de aynı birimde olacak şekilde, elektriksel çıkış gücü ve yakıt girişi arasındaki orandır.

$$Hyh = \frac{\text{Elektriksel güç çıkış } (Pyh)}{\text{yakıt girişi } (Fyh)} \quad (13)$$

Elektriksel çıkış gücü ise Eşitlik 14’deki gibi basitçe gerilim (V) ve akım (I)’ ın çarpımıdır.

$$Pyh = V.I \quad (14)$$

Yakıt girişi, genelde entalpi (ΔH) ya da yüksek ısıtma değeri olarak verilen, (Watt cinsinden) yakıt (hidrojen) tüketim oranı (g/s cinsinden) ve bunun enerji içeriğinin bir çarpımıdır. Hidrojenin yüksek ısıtma değeri 142,000 J/g Elektrokimyasal reaksiyonda hidrojenin tüketim oranı (g/s cinsinden)



Faraday yasası uyarınca Eşitlik 16 ile belirlenir

$$Q_{H_2} = \frac{mI}{nF} \quad (16)$$

Burada m , hidrojenin moleküler ağırlığı (2,016); I , akım (Amper); n , reaksiyona dâhil olan elektronların sayısı (2) ve F , Faraday sabitidir (96,450 C/mol). Böylece yakıt giriş gücü Eşitlik 17'deki gibi olur.

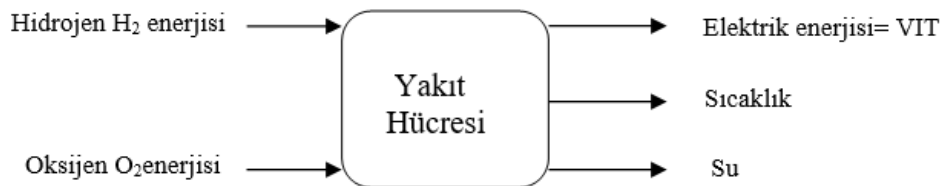
$$F_{yh} = q_{H_2} \cdot \Delta H = \frac{m \Delta H}{nF} I \quad (17)$$

Eşitlik 15'deki elektrokimyasal tepkime $m\Delta H/(nF)$ 1,482 V'luk bir değere sahiptir. Buna, elektrokimyasal tepkime eşitlik 15 deki sonucu ortaya çıkan azami elde edilebilir enerji (hem elektriksel hem termal) ile ilgili tersinir potansiyel adı verilir. Böylece, 13, 14, 16 ve 17 eşitlikleri birleştirilerek, yakıt hücresi verimi basitçe Eşitlik 18'deki gibi asıl çalışma voltajı ve 1,482 V' un oranı olur.

$$\eta_{yh} = \frac{V}{1.482} \quad (18)$$

4.4.3. Yakıt Hücresi Enerji Üretimi

Bir yakıt hücresinde üretilen elektrik enerjisi ölçülen voltaj, akım ve zaman parametreleri kullanılarak hesaplama yapılır. Bu enerjinin kaynağı meydana getiren olaya kimyasal reaksiyon denir.



Bu kimyasal reaksiyon sonrası ortaya çıkan ya da ortamdan alınan enerji reaksiyona giren maddelerin ve sonuçta meydana gelen ürünlerin Gibbs Enerji farkına eşittir. Gibbs Serbest Enerjisi, maddenin Entalpisi (ΔH) ve entropisindeki (ΔS) değişikliklerinin birlikte ifadesine denir.

Tepkime için Gibbs Serbest enerji değişimi:

$$\Delta G = G_f(\text{ürünler}) - G_f(\text{reaktantlar}) = \Delta H - T\Delta S \quad (19)$$

Yakıt hücresinde meydana gelen enerjinin formül ile hesaplanması

$$\Delta g^-_f = g^-_f(\text{ürünler}) - g^-_f(\text{reaktantlar})$$

$$\Delta g^-_f = (g^-_f)_{H_2O} - (g^-_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (g^-_f) \quad (20)$$

Tablo 4.3.Hidrojenin fiziksel özellikleri www.enerjiportali.com/10.06.2019

Üretilen Su Fazı	Termometre	Δg_f (kJ _{mol} ⁻¹)
Sıvı	25	-237,2
Sıvı	80	-228,2
Gaz	80	-226,1
Gaz	100	-225,2
Gaz	200	-220,4
Gaz	400	-210,3
Gaz	600	-199,6
Gaz	800	-188,6
Gaz	1000	-177,4

4.4.4. Yakıt Hücresi Açık Devre Enerji Gerilimi

Eğer yakıt hücresinde hiç enerji kaybı yoksa yani sistemler tersinir ise Gibbs serbest enerji sisteminin tamamı elektrik enerjisine dönüşmektedir. Bu ideal duruma göre, tersinir açık devre gerilimi bulunmaktadır. Bir yakıt hücresinde, üretilen her su molekülü ve için elektron devreden geçer. Yani kullanılan 1 mol hidrojen için 2N elektron geçer. (N Avagadro sayısıdır 6,022 X 10²³ Molekül/Mol) Bir elektronun yükü -e (1,602 X 10⁻¹⁹ coulombs/elektron) ise toplam transfer edilen yük:

$$-2Ne = -2F \text{ coulombs}$$

F:faraday sabiti ve değeri 96485 C / E_{mol}

E: Hücresinin gerilimi ise, elektriksel iş:

$$\text{Elektriksel} = \text{yük} \times \text{gerilim} = -2FE \text{ joules} \quad (21)$$

Eğer sistem tersinir işlemse yapılan iş Gibbs serbest enerjine eşittir. (Pourmovahed)

Açık devre gerilimi:

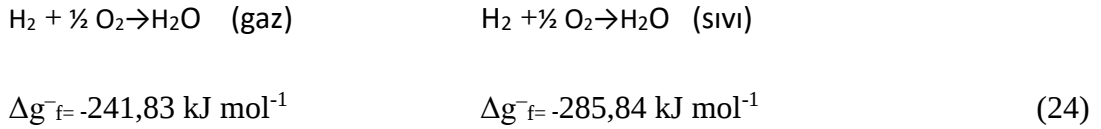
$$\Delta g_f = -2F.E \quad E = \frac{\Delta g_f}{-2F} \quad (22)$$

Yakıt Hücresinin Teorik Enerji Üretimi

Yakıt hücresinin teorik verimi genel olarak bir mol yakıttan üretilen elektrik enerjisinin tepkimenin entalpisine oranıdır.

$$\text{Olası maksimum verim} = \frac{\Delta g_{\text{f}}}{\Delta h_{\text{f}}} \quad (23)$$

Çalışma sıcaklığına dikkate alınarak, dikkat edilmesi gereken hidrojen yakıtının yanması sonucu ile oluşan suyun, sıvı veya gaz halde olmasıdır. (Pourmovahed)



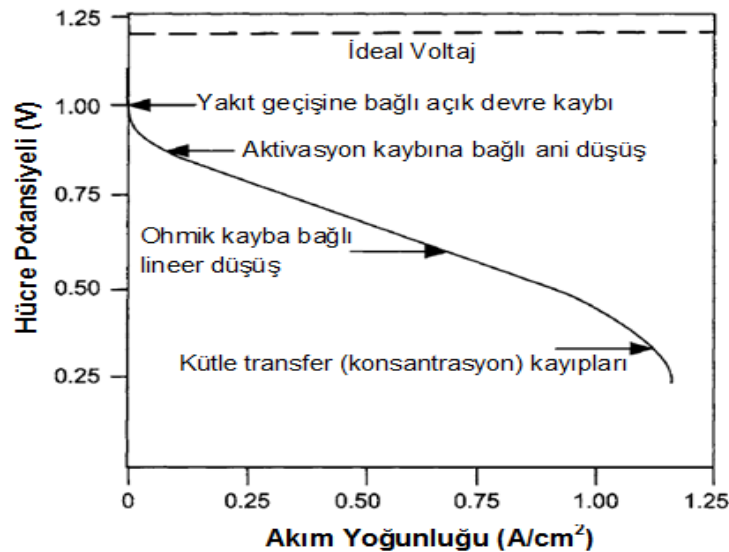
4.4.5. Gerçek Yakıt Hücre Potansiyeli - Polarizasyon Eğrisi

Gerçek hücre potansiyeli (V_{cell}), teorik hücre potansiyelinden aktivasyon (ΔV_{act}), ohmik (ΔV_{ohm}), yoğunlaşma (ΔV_{conc}) kayıplarının çıkarılması sonucu elde edilir.

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{r}} - (\Delta V_{\text{act}} + \Delta V_{\text{conc}}) \text{ a } (\Delta V_{\text{act}} + \Delta V_{\text{conc}}) - \Delta V_{\text{ohm}} \quad (25)$$

Aktivasyon, ohmik ve yoğunlaşma kayıplarının, teorik hücre geriliminden çıkarılarak elde edilen hücre polarizasyon eğrisi Şekil 4,15’de verilmiştir (Pourmovahed).

Anot ve katot aktivasyon kayıpları aynı olarak değerlendirilir ancak kayıpların çoğunluğu oksijen indirgenme reaksiyonundaki yavaşlık nedeniyle katot da meydana gelmektedir.



Şekil 4. 15. Yakıt Hücresindeki Voltaj-Akım Polarizasyon Eğrisi (Pourmovahed, 2009)

4.5.6. Gerçek Hücre Verimliliği

Yakıt hücresi verimliliği, faydalı enerji çıkışı yani üretilen elektrik ve enerji girişi yani tüketilen hidrojen arasındaki orandır. Her ikisi de watt veya kilowatt gibi aynı birimlerde olmalıdır.

$$\eta = W_{el} / W_{H_2} \quad (26)$$

Burada η : verimi, W_{el} : üretilen elektrik enerjisini W_{H_2} : tüketilen hidrojen miktarını göstermektedir. Elektrik üretimi (W_{el}), sadece gerilim (V) ve akımın (A) çarpımıdır.

$$W_{el} = V \cdot I \quad (27)$$

Tüketilen Hidrojen miktarı N (mol/s), Faraday Kanununa göre doğrudan üretilen akım I (A) ile orantılıdır;

$$N_{H_2} = I / nF \quad (28)$$

Tüketilen hidrojenin “enerji değeri”;

$$W_{H_2} = \Delta H \cdot I / nF \quad (29)$$

Tüm elektrokimyasal hücrelerde olduğu gibi, bir yakıt hücresi, elektrotlardan birinde tüketilen veya üretilen bir maddenin miktarının, hücreden geçen elektronlar doğrudan orantılı olduğunu belirten Faraday Kanununa göre çalışmaktadır. Bu nedenle, hidrojen tüketim oranı, yakıt hücresindeki akımla orantılıdır. Faraday’ın sabitini, elektron molü başına 96.485 coulomb'a (C) ve yarım hücre stokiyometrisine Denklemden görüldüğü gibi, hidrojen molü başına 2 mol elektron kadar kullanmalıdır.

Örneğin, hidrojenin 0,00005 mol / sn hızında tüketildiği tek hücreli bir yakıt hücresinde, yakıt hücresi tarafından üretilen elektrik akımı Denklem 30 olarak hesaplanabilir (Pourmovahed).

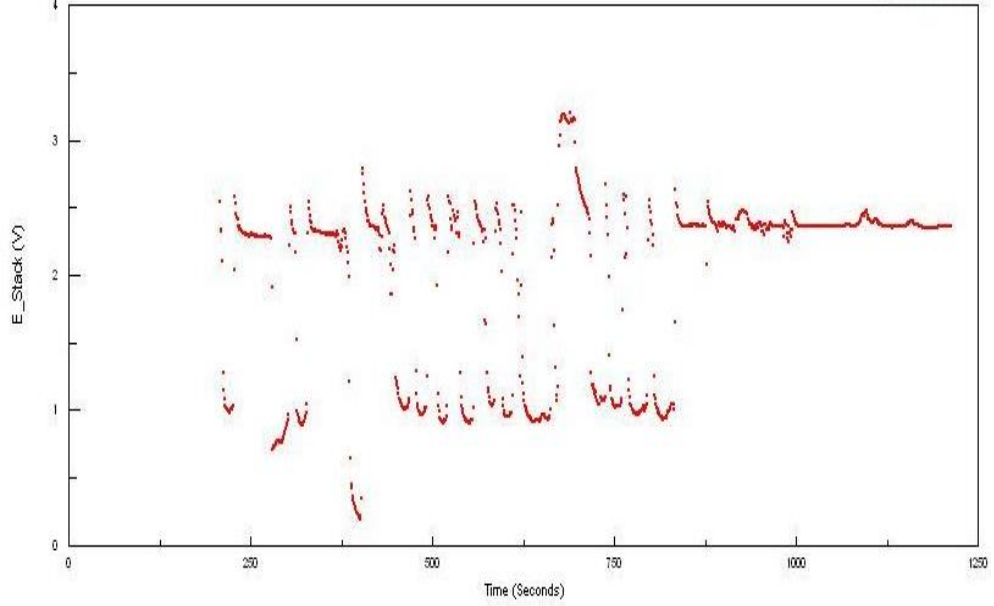
$$I = \frac{5 \times 10^{-5} \text{ mol } H_2}{s} \cdot \frac{2 \text{ mole}^-}{\text{mol } H_2} \cdot \frac{96485 \text{ C}}{\text{mole}^-} = 9.6 \frac{\text{C}}{s} = 9.6 \text{ A} \quad (30)$$

5. DENEYSEL BULGU VE TARTIŞMA

Çalışmamızın bu bölümünde Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında, kurulumunu yapmış olduğumuz PEMYP deney düzeneğini kararlı hale gelene kadar yaklaşık 15 saat çalıştırıp, kararlı bir hale getirdikten sonra Hidrojen ve Oksijen gazının debimetre vasıtasıyla ölçülerek sisteme verilip, sistemin enerji parametreleri tarafımızca gözlemlenmiştir. Bu gözlem verileri kayıt altına alınarak grafik haline getirilerek sunulmuştur. PEMYP'nin ebatları 3×3 cm, 8 adet hücreden oluşmaktadır. Nem %60, Hat Sıcaklığı 70°C, PEMYP Sıcaklığı 41°C sıcaklıkları ve Amper 1,8A parametreleri en ideal konumda sabit bir konuma getirildikten sonra hidrojen ve oksijen debileri kademeli bir şekilde artırılarak yakıt hücresinin verimi ölçülerek veriler kayıt altına alınmıştır. Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında PEMYP deney standında kullanmış olduğumuz tek hücresini, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK'ın yakıt hücresi laboratuvarında aynı değerler üzerinden test edilmiş, test esnasında dijital debimetre kullanılmıştır. Manuel debimetre ile küçük farklılıklar olsa da birbirine yakın veriler elde edilmiştir. Bu çalışmada sistemde dijital debimetre kullanımı daha net veriler elde edileceği için dijital debimetreler kullanımı önerilir. Aşağıdaki veriler yakıt hücresi laboratuvarından alınan verilerdir. PEMYP'de hidrojen debisi 0,2ml/dk oksijen debisi 0,4ml/dk hücre sıcaklığı 39°C, Anot elektron sıcaklığı 50°C Katot elektron sıcaklığı 50°C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 0,593V walt cininden ise 1,065W değerinde güç elde edilmiştir.

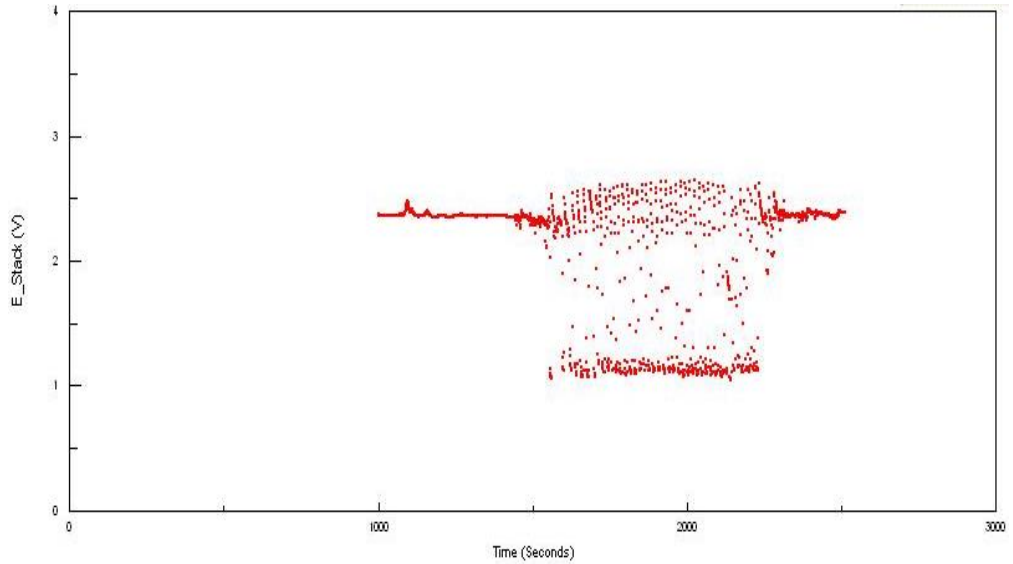
Yapılan deneylerde değişik veriler elde edilmiştir. Örneğin Polimer Elektrolit Membranlı pilli hidrojen 0,2ml/dk oksijen 0,4ml/dk hücre sıcaklığı 39°C Anot elektron sıcaklığı 50 °C, Katot elektron sıcaklığı 50 °C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 2,359V tur. Diğer bir deneyde Polimer Elektrolit Membranlı pilli hidrojen 0,4ml/dk oksijen 0,6ml/dk hücre sıcaklığı 34°C Anot elektron sıcaklığı 50°C, Katot elektron sıcaklığı 50°C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 2,322V tur.

Aşağıdaki Şekil 5.1’de görüldüğü gibi Polimer Elektrolit Membranlı pilli hidrojen 0,2 oksijen 0,4 ml/dk, hücre sıcaklığı 39°C Anot elektron sıcaklığı 50°C, Katot elektron sıcaklığı 50°C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 2,359V’tur.



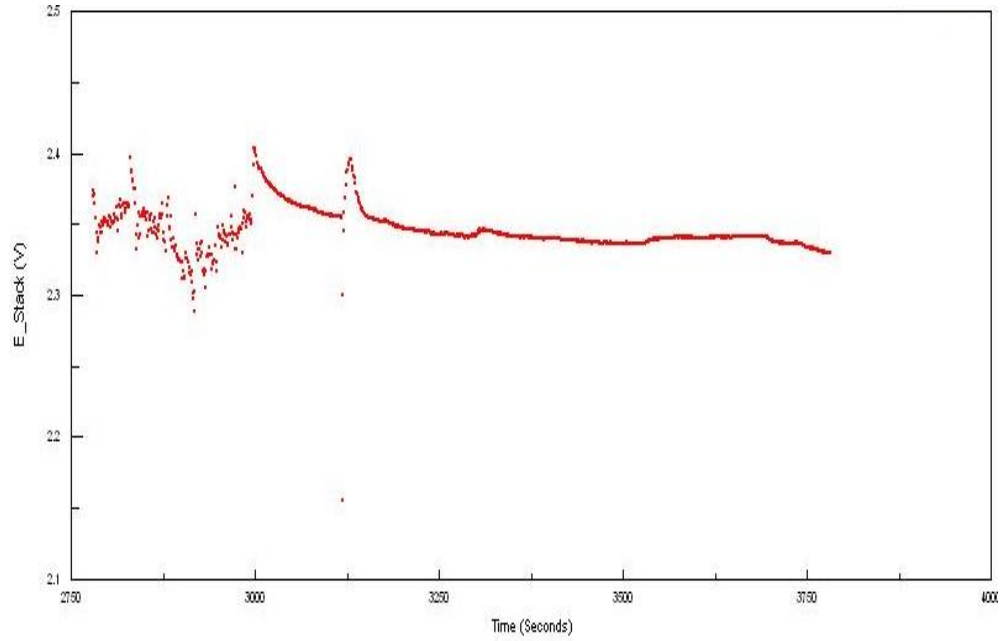
Şekil 5. 1. PEMYP Hidrojen (H₂) 0,6 ml/dk -Oksijen (O₂) 1,0 ml/dk

Aşağıdaki Şekil 5.2’de görüldüğü gibi PEMYP hidrojen 0,8 ml/dk oksijen 1,2 ml/dk hücre sıcaklığı 46°C, Anot elektron sıcaklığı 50°C, Katot elektron sıcaklığı 50°C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 2,384V’tur.



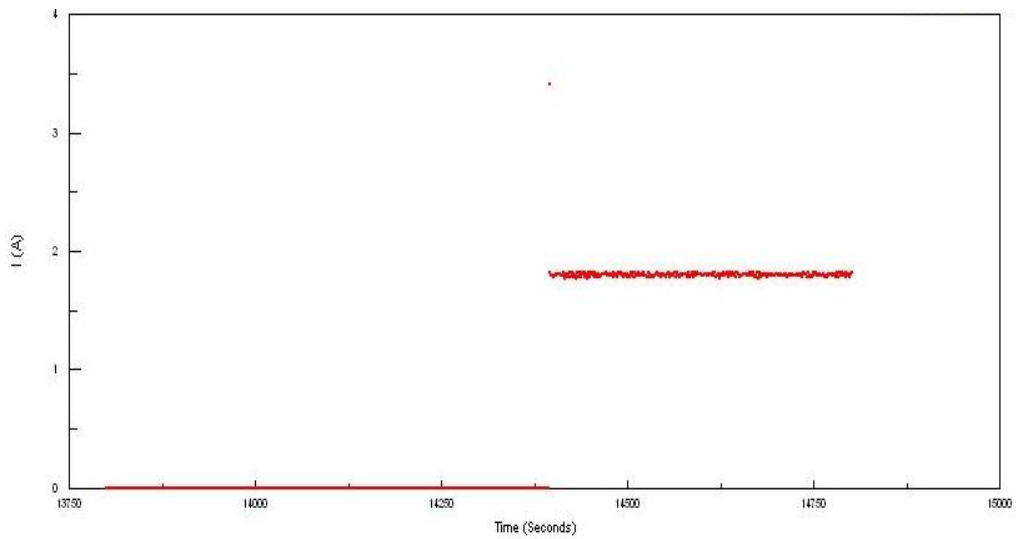
Şekil 5. 2. PEMYP Hidrojen (H₂) 0,8 ml/dk -Oksijen (O₂) 1,2 ml/dk

Aşağıdaki Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi PEMYP Hidrojen 1,8 Oksijen 2,0 ml/dk, hücre sıcaklığı 52°C, Anot elektron sıcaklığı 50°C, Katot elektron sıcaklığı 50°C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 2,329V tur.



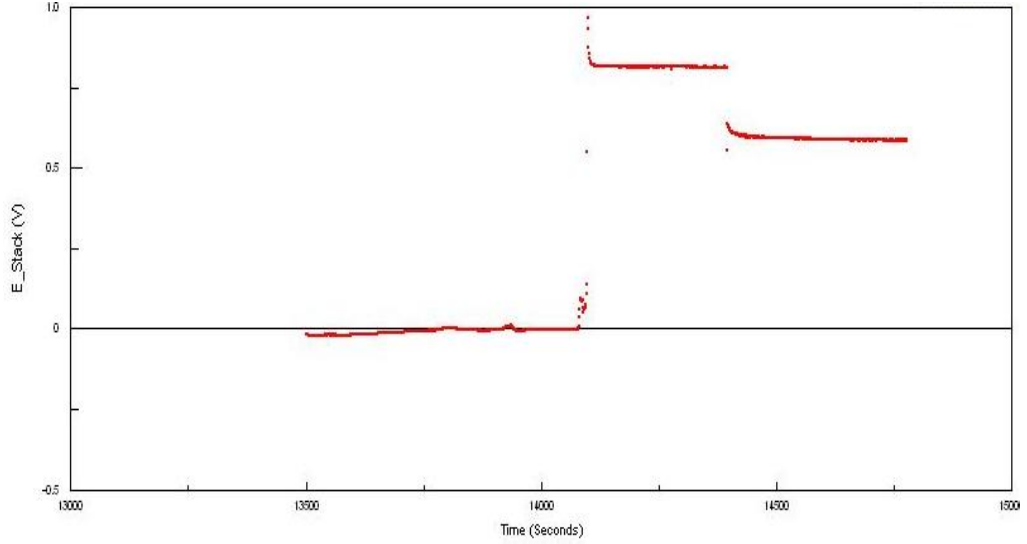
Şekil 5. 3.P.E.M Hidrojen (H₂) 1,8 ml/dk -Oksijen (O₂) 2,0 ml/dk

Aşağıdaki Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi PEMYP deney verileri görülmektedir. Hidrojen 1,8 ml/dk Oksijen 2,0 ml/dk hücre sıcaklığı 40°C, Anot elektron sıcaklığı 66°C, Katot elektron sıcaklığı 64°C sabitlendiğinde sisteme 1,8 amper verildiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 0,584V, Akım 201,4mA/cm² elde edilir.



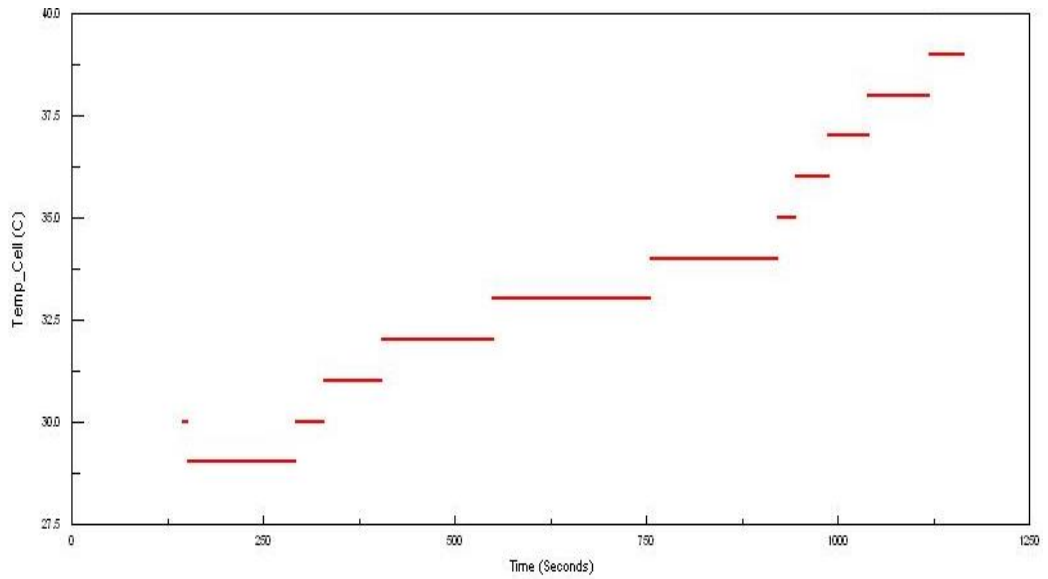
Şekil 5. 4. PEMYP Hücre Akım (A)

Şekil 5.5.'de görüldüğü gibi PEMYP hidrojen 1,8 ml/dk Oksijen 2,0 ml/dk hücre sıcaklığı 40°C, Anot elektron sıcaklığı 66°C, Katot elektron sıcaklığı 64°C sabitlendiğinde sisteme 1,8A verildiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden, 0,587V, Akım 200,1mA/cm² elde edilir.



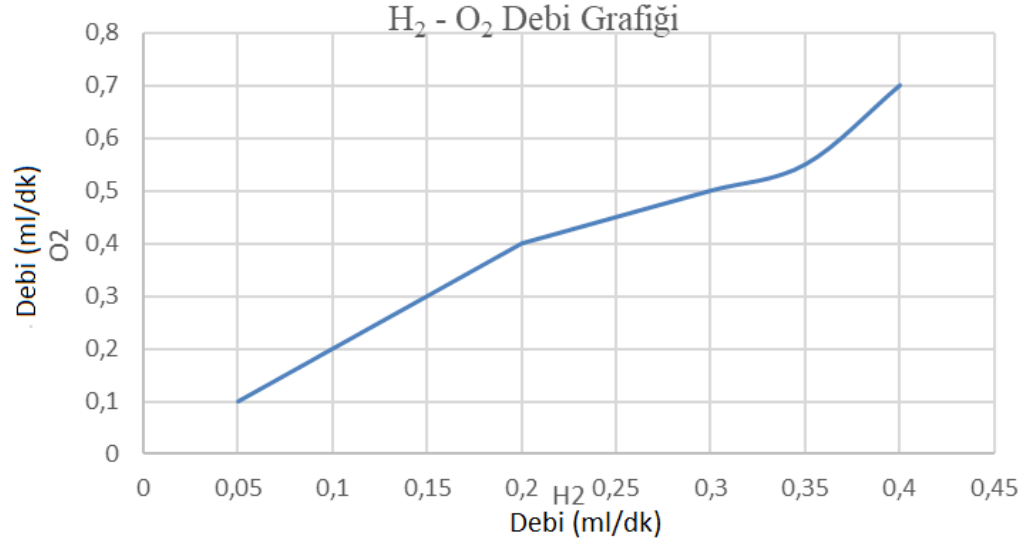
Şekil 5. 5. PEMYP Hücre Voltajı (V)

Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi PEMYP, hücre sıcaklığı 39°C, Anot elektron sıcaklığı 50°C Katot elektron sıcaklığı 50°C sabitlendiğinde ortaya çıkan enerji volt cinsinden 2,373V'tur.



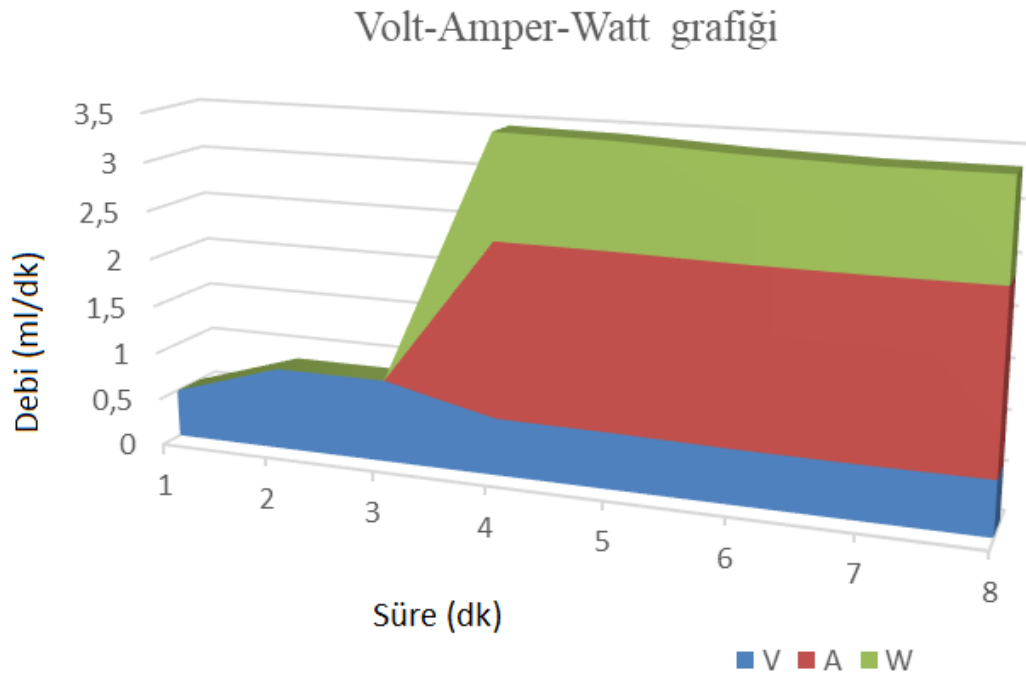
Şekil 5. 6. PEMYP Hücre Sıcaklığı (°C)

Sistemde kullanılan PEMYP üreticine gönderilen hidrojen ve oksijen debi parametreleri zamanla değişimi ml/dk cinsinden Şekil 5.7.'de sunulmuştur.



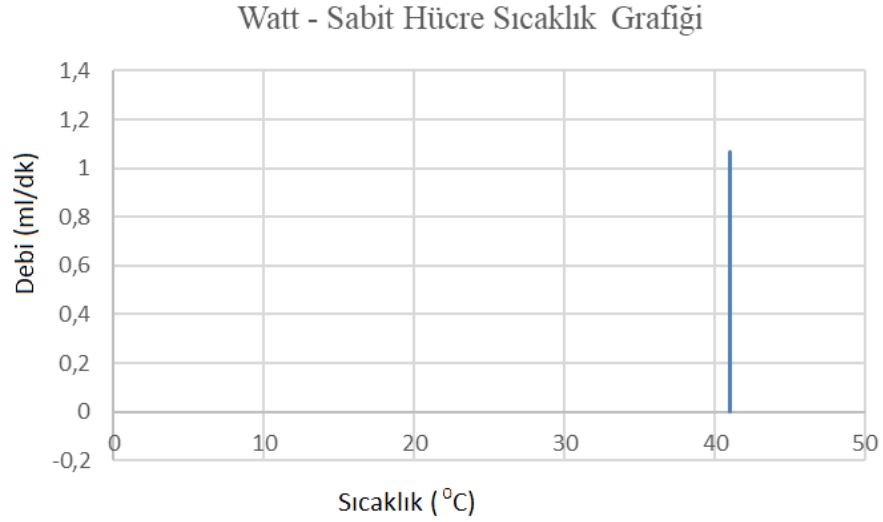
Şekil 5. 7. PEMYP Hidrojen ve Oksijen Debilerin Zamana Bağlı Grafiği

Sistemde kullanılan PEMYP üreticinin meydana getirmiş olduğu elektrik enerjisi üçüncü zaman diliminden sonra sisteme amper verilince, walt değerinin yükseldiği gözlenmektedir. Volt-walt-Amper parametreleri aşağıda Şekil 5.8.'de sunulmuştur.



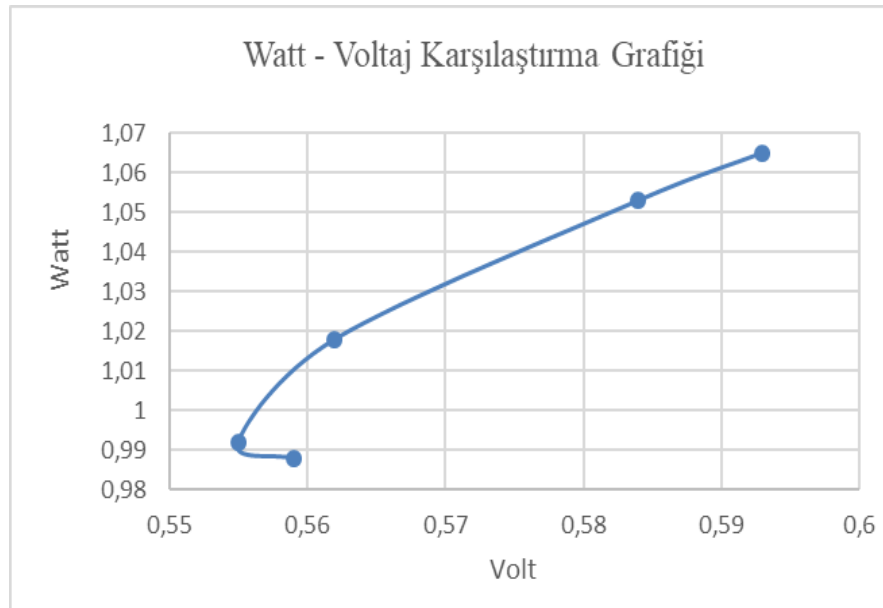
Şekil 5. 8. PEMYP Volt-Amper-Watt Grafiği

Hücre sıcaklığı 41°C sıcaklıkta sabit halde tutulunca PEMYP'nin ürettiği enerji walt cinsinden değeri Şekil 5.9.'da gösterilmektedir. Sabit sıcaklıkta debi 0 ml/dk 'dan başlayarak düzenli bir şekilde 1 ml/dk 'ya kadar artırılmıştır.



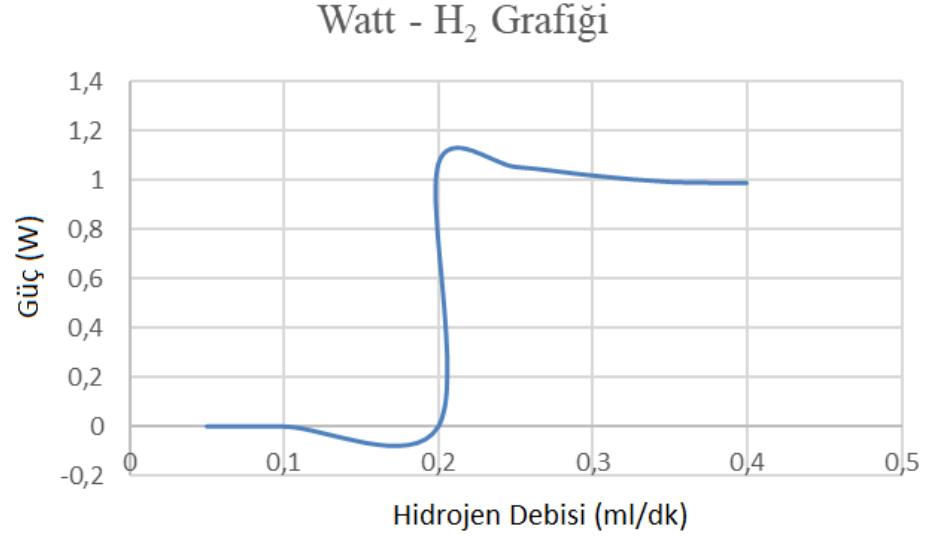
Şekil 5. 9. PEMYP Watt-Sabit Hücre Sıcaklığı Grafiği

PEMYP'nin Oksijen ve Hidrojen gazlarının, debi oranına bağlı olarak volt ve walt paralel güç ürettiği Şekil 5.10'da gözlenmektedir. Volt değeri $0,56\text{V}$ 'da başlamış olup yaklaşık olarak $0,6\text{V}$ 'a kadar ilerlemiştir. Güç ise $0,99\text{W}$ 'dan $1,065\text{W}$ 'a kadar yükselme göstermiştir.



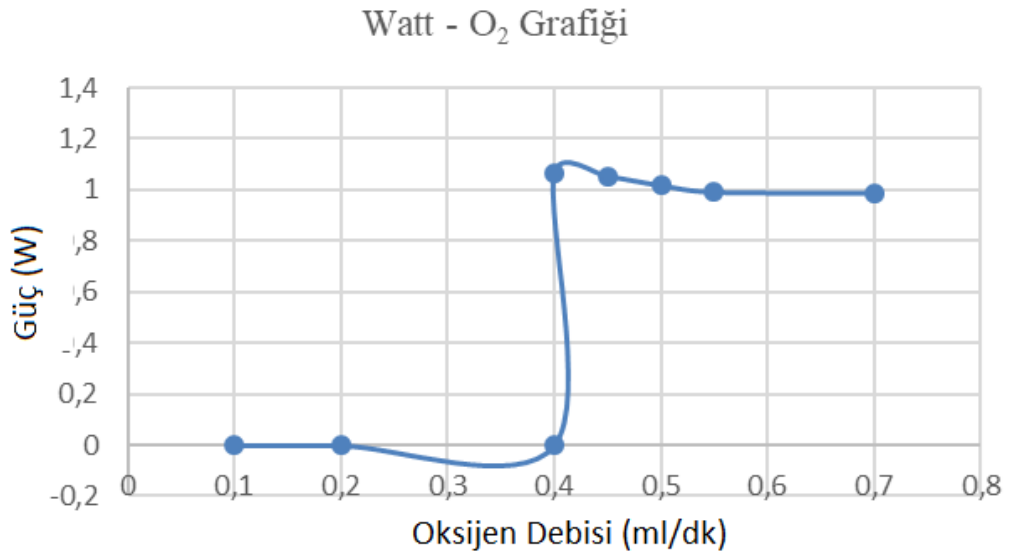
Şekil 5. 10. PEMYP Watt-Voltaj Karşılaştırma Grafiği

Yapılan çalışmada PEMYP gönderilen hidrojen gazının debisi ml/dk cinsinden değeri ve ürettiği enerjinin watt cinsinden değeri aşağıdaki Şekil 5.11.'de sunulmuştur.



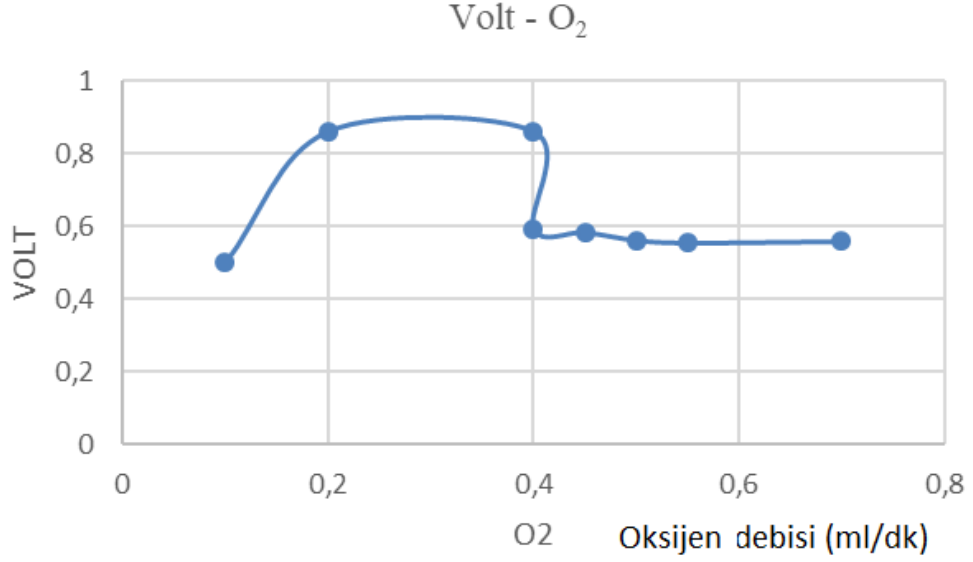
Şekil 5. 11. PEMYP Watt-H₂ Grafiği

Yapılan çalışmada PEMYP 'ne gönderilen oksijen gazının debisi ml/dk cinsinden değeri ve ürettiği enerjinin watt cinsinden değeri aşağıda 5.12 grafiğinde sunulmuştur.



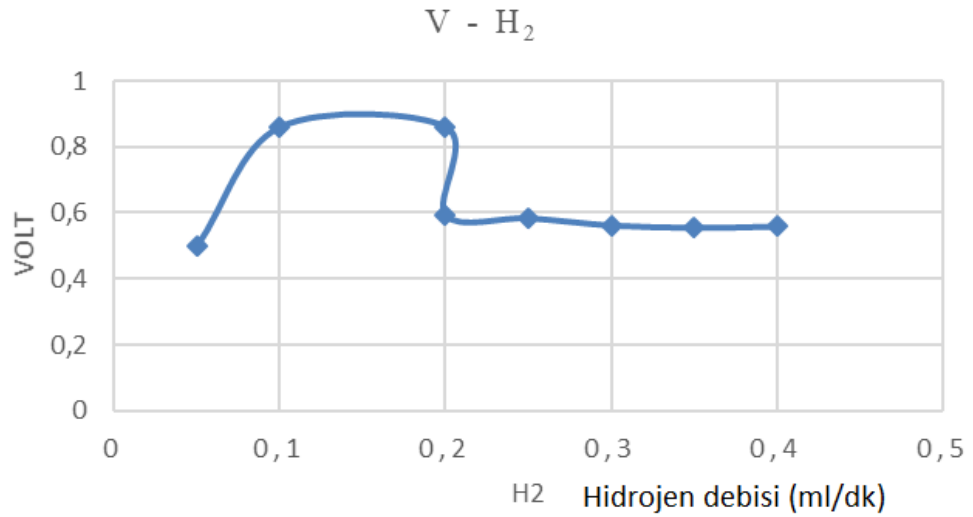
Şekil 5. 12. PEMYP Watt-O₂ Grafiği

Sistemde PEMYP'ne gönderilen oksijen gazının debisi ml/dk cinsinden değeri ve ürettiği enerjinin volt cinsinden değeri aşağıda 5.13'de grafiğinde sunulmuştur.



Şekil 5. 13.PEMYP V -O₂ Grafiği

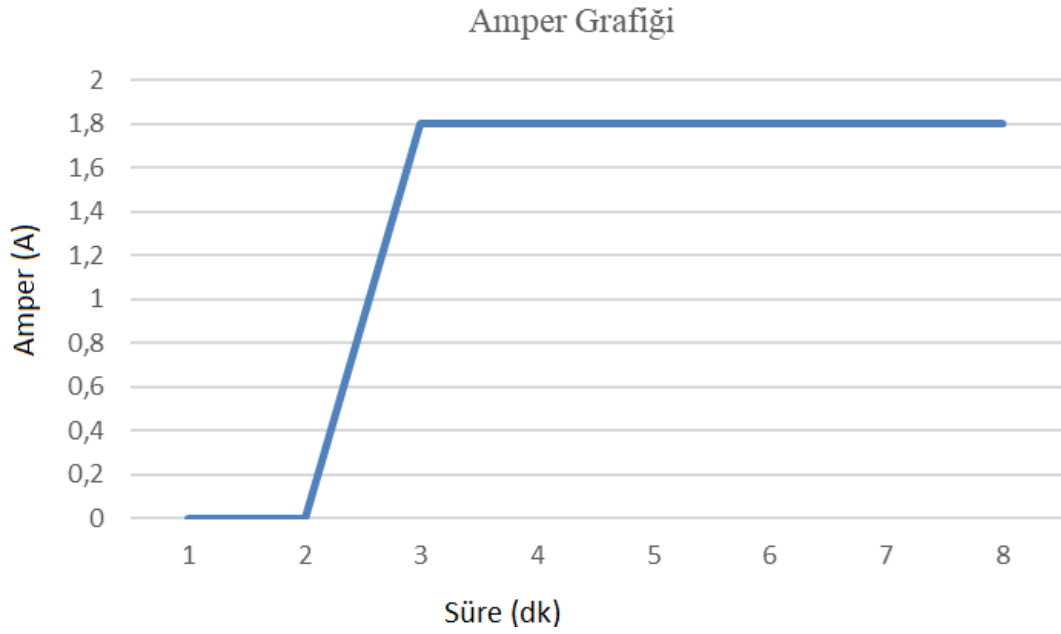
Sistemde PEMYP'ne gönderilen hidrojen gazının debisi ml/dk cinsinden değeri ve ürettiği enerjinin volt cinsinden değeri aşağıda 5.14 grafiğinde sunulmuştur.



Şekil 5. 14. PEMYP V -H₂ Grafiği

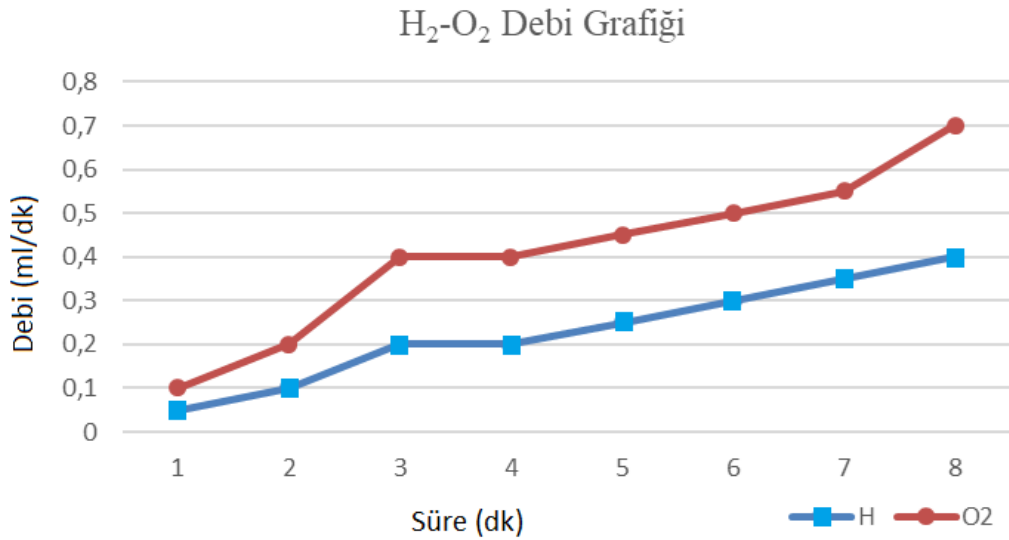
Aşağıdaki görüldüğü gibi ikinci zamanın başlangıcında sisteme 1,8 amper verilmekte, verilen amperin zamanla değişimi aşağıdaki Şekil 5.15.'de

verilmiştir. İlk 2. dakikada 0A iken daha sonraki dakikalarda Amper değeri 1,8A'e kadar yükseltilmektedir. 3. dakikadan sonra amper sabit tutulmaktadır.



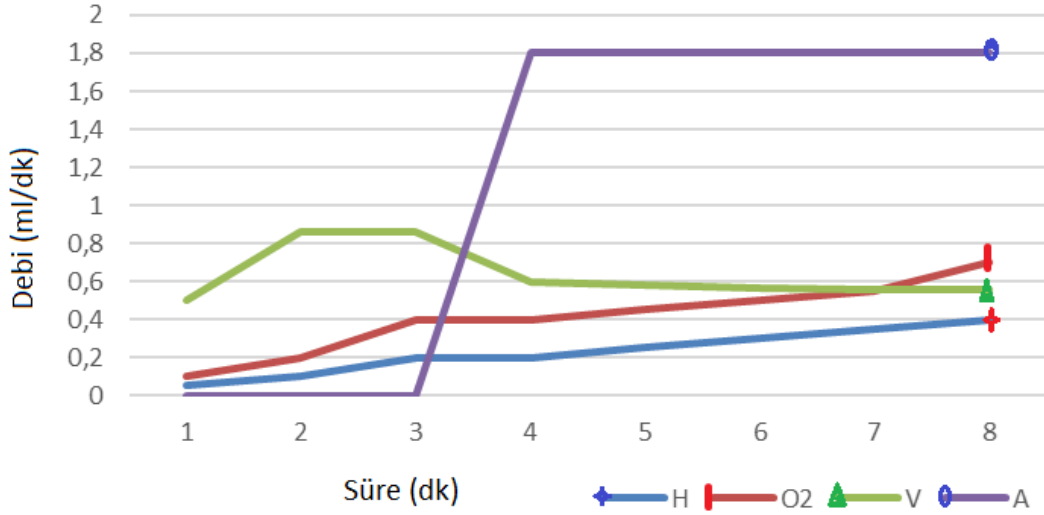
Şekil 5. 15. PEMYP Zaman- Amper Grafiği

PEMYP sisteminde hidrojen ve oksijen debilerinin ml/dk cinsinden zamanla değişimi Şekil 5.16.'de gösterilmiştir. H₂ 0,2 ml/dk O₂ 0,4 ml/dk da en iyi performansı sağlamıştır.



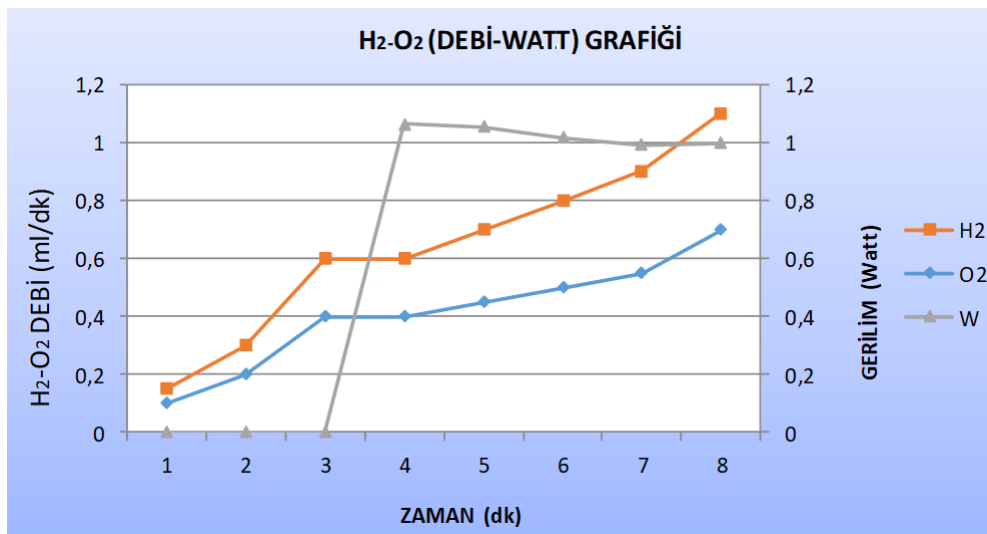
Şekil 5. 16. PEMYP H₂-O₂ Debi Değişim Grafiği

Aşağıdaki Şekil 5.17’de üçüncü ve dördüncü zaman aralığında görüldüğü gibi hidrojen debisi 0,4 ml/dk ve oksijen debisi 0,2 ml/dk verildiğinde, üçüncü zaman başlangıcında sisteme 1,8 Amper bağlandığında maksimum 1,065W değerini elde etmiş oluruz.



Şekil 5. 17. PEMYP H -O₂-V-A, Grafiği

Aşağıdaki Şekil 5.18.’de görüldüğü gibi PEMYP’nde yapılan çalışma neticesinde oksijen O₂ ve hidrojen H₂ zamana bağlı debileri kademeli bir şekilde artırıldığında O₂ 0,4 ml/dk H₂ 0,2 ml/dk sisteme 1,8A verildiğinde voltaj değeri 1,065W değeri elde edilmektedir.



Şekil 5. 18 PEMYP Hidrojen(H₂), Oksijen(O₂), Watt (W) Grafiği

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma neticesinde PEMYP'nin kararlı bir hale gelmesi için yakıt hücresi uzun bir süre çalıştırıldı. Yakıt hücresi kararlı hale geldikten sonra hidrojen ve oksijen debileri sürekli kademeli bir şekilde değiştirilerek sistemin ürettiği enerji gözlemlendi ve bu gözlem sonucunda alınan verilerden grafikler elde edildi. Gereken hesaplamalar yapıldı. Yakıt pili çalıştırıldığında, hidrojen debisi 0,2 ml/dk ve oksijen debisi 0,4 ml/dk değerine sabitlendiğinde, sisteme 1,8A'lık akım verildiğinde en iyi volt değerinin elde edildiği tespit edilmiştir. Yakıt hücresi için ideal değerleri hem H_2 hem de O_2 için 0,1 ml/dk olarak başlayıp 1 ml/dk'ya kadar artırılarak kademeli şekilde deneyler yapılmıştır. H_2 gazı için debi değeri 0,2 ml/dk en ideal verimin sağlandığı değer olarak bulunmuştur. 0,2 ml/dk değerinin altında ise elektrik üretimi olmamıştır. 0,2 ml/dk değerini de çok geçince ise güç yaklaşık olarak %20 değeri kadar düşmüştür. O_2 gazı için ise debi değeri 0,4 ml/dk en ideal verimin sağlandığı değer olarak tespit edilmiştir. 0,4 ml/dk değerinin altında elektrik akımı elde edilmezken, 0,4 ml/dk değerini de çok geçince ise güç ortalama olarak %20 kadar düşüş gözlemlenmiştir. Deneyler esnasında nem %60, hat sıcaklığı $70^{\circ}C$, hücre sıcaklığı $41^{\circ}C$ 'de sabitlenerek deneyler yapılmıştır. Tek hücreden H_2 debisi 0,2ml/dk, O_2 ise 0,4ml/dk değerinde 1,065W değerinde güç elde edilmiştir.

Reaktanların debileri kademeli bir şekilde yükseltildiği zaman yakıt hücresi plakalar içinde su oluşumu meydana gelmektedir. Su oluşumu meydana gelince, plaka kanallarında reaksiyon kesilmekle beraber, buna bağlı olarak voltaj kesintiye uğramakta veya voltaj düşmektedir. Daha iyi enerji verimi elde etmek için, plakalar arasında su oluşumunun önlenmesi gerekmektedir. Plaka kanallarında reaktanların, kimyasal reaksiyon aşamasında su oluşumu önlenirse, yüksek enerji elde edileceğini ve ileriki yıllarda bilime ciddi katkılar sağlayacağı kanaatindeyim. Değerlerin ölçümünde daha hassas ölçüm aletlerinin kullanılması değerlerin alınmasında sağlıklı verilerin elde edilmesini sağlayacağını düşünmekteyim. Sistemin çalıştırılmasında beklenmedik şekilde hücrelerin patlaması ve yanması gibi olumsuz durumlar deneyleri sekteye uğratmaktadır. Çalışmamız Batman Üniversitesi Araştırma Projesi (BAP) tarafından BTÜBAP-2017 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Amerika Enerji Departmanı (DOE), 2012, High-Efficiency, Direct-Hydrogen Fuel Cell System For Automobiles, Michigan.

Akansel S., 2012, Kompleks Hidrit Nano parçacıkların Sentezi Ve Hidrojen Kinematığının Araştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Fen bilimler Enstitüsü, Ankara.

Akfidan T., 2010, Bir Hibrit Yakıt Pili ve Güneş Pili Enerjili Aracın Modellenmesi, Simülasyonu ve Prototip Uygulaması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Ateş Y., 2008, Hibrit Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitörlü Taşıt Güç Sisteminin Yapay Sınır Ağları İle Kontrolü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Alniak O., 2008, Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tankı İmalatının İncelenmesi 5 VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES' 17-19 Aralık, İstanbul.

Altanneh N., 2012, Güneş Pili ve Hidrojen Yakıt Pilinden Beslenen Küçük Bir Elektrikli Araç İçin Batarya Şarj Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Akbulut B., 2007, Yakıt Pili Hibrit Santraller, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.

Ankaralı, A., 2014, Hidrojen Enerjisi Ve Hidrojen Pilleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

Aydın, M., 2007, PEM Yakıt Pillinin İki Boyutlu Modellemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Biliroğlu AÖ., 2009, Seri Hibrit Elektrikli Araçların Modellenmesi Ve Kontrolü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Bıykoğlu, A., 2003, Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 16(3), 523-542, Ankara.

Gülden, B., 2015, Elektroliz Yöntemi İle 20m³/h Kapasiteli Hidrojen Üreticinin Tasarımı ve Gözenekli Elektrot Malzemelerinin Parametrelere Etkisinin Araştırılması, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce.

Büyüktür, A. R., 1995, Termodinamik , Uygulama Esasları, Cilt 2, 3. Baskı, Birsan Yayınevi, 145-157.

Ceviz, Y., Polimer Elektrolitli Yakıt Pillerinde Karbon-Platin-Rutenyum Kompozit Elektrotun Sentezi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul.

Çelik C., 2006, Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili Proses Parametrelerinin Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.

Çalışkan N., 1995, Altın Elektrotakrotil Alkolün Elektrokimyasal Özellikleri Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F., 2002, Yakıt Pilleri ve Uygulamaları, 3e Electrotech Dergisi, Bilişim Yayıncılık, Fuarcılık ve Tanıtım Hizmetleri A.Ş. Sayı: 100, İstanbul.

Çetinkaya M., Karaosmanoglu, F., 2005, Yakıt Pilleri, Makina Mühendisleri Odası Bülteni, 98s., Ankara.

Çuhadaroglu, H., 2005, Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri Teknolojisi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

Doğu İ., 2014, Güneş Enerjisi Destekli PEM Elektrolizlerinde Hidrojen Üretiminin Deneysel İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.

Demirci Y., 2010, Hibrit Araçlarda Elektrik Motoru Denetimi Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale.

Demonstration, PhD Thesis, KTH- Royal Institute of Technology, Stockholm.

Efendioğlu D., 2013, PEMYP Performansının Deney Tasarımı Kullanılarak Optimizasyonu, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

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

Gedik, Ö., T., 2015, Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Çevresel Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Gümüsoğlu T., 2012, PEMYP Performansını Etkileyen Parametrelerin Optimizasyonu, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Güneş S., 2008, PEMYP Katodunda Kullanılmak Üzere Platin Bazlı Üçlü Katalizörlerin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Elektrokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Pourmovahed, A., 2005, Performance of a PEM Fuel Cell System , Proceedings of the 2005 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition Copyright 2005, American Society for Engineering Education, Michigan.

Haraldsson, K., 2005. On Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles Modelling and Demonstration, Doctoral Thesis, KTH- Royal Institute of Technology Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes Stockholm, Sweden.

İçingür Y., 2011, Bir Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili Kullanılmak Üzere Gaz Akış Plakaları Tasarımı Ve Denenmesi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

İ.Türe E., 2006, Fotoelektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi Türkiye 10. Enerji Kongresi, İstanbul.

Kahraman H., 2014, Sıkıştırma Basıncının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Faculty of Technical Education, Department of Mechanical Education, Sakarya.

Keskin F., 2014, Yakıt Pili-Bataryalı Hibrid Bir Elektrikli Araçta Enerji Yönetiminin Sağlanması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Kireç L., 2009, Taşıtlar İçin Alternatif Enerji Sistemi Olan Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili Yapımı ve Parametrik Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Kaplan R., 2008, İmal Edilen ve Ticari PEM Tipi Yakıt Hücrelerinin Performanslarının Kıyaslanması, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.

Köse H., 2012, Hidrojenin Çift Yakıt Modunda İlavesinin Motor Performans ve Emisyon Üzerine Etkisinin Deneysel Araştırılması, Konya.

Obut S., 2010, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresinin Modellenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Alınak M. O., Oğur A., Karakaya Ç., Ertürk M., Güneş İ., 2008, Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tankı İmalatının İncelenmesi 5. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Utes'2008 17-19, İstanbul.

Özbasan M., 2009, Yüksek Basıncıta Hidrojen Depolama İşleminin Termodinamik Modellenmesi ve Enerji Sürdürülebilirlik Analizi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

Sarı, Z., 2002, Alkali Yakıt Pili Bileşen-Basarım İlişkisi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.

Şenaktaş, B., 2005, Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

Ulusoy, I., 2012, Yakıt Hücresi Sisteminde Elektrokimyasal ve Mikrobiyolojik Yaklaşım İle Elektron Transfer Mekanizmasının İncelenmesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli.

URL 1: Us Fuel Cell Council, The Fuel Cell And Hydrogen Energy Association, <http://www.usfcc.com/>, (Erişim Tarihi: 01.05.2019).

URL 2: Alternatif Yakıt Olan Hidrojenin Kullanımı, <https://www.nedimasilkimdir.com/alternatif-yakit-olarak-hidrojen-kullanimi/>, (Erişim tarihi: 01.10.2018).

- URL 3: Exco Enerji, Hidrojen Enerjisi, <http://www.exconenerji.com/uploaded/hidrojen-enerjisi.png>, (Erişim tarihi: 01.10.2018).
- URL 4: Hydrogen / Fuel Cell, H₂Mobility: Hydrogen Vehicles, www.H2cars.de 2001, (Erişim tarihi: 08.10.2018).
- URL 5: Mobility, <https://www.netinform.net/h2/h2mobility/default.aspx>, (Erişim tarihi: 04.11.2018) .
- URL 6: https://books.google.com.tr/books?id=3DjI7P0HBNwC&pg=PP434&dq=www.hfcletter.com+2003&hl=tr&sa=X&ved=0ahUKEwjg8KudjP_iAhW586YKHcPsAzQQ6AEIKTAA#v=onepage&q&f=false, (Erişim tarihi: 18.10.2018).
- URL 7: challenge.tubitak.gov.tr/assets/yakit-pili-ve-kontrol-sistemi, (Erişim tarihi: 01.10.2018).
- URL8: Slide Player, Yenilenebilir Enerjiye Giriş, <https://slideplayer.biz.tr/slide/9402787/>, (Erişim tarihi: 05.08.2018).
- URL9: <https://www.istockphoto.com/tr/vekt%C3%B6r/fosforik-asit-yak%C4%B1t-h%C3%BCresi-gm699798980-129575881>, (Erişim tarihi: 06.11.2018).
- URL10: <https://tr.depositphotos.com/157670902/stock-illustration-phosphoric-acid-fuel-cell.html>, (Erişim tarihi: 27.07.2018).
- URL11: Academia, PEM Yakıt Pili, [www.academia.edu/6656160/PEM Yakıt Pili](http://www.academia.edu/6656160/PEM_Yakit_Pili) (Erişim tarihi: 30.05.2018).
- URL12: Bilgi Ustam, Yakıt Pili Çeşitleri, www.bilgiustam.com/hidrojen-yakit-pili-çeşitleri, (Erişim tarihi: 21.04.2018).
- URL13: Hidrojen Enerjisi, www.exconenerji.com/uploaded/hidrojen-enerjisi.png, (Erişim tarihi: 21.04.2018).
- URL14: Fuel Cell, <https://tr.motor1.com/news/126833/toyota-fuel-cell-bus-acil-durum-guc-kaynagi-olarak-kullanilabiliyor/>, (Erişim tarihi: 12.06.2018).
- URL15:b Hibrit Araçlar, <https://khosann.com/hibrit-araclar-icin-grafen-yakit-pili/>, (Erişim tarihi: 17.09.2018).
- URL16: Hidrojen nedir nerelerde kullanılır, <https://www.enerjiportali.com/hidrojen-nedir-nerelerde-kullanilir/>, (Erişim tarihi: 17.01.2018).
- URL17: Hidrojenin Avantaj ve Dezavantajları, https://www.conserve-energy-future.com/advantages_disadvantages_hydrogenenergy.php, Erişim tarihi: 01.06.2019).
- Urul Y., 2012, Hibrit Sistemlerde Enerji Yönetimi Ve Optimizasyonu, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya.
- Ültanır, Ü.T., 1998, 21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, TUSİAD Yayınları, (Yayın No: TUSİAD-T/98-12/239).

Üçler, K., 2008, PEM Yakıt Pili İçin Buhar Reformasyonu ile Hidrojen Üreten Sistemin Modellenmesi Ve Enerji Geri Kazanımı, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.

Haraldsson, K., Alvfors, P., 2005, Effects of Ambient Conditions on Fuel Cell Vehicle Performance, Journal of Power Sources.

Yıldızbilir, F., 2006, Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.

Yılmaz, A., Edge Ay, İ., Koçer, A., 2016, PEM Yakıt Pilleri, International Engineering, Science and Education Conference, Diyarbakır.

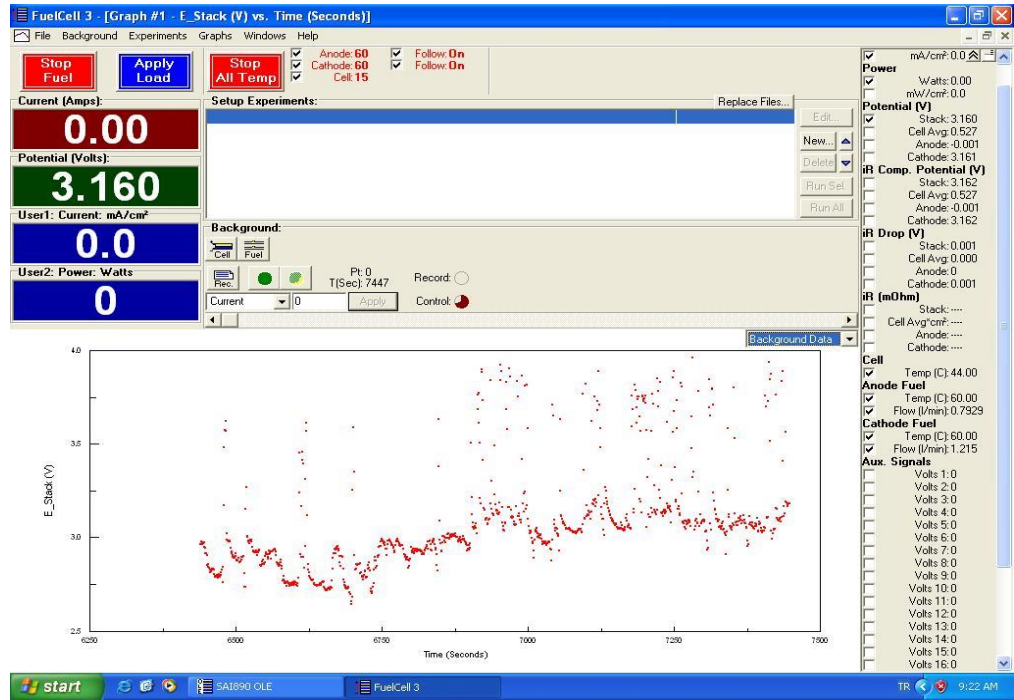
Yılmaz, A., Şevik, S., Demir, M., 2017, PEM Yakıt Hücrelerinin Taşıtlarda Kullanılabilirliği, 8th International Advanced Technologies Symposium, s 2647-2655, Elazığ.

Yılmaz, A., Şevik S., 2017, Sodyum Borhidrür (NaBH_4) Destekli Bir Hidrojen/Hava PEMYF İle Elektrik Üretiminin Deneysel Analizi, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 2/2, Sayfalar: 216-227, Batman.

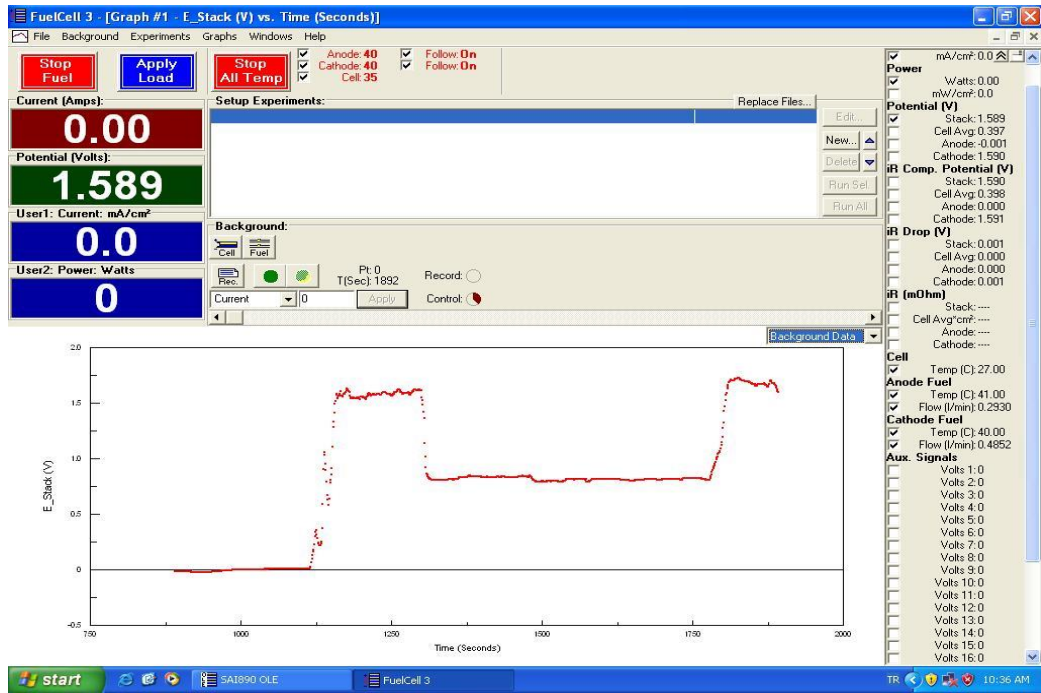
Yılmaz Ulu E., 2010, Güneş-Hidrojen Hibrit Enerji Sisteminin Deneysel Ve Teorik Enerji, Ekserji ve Elektromanyetik Analizi, Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, Denizli.

EKLER

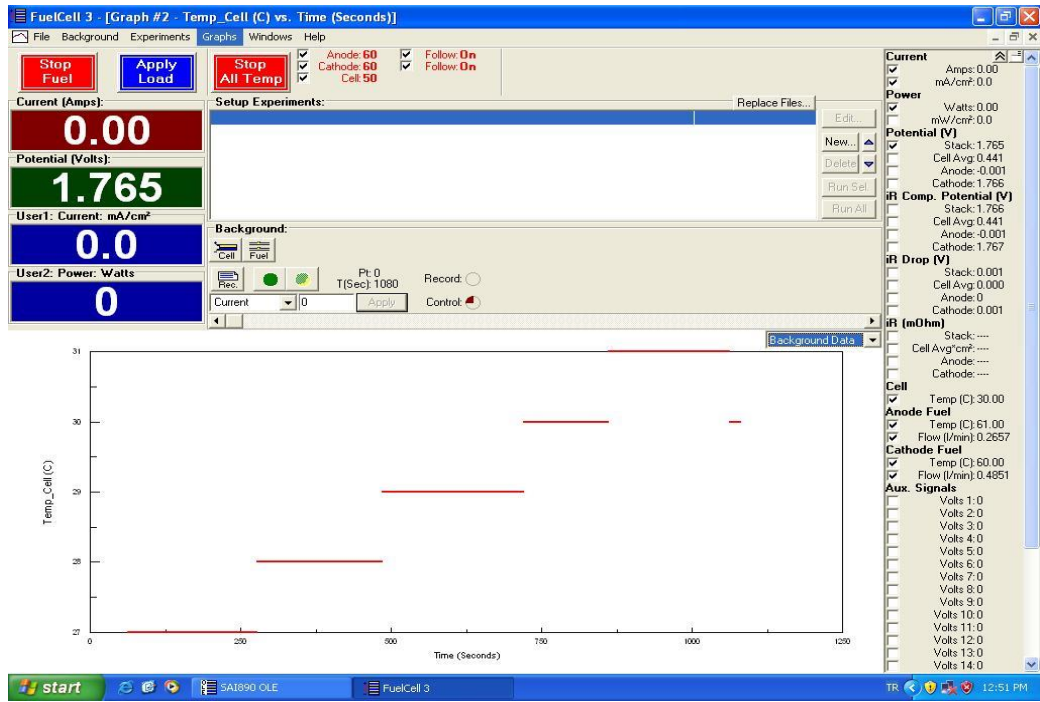
Ek-1 Anot sıcaklığı 60⁰C, Katot sıcaklığı 60⁰C, Hücre sıcaklığı 44⁰C, Gerilim 3,16V



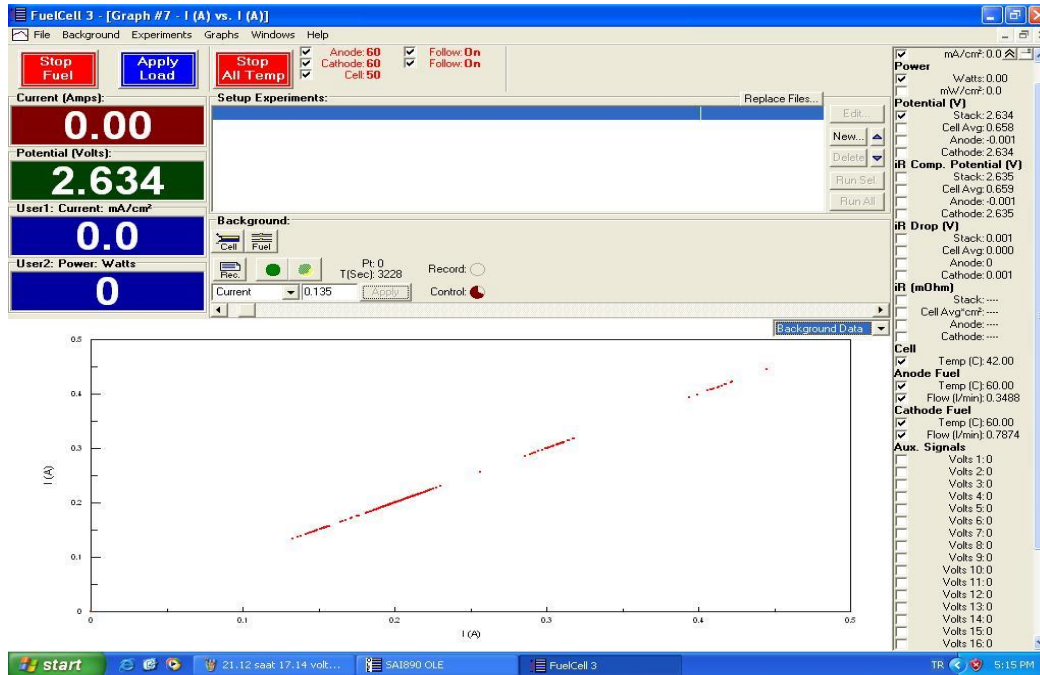
Ek-2 Anot sıcaklığı 41⁰C, Katot sıcaklığı 40⁰C, Hücre sıcaklığı 27⁰C, Gerilim 1,58V



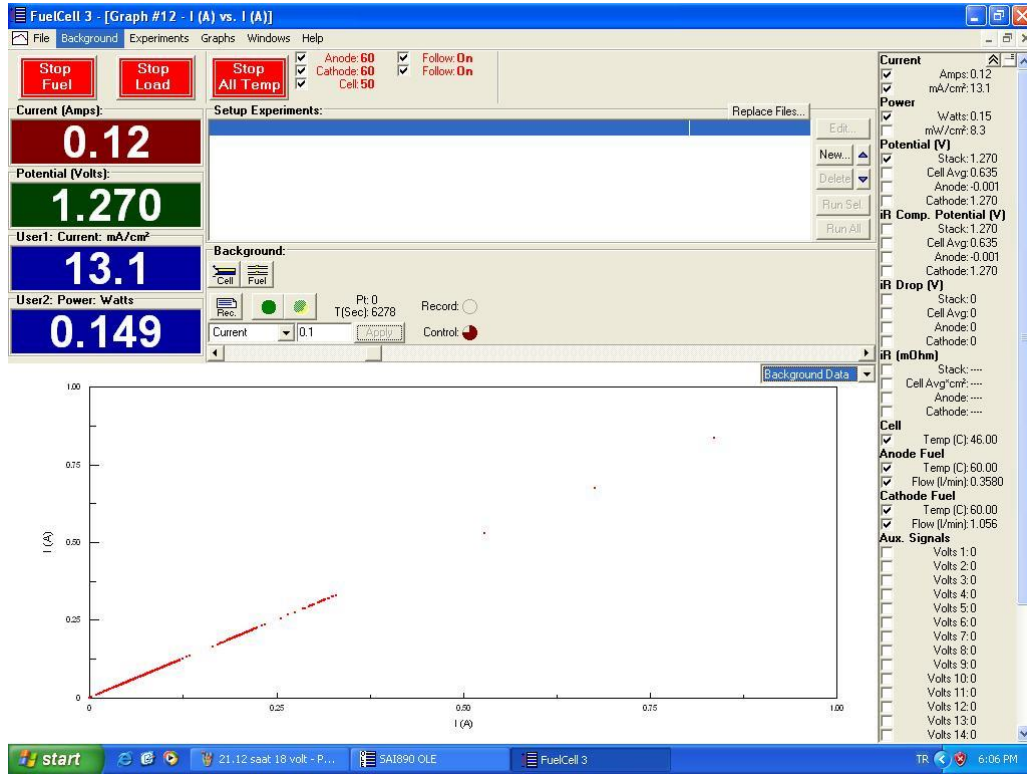
Ek-3 Anot sıcaklığı 61⁰C, Katot sıcaklığı 60⁰C, Hücre sıcaklığı 30⁰C, Gerilim 1,76V



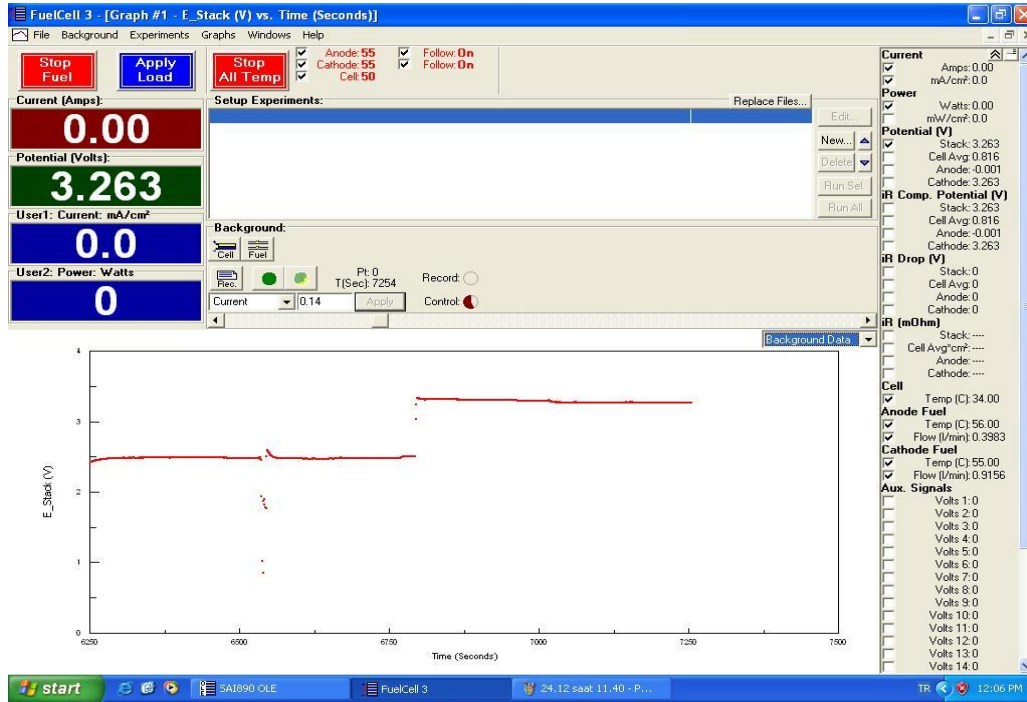
Ek-4 Anot sıcaklığı 60⁰C, Katot sıcaklığı 60⁰C, Hücre sıcaklığı 42⁰C, Gerilim 2,63V



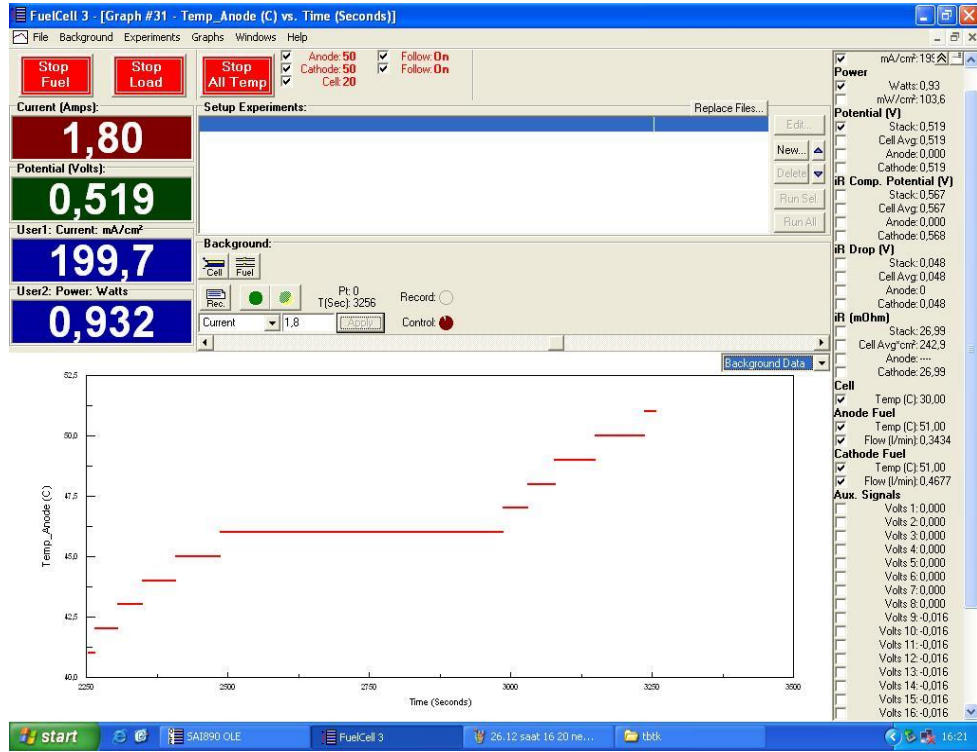
Ek-5 Anot sıcaklığı 60°C, Katot sıcaklığı 60°C, Hücre sıcaklığı 46°C, Gerilim 1.27V



Ek-6 Anot sıcaklığı 56°C, Katot sıcaklığı 55°C, Hücre sıcaklığı 34°C, Gerilim 3,26V



Ek-7 Anot sıcaklığı 51⁰C, Katot sıcaklığı 51⁰C, Hücre sıcaklığı 30⁰C, Gerilim 3,16V



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yunus Zengin
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Batman-1983
Telefon : 05533957142
Faks :
e-mail : yunus-zengin@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı,	İlçe,	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Endüstri Meslek Lisesi	Merkez,	Batman	1999
Üniversite	: Dicle Üniveristesi	Merkez,	Diyarbakır	2010
YüksekLisans	: Batman Üniversitesi	Merkez,	Batman	2019
Doktora	:			

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010	T.P.A.O	Teknisyen

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR