

**SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK POLİMER
ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT
HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ**

Merve DEMİR

YÜKSEK LİSANS

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK POLİMER
ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT
HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ**

Merve DEMİR

YÜKSEK LİSANS

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

**Nisan-2019
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Merve DEMİR tarafından hazırlanan “SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ” adlı tez çalışması 16/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan


Dr. Öğretim Üyesi Arzu EKİNCİ



.....

Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ



.....

Üye

Dr. Öğretim Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU



.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Bahattin İŞCAN
FBE Müdürü

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

Merve DEMİR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Merve DEMİR

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ

2019, 85 Sayfa

Jüri

**Dr. Öğretim Üyesi Adem YILMAZ
Dr. Öğretim Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU
Dr. Öğretim Üyesi Arzu EKİNCİ**

Günümüzde fosil enerji kaynaklarının günden güne azalmaya başlaması ve bu kaynakların çevreye vermiş oldukları olumsuz etkilerinden dolayı çevreyle dost olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmaya başlamıştır. Son dönemlerde yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan hidrojen enerjisi ön plana çıkmaktadır ve yaygınlaşmaktadır. Hidrojen enerjisi üzerine çalışmalar en çok yakıt hücreleri konusunda yapılmaktadır. Yakıt pilleri içerisinde özellikle, yüksek verimle ve düşük sıcaklıklarda da çalışabilen PEM yakıt hücreleri ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresinde kullanılan yakıtların sıcaklık değerleri tespit edilerek, bu yakıtlar için en ideal sıcaklık aralıkları elde edilmiştir. Anot ve katot kısımlarında saf hidrojen ve oksijen kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada nem %40, hidrojen miktarı 0,3 ml/dk, oksijen miktarı 0,5ml/dk olarak alınmıştır. Sistemdeki hat sıcaklık değerleri de 40°C - 45°C - 50°C - 55°C - 60°C - 65°C - 70°C - 75°C - 80°C olarak deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde 40°C'de, volt değeri 0,442V, akım değeri 1,81A olarak alındığında sistemde elde edilen güç değeri 0,804W olduğu bulunmuştur. Yapılan deneyde 75°C'de, akım değeri 1,8A, volt değeri 0,535V alındığında sistemdeki güç değeri 1,025W bulunmuştur. En düşük W değeri 0,804W olarak 40°C'de, en yüksek W değeri 1,025W olarak 75°C'de hesaplanmıştır. Yakıt hücresi performansına etki eden faktörler deneysel olarak incelenip tablo ve grafiklerle sunulmuş olup, bu etkilerin sebepleri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PEM, yakıt hücresi, sıcaklık, hidrojen enerjisi.

ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL THROUGH TEMPERATURE

Merve DEMİR

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

Advisor: Assist. Prof. Dr. Adem YILMAZ

2019, 85 Pages

Jury

Assist. Prof. Dr. Adem YILMAZ

Assist. Prof. Dr. Ahmet GÜNDOĞDU

Assist. Prof. Dr. Arzu EKİNCİ

Nowadays, the use of renewable energy sources that are environmentally friendly has started to gain importance due to the decrease of fossil energy sources and the negative effects of these resources on the environment. Recently, hydrogen energy in renewable energy sources comes to the fore and becomes widespread. Hydrogen energy studies are carried out mostly on fuel cells. Particularly in the fuel cells, studies are carried out on PEM fuel cells that can operate at high temperatures and at low temperatures.

In this study, the temperature values of the fuels used in the Polymer Electrolyte Membrane (PEM) fuel cell were determined and the optimum temperature ranges were obtained for these fuels. Pure hydrogen and oxygen were used in the anode and cathode parts. In this study, humidity 40%, hydrogen amount 0.3 ml / min, oxygen content was taken as 0.5ml / min. The line temperature values in the system were tested at 40°C - 45°C - 50°C - 55°C - 60°C - 65°C - 70°C - 75°C - 80°C. In the experiments, it was found that the power value of the system was found to be 0,804W at 40°C and the volt value was 0,442V and the current value was 1,81A. In the experiment, the power value was found to be 1,025W at 75°C, the current value was 1,8A and the volts value was taken as 0,535V. The lowest W value was calculated as 0,804W at 40°C and the highest W value as 1,025W at 75°C. Factors affecting fuel cell performance have been experimentally examined and presented with tables and graphs and the reasons for these effects are discussed.

Keywords: PEM, fuel cell, temperature, hydrogen 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 hocam Dr. Öğretim üyesi Adem YILMAZ' a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım için yardımcı olan bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan sayın hocam Dr. Öğretim Üyesi Ahmet GÜNDOĞDU hocama teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans tezimi yaptığım Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalının tüm değerli öğretim üyelerine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte moral ve motivasyonumu yüksek tutmak için çaba harcayan, canım ablam Fatma AKBALIK'a, güvenlerini ve desteklerini her an hissettiğim en değerli varlıklarım annem Mevlüde DEMİR'e ve babam Fevzi DEMİR'e sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Merve DEMİR

BATMAN-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. HİDROJEN ENERJİSİ	9
3.1. Hidrojen Enerjisinin Avantajları	9
3.2. Hidrojen Enerjisinin Dezavantajları	10
3.3. Hidrojenin Tarihçesi	10
3.4. Hidrojen Gazı	14
3.4.1. Hidrojenin özellikleri	14
3.4.2. Hidrojenin fiziksel özellikleri	14
3.4.3. Hidrojenin kimyasal özellikleri	15
3.5. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı	16
3.6. Hidrojen Üretim Yöntemleri	19
4. YAKIT PİLLERİ	21
4.1. Yakıt Pili Teknolojisinin Gelişimi	21
4.2. Yakıt Pili	23
4.2.1. Yakıt pilinin avantajları	23
4.2.2. Yakıt pilinin dezavantajları	23
4.3. Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi	24
4.4. Yakıt Pili Çeşitleri	26
4.4.1. Doğrudan metanollü yakıt pili	27
4.4.2. Alkali yakıt pili	28
4.4.3. Fosforik asit yakıt pili	28
4.4.4. Erimiş karbonat yakıt pili	29
4.4.5. Katı oksitli yakıt pili	30
4.4.6. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili	30
4.5. PEM Yakıt Pili Bileşenleri	32
4.5.1. Elektrolit membran	33
4.5.2. Gaz difüzyon katmanı	34
4.5.3. Elektrotlar	34
4.5.4. Akış alanı plakaları	34
4.6. Yakıt Pilinin Hazırlanması	35
4.6.1. Basınç	35
4.6.2. Sıcaklık	35

4.6.3. Reaktan akış hızları	36
4.6.4. Reaktan nemlilikleri	36
5. MATERYAL METOD	37
5.1. PEM Yakıt Hücre Kimyası ve Termodinamik Yapısı	37
5.1.2. Teorik yakıt pili verimi	39
5.2. DeneY Düzeneyinin Hazırlanması	40
5.2.1. Sistem malzemelerinin temini	42
6. DENEY SETİNİN KURULUMU VE DENEYİN YAPILIŞI	45
7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	49
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
8.1 Sonuçlar	62
8.2 Öneriler	64
KAYNAKLAR	65
EKLER	64
ÖZGEÇMİŞ	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

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
Al₂O₃	: Alkali metal oksitler
KW	: Kilowatt
W	: Watt
MW	: Megawatt
mA	: Miliamper
mg	: Miligram
V	: Volt
mm	: Milimetre
mW	: Miliwatt
Atm	: Atmosfer
KPa	: Kilo paskal
Mm	: Mikrometre
g/cm³	: Gram/Santimetre küp
W/cm²	: Watt/ Santimetre kare
s/cm	: Saniye/Santimetre
A/cm²	: Amper/Santimetre kare
W/ cm⁰K	: Watt/Santimetre Kelvin
°C	: Santigrat derece
e⁻	: Elektron

%	: Yüzde
<	: Küçük
≥	: Büyük Eşit
RH	: Bağlı nem
DC	: Doğru akım
W_{el}	: Elektriksel enerji
Y_2O_3	: İtiryum oksit
$NaBH_4$: Sodyum borohidrid
CuO	: Bakır (II) Oksit

Kısaltma	Açıklama
PEMYP	: Polimer elektrolit membranlı yakıt pili
AYP	: Alkali yakıt pili
DMYP	: Doğrudan metanol yakıt pili
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
HFK	: Hava fazlalık katsayısı
KOYP	: Katı oksitli yakıt pili
EKYP	: Erimiş karbonat yakıt pili
GDL	: Gaz difüzyon katmanı
ΔH	: Entalpi
ΔS	: Entropi
KOH	: Potasyum hidroksit
LPG	: Sıkıştırılmış petrol gazı
NASA	: Ulusal havacılık ve uzay dairesi
YP	: Yakıt pili
NECAR	: New electric car
USCAR	: U.S. council for automotive research
HTAP	: Hydrogen technical advisory panel
PNGV	: New Generation of vehicles
Ar-Ge	: Araştırma Geliştirme
THEME	: The hydrogen economy miami energy conference

1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşamının her alanında enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Enerji kaynaklarını iki grup altında toplayacak olursak, fosil enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Fosil enerji kaynakları, kullanılan ancak kısa bir süre içerisinde tekrar elde edilemeyen enerji kaynakları olarak tanımlanabilmektedir. Bu kaynaklar genel olarak petrol, kömür ve doğalgaz gibi tükenen ve çevreye zararı olan yakıtlardır. Fosil yakıtların elde edilmesi ve enerjiye dönüşmeleri sırasında evre kirliliği meydana gelmektedir. Bu evre kirliliği insanlığın geleceğini tehdit etmektedir. Günümüzde rezervleri azalan fosil kaynakların yerine çevreyle dost, yenilenebilir enerji kaynakları gündeme gelmektedir.

Temiz ve yenilenebilir enerji diye bildiğimiz bu enerji kaynaklarının en belirgin özellikleri atmosfere ve çevreye hiç zarar vermemeleridir. Bazılarının ise çok az zararı vardır. Yenilenebilir enerji tekrar tekrar kullanılabilen enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, dalga enerjisi ve hidrojen enerjisi gelmektedir. Bu kaynaklar dünyanın artan evre kirliliğinin önüne geçecek kaynaklar olarak gösterilmektedir. Ayrıca bu kaynaklarla ilgili yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle dünyanın her geçen gün artan enerji ihtiyacının karşılanacağı n görülmektedir. Son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemi artmakta olan hidrojen enerjisi üzerine yoğun bir araştırma ve geliştirme programları yürütülmektedir. Hidrojen enerjisi otomobillerden, hava taşımacılığına kadar hemen hemen tüm sanayi sektöründe kullanılabilecek güce sahiptir. Hidrojen yakıtı otomobil, otobüs, uçak, tren ve diğer taşıtlarda kullanılmaktadır.

Hidrojen enerjisinin, ekonomik ve verimli bir biçimde kullanıldığı alanlardan biri de yakıt pilleridir. Bu sebepten yakıt pillerinin dünyadaki değerini her geçen gün biraz daha artmaktadır. Yakıt pilleri genel olarak yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi elektrokimyasal tepkimeler aracılığıyla direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren cihazlar olarak bilinmektedirler. Hidrojen gazının kullanıldığı yakıt hücrelerinin dnşm sonucunu meydana gelen ürünler sadece ısı ve sudur. Bu özelliği nedeniyle çevreci bir teknoloji olan yakıt pilleri ayrıca bünyelerinde hareketli parçalar olmadığı için sessiz ve gvenilirdirler. Metan, hidrojen, etanol, formik asit, metanol gibi kimyasalların yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılabilmesi yakıt pillerinin en önemli avantajlarından. Çalışma verimleri de yüksek olan yakıt pilleri; cep telefonundan otomobile, sabit uygulamalardan uzay araçlarına kadar çok geniş bir kullanım alanına

sahiptir. Yakıt pilleri teknolojisinin tarihsel gelişim sürecinde, ticarileşmeyi engelleyen sorunların üstesinden gelebilmek için öne sürülmüş farklı yaklaşımlar birçok farklı pilin gelişmesine katkıda bulunmuştur. Bu piller fosforik asit yakıt pili (PAFC), katı oksit yakıt pili (SOFC), erimiş karbonat yakıt pili (MCFC), doğrudan metanol yakıt pili (DMFC), alkali yakıt pili (AFC) ve polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMFC) olarak çeşitlilik gösterir. Farklı bileşenlere sahip olması ve farklı çalışma koşulları sebebiyle yakıt pilleri çeşitlere ayrılmaktadır. Bu çeşitlerin içerisinde PEM yakıt pilleri, ulaşım, taşınabilir güç ve yerel güç üretimi gibi birçok alanda dikkat çekici avantajlara sahiptir. PEM yakıt pilleri, diğer tasarımlarla kıyaslandığında daha düşük sıcaklıkta çalışırlar, az hacim kaplarlar, hafiftirler ve işletimleri kolaydır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde hidrojen yakıtı ile çalışan taşıtların büyük çoğunluğu PEMFC teknolojisi kullanmakta ve yakıt pilleri üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarının yaklaşık %90'ı PEM yakıt pilleri üzerinde odaklanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, alternatif enerji kaynakları içerisinde önemli bir yeri olan, son yıllarda büyük ilgi gören ve araştırma-geliştirme faaliyeti devam eden yakıt pili performans uygulamalarına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarımızda yakıt pillerinin sıcaklık aralıkları değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda yakıt pillerinde yakıtın en uygun performansta çalışma sıcaklığı belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Strahl 2017 yılındaki yazısında, PEM yakıt pillerinin uygun sıcaklık kontrolü yakıt pili performansını optimize etmek için önemli bir faktör olduğu belirtilmiştir. Yakıt pili sıcaklığı, nemlendirme ve performans arasındaki ilişkiyi vurgulayan uygun bir kontrolör tasarımı için temel olarak açık katotlu bir yakıt pili sisteminin denge noktalarının model tabanlı bir karakterizasyonu tanımlanmaya çalışılmıştır. Tasarlanan kontrol cihazı, doğrusal olmayan bitki modeli ile simülasyonda doğrulanmıştır (S. Strahl, 2017). Choi 2017 deki çalışmasında, açık katot proton elektrolit membran (PEM yakıt hücresinin) su ve termal yönetimi geliştirilmiştir. Çok girişli çoklu çıkışlı bulanık kontrolör geliştirilmiş ve gerçek zamanlı olarak güçlü bir doğrusal olmayan dinamik yakıt hücresi sisteminin kontrolünde üstün olduğu ispatlanmıştır. Sonuç olarak da önerilen bulanık kontrol cihazının PEM yakıt hücresinin çıkış gücünü etkin bir şekilde artırdığını göstermektedir (M. Choi, 2017). Yılmaz ve Şevik'in 2017 yılında yaptıkları çalışmada, NaBH_4 kullanılarak H_2 üretimini ve bir yakıt hücresinin performans analizini yapmışlardır. Hücredeki 5.6V DC gerilim değeri ve 0.3A akım değeri bulunmuştur. İlk 4 dakikada düşme görülmüş, 64'üncü dakikaya ulaşınca kadar sabit durumda kalmış ve 64 ile 81' inci dakikada hızlı düşüş gerçekleşmiştir. Güç ve ideal voltajda verim %41.5 ve %82.2 şeklinde bulunmuş (A.Yılmaz, S. Şevik, 2017). Yılmaz, Şevik, Demir 2017 yılındaki çalışmalarında, yakıt pilleri hakkında bilgi vermiş olup, yakıt hücreli araç teknolojisi ve polimer elektrolit membran yakıt hücrelerinin araçlarda kullanılabilirliği hakkında yaşamdan örnekler vermişlerdir. Türkiye gibi emisyon değerlerini artıran ülkelerde bugün olmasa da 2030 veya 2045 sonrası için emisyon değerlerine olumlu katkı sunması nedeniyle gelecekte önemli bir kaynak olabileceği sonucuna varılmıştır (A. Yılmaz, S. Şevik, M. Demir, 2017).

Yılmaz, Edge, Koçer 2016 yılındaki çalışmasında, PEM yakıt pillerini tanıtmak, kullanılan malzemelerin özelliklerini ve yakıt hücresinde meydana gelen voltaj kayıplarını anlatmışlardır. Sonuç olarak, kullanılan malzemelerin performansı ve uygunluğu sayesinde maliyetin düşmesi beklenmektedir (A. Yılmaz, İ. Edge, A. Koçer, 2016). Shekardasht 2016'daki çalışmasında, fotovoltailer aracılığıyla elde edilen elektrik enerjisi sayesinde sudan elektroliz yöntemi ile hidrojen gazı elde etmektedir. Elde edilen hidrojen yakıt pilinde kullanılarak tekrardan enerjiye dönüştürülmesi üzerine sistemin sayısal analizi ve matematik modellemesi yapılmıştır (S.Z. Shekardasht, 2016). Ural ve Karaca 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada hidrojen

özellikleri, depolanma, taşınma adımları ve hidrojen üretimi hakkında bilgi vermişlerdir (Ural, Karaca, 2016). Bilen 2015'teki tezinde %100 doğal kaynak olan saf su kullanılarak daha ekonomik ve yüksek sistem verimi ile hidrojen üretimi sağlayan elektrolizör tasarımı amaçlamıştır. Elektrolizör ünitesinde elektrotlar arası mesafenin ve elektrot yüzey alanının artırılması ile üretilen hidrojen miktarının arttığı teorik hesaplamalar da tespit edilmiştir (G. Bilen, 2015). Doğu 2014 yılında yapılan bu çalışmada, güneş enerji destekli bir PEM elektrolizör ile hidrojen üretimi deney sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir. İki deneysel çalışmasından birinci deneyde başlangıçta ışıma şiddeti 810W/m^2 ölçülürken güneşin durumuna göre ışıma şiddeti 897W/m^2 'ye kadar çıkmıştır. Bu değerlerde akım değeri 3,17-3,2 A arasında ölçülmüş, gerilim ise elektrolizör tarafından çekilen akıma bağlı olarak 4,6V ile 4,7 V arasında ölçülmüştür. İkinci deneysel çalışmalarda ise güneş ışıması şiddeti başlangıçta 884W/m^2 iken güneşin konumuna göre 956W/m^2 'ye kadar çıkmıştır (İ. Doğu, 2014). Kahraman 2014 yılında yaptığı çalışmada, PEM yakıt pili performansı üzerine hücre sıkıştırma basıncının etkisi deneysel olarak gözlemleyip incelenmiştir. Yapılan deneyler, farklı değerlerdeki sıkıştırma basınçlarının yakıt pili performansı üzerindeki etkilerini göstermiştir. Bu etkilerin ana sebepleri üzerinde durulmuştur (H. Kahraman, 2014). Keskin 2014'te yapılan bu çalışmasında, enerji yönetim stratejisinin PEMYP/BAT taşıt sistemine adapte edilmesini içeren bir uygulama gerçekleştirilmiştir. UDDS sürüş çevrimi baz alınarak bir yük modeli bu çalışmada oluşturulmuştur. Lityum-iyon bataryanın çıkışında ise bir çift yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. Çift yönlü DC-DC dönüştürücü kullanılması ek bir maliyet getirmekle birlikte sistemin performansını ve verimliliğini arttırdığı görülmüştür (F. Keskin, 2014).

Efendioğlu 2013'te yapılan çalışmada, deney için elde edilmiş verilere bağlı olarak "Merkezi Bileşik Tasarım Yanıt Yüzey Yöntemi"nin çeşitlerinden olan "Yüz Merkezli Bileşik Tasarım Yöntemi"ne uygun bir biçimde veri seti hazırlanmış ve programda yerine konmuştur. ANOVA'ya geçildiği zaman F istatistiği için sadece "Oran" faktörünün diğerlerinden yüksek olduğu gözlemlenmektedir. p istatistiğinde de 0,05'ten küçük olması ve R^2 testinin model uyumluluğu ile ilgili en yüksek şekli bulunmakla beraber sonunda etki ve etkileşimlerin bulunduğu fonksiyon ifadesi bulunmuştur. Sonuç olarak burada da $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde "Oran" faktörünün "Güç Yoğunluğu" nu en fazla etkilediğine dair kanıtlar bulunmuştur (D. Efendioğlu, 2013). Eker' in 2012 yılında yayınlanan tezinde, tek hücreden oluşan proton aktaran membran (PEMFC) yakıt hücresinin Fluent PEMFC modülü kullanılarak

simülasyonunu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması bulunmaktadır. Deneysel çalışma ile nemlendirme sıcaklığının, pil sıcaklığının, hidrojen gaz debisinin ve oksijen gaz debisinin değerleri alınarak güç yoğunluğuna etkileri ele alınmıştır. Sıcaklık parametresinin PEM yakıt pilinin performansı üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Sıcaklığın artmasıyla beraber sistem performansının artmış olduğu görülmüştür (E. Eker, 2012).

Gümüšoğlu 2012 yılında yaptığı çalışmada, yakıt hücresi performansını gerek MEY hazırlama gerekse de hücre işletim koşullarının önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Bu amaçla ilk etapta mikro gözenekli tabakanın kullanılacak yakıt tipine uygun olarak geliştirilmesi, hazırlanacak elektrolitin elektro katalizör tabakasıyla son derece uyumlu ve yakıtın geri beslemeli bir şekilde tekrar tekrar hücre ortamına gönderilmesiyle hem hücre verimliliğinin hem de performansının artacağı düşünülmektedir (T. Gümüšoğlu, 2012). Altaneh, 2012 senesindeki tezinde, hidrojen ve güneş yakıt pilleri ile beslenebilen bir bataryalı golf arabasına yönelik bazı düzenlemeleri ele almıştır. Bu bağlamda, 1.2 kW gücüne sahip olan bir yakıt hücresinin gerilimi, bir v DA/DA dönüştürücü geliştirerek bu dönüştürücü sayesinde aracın bataryalarını doldurabilecek gerilime dönüştürülmüştür. Yakıt pili çıkışını araç üzerindeki bataryaların gerilimi olan 36V'a yükselten bir DADA dönüştürücü tasarlanmıştır (N. Altaneh, 2012). Ulusoy 2012' deki çalışmasında, katalizör malzemesi olan Pt, elektrotlar üzerine magnetron saçtırma yöntemi ile kaplanarak kaplama sırasındaki katalizör kayıpları sıfıra indirmiştir. Bununla birlikte kullanılan katalizör miktarı 20 kat azaltılmıştır. Katalizörlerin bu yöntemle kaplanması sırasında farklı güçler uygulanarak Pt'in partikül boyutu kontrolü sağlanmıştır (I. Ulusoy, 2012). İcingür 2011'deki çalışmasında, herhangi bir parametrik çalışmalar yapmadan önce nafion 115 membranlı bir alüminyum ve SS 316 paslanmaz çelik maddeleriyle bir yakıt pili dizayn etmiştir. Basınç, sıcaklık, nemlendirme gibi etkenlerin yakıt pili performansı üzerine etkilerini ele almıştır. Yapılan çalışmada alüminyum pilinden 2,98 V elde edilirken, paslanmaz çelik pilinden ise maksimum 3,12 V gerilim değeri elde edilmiştir (Y. İcingür, 2011). Yılmazulu'nun 2010 yılında yayınlanan çalışmasında, güneş ile elektrik üretimi amacıyla kurulan Hidrojen-Güneş hibrit enerji sisteminin performans değeri ve sistem ekserji ve enerji analizi deneysel hesaplamalarla incelenmiştir. Ekserji değeri hesaplandığında %22 ile %36 aralığında değişebildiği bulunmuştur (E. Yılmazulu, 2010).

Akfidan 2010 yılında yaptığı projede yolcu aracı, ana güç kaynağı olarak 2kW'lık yakıt pili ünitesine ve yardımcı güç kaynağı olarak 1.5kW'lık batarya grubu kurmuştur. Bataryalar maksimum 360 watt güç verebilen güneş panelleriyle şarj edilebilmektedir. Yakıt pili ünitesi 17 bar basınç altında toplam 5400 sl (%99.99 saflıkta) hidrojen gazı depolayabilen 6 adet metal hidrür tank ile desteklenmektedir. Bu uygulama projesinden elde edilen gerçek veriler MATLAB ortamında oluşturulmuş modelin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (T. Akfidan, 2010) . Obut 2010 yılında yapmış olduğu tezde, bir PEM yakıt hücresi modeli, kütle, momentum ve enerji korunumu ile birlikte elektrokimyasal reaksiyonlar, membran içerisindeki suyun taşınımı ve sıvı fazdaki suyun oluşumu ve taşınımı gibi olayları incelemiştir. İncelemeler neticesinde, hücre özellikleri ve çalışma koşullarının hücre performansını ve sıcaklık, reaktant derişimi, sıvı fazdaki su gibi değişkenlerin yakıt hücresi içerisindeki dağılımlarını nasıl etkilediği gösterilmiştir (S. Obut, 2010). Kireç'in 2009' da yaptığı çalışmada, yakıt pili türleri arasında PEM yakıt pillerinin taşıtlara kullanımı daha verimli olduğu için PEM yakıt pili kullanılarak bu pilin performansını etkileyen parametreleri incelemek için bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmalara gelmeden önce nafion 115 membrana sahip alüminyum ve SS 316 paslanmaz çelik olarak kullanılan iki tane yakıt pili düzeneği oluşturulmuştur. Yakıt pili performansını etkileyen basınç, sıcaklık, nemlendirme gibi parametreler incelenmiştir. Deneysel çalışmalarla paslanmaz çelik yakıt pilinde en fazla 3.09V gerilim, alüminyum yakıt pilinde en fazla 2,19V değerleri bulunmuştur (L. Kireç, 2009).

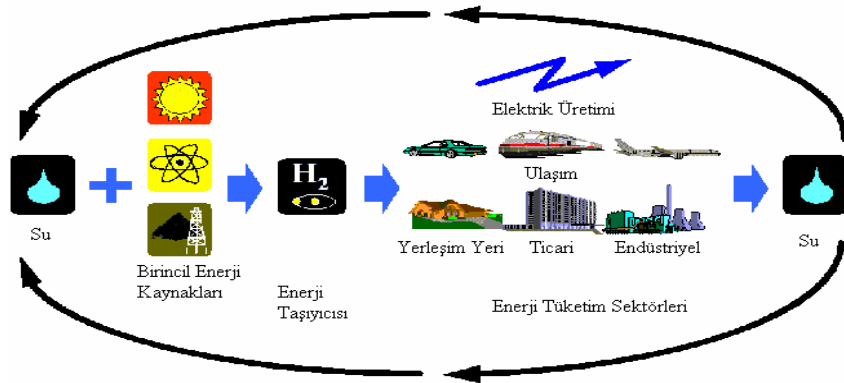
Kaplan'ın 2008'de, membran için Nafion 115, katalizör için elektrik iletkenliği yüksek olan bakır plaka ve anot-katot malzemesi olarak 304 paslanmaz iletken metalik tel kullanılarak PEM yakıt hücresi elde edildi. Bu yakıt hücresinin katalizör ve elektrotunun verime etkisi incelendi. Katalizör olarak kullanılan bakır katalizörün verimi, platin katalizöre göre düşüktür (R. Kaplan, 2008). Alniak, Karakaya ve ark. 2008 yılında yaptıkları çalışmada, alüminyumdan imal edilen yüksek basınca dayanıklı hidrojen depolama tankının imalatını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda üç farklı 6000 serisi alüminyum ile farklı boyutlarda alüminyum tanklar elde edilmiştir (O.Alniak, Ç. Karakaya, 2008). Silver, 2008 de yaptığı bu çalışmada, PEM yakıt pilinin katot kısmında OİR reaksiyonunun elektrokatalizi için etkin, uyumlu ve oldukça ucuz katalizörlerin sentezlenmesi hedeflemiştir. 3.66 ile 16.35 nm değerleri arasında platin partikül boyutu değişmektedir. Bu çalışmada PtCuFe/C-611 ve PtAgFe/C-611 katalizörlerinin PEM yakıt hücresi katodunda katalizör olarak da kullanılabileceği

sonucuna varılmıştır (G.Silver, 2008). Üçler 2008 yılındaki çalışmasında, entegrasyonlu yeni sistem üzerinde buhar/karbon oranı, reformer sıcaklığı, çalışma basıncı ve değişik besleme gazlarının kullanılması parametrelerinin etkileri araştırmıştır. Tüm parametreler için entegrasyonlu sistemin yıllık toplam maliyetinin, entegrasyonsuz sistemin yıllık toplam maliyetinden daha az olduğu tespit edilmiştir. Çalışılan aralıkta buhar/karbon oranı ve reformer sıcaklığı artışına bağlı olarak toplam yıllık maliyetin azaldığı, çalışma basıncının artmasına bağlı olarak ise arttığı görülmüştür (K. Üçler, 2008). Akbulut 2007 yılındaki çalışmasında, bazı hibrit santraller incelenmiş ve bir hibrit santral ele alınarak MATLAB ile benzetimi yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Sonuç itibarıyla, elektrik şebekesinden bağımsız bir yakıt pili-küçük rüzgar santrali hibrit enerji sistemi modeli verilmiştir (B. Akbulut, 2007).

Çenk'in 2006'da yaptığı çalışmada, bor madeni ürünü olan sodyum borhidrür çözeltilisinin doğrudan kullanılmasıyla çalışan doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pili düzeneği laboratuvar boyutunda kurulmuş ve performansını etkileyen parametreler hakkında çalışılmıştır. Çalışmada saf grafit malzemeler bipolar plaka olarak kullanılmıştır. Çalışmalarda ortama uygun, hafif, elektriksel iletkenliği ve mukavemeti yüksek alternatif bipolar plaka tasarımı ve üretimi konuları incelenmiştir (Ç. Cenk, 2006). Türe 2006 yılında yaptığı çalışmada, %10 verime sahip olan bir fotoelektroliz hücresinden elde edilen hidrojen ile fotovoltaiik sistemler ile elde edilen hidrojenin analizi ekonomik olarak karşılaştırılmıştır (E. Türe, 2006). Şenaktaş 2005 çalışmasında hidrojenin özellikleri, depolanması, taşıtlarda kullanılmasını araştırmıştır. Bu incelemede 23.4 W elektrik gücü için gerekli hidrojen miktarı $5.97 \text{ cm}^3/\text{s}$ olarak bulunmuştur. Belli bir güçteki araç için hidrojen 0.563 kg/s, doğalgazda 1,409 kg/s, LPG'de 1.551 kg/s, benzinde 1.568 kg/s ve motorinde 1.849 kg/s olduğu görülmektedir. Buna göre aynı güç için hidrojene göre diğer yakıtların tüketim miktarları, doğalgazın 2.5 kat, LPG'nin 2.7549 kat, benzinin 2.785 kat ve motorinin de 3.284 kat daha fazla kullanılması gerektiği belirtilmiştir (B. Şenaktaş, 2005). Ankaralı 2004 yılında, 'Hidrojen Enerjisi ve Hidrojen Pilleri' adlı tezinde, hidrojen üretim maliyetlerini karşılaştırmış olup, yakıt hücreleri ve bugün ulaşılmış olduğu seviyeyi özet olarak sunmuştur (A. Ankaralı, 2004).

3. HİDROJEN ENERJİSİ

Elektrik enerjisinin birçok kullanım avantajının bulunmasına rağmen günümüzde teknoloji bir tek elektriğe bağlı bir biçimde değil aynı zamanda yakıtı da gerektirecek bir biçimde gelişmiştir. Bunun başlıca sebebi, enerji tüketiminin %60'ının ısı biçiminde meydana gelmesidir. Birincil enerji kaynaklarının fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesiyle elde edilen ikincil enerjilere, "enerji taşıyıcısı" denir. 20. yüzyıla enerji taşıyıcısı olarak damgasını vuran elektrik olmuştur. 21. yüzyıla damgasını vuracağı düşünülen bir diğer enerji taşıyıcısının ise hidrojen olacağı düşünülmektedir. Hidrojenin kullanılmasını gerektiren başlıca iki sebep vardır. Biri fosil yakıtların yanması sonucunda atmosferde karbondioksitin artmasından dolayı küresel ısınmaya neden olan çevre sorunudur. İkincisi ise doğal gaz ve petrol gibi akışkan hidrokarbonların bilinen üretilebilir rezerv ömürlerinin neredeyse insan ömrü ile aynı seviyeye düşmüş olmasıdır (Ültanır 1998). Şekil 3.1'de hidrojen enerji sistemi dönüşüm şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi (Ün 2003).

3.1. Hidrojen Enerjisinin Avantajları

Hidrojen aşağıda yazıldığı gibi birçok avantajı olan oldukça ideal bir enerji taşıyıcısıdır.

- Hidrojen birçok enerji kaynağından elde edilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla da elde edilebilir.
- Elektrik enerjisi kullanılarak da hidrojen üretilebilmektedir. Hidrojen büyük bir verimle de elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Hidrojenin güneş enerjisiyle doğrudan üretim süreçleri de geliştirilmektedir.

- Hidrojenin en son kullanımı esnasında kullanılacak olan enerjiye dönüşürken en yüksek verime sahip olur. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında hidrojen %39 oranında daha yüksek bir verime sahiptir.
- Hidrojen sıvı şeklinde (hava ve uzay ulaşımında), gaz şeklinde (büyük ölçekli olan depolamalarda) ve metal hidrit şeklinde (araçlar ve diğer küçük ölçekli depolamada) depolanabilir.
- Hidrojen uzak mesafelere tankerler ve boru hatları aracılığıyla taşınabilmektedir.
- Hidrojen diğer yakıtlara bakıldığında daha farklı güvenlik ekipmanlarına ihtiyaç duysa da o yakıtlara göre fazla tehlikeli değildir.
- Hidrojenin yakıt hücrelerinde kullanımı ve yanması sonucunda sadece su açığa çıkar.
- Elektrikten veya güneş enerjisinden üretilen hidrojen, taşınması, depolanması ve son kullanımı sırasında meydana kirletici bir madde çıkarmaz. Yani çevreye zarar verebilecek hiçbir etkisi bulunmaz.

3.2. Hidrojen Enerjisinin Dezavantajları

Bazı olumsuzluklar ise aşağıdaki gibidir:

- Enerji üretmede kullanılacak olan hidrojen gazı oldukça saf olmalıdır ancak saflaştırma işlemi oldukça maliyetli bir işlemdir.
- Yakıt pilleri geniş bir alana ihtiyaç duymaktadır. Hidrojenin depolandığı tankların hacmi de geniş bir yer kaplamaktadır. Bu nedenle hidrojen enerjisinin uygulama aşamasında birçok zorluklarla karşılaşılabilir.
- Petrol türevlerinin kullanılması ile çalışan motorlar içten yanmalı motorlar olduğundan bu motorların yakıt pilleriyle çalışmalarında çeşitli sorunlar meydana gelmektedir. Bu nedenle yakıt pilleriyle çalışabilecek motor türlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Petrol terminallerinde de yakıt malzemesi olarak hidrojen bulmak oldukça güçtür.

3.3. Hidrojenin Tarihçesi

1766 – Hidrojen ilk defa, ayrı bir element olarak İngiliz bilim insanı Henry Cavendish tarafından çinkonun hidroklorik asitle reaksiyonu sonucunda bulunmuştur. Londra Kraliyet Cemiyetine bir gösteri sunmak amacıyla hidrojen gazına bir kıvılcım uygulaması sonucunda su açığa çıktı. Bu buluş, daha sonra suyun (H₂O) hidrojen ve oksijenden oluştuğunu bulmasına yol açtı.

1783 – Jacques Alexander Cesar Charles, Fransız fizikçi, ilk hidrojenli balon uçuşunu gerçekleştirdi. “Charliere” olarak bilinen bu insansız balon, 3 kilometre yüksekliğe çıktı. Sadece üç ay sonra, Charles ilk insanlı hidrojenli balon ile uçtu.

1788 – Hidrojen kelimesinin Yunancada “hydro” ile oluşturulan anlamına gelen “genes” kelimelerinden türetildiği Fransız kimyager Antoine Lavoisier tarafından keşfedilmiştir.

1800 – İngiliz bilim insanları William Nicholson ve Sir Anthony Charlisle, suya elektrik akımı uygulandığında açığa hidrojen ve oksijen gazlarının çıktığını keşfetmişlerdir. Bu işlem daha sonraları “elektroliz” olarak adlandırılmıştır.

1839 – Yakıt hücresinde hidrojen ve oksijen gazlarının reaksiyona girerek, su ve elektrik akımını üretmesi, İsviçreli kimyager olan Christian Friedrich Schonbein tarafından bulunmuştur.

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

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

1920 – İngiliz bilim insanı ve Marksist yazar J.B.S. Haldane, “Science and the Future” isimli makalesinde, rüzgarlı havalarda fazla enerjinin, suyun hidrojene ve oksijene elektrolitik bozunması için kullanılacağı fikrini ileri sürmüştür.

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 programlarında ve roket kalkışlarında yakıt hücreleri kullanılmıştır.

1959 – Cambridge Üniversitesi’nden Francis T. Bacon, ilk pratik hava-hidrojen yakıt pilini yapmıştır. Bu 5 kilowatt’lık sistem, kaynak makinesine güç sağlamıştır. Yakıt hücresi dizaynına “Bacon Cell” adını vermiştir.

1959 – “Chalmers Manufacturing Company” için çalışan bir mühendis olan Harry Karl Ihrig,, ilk yakıt hücreli araç olan 20 beygir gücündeki 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 – Elektrokimyager John O’M. Bockris, “hidrojen ekonomisi” terimini ortaya atmıştır. Daha sonra, Amerika Birleşik Devletleri’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 motorunu depodan sağlanan hidrojenle çalışacak şekilde değiştirmiştir.

1973 – OPEC petrol ambargosu ve sonucundaki arz şoku, ucuz petrol döneminin sona erdiğini, dünyanın alternatif yakıtlara ihtiyacı olduğunu göstermiştir. Geleneksel ticari uygulamalar için hidrojenli yakıt hücrelerinin geliştirilmesine başlanmıştır.

1974 – Miami Üniversitesi’nden Profesör T. Nejat Veziroğlu, hidrojen enerjisinin uluslararası olarak ilk kez tartışıldığı “The Hydrogen Economy Miami Energy Conference” ı (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 A.B.D. 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. Bugün, UHB, otomobil ve havacılık sanayi temsilcileri, federal, eyalet ve yerel yönetimler, üniversiteler, araştırmacılar, kamu hizmetleri ve enerji sağlayıcıları da dahil olmak üzere neredeyse 100 üyeye sahiptir. 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 üreticileri ve hükümet arasında ortak bir çaba olması için Clinton yönetimi tarafından kurulmuştur.

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

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

1997 – Emekli NASA mühendisi Addison Bain, hidrojenin Hindenburg kazasına sebep olduğu görüşüne meydan okudu. Bain, hidrojenin bu felaket yangına sebep olmadığını, 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 konsorsiyum oluşturuldu.

2001 – Ballard Power System, endüstriyel ve tüketici nihai ürün uygulamalarına entegrasyon için hazırlanmış, dünyanın ilk Proton Exchange Membrane (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 teknolojilerini 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 teknolojisine 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 demonstrasyon 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).

3.4. Hidrojen Gazı

3.4.1. Hidrojenin Özellikleri

Hidrojen periyodik cetvelin ilk elementidir. Hidrojenin çekirdeğinde bir proton bulunmakta ve hidrojenin orbitalinde de bir elektron yer almaktadır. Hidrojen evrende en fazla bulunan ayrıca çevreye de uyumlu olan bir elementtir (Sarıtış, 2004). İnsan vücudunu oluşturan moleküllerin üçte ikisini, evreni oluşturan atomların da %90’ ını oluşturur. Suyun %11.2’sini hidrojen oluşturur. Ham petrol ve kömürün içinde, karbon elementi ile birleşmiş bir şekilde bulunmaktadır. Ayrıca, kil ve minerallerde genellikle oksijen(O₂) ile birleşmiş bir şekilde önemli miktarda hidrojen bulunmaktadır. Bütün hayvani maddelerin içinde karbon, azot, kükürt, oksijenle bileşik halde bulunur. Hidrojen, kütle başına enerji yoğunluğu en yüksek olan maddedir. Yüksek sıcaklık değerlerinde 141.9 MJ/kg ile benzinden hemen hemen 3 kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir (Sarıtış, 2004).

3.4.2. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Birbirine 0.75 Angstrom mesafesi bulunan iki atomun birleşmesi sonucu hidrojen molekülü oluşur. İki elektronun ortaklaşa kullanılması sonucu aradaki bağ meydana gelir ve molekülün çok kararlı olduğunu da oldukça yüksek bir enerji olan ayrışma enerjisi göstermektedir. Hidrojen herhangi bir rengi ve kokusu olmayan bir gazdır. Hava ile karşılaştırıldığında yoğunluğu 0,07 kg/m³tür ve bu bakımdan elementler içerisinde en hafif elementtir. Bu sebeple diğer gazların hepsinden gözenekli çeperlerden çok daha hızlı geçmektedir. Ayrıca kızıl derecedeki platin, demir ve iridyum gibi metallere de

geçer. Helyumdan sonra sıvılaştırılması en zor olan gaz hidrojenidir. -240°C dönüşüm sıcaklığı olan hidrojen atmosfer basıncında -259°C ' de katılaşmakta ve -253°C ' de kaynamaktadır.

3.4.3. Hidrojenin Kimyasal Özellikleri

Etkinleştirilmiş biçimleri dışında hidrojenin soğukta pek etkisi yoktur. Sıcaklarda ya da katalizörler aracılığıyla birçok tepkimeye girebilir. Oldukça değerli ve önemli bir element olduğu için çok belirgin elektropozitif özellikler taşımaktadır. Orta derecedeki kuvvette bir indirgendir. Çok kararlı olan, alkali metal oksitler (Al_2O_3) gibi bileşiklerini indirgeyemez. Ayrıca metal oksit olarak bilinen CuO , NiO vb. gibi metal oksitlerini indirger.

Bu yöntemle katalizör olarak kullanılan çok ufaltılmış metaller elde edilir. Hidrojen alkali ve toprak alkali metallerle birleşir. Ayrıca ametallerin bir çoğuyla da doğrudan birleşir. Halojenlerin dördüyle de tepkimeye girer ve hidrasitleri verir, flordan iyoda doğru gidildikçe tepkime hızında düşüş olduğu gibi açığa çıkan ısı miktarında da azalma görülür. Oksijenle düşük sıcaklıkta veya kızıl derecede bir katalizör vasıtasıyla birleştiği zaman su verir.

Mavi bir alevle yanar, oksijenle karışımı oksijen-hidrojen hamlacında kullanılır. Kükürt elementi ile 250°C 'deki bir sıcaklıkta birleşir. Yüksek bir basınç ile bir katalizör eşliğinde birleşmesi sonucu amonyak meydana gelir (Toprak, 2006). Tablo 1'de hidrojenin özellikleri tablo halinde rakamsal olarak verilmektedir.

Tablo 1. Hidrojenin bazı özellikleri

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 Stokiometrik Karışım	29.53	% Hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0,61	cm ² /s
Özgül Isısı	14.89	kJ/kg.K

3.5. Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı

Bir yakıtın sanayide, evlerde, taşıtlarda vb. gibi birçok alanda kullanılabilmesi büyük önem arz eder. Diğer yakıtlarla kıyaslandığında, bu yakıtların birçoğunun sadece belirli uygulamalarda kullanılabildiği görülmektedir. Kömür yakıtını, arabalarda veya uçaklarda kullanmak pek uygun değildir. Hidrojen ise, neredeyse her alanda kolay bir şekilde kullanılabilir. Evlerde doğal gaz yerine, ısıtma amacı ile fırın, kalorifer ve şofbenlerde kullanılabilir. Hidrojen yakıtlı piller içinde elektrige dönüştürülmesi ile üretilen elektriğin de, evlerde olduğu gibi, sanayide de bölgesel olarak üretilip kullanılabilir. Hidrojen yakıtının otobüs, kamyon, otomobil, traktör ile tarım makineleri gibi içten yanmalı motorlarda rahatlıkla kullanılabilmesinden dolayı sınırlı rezerve sahip petrol ürünlerinin yerini alması ve çevreye herhangi bir zararı olmamasından, özellikle araç üreten şirketlerin son zamanlarda dikkatini büyük ölçüde çekmektedir. Benzinli motorlara göre hidrojen yakıtlı motorların, birçok üstün özelliği vardır. Bunlardan biri, atık ürün olarak sadece su buharı olması ve diğer özelliği ise hidrojenli motorların yüksek verime sahip olmasıdır. Hidrojen ile çalışan bir otomobil Şekil 3.5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5.1. Hidrojen ile çalışan bir otomobil (Mitsubishi Space Liner) (www.H2cars.de 2001)

Taşıtlarda, içten yanmalı motorların kullanılmasının yerine, yakıtlı piller kullanılarak elektrik üretimi sağlamak ve elektrik motorları vasıtasıyla taşıta güç sağlanabilir. Bu tür araçlarda çevreye atılan herhangi bir zararlı ürün yoktur. Bu yüzden bu taşıtlara, sıfır salınımlı taşıtlar da denmektedir.

Bazı problemlere neden olmasına rağmen hidrojenin kamyon, otobüs ve traktör benzeri ağır taşıtlardaki kullanımını gün geçtikçe artış göstermekte, büyüyen ve gelişen teknoloji ile beraber ortaya çıkan sorunlar gittikçe çözüme kavuşmaktadır. Petrolün sınırlı rezervi ve çevre sorunlarının artması, hidrojen yakıtının kullanımını giderek arttırmıştır.



Şekil 3.5.2. Hidrojenle çalışan bir otobüs (MAN NL 193 CGH₂) (www.H2cars.de 2001).



Şekil 3.5.3. Hidrojen ile çalışan uçak (NASA Cessna) (www.hfcletter.com 2003).

Jet uçakları hidrojen yakıtının ilk kullanım alanlarından biridir. Hidrojen ile çalışan jet uçaklarından herhangi bir tanesi Şekil 3.5.3'te gösterilmiştir. Bu konuyla alakalı bazı denemeler ilk olarak 1957 yılında yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar artık yapılan denemelerden sonra ticari uygulama aşamasına gelmiş bulunmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak özellikleri ve diğer yakıtlar ile karşılaştırması tablo 2' de verilmektedir.

Tablo 2. Hidrojen ve diğer yakıtlarla karşılaştırılması

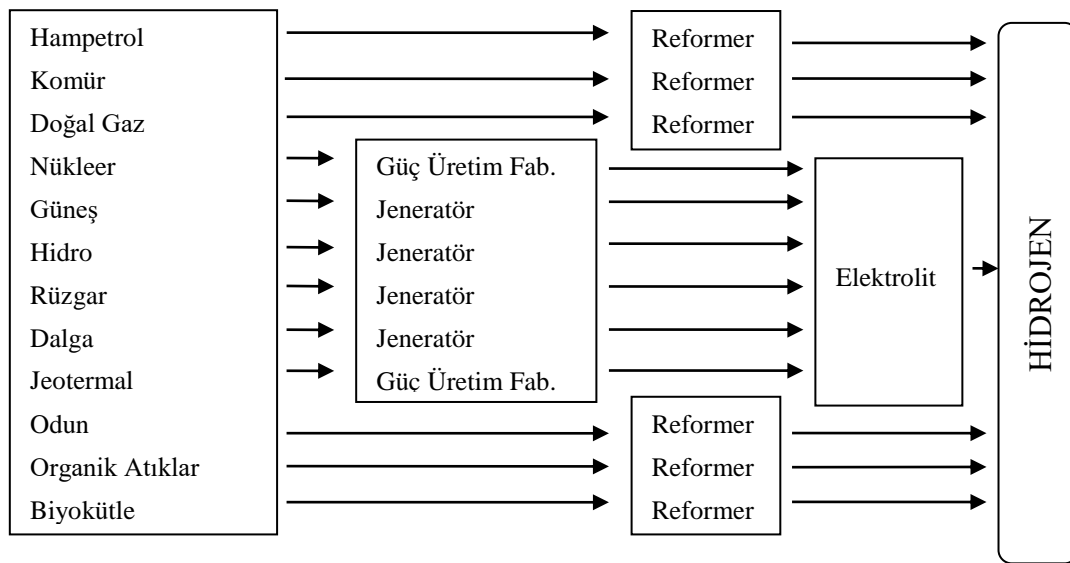
Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk (kg/m ³)	4.4	0.65	0.0838
Hava içindeki difüzyonu (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kg.K)	1.20	2.22	14.89
Havada ateşlenme sınırı (% hacim)	1.0-7.6	5.3-15	4-75
Havada ateşlenme enerjisi (mJ)	0.24	0.29	0.02
Ateşlenme sıcaklığı (°C)	228-471	540	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

3.6. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Doğal bir biçimde hidrojen gazı doğada oldukça az miktarda bulunmaktadır. Atmosfer içerisinde yükseklik ile değişen oranlarda 15000-20000 kısımda sadece 1 kısım bulunur. Kömür yataklarından, volkanlardan, petrol kuyularından doğal hidrojen elde edilebilir.

Evrenin temel maddesi hidrojendir, yıldızlarda ve güneşte bulunan bir ana bileşiktir. Yeryüzünde bulunan hidrojenin neredeyse tamamı diğer elementlerle bileşik halinde bulunmaktadır. İki atom hidrojenin bir atom oksijenle olan bileşiği su molekülüdür; bu sebeple bütün okyanuslar büyük hidrojen depolarıdır. Ayrıca, hayvanlar, bitkiler ve fosil maddeleri 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 ($NaBH_4$ 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 üretilebilir. Şekil 3.6.1'de Hidrojen üretim kaynakları ve prosesleri gösterilmiştir. 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).



Şekil 3.6.1. Hidrojen üretim kaynakları ve prosesler (Beşergil 2009).

Hidrojen üretim metotları elde edilmek istenen hidrojen miktarına, hammaddeye ve saflık derecesi durumuna göre değişim gösterir. Yeni geliştirilmekte olan yöntemler de dikkate alındığında hidrojen üretim teknolojileri üç grup altında toplanabilir:

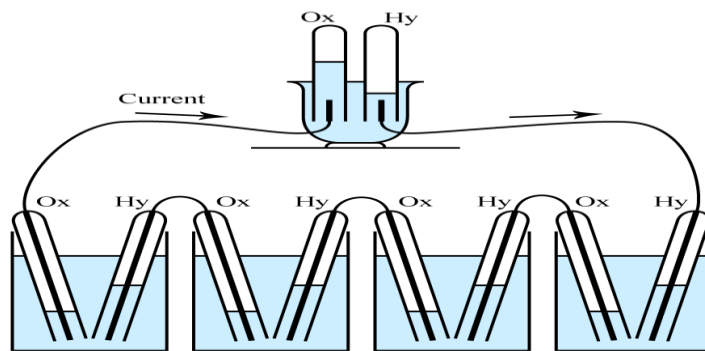
- 1. Fosil Hammaddelerden :** Buhar Reformasyonu, Ototermal Reformasyon, Kısmi Oksidasyon, Kömürün Gazlaştırılması, Termal Dissosiasyon yapılır.
- 2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile :** Biyokütle Gazlaşması, Suyun Elektrolizi, Suyun Termal Parçalanması, Fotoelektroliz yöntemi ile elde edilir.
- 3. Atık Gaz Akımlarından Hidrojen Kazanma :** Rafineriler (buhar veya metanol reformasyon fabrikaları proses gazı gibi) ve kimyasal madde fabrikaları (amonyak veya metanol sentezi gibi) gibi işletmelerde hidrojen zengin atık gazlardaki hidrojen arıtma yapılır (Beşergil 2009).

4. YAKIT HÜCRELERİ

4.1. Yakıt Pili Teknolojisinin Gelişimi

Yüksek teknolojik görünümüne rağmen, yakıt pillerinin yaklaşık 150 yıllık bir geçmişi vardır. 1838 yılında ters elektroliz işlemi düşüncesini ortaya atan William Robert Greve, yakıt pili kavramı ile ilk bağlantıyı kuran bilim adamıdır. Greve hücresi olarak adlandırılan ıslak-hücre bataryasını geliştirmiştir. Bu hücre, çinko sülfat içerisinde çinko elektrot ve nitrik asit içerisinde platin elektrot daldırılarak oluşturulmuş ve yaklaşık 1,8 V civarında gerilim üretirken 12A akım üretmiştir. Greve, elektrotlardan biri sülfürik asit kabına diğeri oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrotu düzenlediği takdirde, elektrotlar arasında sabit bir akım akacağına farkına varmıştır. Sızdırmazlığı sağlanan kaplar kullanarak hem suyu hem de gazları tutmuştur. Greve, akım aktığı takdirde, su seviyesinin her iki tüpte de arttığını gözlemlemiştir (Bıyık oğlu, 2003).

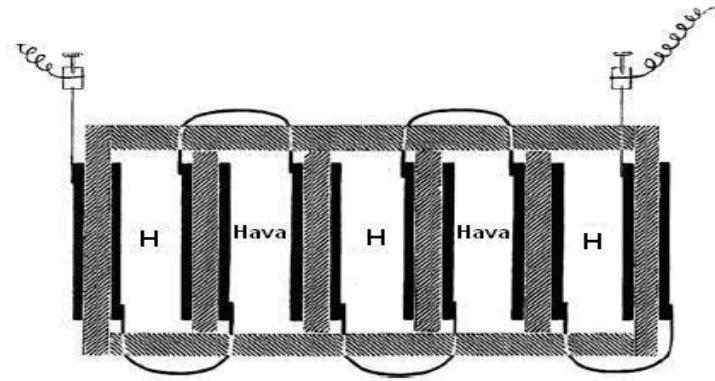
1800’de, İngiliz bilim adamları William Nikolas ve Anthony Carlisle, elektrik vasıtasıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ispatlamışlardır. Fakat elektrik ve su üretmek için iki gazın birleştirilmesini çözememişlerdir. Grove, birkaç elektrotu seri devre ile bağlayarak bileşimini ayarladığı takdirde suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk yakıt pili olarak tanımlayabileceğimiz şekil 4.1.1’de gösterilen aygıt ile başarmıştır (Yıldızbilir, 2006).



Şekil 4.1.1. William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt pili (<http://www.h2gopower.com>)

Grove’un yaptıklarından sonra birçok bilim adamı da YP gelişimi için çaba sarf etmiştir. 1882 yılında Lord Rayleigh tarafından platin elektrotların verimini arttırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunun için katı elektrot, gaz ve sıvı arasındaki

işlem kesitini arttırmış hidrojenin yanı sıra kömür gazı da kullanmıştır. 1889'da kimyager Ludwing Mond ve Carl Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 Watt güç üreten ve %50 verimle çalışan bir YP geliştirmişlerdir. YP'den 1,47V gerilim elde etmeyi beklerken bu değer 0,97V olarak ölçülmüştür. Şekil 4.1.2'de Mond ve Langer'in tasarladığı YP görülmektedir.



Şekil 4.1.2. Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili (Yıldızbilir, 2006)

1893 yılında yakıt pillerinin çalışma prensibinin anlaşılmasında pek çok teorik çalışma yapmış olan Friedrich Wilhelm Ostwald YP'nin çeşitli bileşenlerinin (elektrot, elektrolit, oksitleyici maddeler, anot ve katotlar) bağlantılı işlevlerini deneysel olarak belirlemiştir. 1894'te ise kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır. 1932'de Francis Tomas Bacon hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit kullandığı ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Pahalı olmasına rağmen Pratt&Whitney firması bu projenin önemini kavramış ve Bacon'ın yakıt pilini Apollo uzay aracında kullanmak için lisans vermiştir.

1950'lerin sonlarında, NASA, uzay görevlerinde kullanmak için kompakt elektrik üretici kurmaya başladı. NASA, YP teknolojisi ile ilgili yüzlerce araştırmayı desteklediği gibi son yüzyılda da içlerinde büyük taşıt üreticileri ve çeşitli YP araçları ve diğer uygulamalarında olduğu YP teknolojisi geliştirmeye yönelik araştırmalara destek vermeye devam etmektedir. Günümüzde gelecek için yakıt pillerinin geleneksel güç kaynaklarının yerini alması beklenmektedir. Cep telefonlarında kullanılabilecek küçük yakıt pillerinden otomobil sporlarında kullanılabilecek yüksek güçlü yakıt pillerine kadar geniş bir yelpazede yerini alması beklenmektedir.

4.2. Yakıt Pili

Yakıt pilleri yakıtın sahip olduğu enerjiyi direkt olarak elektro kimyasal yöntemle elektrik enerjisine dönüştürebilen aletler olarak bilinmektedir. Yakıt pilleri son derece temiz bir enerji olup, çevreye ve atmosfere zarar vermeyen enerji teknolojileridir. Yakıt pilleri yüksek bir verime sahiptir. Elektrokimyasal piller olarak da bilinen yakıt pilleriyle, hidrojen ve oksijenin arasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonla yüksek verimli enerji elde edilebilmektedir.

Yakıt pilleri, yakıtın enerjisini sürekli olarak elektrolit bir sistemde elektrik enerjisine çevirebilen cihazlardır. Diğer enerji türleri gibi türbin veya buhar kazanı gibi ekipmanlara ihtiyaçları yoktur. Sadece kimyasal bir madde kullanılarak elektrik enerjisi üretebilmektedirler. Bir yakıt pili batarya görevi de görmektedir. Herhangi bir bataryadan farkı ise sessiz çalışması, verimli olması, gücünde azalma olmaması, şarj gerektirmemesidir.

Hidrojen, hava gazı, doğal gaz, metan, LPG gibi yakıtlar yakıt pillerine doğrudan verilebilir. Yakıt pillerinde yakıtların verilmesi doğrudan olarak veya dolaylı yoldan gerçekleştirilmektedir. Yakıtın dolaylı yoldan verilmesi bir ön işlem gerektirmektedir. Kömür, etanol, metanol, amonyak ve hidrokarbon kullanan yakıt pilleri yakıtın dolaylı olarak beslenmesine örnek verilebilir. Yakıt pillerinin çalışma sıcaklığına göre su, sıvı olarak veya buhar biçiminde ürün olarak açığa çıkar. Oksijen oksitleyici madde olarak kullanıldığında su, hava kullanılması durumunda azot ve su meydana gelmektedir. Bazı karbon içeren yakıtların kullanılması durumunda açığa karbondioksit çıkmaktadır. Yakıt pillerinin çalışması durumunda pil içerisinde reaksiyonlar meydana geldiğinden yakıt pili ısınmaktadır. Meydana gelen bu ısı, Yakıt pili içinde oluşan suyun dışarı atılmasıyla pil kendi kendini soğutmaktadır. Yakıt pilinden elektrik enerjisi elde edilmesi esnasında atık madde olarak su, ısı ve çok az miktarda emisyon oluşmaktadır.

4.2.1. Yakıt Pilinin Avantajları

Yakıt pillerinin birçok avantajı vardır. Bu avantajları sıralayacak olursak:

- Yakıt pilleri oldukça sessiz çalışırlar ve yüksek verimlere sahiptirler.
- Yakıt pilleri fosil yakıtlara ihtiyaç duymadığından daha fazla talep görmektedir.
- Elektrik üretimleri şebekeden bağımsız olarak da çalışabilir.
- Yakıt pillerini şarj etmek gibi sorunumuz yoktur. Yani sıradan piller veya aküler gibi şarj zorunluluğu yoktur.

- Yakıt pillerinin fosil yakıtlar gibi çevreyi ve atmosferi kirletici özelliği yoktur. Atık ürün olarak sadece su ve ısı açığa çıkarırlar.

4.2.2. Yakıt Pilinin Dezavantajları

Yakıt pillerinin dezavantajlarını belirtecek olursak:

- Yakıt pilleri DC gerilim ürettiğinden bu cihazların evlerde kullanılabilmesi için çeviricilere ihtiyaç duyması söz konusudur.
- Yakıt pompası ve hava pompası gibi elemanlarla çalışan yakıt pilleri ürettikleri gerilimin de belirli bir bölümünü bu kontrol elemanlarını çalıştırmada kullanmaktadır.
- Yakıt pillerindeki membran oldukça pahalıdır ve bu da maliyeti arttırmaktadır.

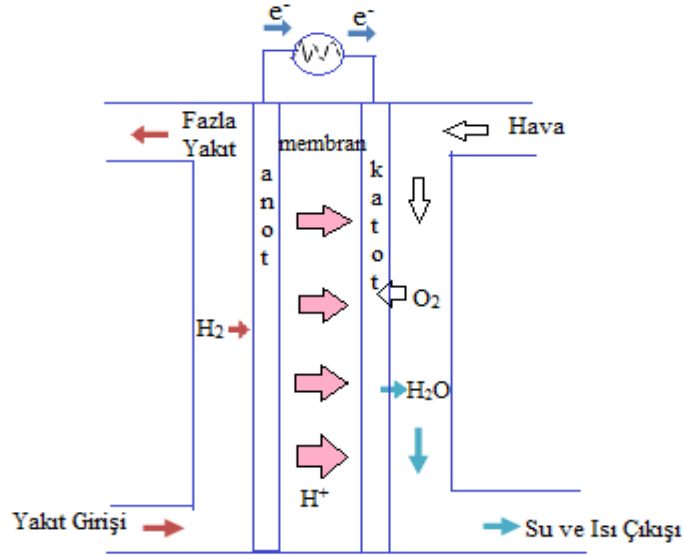
4.3. Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi

Yakıt pilleri, yüksek verimli, doğaya herhangi bir zararı olmayan ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirebilen bir enerji dönüşüm teknolojisi gibi pillerdir. Yakıt pillerinde içten yanmalı motorlardaki yanma bölümü olmadığından oldukça temiz bir enerji türüdür.

Yakıt pilleri bir elektrolit ve bu elektroliti çevreleyen anot ve katot olarak bilinen iki elektrottan oluşmaktadır. Anot elektrotu kısmına yakıt elektrotu denmektedir. Katot elektrotu kısmı ise oksijen elektrotu olarak bilinmektedir. Oksijen ve hidrojenin ayrı ayrı elektrotlardan geçmesiyle elektrik ve ısı oluşur. Kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yakıt pilleri çalışma prensibi olarak pile veya akümülatörlere benzemektedir. Akümülatörlerden farkı ise akümülatörlerde kimyasal enerji kullanılmadan önce depolanmış olması gerekir. Pillerden farkı ise, normal piller şarj edilmeye ihtiyaç duyar; fakat yakıt pilleri bitmez ya da şarj edilmeye ihtiyaç duymazlar. Yakıt pillerine dışarıdan enerji verildiği sürece elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Daha çok gerilim elde edilmek istendiğinde ise bu piller seri biçimde bağlanır ve daha fazla gerilim elde edilebilir. Dolayısıyla hücrenin üreteceği akım yüzey alanıyla bağlantılı olduğu için, daha fazla akım değeri istenilmesi durumunda yakıt pilinin alanı arttırılmaktadır.

Elektroliz işleminde ise suya doğru akım verilmesi sonucunda su, oksijen ve hidrojene ayrılmaktadır. Yakıt pilleri ise elektroliz işleminin tam tersi bir kimyasal reaksiyondur. Suyun elektrolizi yönteminde elektrik enerjisinin kullanılmasıyla su, oksijen ve hidrojene ayrıştığına göre bu işlemin tersi de düşünüldüğünde, yani oksijen ve hidrojen

reaksiyona girerek su ve ısı açığa çıkarırken elektrik enerjisi üretmektedir. Saf hidrojen bulamadığımız durumlarda ise hidrojen içeren hidrokarbon türleri de tercih edilebilmektedir. Ancak bu hidrokarbonların kullanılması durumunda hücre veriminde düşüş olduğundan pek fazla kullanılmamaktadır. Şekil 4.3.1.'de yakıt pilinin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.3.1. Yakıt pili'nin çalışma prensibi (İspirli, 2015)

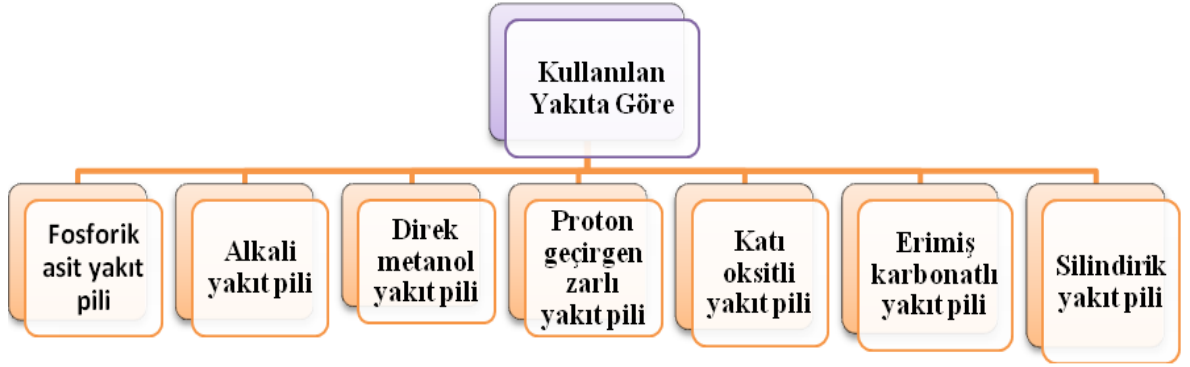
Yakıt pillerine hidrojen yakıtı anot kısmından gönderilirken, oksijen veya hava ise katot kısmından verilir. Katalizör aracılığıyla hidrojen yakıtı katoda farklı yollardan gidecek olan bir proton ve elektrona ayrılmaktadır. Proton, elektrolitin içerisinde geçerken elektronlar katoda dönüp hidrojen ve oksijen ile birleşerek su molekülü oluşturmadan önce bir elektrik akımı oluştururlar.

Yakıt pilinde 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 pilinin iki elektrotuna dış devreden bağlanan iletken yardımıyla oluşan elektrik pilden alınır. Bu iletken üzerinden 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, doğal gaz, metanol veya etanol kullanılabilirken, oksidan

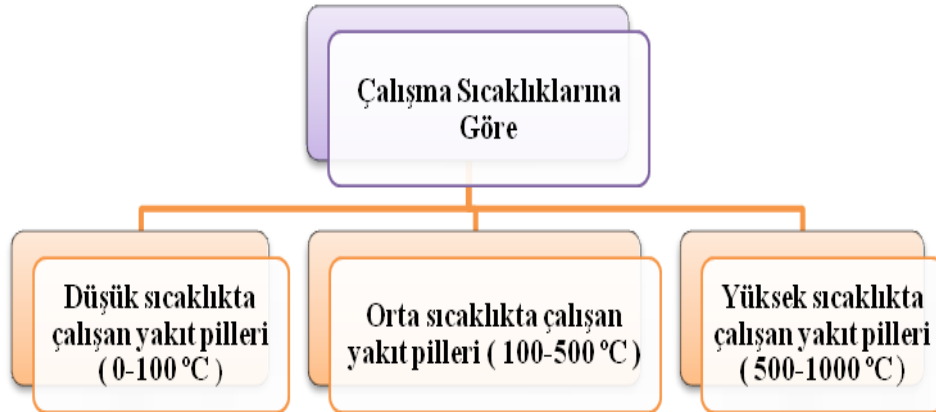
olarak oksijen gazı veya hava kullanılabilir. Eğer yakıt ile oksidan çifti hidrojen ve oksijen gazlarından oluşturulursa, yan ürün olarak saf su elde edilir. Yakıt pillerinin hareketli kısımları bulunmamaktadır. Bu sebeple gürültü ve titreşim seviyelerinin çok düşük olmasının yanı sıra güvenilirlikleri yüksek ve maliyetleri düşüktür.

4.4. Yakıt Pili Çeşitleri

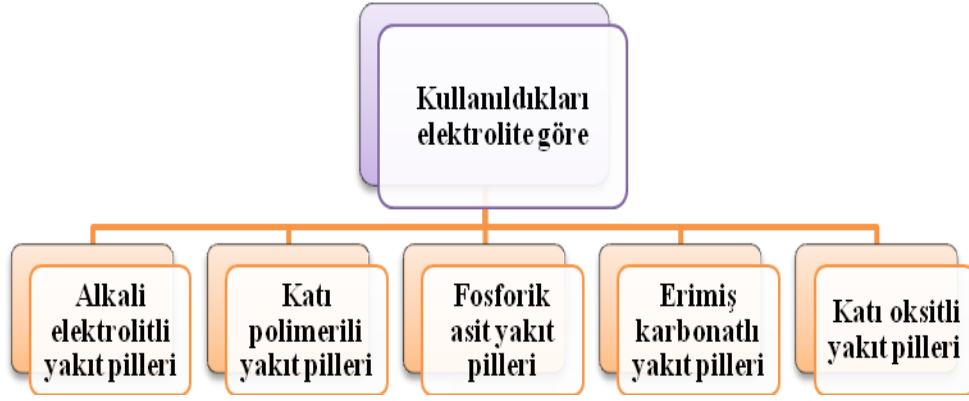
Yakıt pilleri kullandıkları elektrolit cinsine, yakıt türüne ve çalışma sıcaklığına göre farklı isimler alır. Aşağıda çizilmiş olan şekillerde yakıt pillerinin sınıflandırılmış hali gösterilmiştir.



Şekil 4.4.1. Yakıt pillerinin kullanılan yakıtı göre sınıflandırılması



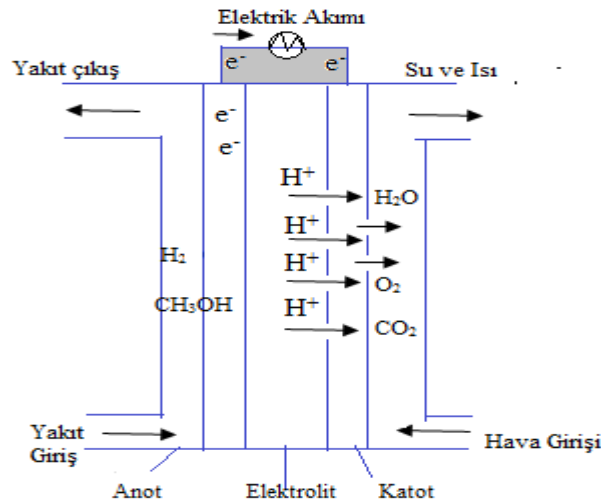
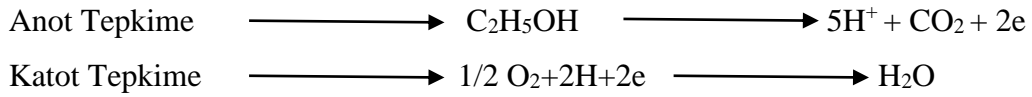
Şekil 4.4.2. Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılması



Şekil 4.4.3. Yakıt pillerinin kullanıldıkları elektrolite göre sınıflandırılması

4.4.1. Doğrudan metanollü yakıt pili

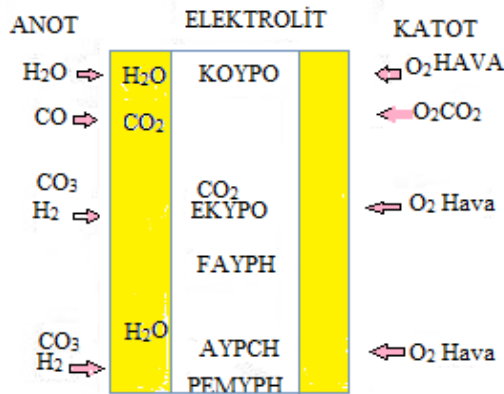
Bu piller de membran polimer yapıdadır ve pillerin yapıları basittir. Bu yakıt pilleri 50°C-90°C arasında çalışırlar. %40'lara ulaşan verimliliğe sahiptirler. Anottaki sulu metanol çözelti, hidrojen protonları ile birlikte polimer zardan katota doğru geçer. Bu geçiş yaşanırken anot tarafında hidrojenlerinden ayrılmış olan metanol CO₂'ye dönüşür ve anotu terk eder. Hidrojen iyonları dışardan bağlanan tel vasıtasıyla anot tarafından katot tarafına geçer ve böylelikle elektrik üretimi gerçekleşmiş olur. Şekil 4.4.1.1'de doğrudan metanollü yakıt pili gösterilmektedir.



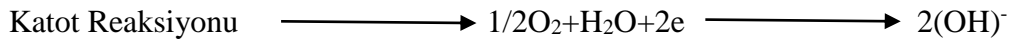
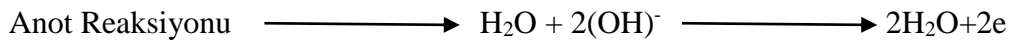
Şekil 4.4.1.1. Doğrudan metanollü yakıt pili (Kaplan, 2008)

4.4.2. Alkali yakıt pili (AYP)

En eski yakıt pilidir. Nasa'nın (Apollo) uzay çalışmalarında da kullanılmıştır. Elektrot olarak KOH kullanılır. Verimleri %70'leri bulur. Bu pillerin mahsuru 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. Şekil 4.4.2.1'de alkali yakıt pili gösterilmektedir.

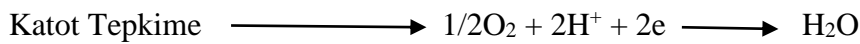
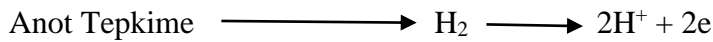


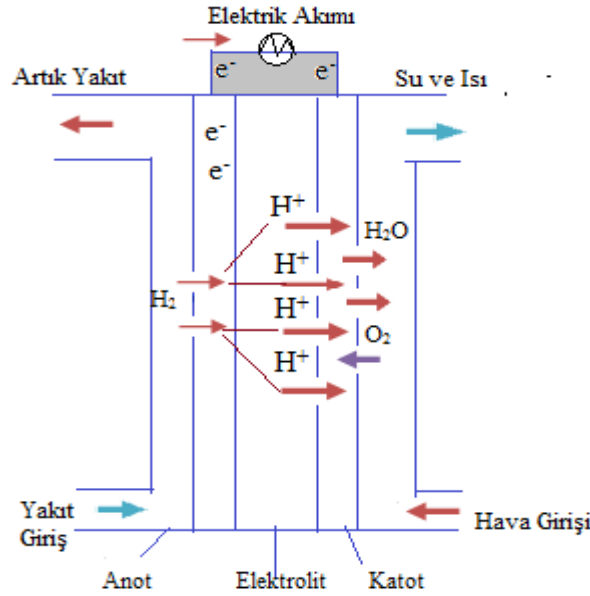
Şekil 4.4.2.1. Alkali yakıt pili (Kaplan, 2008)



4.4.3. Fosforik asit yakıt pilleri (FAYP)

Elektrot olarak sıvı fosforik asit kullanılır. Verimi yaklaşık %41 civarındadır. 150°C - 200°C arasında çalışma sıcaklığına sahiptirler. Anotta ve katotta katalizör olarak platin kullanılır. CO birikimi bu pillerde sorunlara yol açmaktadır. Bu pil türünde doğalgaz ve LPG gibi temiz yakıtlar kullanılır. Şekil 4.4.3.1'de fosforik asit yakıt pili gösterilmektedir.

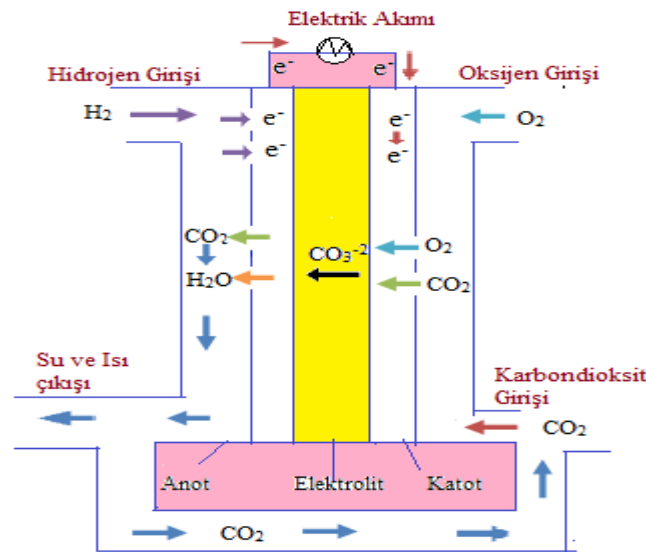
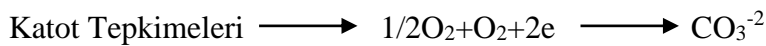
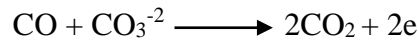
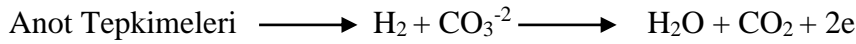




Şekil 4.4.3.1. Fosforik yakıt pili (Kaplan, 2008)

4.4.4. Erimiş karbonat yakıt pilleri (EKYP)

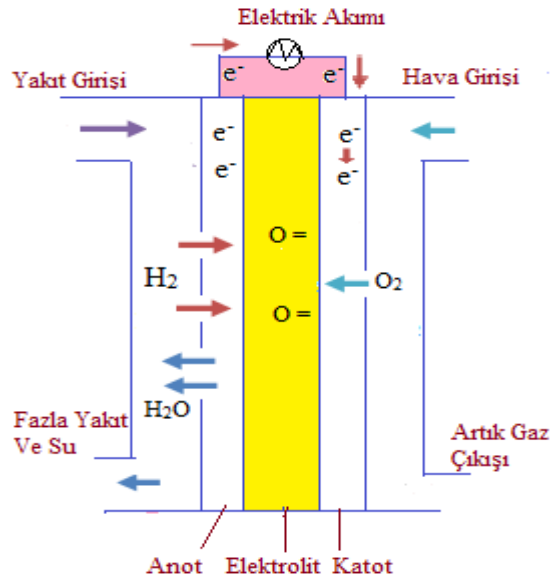
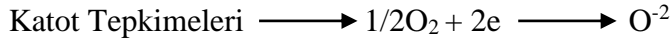
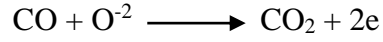
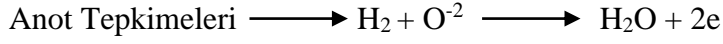
600°C-650°C arasında çalışabilen yakıt pilleridir. Elektrolit olarak anot kısmında nikel, katot kısmında ise nikel oksit kullanılır. Elektrolit üzerinden geçen karbonat iyonları burada hidrojen iyonları ile birleşerek su ve CO₂ oluşturur. Verimleri %50'ye kadar ulaşabilmektedir. Şekil 4.4.4.1'de erimiş karbonat yakıt pilleri gösterilmektedir.



Şekil 4.4.4.1. Erimiş karbonat yakıt pilleri (Appleby ve Foulkes, 1989)

4.4.5. Katı oksitli yakıt pilleri (KOYP)

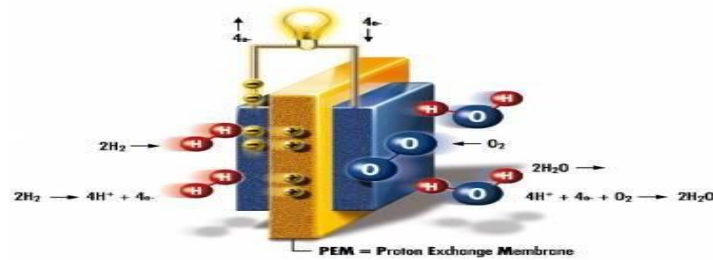
1000°C sıcaklıkta çalışabilen pillerdir. Elektrolit katı gözeneksiz Y_2O_3 içeren zirkonyumdan oluşmaktadır. O^{2-} iyonları katı bir elektrolit üzerinden anota aktarılır. Bu iyonlar anotta CO ve H_2 içeren yakıt ile birleşerek elektron oluştururlar. Şekil 4.4.5.1. katı oksitli yakıt pili gösterilmektedir.



Şekil 4.4.5.1. Katı oksitli yakıt pili (Appleby ve Foulkes, 1989)

4.4.6. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)

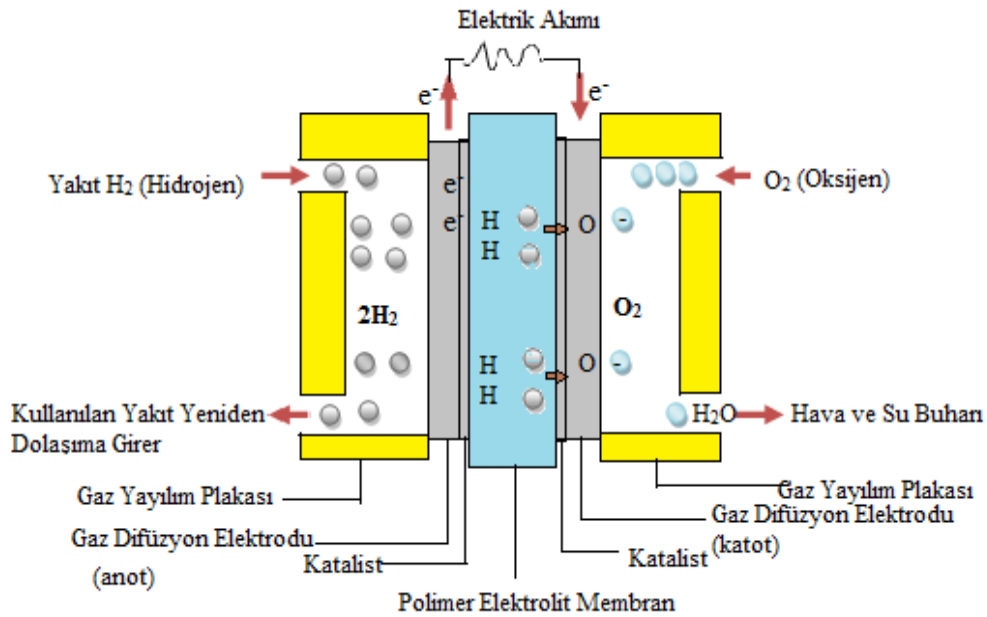
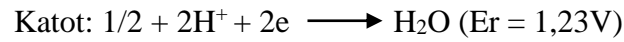
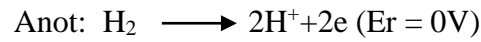
PEM yakıt pili ilk olarak General elektrik tarafından 1960'lı yılların başlarında keşfedilmiştir. 1960'lı yılların ortalarında PEM yakıt pilleri NASA tarafından Gemini programında yer almıştır.



Şekil 4.4.6.1. PEM yakıt pili üzerinde gerçekleşen tepkimeler

Şekil 4.4.6.1’de görüldüğü gibi hidrojen pilin anot tarafında bulunan kanaldan geçerek gözenekli elektrot yüzeyine ulaşır. Hidrojen, gözenekli elektrot yüzeyinden geçerken platin aktif yüzeyi ile temas etmesi sonucu tepkime ile bir elektronunu vererek iyon haline dönüşür (Sarıdemir, 2003). İyon haline dönüşen hidrojen, elektrottan elektrolite geçerek katota ulaşır. Bu sırada platin etken yüzeyinde hidrojenin vermiş olduğu elektronlar, dış devreden katota doğru giderken elektrik akımı oluştururlar. Pilin katot tarafındaki kanaldan geçerek gözenekli elektrota ulaşan oksijen buradan elektrolit elektrot ara yüzeyine ulaşır. Elektrolit -elektrot ara yüzeyinde, dış devreden gelen elektronlarla elektrolitten geçen hidrojen iyonları ve oksijen birleşerek aşağıdaki reaksiyonla su oluşturur (Sarıdemir,2003).

Anotta ve katotta gerçekleşen tepkimeler şu şekildedir :



Şekil 4.4.6.2. PEM yakıt pili

Oluşan su katot tarafındaki kanaldan pili terk eder . PEM yakıt pillerinde elektrolit olarak yapısında flor bulunduran sülfonik asit gibi iyon değıştiren asidik membranlar kullanılmaktadır. Polimer membranın yakıt pilindeki görevi, protonun anottan katoda geçişini sağlamak ve katotta oluşan suyun anota geçmesini engellemektir. Yakıt pilinde kullanılan bu membranlar, anot ve katot arasında gaz

geçişini engellemeli ve yalıtkan olmalıdır. Ayrıca membranlar yüksek kimyasal ve elektrokimyasal kararlılık için ince olmalıdır (Sarıdemir, 2003).

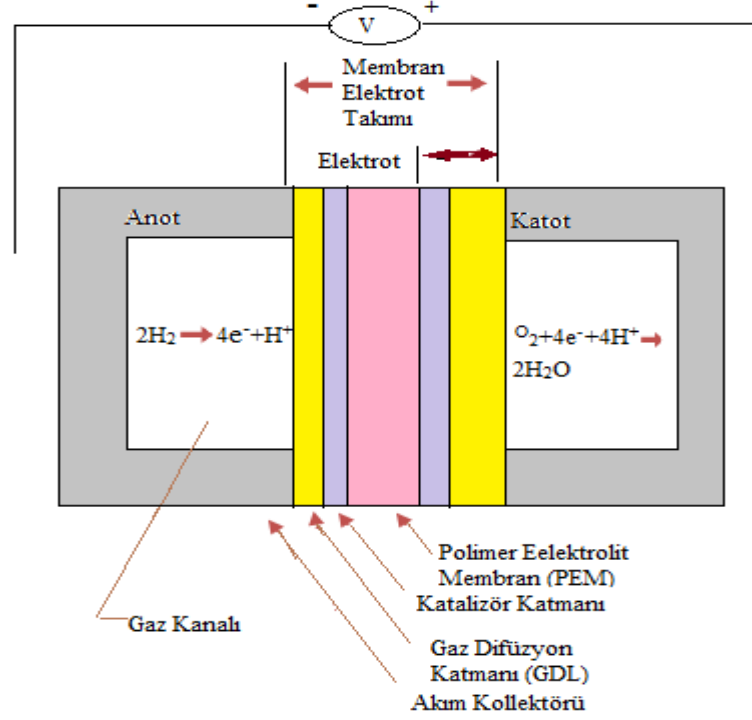
Tablo 3'te yakıt pili çeşitlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Platinyum katalizör olarak birden çok yakıt pilinde kullanılmaktadır. Tabloda AYP verimi en yüksek pil olarak gözükmetedir.

Tablo 3. Yakıt pili karşılaştırılması

	PEMYP	DMYP	AYP	FAYP	EKYP	KOYP
Elektrolit	Katı Polimer Membran	Katı Polimer ya da sıvı alkalın	KOH	Sıvı fosforik asit	Sıvı erimiş karbonatlar	Y ₂ O 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 edilen iyon	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

4.5. PEM Yakıt Pili Bileşenleri

PEM yakıt pilini oluşturan elemanlar Şekil 4.5.1'de gösterilmiştir. Yakıt piline ait her bileşenin farklı görevleri vardır. Bu bileşenler polimer membran, gaz difüzyon katmanı, ve katalizör katmanındaki elektrotlardan oluşmaktadır.



Şekil 4.5.1. PEM yakıt pili bileşenleri (Aydın, 2007)

4.5.1. Elektrolit membran

Yakıt pillerinde 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. Hidrojen ve oksijenin pil içerisinde doğrudan karışmasını engeller. En geniş kullanılan membran materyali Dupont üretimi olan Nafion®’ dur (DOE, 2004).

Membranın yüksek proton iletkenliğine sahip olması istenir. Membranın, uzun süreli ve sürekli çalışmaya, yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı olması istenir. Maliyet ve çalışma sıcaklıklarının sınırlı olmaları dezavantajları arasında yer almaktadır.

Membran proton iletken olması için sulandırılmalıdır. PEM yakıt hücrelerinde transferin önemi; göç eden iyonların, suyu membranın bir ucundan diğerine taşımasından kaynaklanmaktadır. Bu durum suyun az olduğu bölgelerde daha yüksek dirence sebep olmaktadır. İyon değıştiren membranların, yakıt hücrelerinde elektrolit olarak kullanılmasında, membranın dehidrasyon özelliğinin membranın fiziksel boyutları ve elektrolit direnci üzerindeki etkisi büyük önem taşır (Öğüt, 2005).

4.5.2. 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.

4.5.3. 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 iletimi çok iyi göstermektedir. Bunun haricinde farklı gazların kullanılması durumunda Rutenyum da iyi bir iletim sağlamaktadır. Elektrotların tasarımlarındaki asıl nokta iletkenlik konusudur. Elektrot kalınlığının ince olması iletkenlikte kolaylık sağlar.

4.5.4. Akış alanı plakaları

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

Genel kanal konfigürasyonları;

- Paralel gaz kanalları,
- 'Mirrored' akış alanı,
- Serpantin tipi akış kanalı,
- Akış kanalsız gaz difüzyon katmanı,
- Parçalı akış alanı,
- Metal ağ akış alanı olmak üzere 6 çeşittir.

Serpantin tipi akış kanalları ise “Ballard Power Systems” tarafından patenti alınan bir akış alanı konfigürasyonudur. Serpantin tipi akış kanalı başlangıçtan sona kadar süreklidir. Serpantin plakanın avantajı, yol üzerinde su zerresi gibi bir engelin akışı engellememesidir. Tıkanık bir serpantin kanalında tepken gazlar, akım toplayıcı plakaların altındaki akışla kanalı geçmeye zorlanır, 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 kanaldaki bir engel, tıkanıklığın alt bölgesinde bir ölü bölge oluşturacaktır. Bu ölü bölge içerisinde tepken bulunmayacak ve etken olmayacaktır (Aydın, 2007).

4.6. Yakıt Hücresinin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan yakıt hücresi; anot ve katot katalizör tabakalar, anot ve katot gaz kanalları ve membran bölümlerinden oluşmaktadır. Anot gaz kanalından hidrojen (H_2) yakıtı girmektedir. Katot gaz kanalından ise, oksijen (O_2) akışkanı girmektedir. Hücre işletim koşulları değişkenleri;

4.6.1. Basınç

Yakıt hücresi atmosferik ya da yüksek basınçtaki gazlar beslenerek çalıştırılabilir. Termodinamik olarak yüksek basınç ile çalıştığında hücre voltajı artmasına rağmen basınç oluşturmak için harcanan güç göz önüne alındığında bu durum biraz daha karışık hale gelebilmektedir. Ayrıca basıncın etkisi su yönetimiyle de ilgili olduğundan sistemden sisteme değişiklik gösterebilmektedir (Barbir, 2005).

4.6.2. Sıcaklık

Genel olarak yüksek işletim sıcaklığı daha yüksek potansiyelin elde edilmesini sağlamaktadır. Fakat farklı yakıt hücresi tasarımları için farklı işletim sıcaklıkları optimum sonuçlar doğurabilir. Yakıt hücresinin işletim sıcaklığı da uygulanacak basınç gibi sistem tasarımıyla ilgilidir. Hücre performansının yanı sıra sistem gereklilikleri özellikle boyutlar ve ısıtıcı gibi alt sistemlerin güç gereklilikleri de hesaba katılmalıdır (Barbir, 2005).

4.6.3. Reaktan akış hızları

Yakıt hücresinde reaktanların giriş hızları tükenim hızlarından daha büyük veya eşit olmalıdır. Reaktanların harcanma ve suyun oluşum hızları Faraday kanunu ile belirlenir. Reaktanların akış hızlarının tüketim hızlarına oranına da stokiyometrik oran denir. Reaktan debileri aslında tasarım değişkenleridir. Eğer akış hızı fazlaysa yakıt kaybı, eğer debi düşükse de performans kaybı yaşanmaktadır. Bu sebeple optimize reaktan akış hızının belirlenmesi gerekmektedir (Barbir, 2005).

4.6.4. Reaktan nemlilikleri

PEMYH'de membranın kuru halde çalışması bozunmayı hızlandırabilecek gözeneklilik oluşum riski yüksektir. Bunun yanı sıra aşırı su anot ve katot gözenekliliğini tıkararak kütle transfer direncini arttırıp performans kaybına sebep olabilir. Bu tip yakıt hücrelerinde ilginç olan durum besleme gazları hem nemlendirilmelidir, hem de hücre ortamından su uzaklaştırılmalıdır. Yapılan çalışmalarda farklı işletim parametrelerinde elde edilen veriler yetersizdir (Barbir, 2005).

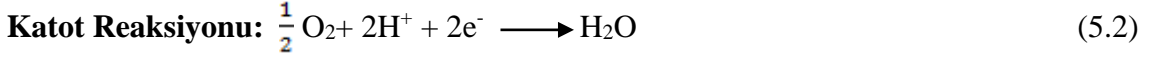
Nemlendirme oranının ideal şartlarda olabilmesi tüm işletim koşulları için oldukça zordur. Polimer Elektrolit Membran yakıt hücrelerinin iyi ve yüksek bir performans gösterebilmesi için su yönetimi de oldukça önemlidir. Her bir düzenek için optimize koşullar tespit edilmelidir.

5. METERYAL METOD

5.1. PEM Yakıt Hücre Kimyası ve Termodinamik Yapısı

Yakıt hücresinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar membranın iki bölümünde, anot ve katot tabakalarında gerçekleşmektedir.

Tipik bir yakıt hücresinde gerçekleşen temel reaksiyonlar:



Genel olarak ise iki reaksiyon aşağıdaki gibi toplam şeklinde ifade edersek:



İfade edilen bu reaksiyon yakıt hücresinde meydana gelen temel süreçleri göstermektedir. Genel reaksiyon yanma reaksiyonuyla tamamen aynıdır. Reaksiyondaki yanmanın ekzotermik olmasından dolayı enerji açığa çıkmaktadır. Bu reaksiyonda sıcaklığın 25°C olması durumunda (yani reaksiyona giren gazlar ve oluşan su 25°C olursa), reaksiyon (5.4) ile ifade edilebilir.



Yakıt hücrelerinde üretilen gerilimi hesaplayabilmek için ilk olarak enerji açıklanmalıdır. Hidrojenin yanma reaksiyonunun entalpi değeri hidrojenin ısınma değeri (hydrogen's heating value) olarak da adlandırılır. Bunun yanında reaksiyon sırasında tam verim elde etmek mümkün değildir. Tam bir verim elde edilemeyeceğinden dolayı kayıp ısı oluşmaktadır. Hidrojenin ısıtma değerinin tamamı verimli olarak kullanılamaz. Reaktantlar ile ürünler arasındaki enerji farkı ile yararlı enerjiyi ifade eden Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (5.5)$$

ΔG , Tablo 4'de yakıt pilinde kullanılan hidrojene ait Gibbs serbest enerjisinin değeri farklı sıcaklıklar için görülmektedir. Değerlerin negatif olması enerji açığa çıktığını göstermektedir.

Tablo 4. Çeşitli sıcaklıklarda hidrojen yakıtının Gibbs serbest enerjisi (Larminie,J., Dicks, A. 2000)

Üretilen Su Formu	Sıcaklık (°C)	$\Delta G(\text{kJ/mol})$
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

$$\Delta H = (h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{\text{O}_2} \quad (5.6)$$

Gibbs serbest enerji formülündeki ΔS ise reaksiyona giren ve reaksiyon sonucu oluşan ürünlerden meydana gelen kayıp enerjii (entropiyi) ifade etmekte olup (5.7) ifadesinde görüldüğü gibidir.

$$\Delta S = (h_s)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_s)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (h_s)_{\text{O}_2} \quad (5.7)$$

T ifadesi Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.

25°C' de h_f ve h_s değerleri Tablo 5'de gösterilmektedir.

Tablo 5. 25 °C'de h_f ve h_s değerleri için yakıt hücrelerindeki entalpi ve entropi değerleri (Barbir, 2005).

	$h_f (\text{kJmol}^{-1})$	$h_s (\text{kJmol}^{-1})$
Hidrojen	0	0.13066
Oksijen	0	0.20517
Sıvı formunda su	-286.02	0.06996
Buhar formunda su	-241.98	0.18884

Kalori ölçen cihazlar kullanılarak reaksiyonlardaki mevcut ısı belirlenmektedir. Örnek olarak 25°C sıcaklıkta 286.2kJmol⁻¹'lük bir enerji meydana gelmektedir. Fakat bu enerjinin 237.34kJmol⁻¹'lük kısmı elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Kalan

48.68 kJmol⁻¹'lük kısmı ise ısı enerjisine çevrilebilmektedir. Yakıt hücresi ile ilgili gerekli enerji ifadeleri gösterildikten sonra gerilimin nasıl bulunabileceğini ifade edelim. Teorik yakıt hücre potansiyelini belirtirsek:

Elektriksel iş genellikle, (5.8) denkleminde gösterildiği üzere yükün ve potansiyelin çarpımı ile elde edilir.

$$W_{el} = q \cdot E \text{ (Jmol}^{-1}\text{)} \quad (5.8)$$

Bu ifade de W_{el} elektriksel işi, (Jmol⁻¹) birimiyle,

q Coulombs yükü, mol⁻¹ birimiyle,

E potansiyeli, Volt birimiyle ifade edilmektedir.

Toplam yük transferi yakıt hücre reaksiyonunda aşağıdaki gibidir.

$$q = n \cdot N_{AVG} \cdot q_{el} \quad (5.9)$$

Bu ifadede, n molekül başına elektronu (H₂ için n=2' dir.),

q Coulombs yükü, mol⁻¹ birimiyle,

N_{AVG} 6.022x10²³ değeriyle avagadro sayısını ifade etmektedir.

Bir elektron yükü ile avagadro değerinin çarpımı Faraday sabitini vermektedir. Bundan dolayı elektriksel iş (5.10) ifadesiyle bulunur.

$$W_{el} = n \cdot F \cdot E \text{ (Jmol}^{-1}\text{)} \quad (5.10)$$

Bir yakıt hücresinde üretilecek olan elektriksel enerjinin Gibbs enerjisine göre maksimum değeri (5.11)' de gösterildiği gibidir.

$$W_{el} = -\Delta G \quad (5.11)$$

Bu nedenle yakıt hücre potansiyeli teorik olarak (5.12) ifadesiyle elde edilmektedir.

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \text{ (V)} \quad (5.12)$$

25°C için ΔG , n ve F bilindiğinden yakıt hücre potansiyeli teorik olarak (5.13) ifadesindeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237.340 \text{ (Jmol}^{-1}\text{)}}{2.96,485 \text{ (Asmol}^{-1}\text{)}} = 1.23 \text{ (V)} \quad (5.13)$$

Bunların sonucunda, 25°C' de H₂ - O₂ yakıt hücre potansiyeli teorik olarak 1.23V' tur diyebiliriz.

5.1.1. Teorik yakıt hücresi verimi

Teorik olarak maksimum yakıt hücresi verimi Gibbs serbest enerjisinin tamamı elektriksel enerjiye dönüştüğü varsayımı düşünülerek aşağıdaki değer bulunur.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237.34}{286.02} = \%81 \quad (5.14)$$

Bu durumda meydana gelen su sıvı formdadır. Fakat verim geleneksel olarak yakıtın daha düşük ısıtma değeri için verilir. Bu durumda su gaz formundadır (Larminie ve Dicks, 2000; Barbir, 2005).

Teorik yakıt hücre verimi bir sistem için ele alındığında verimin %40 veya %50 civarlarında olması verimin yüksek olduğunu ifade eder. Sistem içi çalışmalarda en iyi verim için %40 değeri ele alınmaktadır.

Yakıt hücre teorik verimliliği (25°C, 1 atm) hidrojen alt ısı değeri yakıt hücre verimliliğini belirtmede kullanıldığında aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H_{LHV}} = \frac{228.74}{241.98} = \%94,5 \quad (5.15)$$

5.2. Deney Düzeneginin Hazırlanması

Son yıllarda Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücreleri ile ilgili yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Bundan dolayı PEM yakıt hücresinin sıcaklık, nem, basınç gibi hücre performansına etki eden işletme parametreleri gibi pek çok parametrenin de günümüzde ve gelecekte ne gibi sonuçlar doğuracağı bilgisayar üzerinde simülasyonu ile belirtilmiştir. Dolayısıyla ortaya çıkan sonuçlar yapılan deney verileriyle karşılaştırılmıştır.

Tasarlanmış olduğumuz düzenekte yakıt pili üzerinde önemli etkiye sahip olan sıcaklığın ve nemin yakıtlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yakıt piline verilen hidrojen yakıtının giriş sıcaklığı ve hücreye verildikten sonraki çıkış sıcaklığı gözlenmiş olup grafikler şeklinde gösterilmiştir. Aynı şekilde yakıtların giriş ve çıkış nem oranları incelenerek yakıt hücre performansına etkisi gözlemlenmiştir. Tasarlanan deney

düzeninde Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Laboratuvarı uygulama alanı olarak kullanılacağı da göz önünde bulundurularak en uygun tasarım modeli Şekil 5.2.1'de görüldüğü gibi geliştirilmiştir.

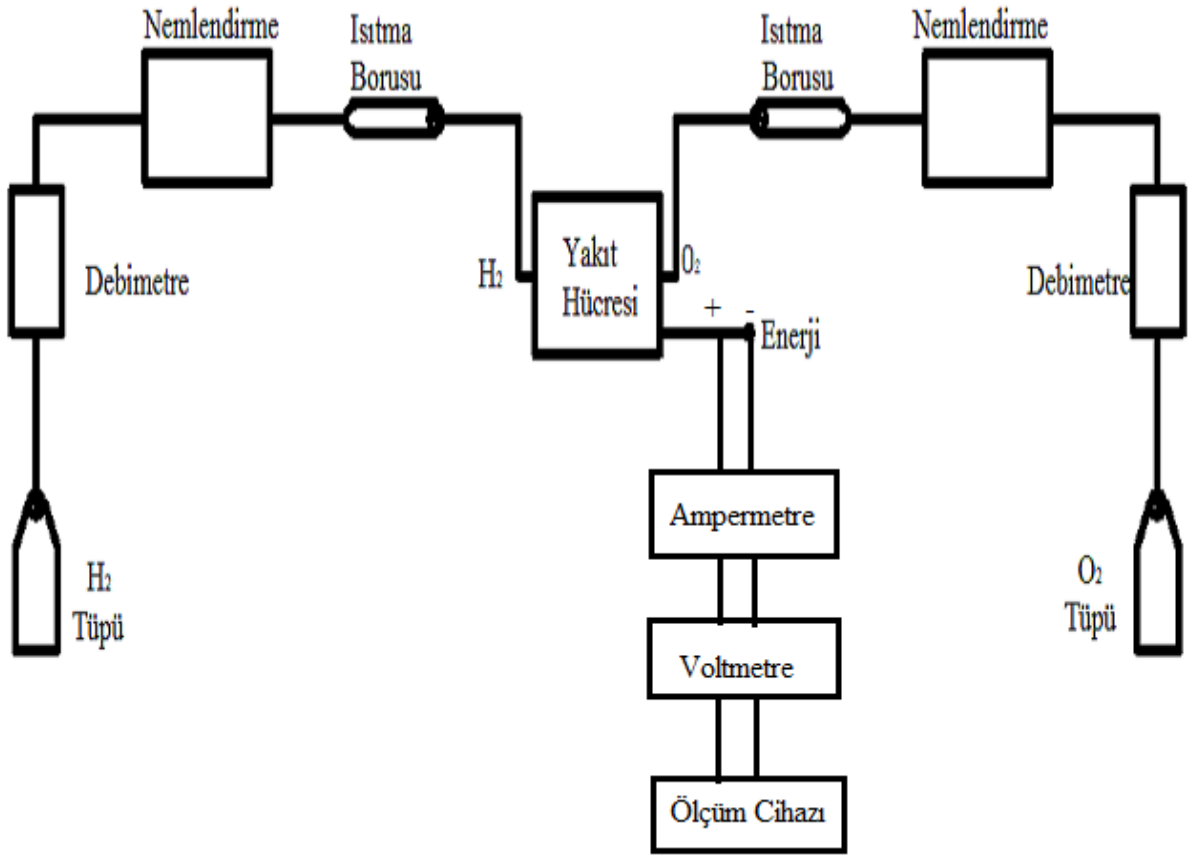


Şekil 5.2.1. Tasarlanan deney düzeneğinin görüntüsü

Deney düzeneğinde kullanılan cihazların teknik özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Kullanılan bu cihazlar deney setimiz için hesaplanan kapasitelerde seçilmiştir.

Tablo 6. Sistemin değerini almak için kullanılan cihazlar ve özellikleri

Ekipmanlar	Özellikleri	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
H ₂ ve O ₂ Debimetre	Ayar yapılabilir hassas vana ve göstergesi	Maksimum sıcaklık 70 °C	%4 F.S 7
Sıcaklık ve nem sensörü (Termometre,Higrometre)	Pil özelliği 2xLR44 1,5V	Sıcaklık: -50°C ~ 70°C ; Nem:10%~95% RH	Sıcaklık: 0.1°C ; Nem % 1 RH
Ampermetre ve Voltmetre	3 Bit 0.28' LED digital tube	DC 4.5-30 V (voltaj)- DC 0.00-5.00A(akım)	Çalışma Ortam Sıcaklığı: -10° ~ 65°
(Termokupl)	K tipi termokupl girişi	-50-1372 °C	±%3
Sıcaklık Ölçer(termometre)	2 x LR44 düğme pil	-50 °C ~ 100 °C	1.5C

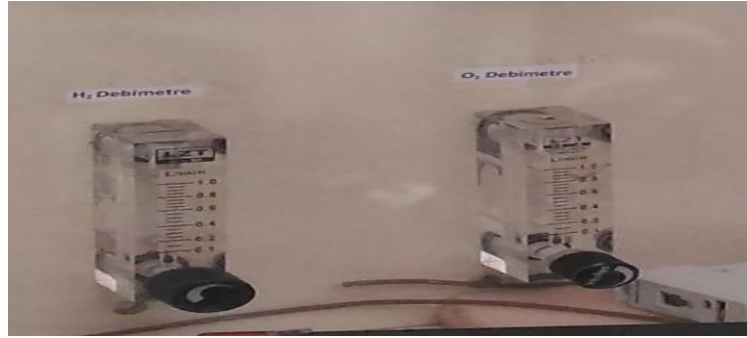


Şekil 5.2.2. Çalıştırılan sistemin H₂ ve O₂ beslemeli yakıt hücresinin şematik gösterimi

5.2.1. Sistem malzemelerinin temini

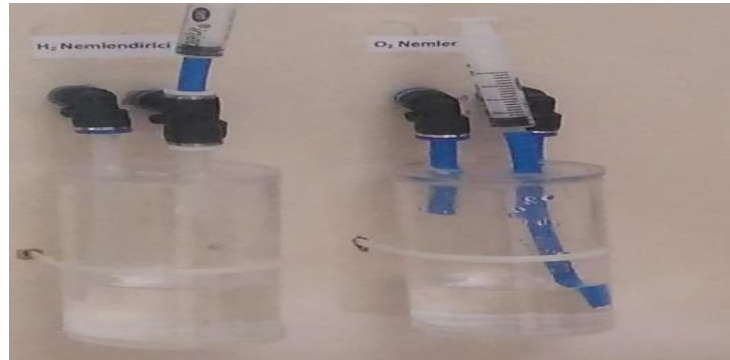
Yapılan çalışmada kullanılan deney seti malzemeleri; hidrojen tankı, oksijen tankı, termometreler, ampermetreler, voltmetreler, termokulplar, nem ölçer, debimetre, PEM yakıt hücresi kısımlarından oluşturuldu.

Yaptığımız deneyde hidrojen ve oksijenin girişini sağlayabilecek ısıya dayanıklı hortumlar kullanıldı. Deney sisteminin içerisine gönderilecek olan havayı ölçmek için debimetre kullanıldı. Debimetreler sistemin çalışma kapasitesi, sistem ömürlerini belirlemede önemli bir role sahip olduğu için kullanıldı. Yapılan düzeneğin verimliliği debimetrelerin aktardığı bilgiler eşliğinde ölçülerek belirlendi. Ayrıca deneyde kullanılan hidrojen ve oksijen debimetreleri, yapmış olduğumuz sistemin performansını ihtiyaca göre arttırmak veya azaltmak için de kullanıldı. Şekil 5.2.1.1'de hidrojen ve oksijen debimetre verilmiştir.



Şekil 5.2.1.1. Hidrojen ve Oksijen debimetre

Hidrojen ve oksijen için iki tane ayrı nemlendirici kapları temin edilmiştir. Hidrojen ve oksijenin belirli değerlerde nem ihtiva etmesi gerekir. Bu ihtiyaç nemlendirme kapları ile sağlanmıştır.



Şekil 5.2.1.2. Hidrojen ve Oksijen nemlendirici kapları

Yapılan düzende nem değerlerini ölçmek için nem ölçerler kullanıldı. Bu nem ölçerler hidrojenin ve oksijenin giriş - çıkışı sırasındaki sahip olduğu nem değerlerini algılayarak göstermektedir. Deney düzeneğinde kullanılan nem ölçerler sayesinde hidrojen ve oksijenin sisteme giriş ve çıkış esnasındaki nem dengesi istenilen seviyede tutulur.



Şekil 5.2.1.3. Nem ölçerler

Sistemimizde ısı bantlarından geçen hidrojen ve oksijen gazının hacmindeki ya da basıncındaki değişiklikler gözlemlenerek sıcaklıklarının kaç derece olduğunu öğrenmek için sıcaklık ölçerler kullanıldı. Şekil 5.2.1.4 de gösterilen düzenekte kullanılan sıcaklık ölçerler vasıtasıyla hidrojen ve oksijenin sıcaklığı istenilen ayarda tutulmuştur.



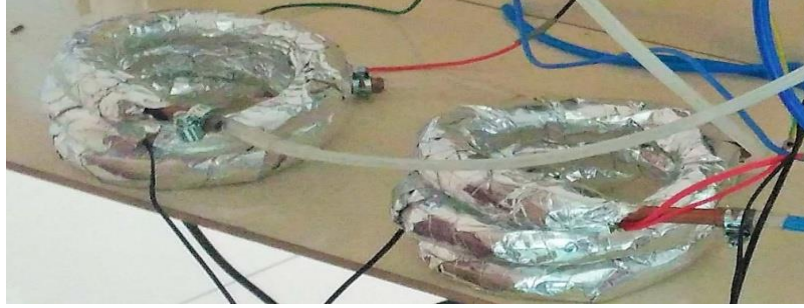
Şekil 5.2.1.4. Sıcaklık ölçer

Kurulan bu düzenekte elektrik devresinden geçen elektrik akımını ölçmek amacıyla ampermetreler kullanıldı. Ampermetrelerin kullanılmasıyla sistemdeki akım şiddeti okunarak gereken hesaplamaların yapılmasına olanak sağlandı.



Şekil 5.2.1.5. Ampermetre ve Voltmetre ölçüm aletleri

Yapılan çalışmada sisteme verilecek olan hidrojen ve oksijen gazlarının içinden geçeceği termokupllar kullanıldı. Bu termokupllar bir tür sıcaklık sensörüdür. Bu termokuplların iki ucu birleştirildi ve ısıtılıp diğer uçlarında gerilim elde edildi.



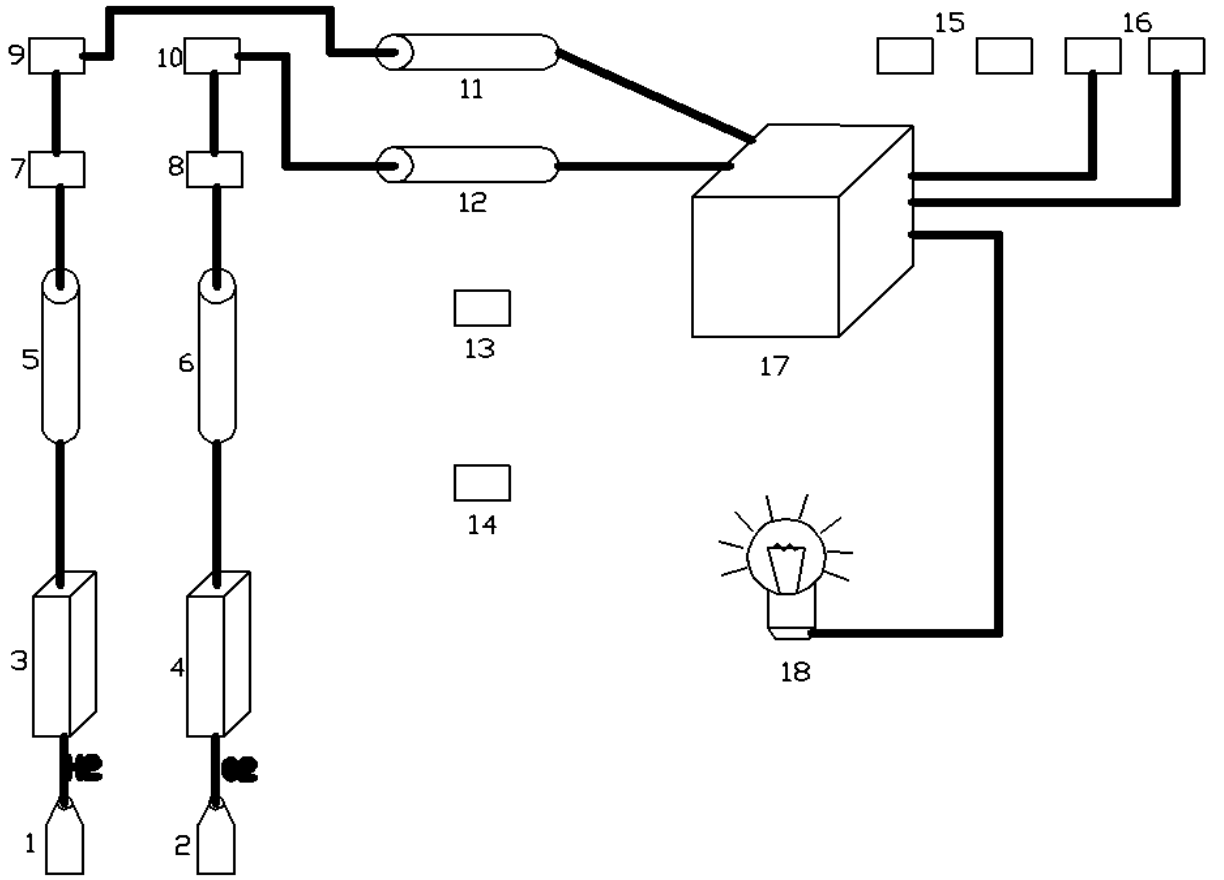
Şekil 5.2.1.6. Termokupllar (ısı bantları)

Yapılan çalışmada PEM yakıt hücresinin akım toplayıcı kanallarına ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Yakıt hücre sıcaklığı yerleştirilen bu ısıtıcılar vasıtasıyla çalışma anında ulaşılmak istenen sıcaklık değerine kadar getirilmektedir. Hidrojen ve oksijen gazları sisteme girmeden önceki sıcaklıkları ve sistemden çıktıktan sonraki sıcaklıkları tespit edildi. Bu düzenekler sayesinde yakıt piline giren H_2 ve O_2 'nin sıcaklık, nem ve debileri kontrol altına alınmış oldu. H_2 ve O_2 'nin sıcaklık değerleri istenilen aralıklarda değiştirildi. Sistem üzerindeki kontrol panelinden gözlemlendi. Sonuç olarak yakıt piline giren H_2 ve O_2 'nin tüm parametreleri kontrol altına alındı. Ayrıca yakıt pilinde üretilen enerjinin ölçümü yapılmış oldu.

6. DENEY SETİNİN KURULUMU VE DENEYİN YAPILIŞI

Bu bölümde PEM yakıt hücresinin sıcaklık, nem, kütle gibi parametrelerinin yakıt hücresi performansına etkilerinin gözlenebilmesi amacıyla PEM test hücresi, deney düzeneği ve yöntemi anlatılmıştır. Bununla birlikte yapılan deney sonucunda elde edilen veriler yakıt hücre programı vasıtasıyla ayrıntılı bir biçimde incelenmiş, yakıtların çalışma sırasındaki zamana bağlı olarak en ideal hücre sıcaklığı ve nem oranları tespit edilip önerilmiştir. Aynı zamanda yakıt hücresine göre uygun miktarlarda Hidrojen (H_2) ve Oksijen (O_2) gönderilerek bu yakıtların çalışma esnasında kimyasal reaksiyon sonucu zamana bağlı olarak verileri de ölçülmüştür. Deneyin yapılması için gerekli olan tüm ekipmanlar ve bağlantı aletleri tek tek alınarak sisteme entegre edilmiştir. Alınan tüm aletler deney düzeneği üzerinde gerekli yerlere monte edilerek deney düzeneği oluşturulmaya başlanmıştır. Temin edilen bu aletler çeşitli hortumlar ve kablolar aracılığıyla birbirlerine bağlanmıştır. İlk olarak bir adet hidrojen tüpü ve bir adet oksijen tüpü temin edildi. Bu hidrojen ve oksijen tüpleri deney düzeneğine yerleştirilen hidrojen ve oksijen debimetrelerine pnömomatik hortumlarla bağlantıları gerçekleştirildi. Hidrojen debimetresinin ve oksijen debimetresinin çıkışlarına da akışın gerçekleşebilmesi için hortumlar yerleştirilerek hidrojen nemlendirme ve oksijen nemlendirme kaplarına geçiş sağlanabilmektedir. Böylece hidrojen ve oksijenimiz nemlendirme kapları vasıtasıyla nemlendi.

Daha sonra hidrojen ve oksijen nemlendirme kaplarının giriş ve çıkışlarına elektronik nem ölçer cihazları takıldı. Hidrojen nemlendirme ve oksijen nemlendirme kaplarının çıkışlarına iki adet termokupl (çelik hortum) takıldı. Hidrojen çelik hortumu ve oksijen çelik hortumunun giriş-çıkışlarına elektronik termometreler takıldı. Sisteme bağlanan çelik hortumların üzeri az da olsa ısı kaybını azaltmak amacıyla ısı bandı ve izolasyon malzemesi ile sarıldı. Hidrojen çelik hortumunun ve oksijen çelik hortumunun çıkış kısımları, hidrojen gazı ve oksijen gazının yakıt hücresine geçişinin sağlanması için bağlantı elemanlarıyla Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresine bağlantısı yapıldı. Hidrojen ve oksijen gazlarının Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresine geçişi sağlanır. Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresi sisteminin içinde hidrojen gazı ve oksijen gazı elektrokimyasal tepkimeleri sonucunda elektrik enerjisi açığa çıkmaktadır. Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresinin çıkışlarına da voltmetreler ve ampermetreler yerleştirildi. Açığa çıkan elektrik enerjisi de bir fan vasıtasıyla dışarı verildi.



Şekil 6.1. Tasarlanan PEM yakıt pili prototipi

Deney setindeki teknik elemanlar;

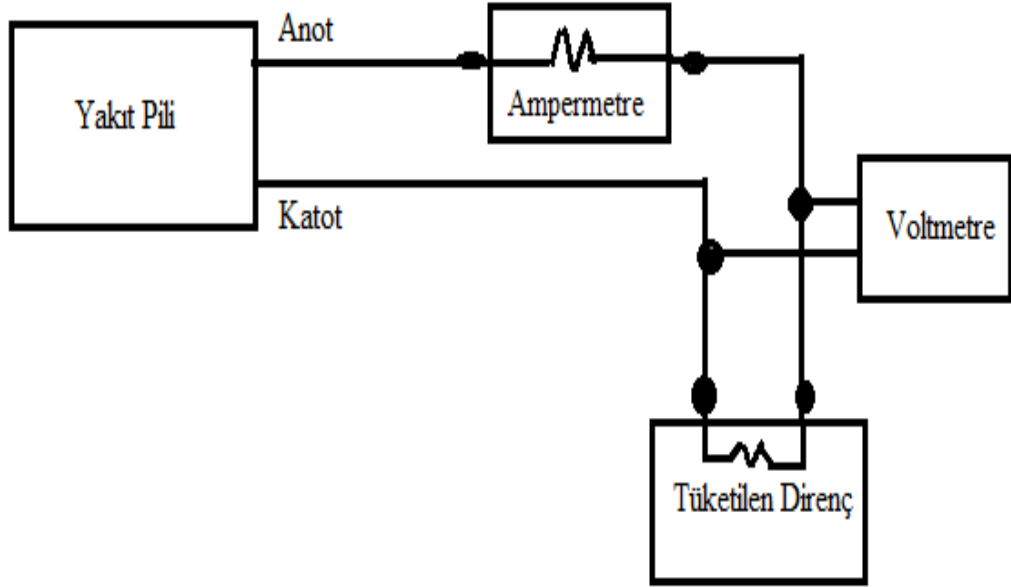
- 1- Hidrojen (H_2) gaz tüpü
- 2- Oksijen (O_2) gaz tüpü
- 3- Hidrojen debimetre
- 4- Oksijen debimetre
- 5- Hidrojen nemlendirme tüpü
- 6- Oksijen nemlendirme tüpü
- 7- Hidrojen giriş nem ve sıcaklık göstergesi
- 8- Oksijen giriş nem ve sıcaklık göstergesi
- 9- Hidrojen çıkış nem ve sıcaklık göstergesi
- 10- Oksijen çıkış nem ve sıcaklık göstergesi
- 11- Hidrojenin ısıtıldığı boru
- 12- Oksijenin ısıtıldığı boru

- 13- Hidrojen gazı sıcaklık ayarı
- 14- Oksijen gazı sıcaklık ayarı
- 15- Voltmetre
- 16- Ampermetre
- 17- PEM yakıt hücresi
- 18- Güç çıkış ünitesi

PEM yakıt hücrelerinde sıcaklık, kütle ve nem parametrelerinin hücre performansına etkilerinin görülebilmesi için Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü laboratuvarında kurulu olan yakıt hücresi grubunun test düzeneği kullanılmıştır. Oksijen gazı ve hidrojen gazının içinde bulunduğu yakıt tankları, hidrojenin ve oksijenin akımlarını ölçmeye yarayan akış ölçer aletleri, PEM yakıt hücresi test düzeneği, hidrojen ve oksijenin sisteme verilmeden önceki sıcaklıkları, nem oranları ve hücre sıcaklığını değiştirecek ısı değiştiriciler, ve güç kaynaklarıyla deney düzeneği kurulmuştur.

Kurulan deney düzeneğinin çalıştırılmasında; ilk olarak Hidrojen ve oksijen gazı tüplerinden belirli miktarda hidrojen ve oksijen gazı sisteme verildi. Bu hidrojen ve oksijen gazları debimetreden geçilerek hidrojen debisi ve oksijen debisi teker teker ölçülerek istenilen değerlere getirildi. Gazlar debimetreden geçerek sistem için gerekli debi ayarlanır. Gazların debileri ölçüldükten sonra hem oksijen gazı için hem de hidrojen gazı için düzenekte oluşturduğumuz nemlendirme kaplarında gazlar nemlendirildi. Daha sonra nemlendirme kaplarının giriş ve çıkışlarına taktığımız elektronik nemölçer aletleriyle nem seviyeleri ölçüldü. Nemlendirme kaplarının çıkışlarına çelik hortum bağlantısı yapılmıştır. Yakıt hücresi üzerindeki sıcaklık parametresinin etkisinin incelemek amacıyla birkaç noktada sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır. Bu kontrol cihazları, hidrojen yakıtının ve oksijenin sisteme girmeden önceki nemlendirme sıcaklığını kontrol etmede kullanılan termokuplardır. Bununla birlikte Anot ve Katot akım toplayıcı kanallara hücre sıcaklığını ayarlaması amacıyla kanallara bağlanmak için termokuplar kullanıldı. Hidrojen ve oksijen gazlarının çelik hortumlarının giriş-çıkış kısımlarına bağlanan termometreler ile hidrojen ve oksijen gazlarının sıcaklık seviyeleri de ölçüldü. Gazlar istenilen sıcaklıklara göre ayarlanarak gerekli değerler alındı.

Daha sonra çelik hortumlarından geçen hidrojen ve oksijen gazları, yakıt hücresinin katot bölümüne oksijen ve anot bölümünden de hidrojen gazı girişi yapıp istenilen değerlere ayarlanarak sisteme gönderildi. Yakıt hücresi sisteminde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu elektrik üretimi sağlandı. Bunun sonucunda meydana gelen su (H_2O), su şeklinde yakıt hücresinden dışarı verilmektedir. Sistemdeki akım değerleri voltaj değerleri, voltmetre, ampermetre ölçüm aletleri ile ölçülmektedir. Yakıt hücresine gönderilen Hidrojen ve Oksijen miktarları zamana göre kullanım miktarları da tespit edilmiştir. Yakıt pilinin elektrik görüntüsü Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Yakıt pilinin elektrik devresi

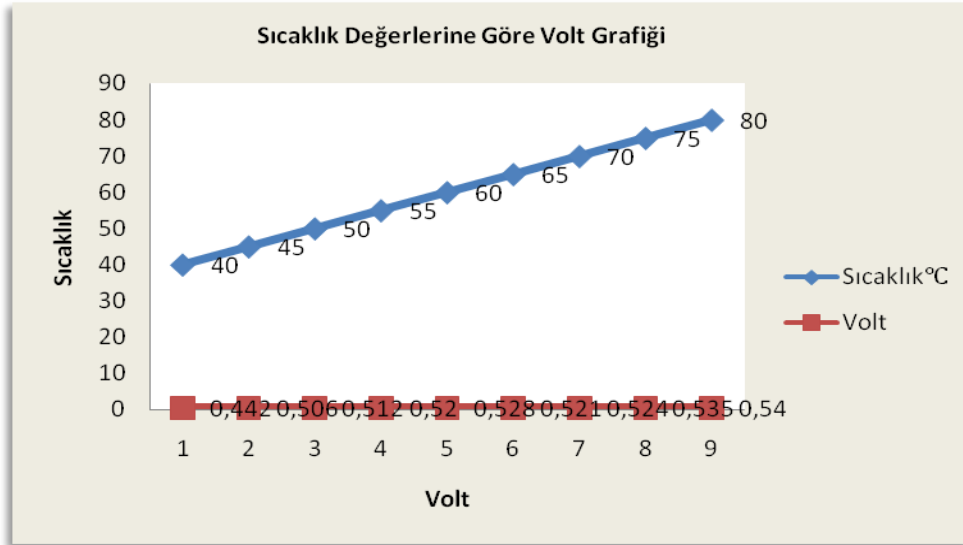
7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney sonuçlarının sağlıklı bir biçimde incelenebilmesi için Datalogger ile ölçümler yapıldı. Hidrojen ve oksijen gazları sisteme girmeden önceki sıcaklıkları tespit edilip ve bu sıcaklıklarda sistemin istenildiği gibi çalışıp çalışmadığını bakıldı. Sistemin sağlıklı çalışabilmesi için yakıtların sıcaklık, nem ve debi değerleri tespit edildi. Tasarlanmış olduğumuz düzenekte, yakıt hücresi üzerinde önemli etkiye sahip olan sıcaklığın yakıtlar üzerindeki etkisine bakılarak gerekli olan veri değerleri alındı.

Cihazlar ve tüm ekipmanlar hazır hale geldiğinde yapılan deneyler sonucunda,

- Nem değerinin 40°C alındığı,
- H₂ gazının debisinin 0,3 ml/dk alındığı ve
- O₂ gaz debisinin de 0,5 ml/dk olarak alındığı durumda,

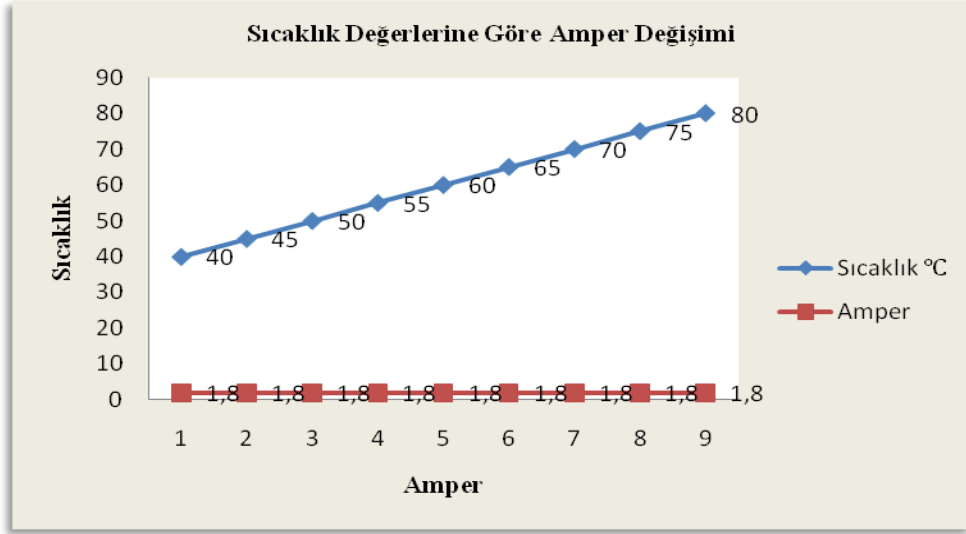
Sistemdeki hat sıcaklık değerleri de 40°C - 45°C - 50°C - 55°C - 60°C - 65°C - 70°C - 75°C - 80°C aralıklarında bilgisayara girilerek, bu değer aralıklarının sistem performansındaki etkileri kontrol edildi. Şekil 7.1 de bu değer aralıklarındaki sıcaklık değerine göre volt değerleri grafiğinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Sistem içi sıcaklık- volt değerleri

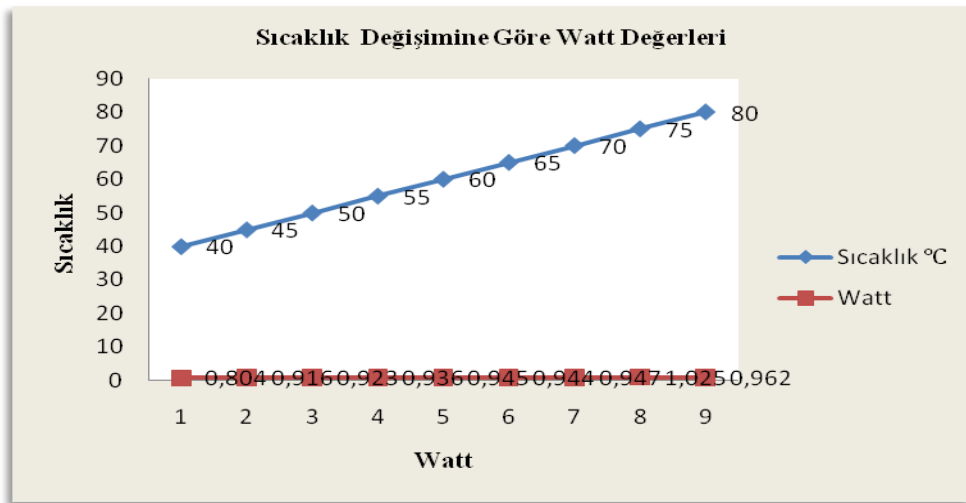
Şekil 7.1' de görüldüğü üzere; verilen bu değerler aralığında ölçüm yapıldığında sıcaklık değerleri belirli aralıklarda arttırıldığında volt değerlerinde fazla bir farklılık olmadığı gözlemlenmiştir. Sistem için uygun olan en düşük sıcaklık 40°C ile en yüksek sıcaklık 80°C aralığında değerler alınarak volt değerlerinin değişimi kontrol edilerek sistem performansına bakıldı.

Aynı şekilde sistemimiz için uygun olan en düşük sıcaklık olan 40°C ile en yüksek sıcaklık olan 80°C aralığında sıcaklık - amper değerleri gözlemlendi.



Şekil 7.2. Sistem içi sıcaklık amper değerleri

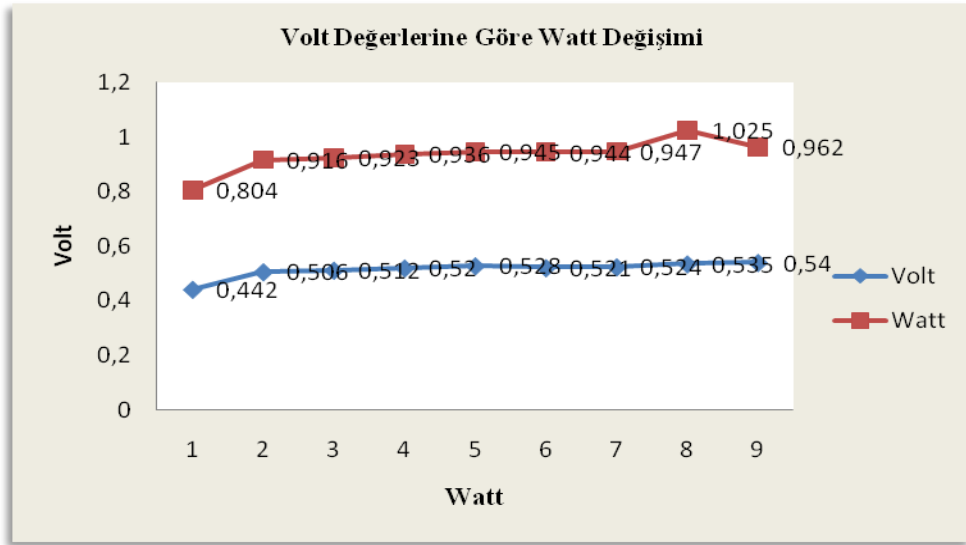
H₂ ve O₂ gazlarının sıcaklık verileri 40°C - 45°C - 50°C - 55°C - 60°C - 65°C - 70°C - 75°C - 80°C değerlerinde alınırken akım değerlerinin sabit kaldığı görülmüştür. Sistemde en düşük sıcaklıkta ve en yüksek sıcaklıkta akım değeri sabit kalmıştır. Sıcaklık değerleri artış gösterirken akım değerlerinde herhangi bir değişiklik olmadığı sonucuna varılmıştır. Aynı sıcaklık aralıklarında bu kez watt değerleri alındı. Bu sıcaklık değerleri aralığında watt değerlerinin sabit kalıp kalmadığına ve sistem üzerindeki etkilerine bakılarak aşağıdaki Şekil 7.3 oluşturuldu.



Şekil 7.3. Sistem içi sıcaklık - watt değerleri

Bu sıcaklık değerlerinde 40°C de watt değeri 0,804 W olarak ölçülürken sistem için en yüksek sıcaklık olan 80°C de watt değerinin 0,962 W olduğu görülmüştür. En yüksek watt değerine 75°C de ulaşılmıştır. Sistem için en iyi performans sıcaklık aralığının 70-75°C'de olduğu gözlemlenmiştir. Artan bu sıcaklık değerleri aralığında watt değerlerinde büyük bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir. Sıcaklık değeri arttıkça watt değerinde azda olsa bir artış olduğu görülmüş olup 80°C'ye çıkarıldığında tekrar sistem gücü azalmaya başlamıştır.

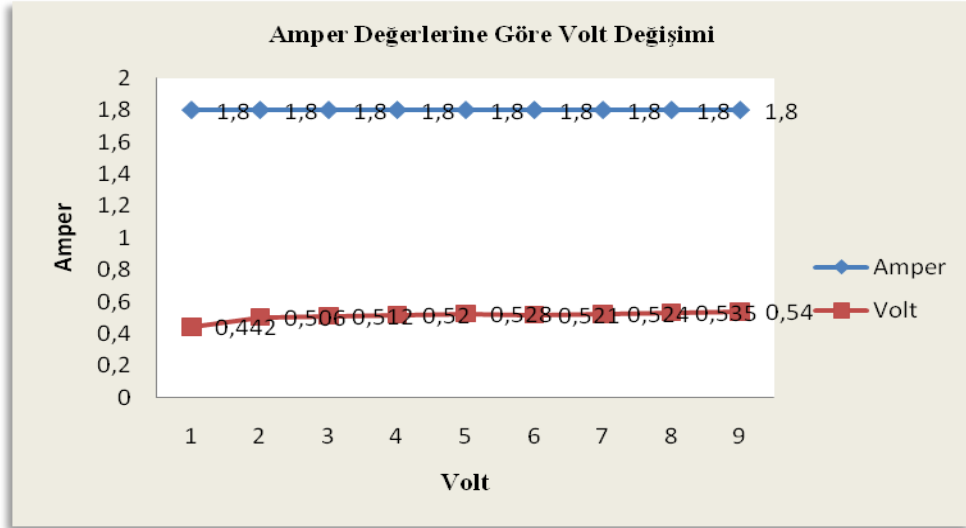
Aynı şekilde sistemdeki Volt(V) değerleri ve Watt(W) değerleri belirli aralıklar boyunca ölçülüp bu değerler izlenmiş olup bu değerlerin sistem üzerindeki etkilerine bakılmıştır. Volt ve Watt değerlerinin yapılan deney sonucundaki göstermiş oldukları performans analizleri Şekil 7.4'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Sistem içi volt - watt değerleri

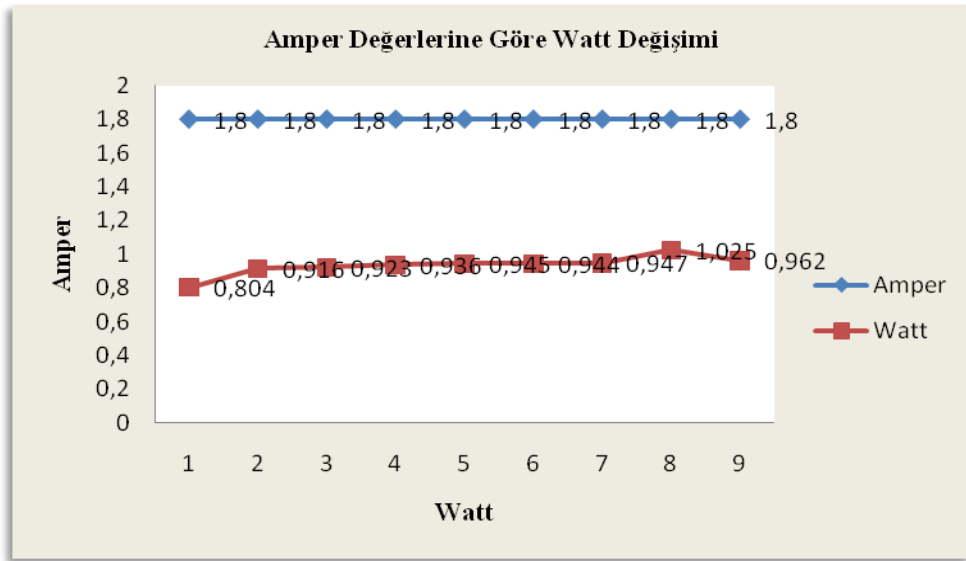
Volt - Watt grafiğine bakıldığında, volt değeri 0,804 iken watt değeri de 0,442 olarak ölçülmüştür. Volt değerleri 0,804 ile 0,916 aralığında bir miktar arttıktan sonra sabit kalmış olup, 0,947 ile 1,025 aralığında tekrar artmış ve daha sonra yine sabit durumda olduğu gözlemlenmiştir. Bu sırada watt değeri az bir artış gösterdikten sonra sabit kalmıştır.

Yapılan deney düzeneği çalıştırıldığı süre boyunca ölçülmüş olan akım değerleri ile sistem boyunca değerleri takip edilen volt değerleri ölçüldüğünde elde edilen değerler bilgisayara girilerek akım ve volt grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 7.5. Sistem içi amper - volt değerleri

Şekil 7.5'te görüldüğü gibi, sistem takibi süresince volt değerleri belirli bir oranda artarken akım değerlerinde bir değişiklik olmamıştır. En düşük volt değerinde de en yüksek volt değerinde de ölçülen akım değeri aynıdır.

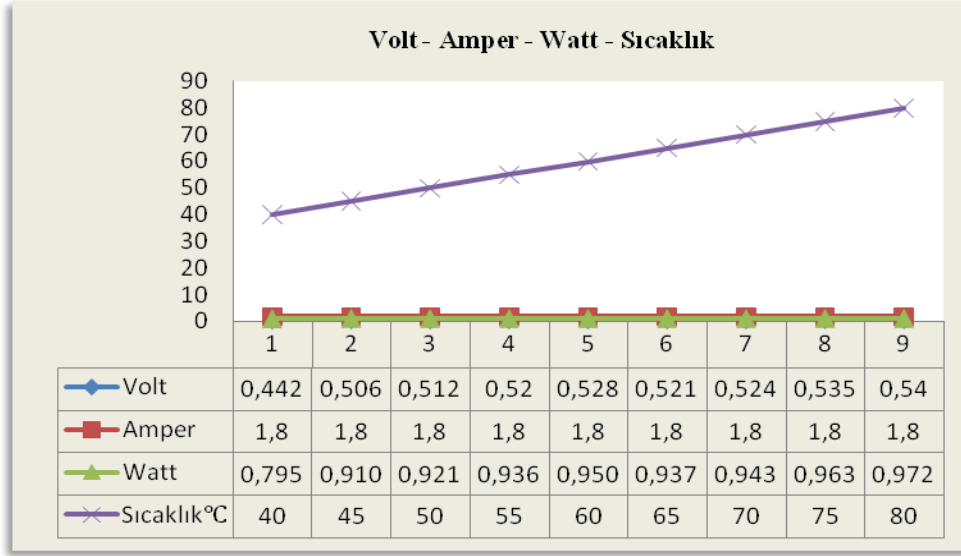


Şekil 7.6. Amper - Watt değerleri

Yine aynı şekilde Amper ve W değerleri alındı. Sistemde alınan Akım ve W değerleri bilgisayara girilerek grafik oluşturulduğunda Şekil 7.6'da ki dağılım meydana gelmiştir. Amper değerleri sabit bir şekilde devam ederken W değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir.

Kurulan deney düzeneğinde sistem çalışması üzerine etkisi olan Sıcaklık, Volt, Akım ve Güç değerleri datalogger ile yapılan ölçümler sonucunda alındı ve yakıt hücre

performansı incelendi. Gerekli olan tüm veriler alındıktan sonra bu verilerin sistemdeki performansları hesaplanarak Şekil 7.7 deki gibi verildi.



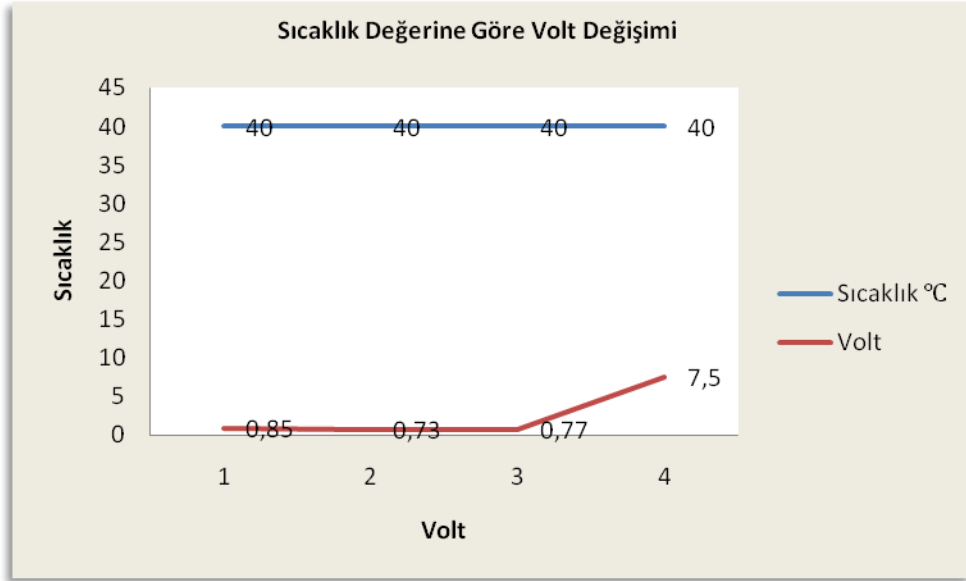
Şekil 7.7. Volt- Amper - Watt - sıcaklık değerleri

Sistemden aldığımız sıcaklık, volt, akım ve güç verileri değerlendirilerek ve gereken hesaplamalar yapılarak toplam grafiği Şekil 7.7'deki gibi oluşturuldu. Sıcaklığın artması durumunda volt, akım ve güç değerlerinde büyük bir farklılık olmadığı görüldü. Sıcaklığın artırılması durumunda sistemin performansının da yavaş yavaş arttığı tespit edilmiştir.

Sıcaklık değeri 40°C - 50°C - 60°C - 70°C'lerde sabit tutulup bu sabit değerlerdeki volt değişimlerine bakıldı. Sabit tutulan bu sıcaklıklarda sistemdeki ortalama volt değerleri alındı. Debi optimize edilerek sistemin performansının en iyi olduğu debi miktarları alındı.

- H₂ debi miktarının 0,7ml/dk alındığında,
- O₂ debi miktarının 1,1ml/dk alındığında,
- Hücre sıcaklığının 44°C olduğu ve Nem değeri 51°C de iken,

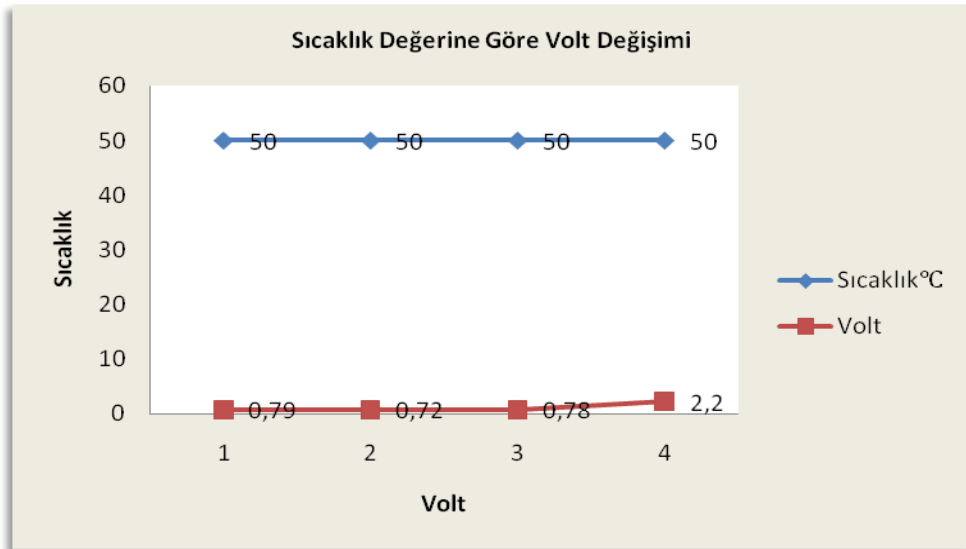
İlk önce sistem deki H₂ ve O₂ gazlarının sıcaklığı 40°C'de sabit olarak tutulduğunda sistemdeki volt değerleri alınarak Şekil 7.8'deki gibi değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.8. Sıcaklık - Volt değerleri

Sistemde sıcaklık 40°C de sabit tutulduğunda Volt değeri belirli bir süre sabit kaldıktan sonra artmıştır.

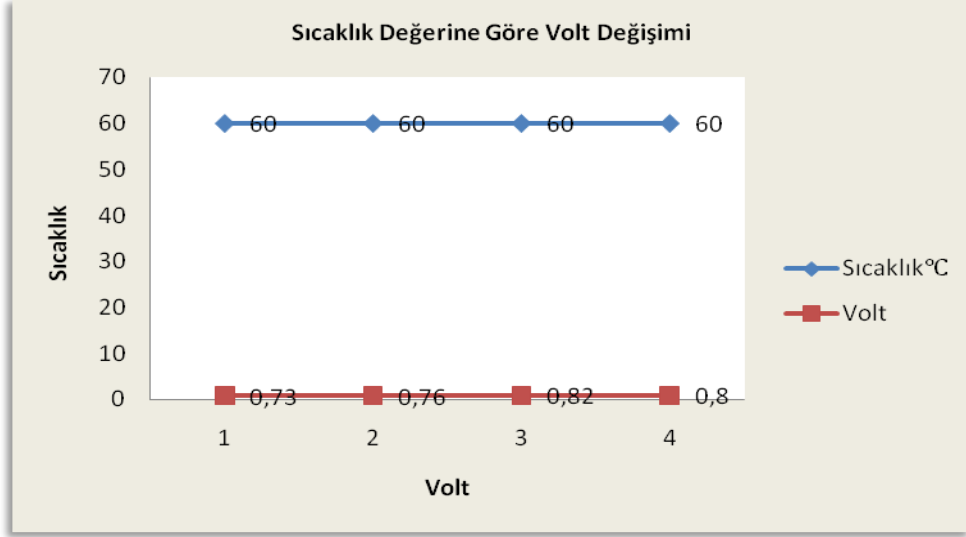
Daha sonra sıcaklık 50°C'ye çıkarıldı ve sıcaklık 50°C'de sabit tutularak, sistemdeki volt değerleri alındı ve alınan bu değerler bilgisayara girilerek aşağıdaki şekil 7.9 meydana gelmiştir.



Şekil 7.9. Sıcaklık - Volt değerleri

Şekil 7.9 da ki gibi sıcaklık 50°C'ye çıkarıldığında izlenen volt değerlerinde ilk başta artış gözlemlenmemiş olup daha sonra volt değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

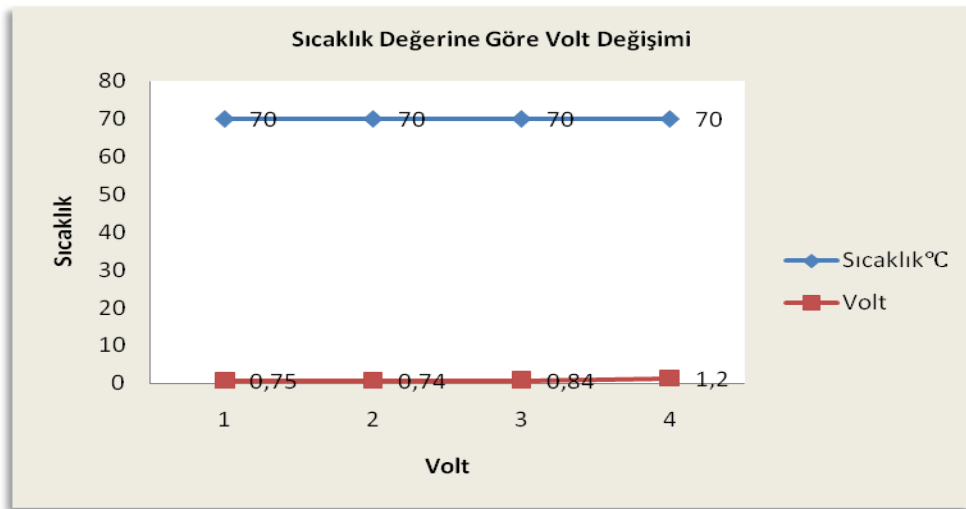
Tekrar sıcaklık biraz daha arttırıldı ve 60°C'ye getirilerek sabit tutuldu. H₂ ve O₂ gazlarının sıcaklığı 60°C'de iken sistemin performansının iyi olup olmadığına bakılarak bazı volt değerleri alındı. Yapılan hesaplamalar sonucunda Şekil 7.10 oluşturuldu.



Şekil 7.10. Sıcaklık - Volt değerleri

Gaz sıcaklıkları 60°C'ye çıkarılıp sisteme verildiğinde sistemdeki volt değerlerinde de fazla bir artış olmamıştır. 60°C'de iken elde edilmiş olan volt değerleri 0,73V, 0,76V, 0,82V, 0,8V'dur. En düşük 0,73V ve en yüksek 0,8 V değeri bulunmuştur.

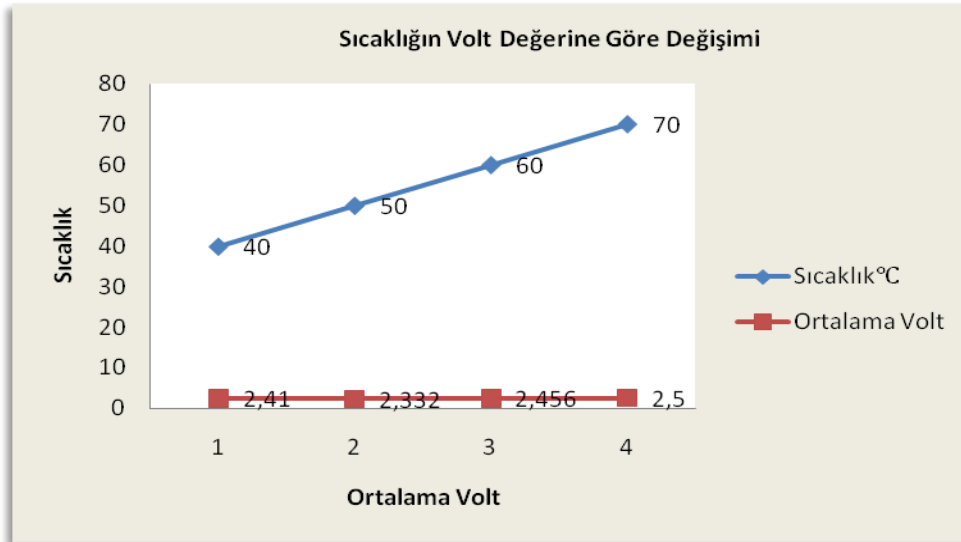
Gaz sıcaklıkları 70°C'ye çıkarıldı ve sistem performansı takip edildi. Sıcaklık değeri bu kez 70°C'de sabit tutularak sistemdeki volt değerleri izlendi ve aşağıdaki Şekil 7.11 meydana geldi.



Şekil 7.11. Sıcaklık - Volt değerleri

Son olarak H₂ ve O₂ gazlarının sıcaklığı 70°C'ye çıkartılıp sistem performansına bakıldığında elde edilen volt değerleri de hemen hemen sabit kalmıştır.

Daha sonra 40°C - 50°C - 60°C - 70°C sıcaklıklarında ortalama Volt(V_{ort}) değerleri hesaplandı ve bu değerler bilgisayara girilerek Şekil 7.12 oluşturuldu.



Şekil 7.12. Sıcaklık- Ortalama Volt

Sistem takibi boyunca H₂ ve O₂ gazlarının sıcaklık değerleri artırılması sonucu elde edilen ortalama volt değerleri alınarak Şekil 7.12 oluşturuldu. Sıcaklık 40°C iken sistemdeki ortalama volt değeri 2,410V, sıcaklık 50°C'ye artırıldığında ortalama volt 2,332V olarak bulunmuş olup, 60°C sıcaklıktayken ortalama volt değeri 2,456V ve 70°C 'deki ortalama volt değeri de 2,50V olarak bulundu. Sıcaklığın en düşük 40°C ile en yüksek 70°C arasında artırılmasıyla ortalama Volt (V_{ort}) değerleri yaklaşık olarak 2,41V ile 2,5V arasında sabit kalmıştır.

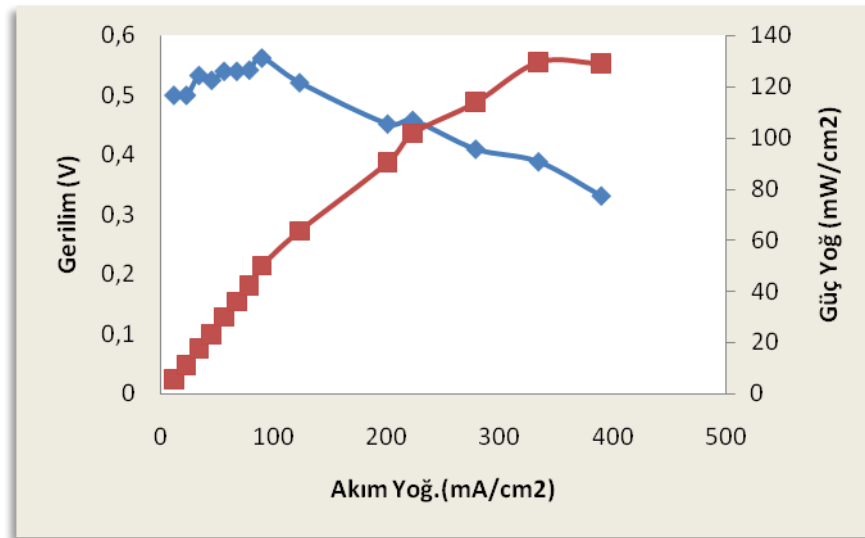
26 Aralık 2018 tarihinde yapılan deney sonucunda;

- H₂ gaz debisi 0,3 ml/dk
- O₂ gaz debisi 0,58 ml/dk iken Gerilim(V), Akım(Amp), Güç(W), Akım yoğunluğu(mA/cm²) ve Güç yoğunluğu (W/cm²) verileri alındı ve Tablo 7 oluşturuldu.

Tablo7. Sistem içi akım - güç - gerilim değerleri

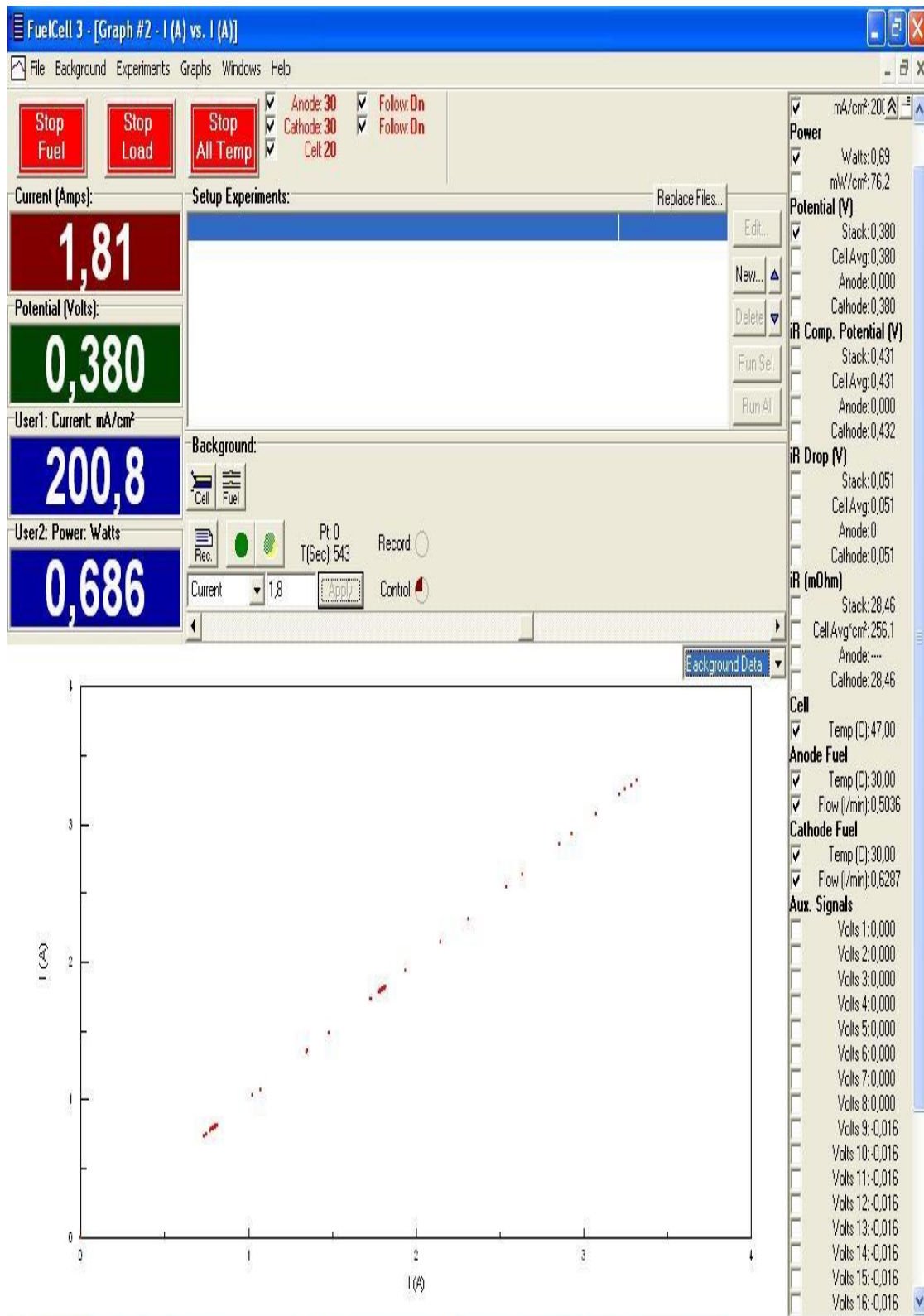
Gerilim (V)	Akım (Amp)	Güç (W)	mA/cm2	Gerilim (V)	W/cm2
0,5	0,1	0,05	11,11111	0,5	5,555556
0,5	0,2	0,1	22,22222	0,5	11,11111
0,533	0,3	0,1599	33,33333	0,533	17,76667
0,525	0,4	0,21	44,44444	0,525	23,33333
0,54	0,5	0,27	55,55556	0,54	30
0,54	0,6	0,324	66,66667	0,54	36
0,542	0,7	0,3794	77,77778	0,542	42,15556
0,562	0,8	0,4496	88,88889	0,562	49,95556
0,521	1,1	0,5731	122,2222	0,521	63,67778
0,452	1,8	0,8136	200	0,452	90,4
0,458	2	0,916	222,2222	0,458	101,7778
0,41	2,5	1,025	277,7778	0,41	113,8889
0,389	3	1,167	333,3333	0,389	129,6667
0,332	3,5	1,162	388,8889	0,332	129,1111

Belirli bir süre sistem çalışması boyunca gerilim, akım, güç, akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu değerleri tabloda çeşitli hesaplamalar yardımıyla oluşturuldu. Sistem performansını ve sistem verimini izleyebilmek adına alınan bu veriler bilgisayara girilerek parametre grafiği (Şekil 7.13) oluşturuldu.

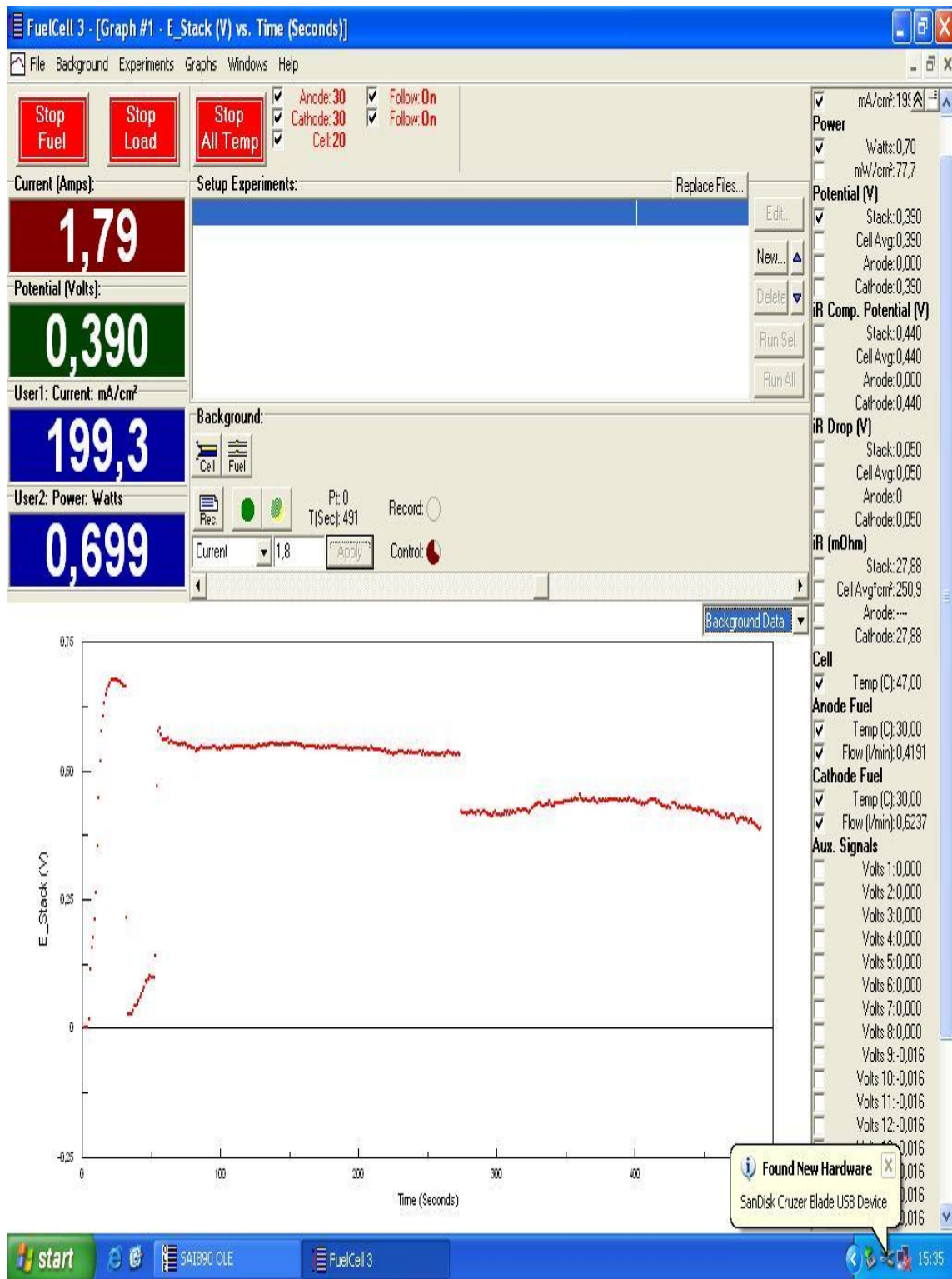
**Şekil 7.13.** Gerilim- Akım yoğunluğu değerleri

Deney süresince sistemde yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi gerilim değeri ilk başlarda oldukça sık değışkenlik gösterdiği görülmüş ve daha sonra belirli oranlarda azaldığı görülmüştür.

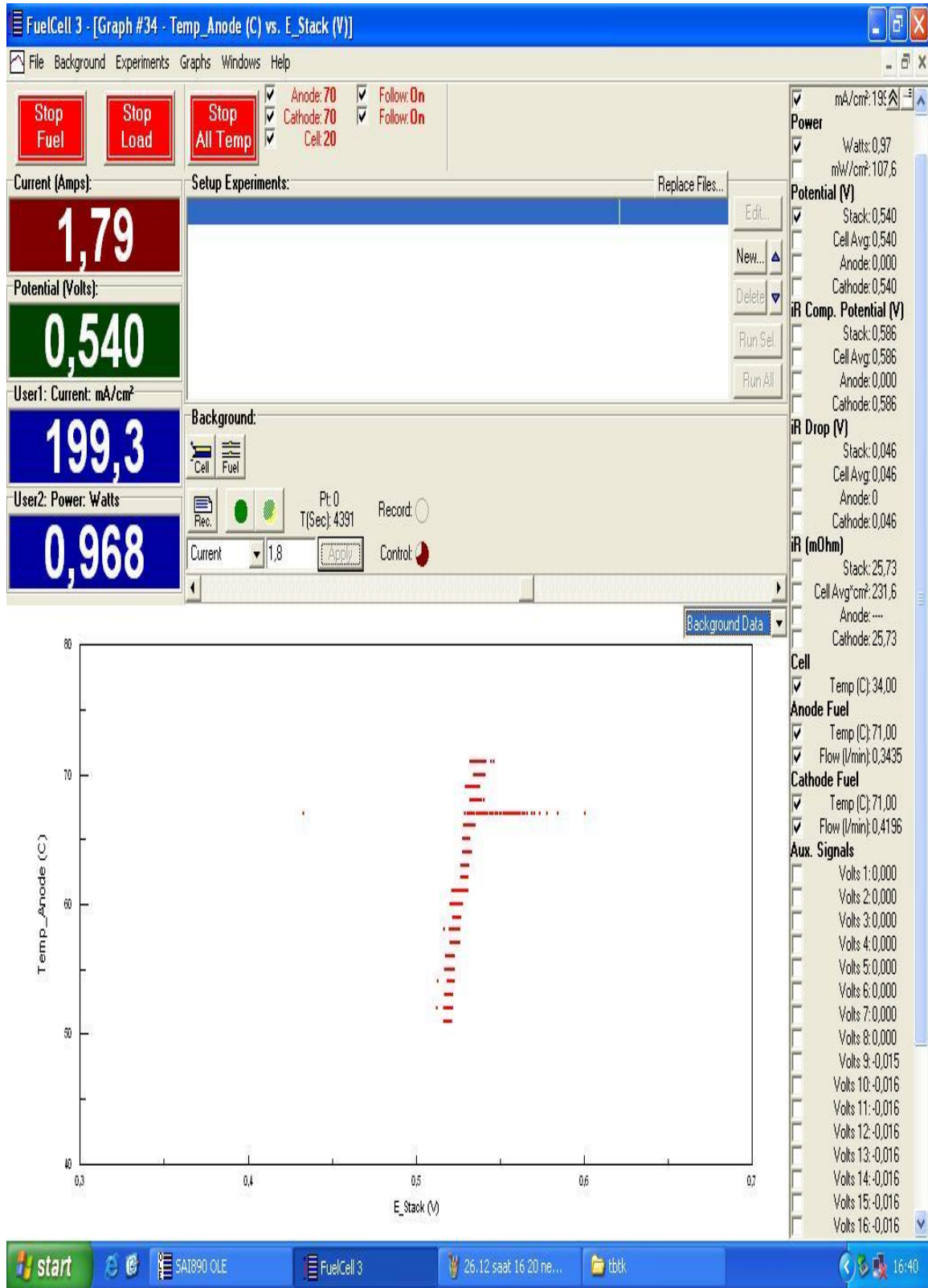
Tasarlanan deney düzeneğinde alınan veriler başka bir programda deneme yapılarak karşılaştırıldı. Sonuçlar paralel çıktığı gözlemlendi. Bu programın görseli ise Şekil 7.14'deki gibidir. Yakıt hücresinin kendi programı kullanılarak H₂ ve O₂ gazlarının hangi sıcaklık değerlerindeyken sistem performansındaki etkileri incelenmiştir. 26.12.2018 tarihinde saat 15:36 da yapılan deneyde alınan değerler yakıt hücre programı ile gösterilmiştir.



Şekil 7.14. Sistem sıcaklık akım değerleri



Şekil 7.15. Sistem volt değerleri



Şekil 7.16. Sıcaklık değerleri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Deney düzeneğinde; sıcaklık oranı, hidrojen debisi, oksijen debisi, nem oranı, gibi parametrelerin PEM yakıt hücresi ve bu hücreye gönderilen yakıtlar üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Sisteme gönderilen yakıtların sıcaklıkları belirli oranda arttırıldı ve kurulan sistemin performansını ne şekilde etkilediği incelendi. H₂ gazının debisi 0,3 ml/dk alındığında ve O₂ gaz debisi de 0,5ml/dk olarak alındığı durumda, sistemdeki hat sıcaklık değeri 75°C 'de iken akım değeri 1,8A ve volt değeri 0,535V alındığında sistemdeki güç değeri 1,025W olarak elde edilmiştir. Böylelikle hat sıcaklığı 75°C' de iken en yüksek güç değerinin elde edildiği görülmüştür.

Sistemdeki hat sıcaklığı 40°C de iken, 1,81A akım değerinde ve volt değeri 0,442V olarak alındığında sistemde elde edilen güç değerinin 0,804W olduğu tespit edildi. Sıcaklık 40°C iken ise sistemin en düşük güç değeri olduğu ve sistem performansının en düşük değerde olduğu görüldü. Sistemin hat sıcaklığı 45°C' ye çıkarıldığında akım değeri 1,8A ve gerilim değeri 0,506V olarak bulunduğundan güç değeri de 0,916W olarak elde edildi. Hat sıcaklığı 50°C'ye çıkarıldığında sistemde 1,8A, 0,512V ve güç değeri de 0,923W olarak bulundu. Sistemdeki mevcut hat sıcaklık değeri 55°C'ye çıkarıldığında akım değeri 1,8A, gerilim değeri 0,520V, güç değeri ise 0,936W olarak tespit edildi. Sıcaklık değeri 60°C'ye yükseltildiğinde sistemden alınan verilere göre akım değeri 1,8A iken, volt değeri 0,528V olarak ölçüldüğünde güç değeri de 0,945W olarak ölçüldü. 65°C'de iken, akım 1,8A, gerilim 0,521V olarak tespit edildiğinde güç değeri 0,944W olarak bulundu. Hat sıcaklık değeri 70°C' de, akım 1,8A ve gerilim 0,524V iken sistemde elde edilen güç miktarı 0,947W olarak ölçüldü. Sıcaklık değeri biraz daha arttırılarak 80°C' ye getirilmesi durumunda akım değeri 1,8A iken, gerilim değeri 0,540V olduğu ve güç değerinin 0,962W'a düştüğü tespit edildi.

Sıcaklık değeri arttıkça sistem performansının da arttığı görüldü. 40°C ile 75°C arasındaki sıcaklıklarda sistem performansında az da olsa bir artış olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak sıcaklık değeri 80°C ve üzeri değerlerine çıkarıldığında sistemdeki gücün azaldığı, performansında düştüğü görülmüştür. Bunun sonucunda PEM yakıt hücresine gönderilen yakıtların belirli oranlarda alınan sıcaklık değerlerinde hücre performans sonuçları elde edildi. Yapılan deneysel çalışma neticesinde sıcaklık parametresinin Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücresinin göstermiş olduğu performans üzerinde etkisinin önemli olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla

sistemin performansının da arttığı görülmüştür. Ancak belirli bir sıcaklık değerine ulaşıldığında sistem performansındaki artışın yavaş yavaş düşme gösterdiği görülmüştür.

8.2. Öneriler

- 1). Yaptığımız deneyler sırasında yakıt olarak kullandığımız Hidrojen (H_2) ve Oksijen (O_2) gazlarının gramlarını tam olarak alamadık. Hidrojen ve oksijen gazlarının miktarları tam olarak alınabilseydi sistem daha iyi bir performans gösterebilirdi.
- 2). Yapılan deney süresince 8 hücreli ve 35 W değerine sahip bir yakıt hücresi kullanıldığında hücrelerin çalışıp çalışmadığı durumlar oldu. Deney düzeneğinde 8 hücreli değil de 20 hücreli olan ve daha yüksek bir watt değerine sahip olan bir yakıt hücresi tercih edilseydi daha iyi bir sistem performansı ve verimi elde edilebilirdi.
- 3). Deney düzeneğimizde kullandığımız alet ve ekipmanlar hassas olmadıklarından dolayı sistem performansı istenilen seviyelerde olamadı. Daha hassas aletler kullanılmış olsaydı sistem belki daha iyi bir performansta çalışabilirdi.
- 4). Gelecekte yapılabilecek olan çalışmalar kapsamında örnek bir uygulama olarak ele aldığımız sistemimizin optimum koşullarda çalışabilirse, gelecekte birçok çalışmaya alt yapı oluşturabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

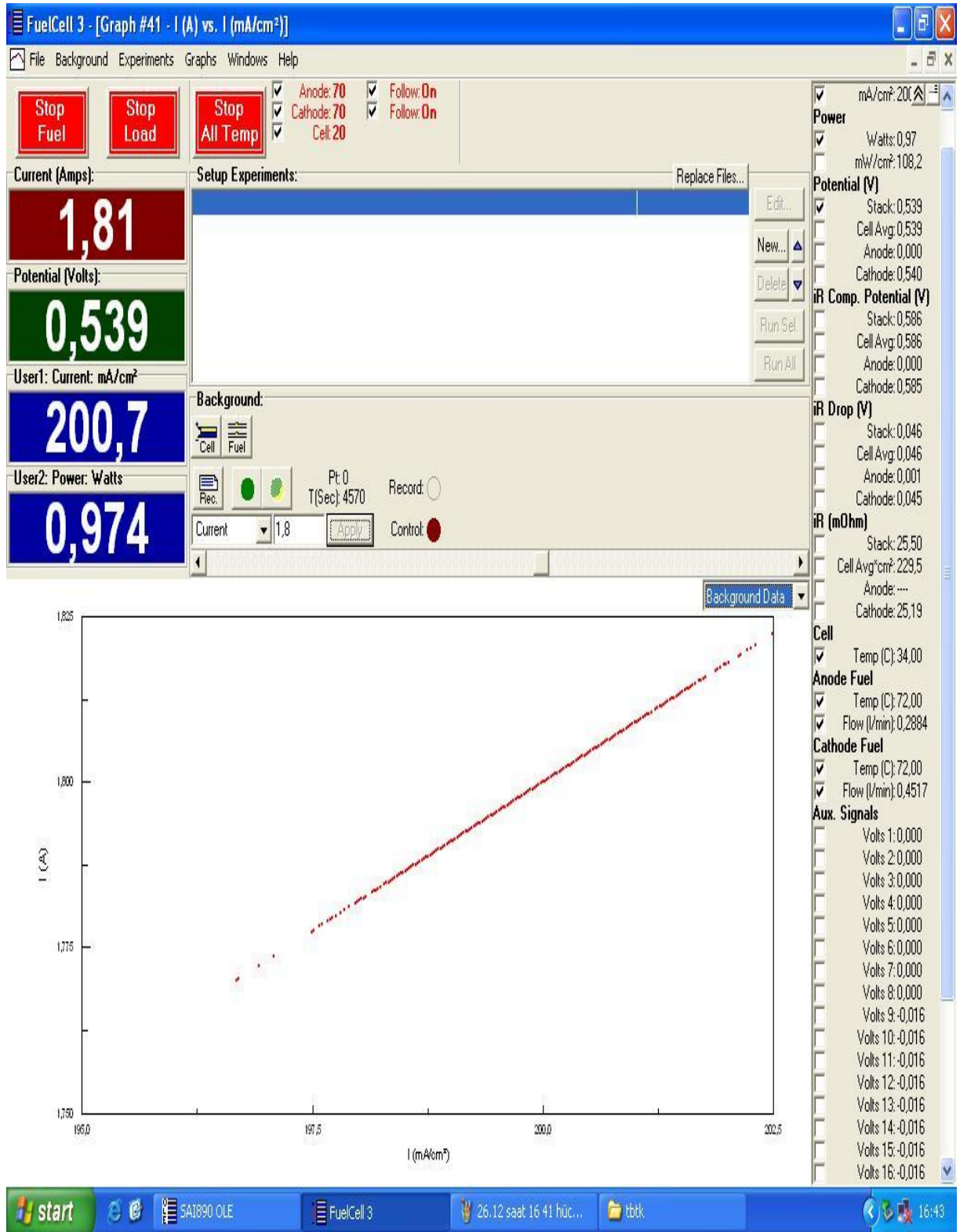
- Akbulut, B., 2007, Yakıt pilli hibrit santraller, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Akfıdan, T., 2010, Bir hibrit (yakıt pilli & güneş pilli) enerjili aracın modellenmesi, simülasyonu ve prototip uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Almak, O., OUR A., Karakaya, Ç., Ertürk, M., Güneş İ., 2008, Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankı imalatının incelenmesi 5 VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008 17-19 Aralık, İstanbul.
- Altaneh, N., 2012, Güneş pili ve hidrojen yakıt pilinden beslenen küçük bir elektrikli araç için batarya şarj sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ankaralı, A., 2004, Hidrojen enerjisi ve hidrojen pilleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Appleby, A., Foulkes, F., 1989, Fuel Cell Handbook, Van Nostrand Reinhold Newyork, 762 s.
- Aydın, M., 2007, Pem Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 94s.
- Barbir, F., 2005, Barbir F., 2005, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier Academic Press, USA, ISBN-13:978-0-12-078142-3.
- Beşergil, Prof. Dr. B., 2009, Yakıtlar Yağlar, Elektronik Makale.
- Bıykoğlu, A., 2003, "Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri Bugünkü Durumu", G.U Journal of Science , 16(3):523-542.
- Bilen, G., 2015, Keskin elektroliz yöntemi ile 20 m³/h kapasiteli hidrojen üreticinin tasarımı ve gözenekli elektrot malzemelerinin parametrelere etkisinin araştırılması, Makale.
- Biliroğlu, Ali Ö., 2009, Seri hibrit elektrikli araçların modellenmesi ve kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Choi, M., 2017, Performance increase for an open-cathode PEM fuel cell with humidity and temperature control, International Journal of Hydrogen Energy, s 29629-30036, Korea.
- Çelik, C., 2006, Doğrudan sodyum borhidrüllü yakıt pilinde proses parametrelerinin verim üzerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- Doğu, İ., 2014, Güneş enerjisi destekli PEM elektrolizlerinde hidrojen üretiminin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Efendioğlu, D., 2013, PEM yakıt hücresi performansının deney tasarımı kullanılarak optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eker, E., 2012, PEM tipi yakıt hücrelerinde ısı ve su yönetiminin modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gümüőođlu, T., 2012, PEM Yakıt hücresi performansını etkileyen parametrelerin optimizasyonu, İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Güneş, S., 2008, PEM yakıt hücresi katodunda kullanılmak üzere platin bazlı üçlü katalizörlerin sentezi, karakterizasyonu ve elektrokatalitik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ispirli, M., An Investigation on The Parameters That Affect The Performance of Hydrogen Fuel Cell, University of İstanbul, 2015.
- İ.Türe, E., 2006, Fotoelektroliz yoluyla hidrojen üretimi, Türkiye 10. enerji kongresi, 417-421.
- İçingür, Y., 2011, Bir polimer elektrolit membran yakıt pilinde kullanılmak üzere gaz akış plakaları tasarımı ve denenmesi, Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, Cilt:14, s 31-34.
- Kahraman, H., 2014, Sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansına etkisi, Makale, Sakarya Üniversitesi, Turkey, 1008-1016.
- Kaplan, R., 2008, İmal edilen ve ticari PEM tipi yakıt hücrelerinin performanslarının kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 55 s.
- Keskin, F., 2014, Yakıt pilli-bataryalı hibrid bir elektrikli araçta enerji yönetiminin sağlanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kireç, L., 2009, Taşıtlar için alternatif enerji sistemi olan polimer elektrolit membran yakıt pili yapımı ve parametrik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Obut, S., 2010, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile proton değişim membranlı yakıt hücresinin modellenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Öğüt, E., 2005, Sülfolanmış Polistiren Membran Sentezi Ve Karakterizasyonu Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 112 s.

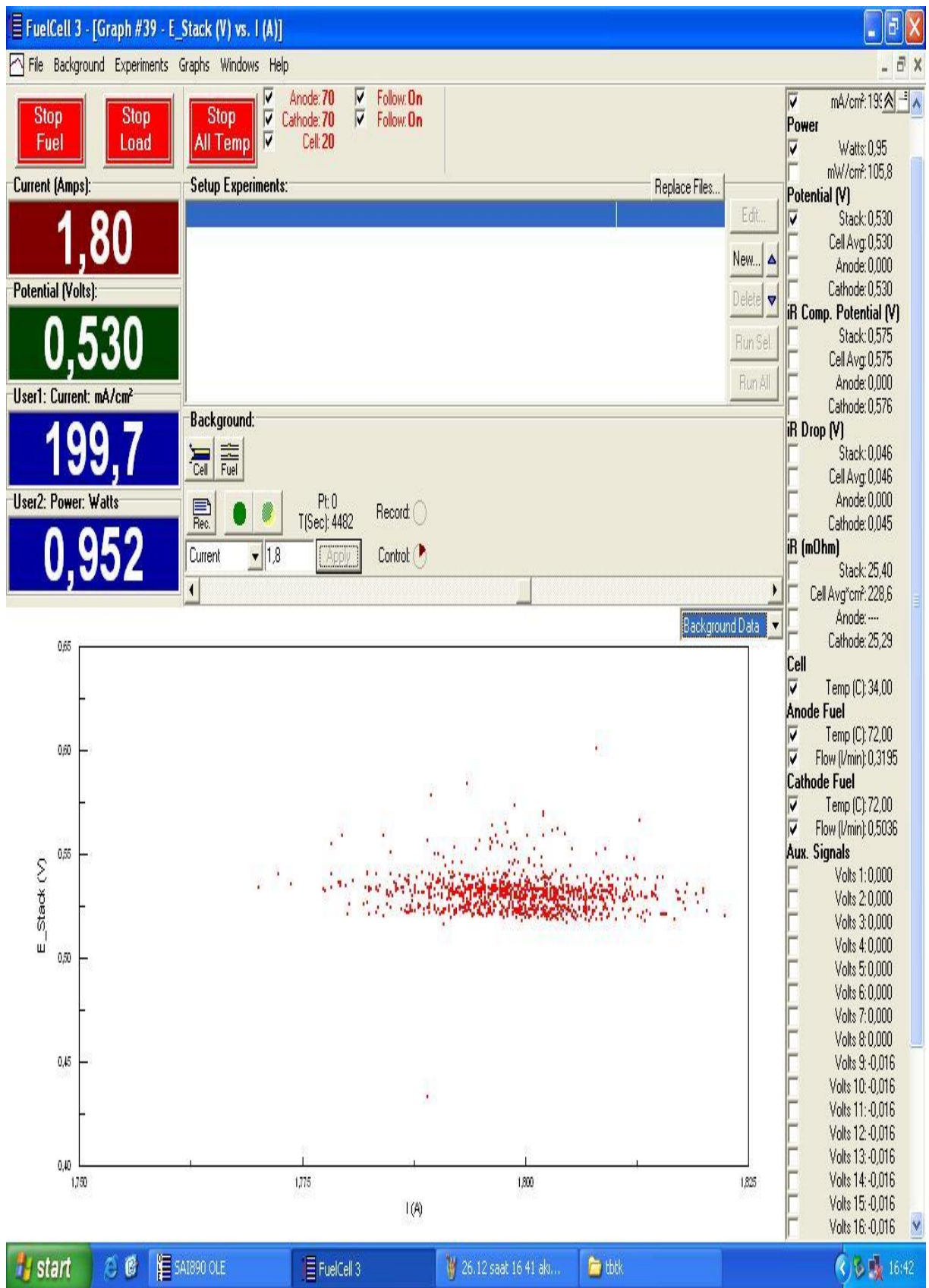
- Sarıdemir, S., 2003, Gelecekte Taşıtlarda Yaygın Olarak Kullanılması Düşünülen PEM Yakıt Pilleri İçin Membran Geliştirilmesi Ve Denenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 116 s.
- Sarıtaş, F., 2004, Hidrojenin Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Gelecekteki Önemi, Uygulama Alanları ve Yakıt Hücrelerindeki Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Strahl, S., 2017, Temperature control of open-cathode PEM fuel cells, IFAC Conference Paper Archive, Barcelona, s 11088-11093 Spain.
- Şenaktaş, B., 2005, Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Toprak, K., 2006, “Rüzgâr Enerji Santralleri Yardımıyla Hidrojen Eldesinin Ekonomik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ulusoy, I., 2012, Yakıt hücresi sisteminde elektrokimyasal ve mikrobiyolojik yaklaşım ile elektron transfer mekanizmasının incelenmesi, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- Ural, T., Karaca, G., 2016, Hidrojen Ekonomisi, Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 48000, Makale, Muğla.
- URL 1: 21. Yüzyılın enerjisi hidrojen, 2003, <http://www.arşiv.emo.org.tr> [Erişim tarihi: 12.03.2019].
- URL 2: Hidrojen Enerjisi Alternatif Olabilir mi, 2003, <http://www.aksam.com.tr> [Erişim tarihi: 12.03.2019].
- URL 3: H₂cars., 2001, <http://www.H2cars.de> [Erişim tarihi: 12.03.2019].
- URL 4: Hydrogen & Fuel Cell Letter., 2003, <http://www.hfcell.com> [Erişim tarihi: 12.03.2019].
- URL 5: 2019, <http://www.h2gopower.com> [Erişim tarihi: 12.03.2019].
- URL 6 : American History, 2010, <http://americanhistory.si.edu/> [Erişim tarihi: 12.03.2018].
- Üçler, K., 2008, PEM yakıt pili için buhar reformasyonu ile hidrojen üreten sistemin modellenmesi ve enerji geri kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.
- Ültanır, Ü.T., 1998, 21. Yüzyıla girerken Türkiye'nin enerji stratejisinin değerlendirilmesi, <http://www.tusiad.org.tr>.

- Yıldızbilir, F., 2006, "Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi Üretimi", Yüksek Lisans Tezi , Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Yılmaz A., Edge Ay, İ., Koçer, A., 2016, PEM Yakıt Pilleri, International Engineering, Science and Education Conference, Diyarbakır.
- Yılmaz Ulu, E., 2010, Güneş-Hidrojen hibrit enerji sisteminin deneysel ve teorik enerji, ekserji ve elektromanyetik analizi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Yılmaz, A., Şevik, S., 2017, Sodyum Borhidrür (NaBH₄) Destekli Bir Hidrojen/Hava PEM Yakıt Hücresi İle Elektrik Üretiminin Deneysel Analizi, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, sayı 7 cilt (2/2), s 216-227, Batman.
- Yılmaz, A., Şevik, S., Demir, M., 2017, PEM Yakıt Hücrelerinin Taşıtlarda Kullanılabilirliği, 8th Internatioanl Advanced Tecnologies Syposium, s 2647-2655, Elazığ.
- Zendehtel Shekardasht, S., 2016, Güneş enerjisi(PV) destekli hidrojen üretimi ve hidrojen yakıt pilinde kullanılması üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

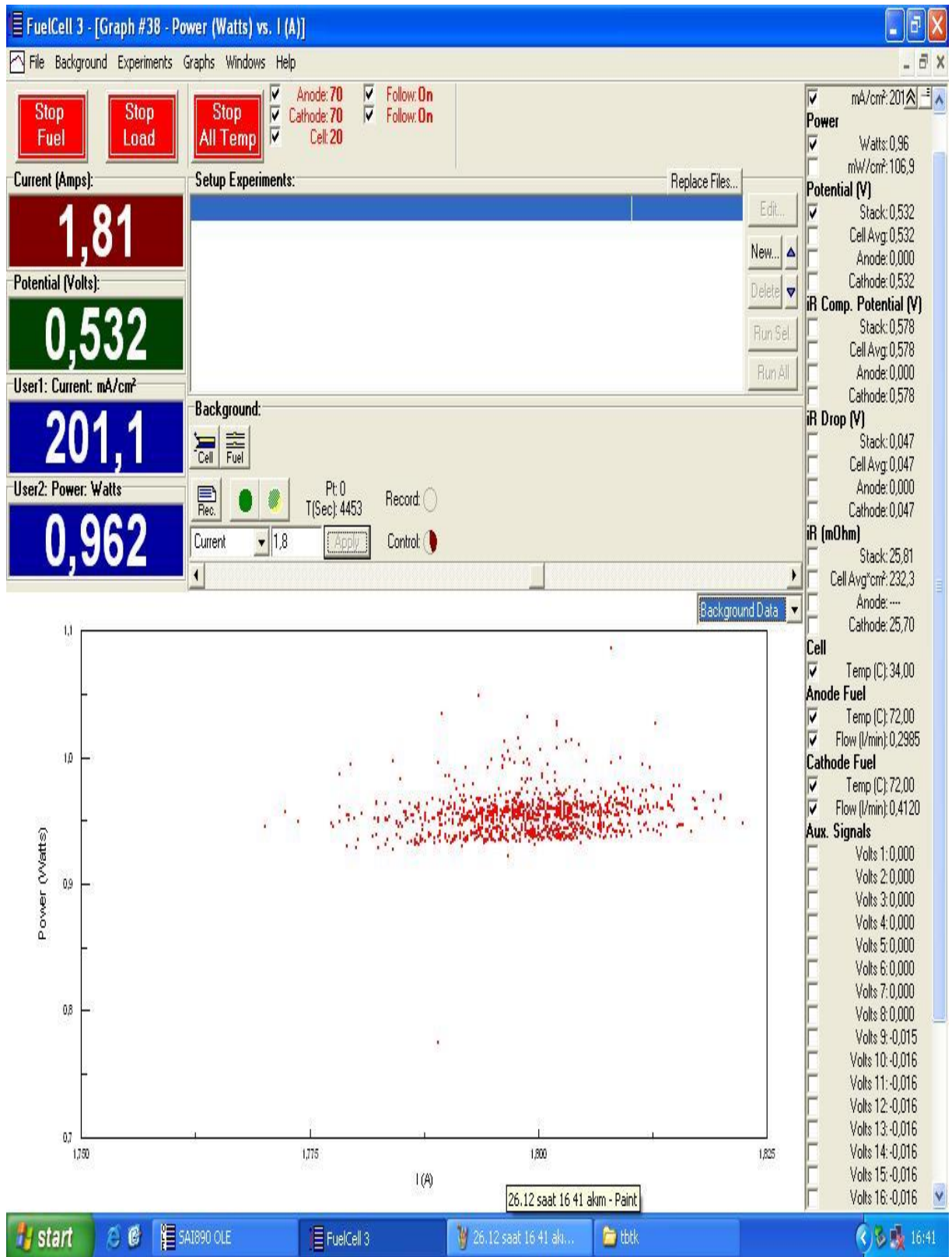
EKLER



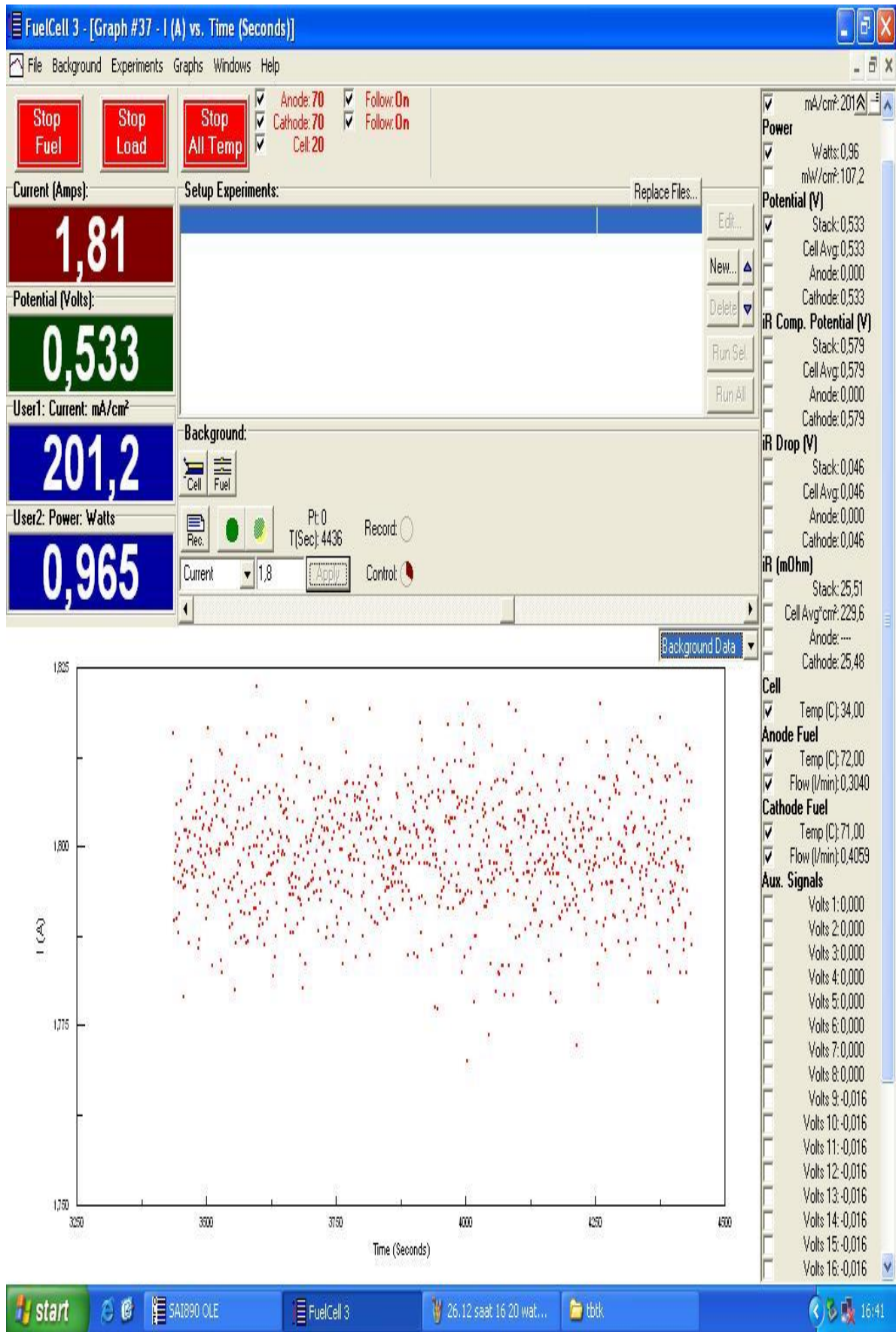
Şekil. Sistem içi akım-akım değerleri



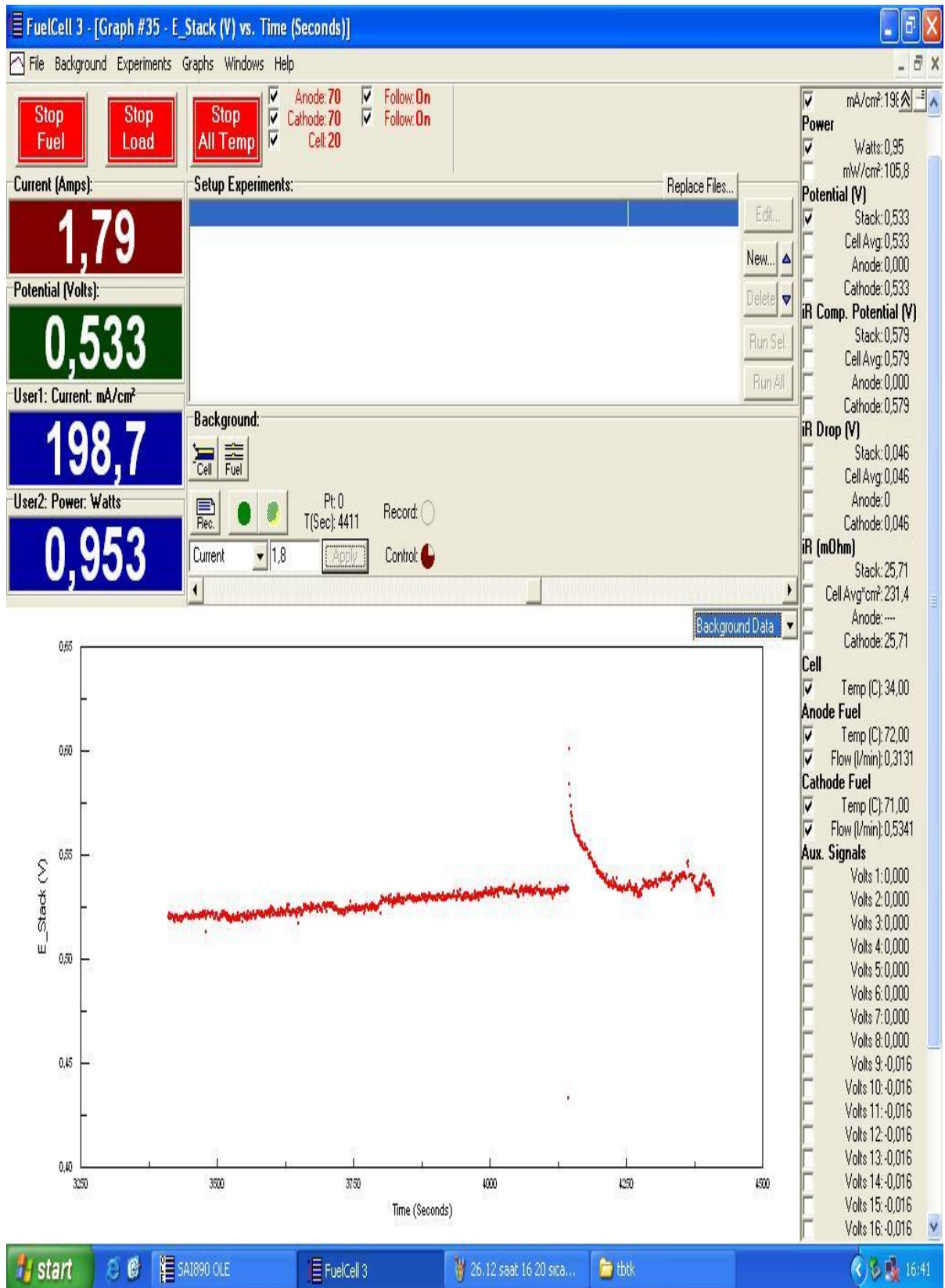
Şekil. Sistem içi akım - volt değerleri



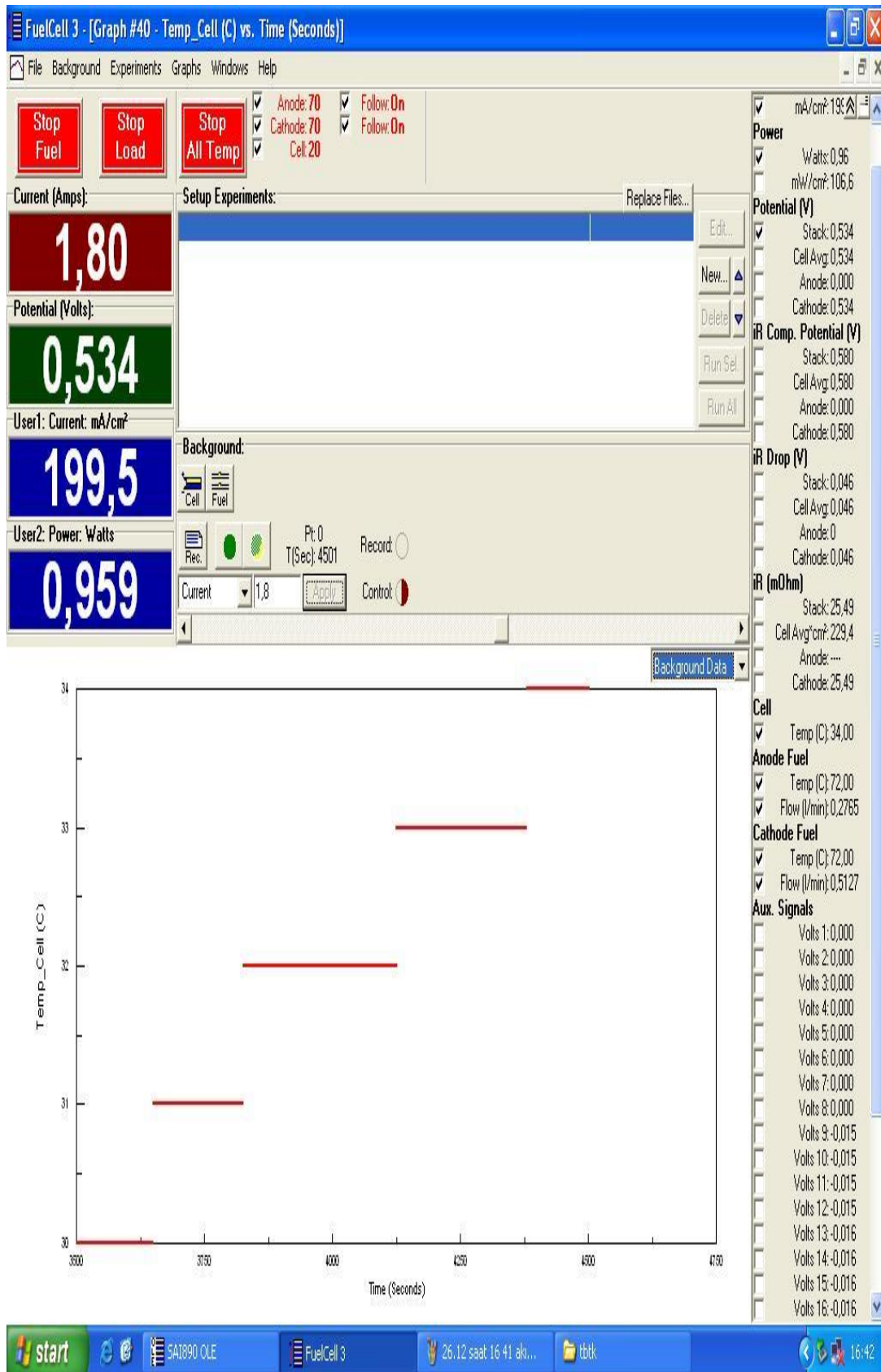
Şekil. Sistem içi akım watt değerleri



Şekil. Sistem içi akım değerleri



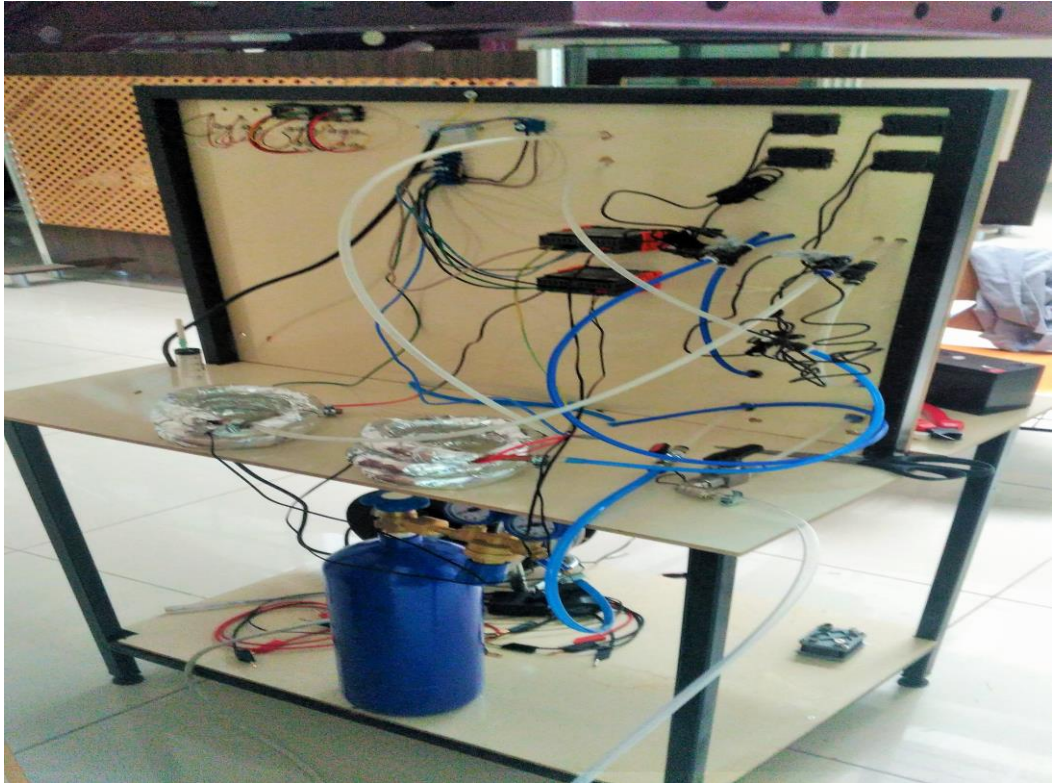
Şekil. Yakıt hücre volt değerleri



Şekil. Yakıt hücre sıcaklık durumu



Şekil. Deney setinin önden görünümü



Şekil. Deney setinin arkadan görünümü

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve DEMİR
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : BATMAN-1994
Telefon : 05074326393
e-mail : merve.dmir003gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Batman Fatih Lisesi	2012
Üniversite	: Şırnak Üniversitesi, Merkez, Şırnak	2016
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi, Merkez. Batman
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
-----	-------	--------

YABANCI DİLLER

İNGİLİZCE

YAYINLAR

Yılmaz A., Ünvar S., Şevik S., Demir M.,(2017) Usability in of PEM Fuel Cells, 8TH INTERNATIONAL ADVANCED TECHNOLOGİES SYMPOSIUM, Elazığ / Turkey.