



**YENİ BİR FOTOVOLTAİK-YAKIT HÜCRESİ-BATARYA HİBRİT
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Orhan YILMAZ

**DOKTORA TEZİ
KİMYA ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Orhan YILMAZ

28/11/2025

YENİ BİR FOTOVOLTAİK-YAKIT HÜCRESİ-BATARYA HİBRİT SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Orhan YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2025

ÖZET

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli, sürekli ve sürdürülebilir kullanımını sağlamak amacıyla, fotovoltaik panel, elektrolizör, yakıt hücresi ve batarya bileşenlerinden oluşan yeni bir hibrit enerji sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Sistem, güneş enerjisinin doğrudan elektrik üretiminde kullanılması, bu enerjinin elektroliz yoluyla hidrojen üretimine dönüştürülmesi ve üretilen hidrojenin yakıt hücresinde tekrar elektrik enerjisine çevrilmesi üzerine kuruludur. Çalışmada, potansiyel, akım, elektrolit tipi ve derişimi gibi temel parametrelerin H_2 üretim hızı üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Sistemin yönetimi için özel bir elektronik kontrol ünitesi tasarlanmıştır. Farklı derişimlerde ve değişen potansiyel-akım koşullarında yapılan deneyler, elektrolit derişiminin ve uygulanan potansiyelin hidrojen üretimini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Özellikle KOH ortamında derişim arttıkça üretim veriminin belirgin şekilde yükseldiği, NaOH elektrolitinde ise orta derişim seviyelerinde daha kararlı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Optimum performans 1,5 M KOH ve 60 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Hidrojen ve oksijen tüketimi zamana bağlı olarak incelenmiş ve hücre potansiyeli 0,86–2,44 V aralığında belirlenmiştir. 0,2 ml/dak. hidrojen ve 0,1 ml/dak. oksijen akış hızında, maksimum 2,44 V potansiyel ve 68,8 mW güç ile optimum çalışma koşulları sağlanmıştır. Fotovoltaik panel ve yakıt hücresi teknolojileri nispeten düşük dönüşüm verimliliğine sahip olmasına rağmen, sistemin sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji üretim döngüsü sunduğunu göstermektedir. Önerilen hibrit sistem, enerji sürekliliği, düşük karbon emisyonu, yüksek saflıkta hidrojen üretimi ve modüler yapısı ile özellikle şebekeden bağımsız uygulamalar ve mikro şebekeler için güçlü bir alternatif sunmaktadır.

Bilim Kodu : 20105

Anahtar Kelimeler : Fotovoltaik, elektrolizör, yakıt hücresi, batarya, hibrit sistem, hidrojen enerjisi

Sayfa Adedi : 124

Danışman : Doç. Dr. Aylin AYTAÇ

DEVELOPMENT OF A NEW PHOTOVOLTAIC-FUEL CELL-BATTERY HYBRID SYSTEM

(Ph. D. Thesis)

Orhan YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2025

ABSTRACT

This study, a novel hybrid energy system comprising a photovoltaic panel, electrolyzer, fuel cell, and a battery was designed and analyzed to ensure the efficient, continuous, and sustainable utilization of renewable energy sources. The system is based on the direct conversion of solar energy into electricity, its subsequent use for hydrogen production through water electrolysis, and the reconversion of the produced hydrogen into electrical energy via a fuel cell. The effects of key operational parameters -including applied potential, current, electrolyte type, and electrolyte concentration- on the hydrogen production rate (H_2) were examined in detail. A dedicated electronic control unit was developed to manage and stabilize the overall system operation. Experimental results conducted under various concentrations and potential-current conditions revealed that both electrolyte concentration and applied potential directly influence hydrogen production. It was observed that increasing concentration in KOH electrolyte significantly improved production efficiency, whereas NaOH provided more stable performance at moderate concentration levels. Optimum operating conditions were contained at 1.5 M KOH and 60 °C. Time-dependent analyses of hydrogen and oxygen consumption showed that the cell potential varied between 0.86 and 2.44V. At flow rates of 0.2 ml/min hydrogen and 0.1 ml/min oxygen, a maximum potential of 2.44 V and power output of 68.8 mW were achieved, representing the system's optimal performance. Although photovoltaic and fuel cell technologies inherently exhibit relatively low energy conversion efficiencies, the results demonstrate that the proposed system provides a sustainable and environmentally friendly energy production cycle. Owing to its energy continuity, low carbon emissions, high-purity hydrogen production, and modular architecture, the hybrid system offers a strong alternative particularly for off-grid applications and microgrid-based renewable energy solutions.

Science Code : 20105

Key Words : Photovoltaic, electrolyzer, fuel cell, battery, hybrid system, hydrogen energy

Page Number : 124

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aylin AYTAÇ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin ve doktora tezimin hazırlanmasında kendisi ile çalışmaktan büyük onur duyduğum çok kıymetli hocam Doç. Dr. Aylin AYTAÇ'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sürecinde sundukları görüş ve fikirlerle tezimin gelişmesini sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyeleri saygıdeğer hocalarım Müşerref ÖNAL ve Prof. Dr. Muzaffer BALBAŞI ile Tez Savunma Komitesi Üyeleri Prof. Dr. Meltem Çelik ve Prof. Dr. Mehlika PULAT'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sürecinde yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Mustafa YILDIRIM, Mehmet GÜRBÜZ, Hasan MERT ve Dr. Murat YÜCEL'e teşekkürlerimi sunarım. Doğduğum andan itibaren beni yalnız bırakmayan, her zaman arkamda olduklarını ve desteklerini hissettiğim anneme, babama, kardeşlerime; çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen eşim Ebru YILMAZ ve oğlum Ömer Arın YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	11
2.1. Fotovoltaik Sistemler	11
2.1.1. Güneş enerjisinin temelleri	11
2.1.2. Fotovoltaik hücre teknolojileri.....	12
2.1.3. Maksimum güç izleme algoritmaları	12
2.2. Elektrolizör Teknolojileri.....	13
2.2.1. Elektrolizör türleri	13
2.2.2. Fotovoltaik sistemlerde uyum ve dinamik çalışma.....	14
2.2.3. Verimlilik ve sistem performansı.....	14
2.2.4. Zorluklar ve gelişim alanları	15
2.3. Yakıt Hücresi Teknolojileri	15
2.3.1. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi	16
2.3.2. Yakıt hücresi türleri.....	16
2.3.3. Yakıt hücresi performans parametreleri.....	19
2.3.4. Yakıt hücresi sistemleri ve yardımcı bileşenler	20

	Sayfa
2.4. Batarya Teknolojileri	21
2.4.1. Bataryaların temel çalışma prensibi	21
2.4.2. Batarya türleri.....	22
2.4.3. Performans parametreleri	23
2.4.4. Batarya yönetim sistemleri.....	25
2.5. Fotovoltaik-Elektrolizör-Yakıt Hücresi-Batarya Hibrit Sistemleri.....	26
2.5.1. Sistem mimarisi ve enerji akış yapısı.....	28
2.5.2. Elektrolizör teknolojileri ve seçimi	29
2.5.3. Hidrojen depolama ve yakıt hücresi ile elektrik üretimi	29
2.5.4. Batarya rolü ve dinamik güç dengelemesi	30
2.5.5. Enerji yönetim stratejileri.....	30
2.5.6. Sistem bileşenlerinin entegrasyonu.....	33
2.5.7. Hibrit sistemlerin avantajları ve dezavantajları.....	34
3. GEREÇLER VE YÖNTEM.....	37
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	37
3.1.1. Fotovoltaik panel.....	37
3.1.2. PEM elektrolizör hücresi.....	38
3.1.3. Alkali elektrolizör hücresi.....	40
3.1.4. PEM yakıt hücresi	40
3.1.5. PEM yakıt hücresi kiti.....	42
3.1.6. Yakıt hücresi yığını	43
3.1.7. Hidrojen ve Oksijen depolama tankları.....	44
3.1.8. Ayarlanabilir güç kaynağı	45
3.2. Elektronik Yönetim Sistemi.....	46

	Sayfa
3.2.1. Elektronik kontrol ünitesi tasarımının yapılması	47
3.3. Güneş Panelinin Akım-Potansiyel Özellikleri, Güç Eğrisi ve Verimliliği	49
3.4. PEM Elektrolizörü.....	50
3.4.1. Hidrojen ve Oksijen gazının oluşun hacmine göre suyun ayrışması.....	50
3.4.2. PEM elektrolizörünün akım-potansiyel karakterizasyonu	51
3.4.3. PEM elektrolizörünün enerji verimliliği ve Faraday verimliliği.....	53
3.5. Farklı Elektrolit Derişimlerinde ve Sürelerinde Elektrolizör İle Hidrojen Üretimi	54
3.5.1. Elektrolit derişimlerinin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerine etkisi	54
3.5.2. Elektrolit derişimlerinin farklı potansiyellerde H ₂ üretimi üzerine etkisi	54
3.5.3. Farklı akımlarda zamanın H ₂ üretimi üzerine etkisi	55
3.5.4. Farklı potansiyellerde zamanın H ₂ üretimi üzerine etkisi	56
3.6. PEM Yakıt Hücresi	56
3.6.1. PEM yakıt hücresinin akım-potansiyel karakterizasyonu.....	57
3.6.2. PEM yakıt hücresinin enerji ve Faraday verimliliği	58
3.7. Küçük Ölçekli Bir Güç Olarak Fotovoltaik-Elektrolizör-Yakıt Hücresi Hibrit Sisteminin Deneysel Modelinin İncelenmesi	59
3.7.1. Değişen KOH çözelti derişimlerinde PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki İlişki	63
3.7.2. Değişen KOH çözelti derişimlerinde PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliği arasındaki İlişki	64
3.7.3. Değişen sıcaklıklarda PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliği arasındaki İlişki	64
3.7.4. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminde Hidrojen ve Oksijen tüketiminin zamana karşı incelenmesi	64
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	67

Sayfa

4.1. Güneş Panelinin Akım-Potansiyel Özellikleri, Güç Eğrisi ve Verimliliği	67
4.2. PEM Elektrolizörü	71
4.2.1. Hidrojen ve Oksijen gazının oluşan hacmine göre suyun ayrışması.....	71
4.2.2. PEM elektrolizörünün akım-potansiyel karakterizasyonu	72
4.2.3. PEM elektrolizörünün enerji verimliliği ve Faraday verimliliği.....	73
4.3. Farklı Elektrolit Derişimlerinde ve Sürelerinde Elektrolizör İle H ₂ Üretimi.....	76
4.3.1. Farklı elektrolit derişimlerinin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerine etkisi	76
4.3.2. Farklı elektrolit derişimlerinin farklı potansiyellerde H ₂ üretimi üzerine etkisi	78
4.3.3. Farklı akımlarda zamanın etkisi	80
4.3.4. Farklı potansiyellerde zamanın etkisi.....	87
4.4. PEM Yakıt Hücresi	93
4.4.1. PEM yakıt hücresinin akım-potansiyel karakterizasyonu.....	93
4.4.2. PEM yakıt hücresinin enerji ve Faraday verimliliği	94
4.5. Küçük Ölçekli Bir Güç Olarak Fotovoltaik-Elektrolizör-Yakıt Hücresi Hibrit Sisteminin Deneysel Modelinin İncelenmesi.....	99
4.5.1. Değişen KOH çözelti derişimlerinde PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki.....	100
4.5.2. Değişen KOH çözelti derişimlerinde PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliği arasındaki ilişki	105
4.5.3. Değişen sıcaklıklarda PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliği arasındaki İlişki	107
4.5.4. PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminde Hidrojen ve Oksijen tüketiminin zamana karşı incelenmesi	109
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR	117
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Batarya çeşitlerinin karşılaştırılması.....	23
Çizelge 2.2. Batarya çeşitlerinin parametreleri	25
Çizelge 4.1. İlgili direnç için potansiyel-akım ölçümü.....	67
Çizelge 4.2. Üretilen Hidrojen ve Oksijen hacminin ölçümü	71
Çizelge 4.3. Uygulanan farklı potansiyeller için ilgili akım ölçümü.....	72
Çizelge 4.4. Zaman, Potansiyel ve akım, üretilen hidrojen gazının hacimleri.....	73
Çizelge 4.5. Farklı akımlarda değişen NaOH derişimlerinde üretilen H ₂ hacmi	76
Çizelge 4.6. Farklı akımlarda değişen KOH derişimlerinde üretilen H ₂ hacmi	77
Çizelge 4.7. Farklı potansiyellerde değişen NaOH derişimlerinde üretilen H ₂ hacmi	78
Çizelge 4.8. Farklı potansiyellerde değişen KOH derişimlerinde üretilen H ₂ hacmi	79
Çizelge 4.9. Farklı akımlarda 0,5M NaOH derişiminde üretilen H ₂ -zaman çizelgesi	81
Çizelge 4.10. Farklı akımlarda 0,5M KOH derişiminde üretilen H ₂ -zaman çizelgesi	81
Çizelge 4.11. Farklı akımlarda 1,0M NaOH derişiminde üretilen H ₂ -zaman çizelgesi ..	83
Çizelge 4.12. Farklı akımlarda 1,0M KOH derişiminde üretilen H ₂ -zaman çizelgesi....	83
Çizelge 4.13. Farklı akımlarda 1,5M NaOH derişiminde üretilen H ₂ -zaman çizelgesi ..	85
Çizelge 4.14. Farklı akımlarda 1,5M KOH derişiminde üretilen H ₂ -zaman çizelgesi....	85
Çizelge 4.15. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	87
Çizelge 4.16. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5M KOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	88
Çizelge 4.17. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	89
Çizelge 4.18. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0M KOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	90

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.19. Zamanın farklı potansiyellerde 1,5M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	91
Çizelge 4.20. Zamanın farklı potansiyellerde 1,5M KOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	92
Çizelge 4.21. Farklı yük dirençlerinde yakıt hücresi için potansiyel ve akım değerlerinin ölçümleri.....	93
Çizelge 4.22. Tüketilen hidrojen gazına göre zaman, potansiyel ve akım değerleri ölçü çizelgesi.....	94
Çizelge 4.23. 0,50 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi.....	100
Çizelge 4.24. 1,00 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi.....	101
Çizelge 4.25. 1,50 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi.....	103
Çizelge 4.26. 2,0 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi.....	104
Çizelge 4.27. Değişen KOH çözelti derişimlerinde PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin çıkış gücü ve verimlilik çizelgesi	105
Çizelge 4.28. Değişen sıcaklıklarda PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım yoğunluğu - potansiyel çizelgesi.....	107
Çizelge 4.29. Değişen sıcaklıklarda PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım yoğunluğu – çıkış gücü çizelgesi	108

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrolizör türleri	15
Şekil 2.2. Yakıt hücresi türleri	18
Şekil 2.3. Fotovoltaik–elektrolizör–yakıt hücresi–batarya hibrit sistemi	28
Şekil 2.4. Sistem bileşenlerinin entegrasyonu	34
Şekil 3.1. Fotovoltaik panel	37
Şekil 3.2. PEM elektrolizör hücresi	39
Şekil 3.3. AEL elektrolizör hücresi.....	40
Şekil 3.4. PEM yakıt hücresi.....	42
Şekil 3.5. PEM FC kiti.....	43
Şekil 3.6. Yakıt hücresi yığını.....	44
Şekil 3.7. Depolama tankları.....	44
Şekil 3.8. Ayarlanabilir güç kaynağı.....	45
Şekil 3.9. Kart tasarımı devre şeması.....	48
Şekil 3.10. Geliştirilen anakart.....	49
Şekil 3.11. Güneş panelinin karakteristiğini belirlemek için kurulum şeması	49
Şekil 3.12. Güneş panelinin karakteristiğini belirlemek için deney düzeneği.....	50
Şekil 3.13. Suyun elektrolizi deney düzeneği	51
Şekil 3.14. Ayarlanabilir bir güç kaynağı kullanarak elektrolizörün akım-potansiyel karakteristiğini belirlemek için devre kurulum şeması.....	52
Şekil 3.15. PEM elektrolizörünün akım-potansiyel karakterizasyonu.....	52
Şekil 3.16. Ayarlanabilir güç kaynağı kullanarak elektrolizörün enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için kurulum devre şeması	53
Şekil 3.17. Ayarlanabilir güç kaynağı kullanarak elektrolizörün enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için deney düzeneği.....	53

Şekil	Sayfa
Şekil 3.18. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristiğini belirlemek için kurulum devre şeması.....	57
Şekil 3.19. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristik özellikler ve güç eğrisi için deney düzeneği.....	58
Şekil 3.20. Yakıt hücresinin enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için deney düzeneği.....	58
Şekil 3.21. Yakıt hücresinin enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için kurulum devre şeması	59
Şekil 3.22. Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin test devresi.....	62
Şekil 3.23. Tasarlanan devre şeması.....	62
Şekil 3.24. Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin deneysel modeli	63
Şekil 4.1. Güç panelinin akım-potansiyel karakteristiği.....	67
Şekil 4.2. Güneş panelinin güç eğrisi.....	68
Şekil 4.3. Elektrolizörün akım-potansiyel karakteristiği	72
Şekil 4.4. Elektrolizörün gaz hacmi-zaman grafiği	74
Şekil 4.5. NaOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	77
Şekil 4.6. KOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	78
Şekil 4.7. NaOH derişiminin farklı potansiyellerde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	79
Şekil 4.8. KOH derişiminin farklı potansiyellerde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	80
Şekil 4.9. 0,5 M NaOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	81
Şekil 4.10. 0,5 M KOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	82
Şekil 4.11. 1,0 M NaOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	83
Şekil 4.12. 1,0 M KOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	84
Şekil 4.13. 1,5 M NaOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	85
Şekil 4.14. 1,5 M KOH derişiminin farklı akımlarda H ₂ üretimi üzerindeki etkisi.....	86
Şekil 4.15. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	87

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5M KOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	88
Şekil 4.17. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	89
Şekil 4.18. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0M KOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	90
Şekil 4.19. Zamanın farklı potansiyellerde 1,5M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	91
Şekil 4.20. Zamanın farklı potansiyellerde 1,5M NaOH derişiminde H ₂ üretimi üzerindeki etkisi	92
Şekil 4.21. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristiği	93
Şekil 4.22. Yakıt hücresinin güç eğrisi	94
Şekil 4.23. P = 0.1606 W'ta bir yakıt hücresinin depolama tankı içeriği-zaman grafiği	95
Şekil 4.24. P = 0.1606 W'ta bir yakıt hücresinin hidrojen tüketimi-zaman grafiği	96
Şekil 4.25. 0,50 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki	100
Şekil 4.26. 1,0 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki	102
Şekil 4.27. 1,50 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki	103
Şekil 4.28. 2,0 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki	104
Şekil 4.29. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin değişen KOH çözelti derişiminde çıkış gücü ve verimliliği arasındaki ilişki	106
Şekil 4.30. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin değişen sıcaklıklarda akım yoğunluğu - potansiyel arasındaki ilişki	108
Şekil 4.31. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin değişen sıcaklıklarda akım yoğunluğu – güç yoğunluğu arasındaki ilişki	109
Şekil 4.32. H ₂ ve O ₂ akış hızı – zaman grafiği	110
Şekil 4.33. H ₂ akış hızı - potansiyel grafiği	110

Şekil	Sayfa
Şekil 4.34. O ₂ akış hızı - potansiyel grafiği	111
Şekil 4.35. H ₂ - O ₂ akış hızı - potansiyel grafiği.....	111
Şekil 4.36. Potansiyel - güç karşılaştırma grafiği	112



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m³	Metreküp
dB	Desibel
Hz	Hertz
m²	Metrekare
V	Volt
A	Amper
kg	Kilogram
L	Litre
W	Watt
s	Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

ADC	Analog dijital çevirici
AFC	Alkali yakıt hücresi
AEC	Alkali elektrolizör hücresi
BMS	Batarya yönetim sistemi
CC	Sabit akım
CV	Sabit potansiyel
DC	Doğru akım
DMFC	Doğrudan metanol yakıt hücresi
DSP	Sayısal sinyal işleme
EMS	Enerji yönetim sistemi
EYS	Elektronik yönetim sistemi
FC	Yakıt hücresi
FCHEV	Yakıt hücreli hibrit elektrikli araç
LHV	Düşük ısıtma değeri

Kısaltmalar**Açıklamalar**

MCFC	Eritilmiş karbonatlı yakıt hücresi
MGN	Maksimum güç noktası
MOSFET	Metal-oksit yarıiletken alan etkili transistörler
MPPT	Maksimum güç noktası izleme
OCP	Aşırı akım
OTP	Isınma koruması
OVP	Aşırı gerilim
PAFC	Fosforik asit yakıt hücresi
PEM	Proton değişim membran
PEMEC	Proton değişim membranlı elektrolizör hücresi
PEMFC	Proton değişim membranlı yakıt hücresi
PFC	Güç faktörü düzeltme
PV	Fotovoltaik panel
PVFCHEC	Fotovoltaik yakıt hücreli hibrit elektrikli araç
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
SOC	Şarj durumu göstergesi
SOEC	Katı oksit elektrolizör
SOFC	Katı oksit yakıt hücresi
SOH	Sağlık durumu göstergesi
V_a	Ayrışma potansiyeli

1. GİRİŞ

Giderek artan küresel enerji talebi, enerji üretim ve tüketim süreçlerinin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik bağlamında kritik bir sorun alanı hâline gelmiştir. Fosil yakıt kullanımı; küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi çevresel krizleri tetiklemektedir. Bu durum, düşük karbon salımı sağlayan ve çevreyle uyumlu enerji alternatiflerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar hız kazanmış, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması hedeflenmiştir. Yenilenebilir sistemlerin yaygınlaşması, sürdürülebilir enerji dönüşümünün temel dinamiklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, hidrojen enerjisi; yüksek enerji yoğunluğu, çevresel açıdan temiz yapısı ve çeşitli uygulama alanları sayesinde, geleceğin stratejik enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır.

Günümüzde hidrojen, çoğunlukla fosil yakıtların türevlerinden üretilmekte; bu durum ise sürecin çevresel sürdürülebilirliğini sınırlamaktadır. Alternatif olarak, suyun elektroliz yoluyla hidrojen ve oksijene ayrıştırılması daha temiz bir çözüm sunmakta, ancak bu yöntem yüksek enerji girdisi gerektirmektedir. Elektroliz işlemi çevreci bir yöntem olmakla birlikte, sürecin gerçekleştirilebilmesi için enerji girdisine ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektroliz teknolojisi, hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir ve farklı uygulama alanlarının ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla çeşitli güç ve özelliklerde elektrolizörler geliştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli çalışmalar için düşük güçlü elektrolizörler tercih edilirken, sanayi ölçeğinde hidrojen üretimi için yüksek güçlü ve dayanıklı sistemler kullanılmaktadır. Bunun yanında, elektrolizörlerin teknolojik özellikleri de kullanım amacına göre farklılık göstermektedir. Proton Değişim Membranlı (PEM), Alkali ve Katı Oksit Elektrolizör (SOEC) sistemleri; çalışma sıcaklıkları, verimlilikleri, hidrojen saflıkları ve maliyetleri açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Bu çeşitlilik sayesinde, hem mobil uygulamalarda (örneğin yakıt hücresi araçlar için hidrojen kaynağı) hem de sabit uygulamalarda (örneğin endüstriyel enerji depolama sistemleri) optimum çözümler elde edilebilmektedir (Dunn, 2011; Millet ve Grigoriev, 2013).

Hidrojen, enerji üretiminde ara bir işleme gerek kalmadan doğrudan yakıt olarak kullanılabilme özelliğine sahiptir. Bu özellik, hidrojenin kimyasal enerjisinin doğrudan

elektrik, ısı veya mekanik enerjiye dönüştürülebilmesini mümkün kılar. Örneğin, yakıt hücrelerinde hidrojen, oksijen ile reaksiyona girerek doğrudan elektrik üretir. Bu süreçte hidrojen, elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla enerjiye dönüşür ve yan ürün olarak sadece su buharı açığa çıkar. Hidrojenin doğrudan yakıt olarak kullanılması, enerji dönüşüm verimliliğini arttırması yanı sıra ara süreçlerden kaynaklanan kayıpları da minimize eder. Bu durum, hidrojenin sürdürülebilir enerji sistemlerinde kritik bir rol oynamasını sağlamaktadır. Ayrıca, kullanım biçimine bağlı olarak karbon emisyonu üretmemesi, hidrojeni temiz enerji teknolojilerinin temel yakıtlarından biri hâline getirmektedir. Böylece, enerji üretimi sırasında çevresel etkiler minimuma indirgenir ve fosil yakıt kullanımına bağlı emisyonlar ortadan kalkar (Staffell vd., 2019; Zhang ve Li, 2021).

Hidrojen üretim verimliliği ve yakıt hücresi performansı; elektrolit konsantrasyonu, sıcaklık, uygulanan potansiyel, akım yoğunluğu, elektrot malzemesi ve sistem kontrol stratejileri gibi çeşitli operasyonel parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Sıcaklık artışı, elektroliz performansını olumlu yönde etkileyebilmekte, ancak aşırı sıcaklıklar elektrot malzemelerinin bozulmasına neden olabilmektedir (Verastegui vd., 2020). Uygulanan potansiyel ve akım yoğunluğu da hidrojen üretim hızını artırmakla birlikte yüksek değerlerde enerji verimliliğini olumsuz etkileyebilir (Hwang, 2009). Elektrot malzemesi ve yüzey yapısının optimize edilmesi, elektrotlar üzerindeki reaksiyon hızını artırarak verimliliği arttırabilir (Verastegui vd., 2020; Al-Mamoori, 2023). Son olarak, sistem tasarımı ve kontrol stratejileri, özellikle PID e MPC gibi algoritmaların kullanımı, dinamik koşullarda sistemin stabil çalışmasını sağlayarak genel verimliliği artırmaktadır (Mohanty vd., 2024). Hidrojenin etkin şekilde kullanılmasını sağlayan yakıt hücreleri, yüksek verimlilikleri ve düşük çevresel etkileri nedeniyle enerji üretiminde önemli bir rol oynamalarına rağmen tek başlarına çalıştıklarında ani yük değişimlerine ve hızlı enerji talebine her zaman yeterli şekilde yanıt veremezler. Bu sınırlamayı aşmak ve sistem verimliliğini artırmak amacıyla yakıt hücreleri, hibrit enerji sistemlerine entegre edilmektedir. Bu bulgular, hibrit enerji sistemlerinde hidrojen üretiminin ve yakıt hücresi performansının optimum koşullar altında gerçekleştirilmesi gerektiğini ve sistemin genel verimliliğinin artırılmasına önemli katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Hibrit enerji sistemlerinde yakıt hücreleri genellikle batarya, süperkapasitör veya yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (güneş panelleri, rüzgâr türbinleri) birlikte

kullanılmaktadır. Bu entegrasyon sayesinde yakıt hücresi, sabit yükte ve yüksek verimlilikle çalışırken, batarya ve süperkapasitör gibi depolama elemanları ani enerji talep dalgalanmalarını dengeleyerek sistemin toplam performansını artırır. Ayrıca, yakıt hücresine binen ani yükler azaltıldığından sistemin ömrü uzamakta ve bakım gereksinimleri azalmakta, böylece ekonomik açıdan da avantaj sağlanmaktadır (Shboul vd., 2025).

Hibrit yakıt hücresi sistemleri, güneş ve rüzgâr gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kombine edildiğinde güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji çözümü sunmaktadır. Bu sistemler, özellikle elektrikli araçlar, mikro şebekeler ve taşınabilir enerji uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Bu entegrasyon, yüksek verimlilik, esneklik ve düşük karbon emisyonu avantajlarını bir araya getirerek modern enerji teknolojilerinde tercih edilen bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Liu vd., 2022; Wang ve Chen, 2021).

Hibrit enerji sistemlerinde farklı enerji kaynakları ve depolama birimlerinin uyumlu şekilde çalışmasını sağlamak, sistemin verimliliği, güvenliği ve sürekliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu amaçla, elektronik kontrol üniteleri (EKU) yaygın olarak kullanılmaktadır. EKU, sistem bileşenleri arasındaki enerji akışını optimize ederek batarya şarj ve deşarj süreçlerini yönetir, fotovoltaik paneller ve yakıt hücresinin performansını izler ve aşırı yüklenme veya güvenlik risklerine karşı koruma sağlar (Riffonneau vd., 2010; Katiraei ve Iravani, 2006). Gerçek zamanlı kontrol algoritmaları sayesinde, sistem hem enerji sürekliliğini sağlar hem de verimlilik ve dayanıklılığı artırır. Bu nedenle, hibrit enerji sistemlerinde elektronik kontrol ünitesi, enerji yönetimi stratejilerinin uygulanabilmesi ve sistemin güvenli, verimli ve sürdürülebilir biçimde çalışabilmesi için temel bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda hibrit enerji sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, fotovoltaik hücreler, bataryalar ve yakıt hücrelerinin entegrasyonu üzerine odaklanmaktadır. Li ve arkadaşları (2021), fotovoltaik hücre ile lityum-iyon bataryayı birleştiren hibrit bir güç sistemi geliştirmiş ve bu sistemin kompakt tasarımının, küçük ölçekli hidrojen üretimi ve depolaması ile entegre edilerek verimli çalışabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, Meyer ve arkadaşları (2015) süper kapasitör ve batarya tabanlı hibrit araç aktarma organlarının güç yönetimini incelemiş, Kasımalla ve arkadaşları (2018) ise yakıt hücresi-batarya-ultrakapasitör kombinasyonlarının enerji yönetimi stratejilerine katkılarını ortaya koymuştur. Huang ve arkadaşlarının (2019) geliştirdiği fotovoltaik-yakıt hücresi hibrit

modeli ise, belirsiz mantık tabanlı kontrol yöntemleriyle enerji yönetimini optimize etmiştir. Ayrıca Mohamed ve arkadaşları (2021), hibrit şarj sistemlerinin performansını artırmaya yönelik fotovoltaiik-yakıt hücresi kombinasyonlarını incelemiştir.

Luo ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan bir derleme çalışmasında, yakıt hücresi hibrit elektrikli araçların (FCHEV) gelişim süreci, hibridizasyon topolojileri ve enerji yönetim stratejilerini detaylı şekilde değerlendirmiştir. Çalışmalar, proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin otomotiv uygulamalarında öne çıktığını ve bu tip hibrit sistemlerin enerji verimliliği açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ancak maliyet, dayanıklılık, soğuk çalıştırma ve hidrojen altyapısı gibi sorunların çözülmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ayrıca mevcut çalışmalarda genellikle yalnızca iki veya üçlü enerji kaynağı kombinasyonları ele alınmıştır.

Hibrit yakıt hücresi sistemlerinde enerji yönetimi, sistemin verimliliği ve ömrü açısından kritik öneme sahiptir. Bir çalışmada, yakıt hücresi ve batarya içeren hibrit sistemler için çevrimli enerji yönetimi stratejileri önerilmiştir. Bu stratejiler, sistemin enerji verimliliğini artırmakta ve bileşenlerin ömrünü uzatmaktadır (Ji, 2024).

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde fotovoltaiik sistemler, hidrojen üretimi, yakıt hücreleri ve batarya teknolojileri ile ilgili çok sayıda çalışma olduğu görülebilir. Ancak bu çalışmalarda genellikle her bir teknoloji ayrı ayrı ele alınmış ve hibrit sistem tasarımları daha çok birbirini destekleyici unsurlar olarak incelenmiştir. Bazı araştırmalar, fotovoltaiik-elektrolizör sistemlerinin enerji verimliliği üzerine odaklanmış, bazıları ise hidrojenin yakıt hücrelerinde kullanımı üzerine çeşitli modeller geliştirmiştir. Ancak literatürdeki çalışmaların büyük bölümü, ağırlıklı olarak simülasyon düzeyinde kalmakta; sistem entegrasyonu ve optimizasyonu açısından sınırlı katkı sunmaktadır. Bu tez çalışması, söz konusu boşluğu gidermeyi hedefleyerek, dört farklı teknolojiyi bir araya getiren daha verimli ve sürdürülebilir bir hibrit enerji sistemi tasarımı ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, mevcut hibrit sistemlere alternatif olarak fotovoltaiik, elektrolizör, yakıt hücresi ve batarya entegrasyonuna dayalı yenilikçi bir hibrit güç sistemi önerilmektedir. Önerilen yapı, fotovoltaiik panellerden elde edilen enerjinin hem batarya şarjında hem de elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde kullanılmasını esas almaktadır. Üretilen hidrojen, proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresinde elektrik enerjisine

dönüştürülerek yeniden batarya sistemine aktarılmakta, böylece çift yönlü enerji akışıyla sistemin genel verimliliğini artırılmaktadır. Bu yapı sayesinde, yenilenebilir kaynaklardan sürekli enerji temini mümkün hale gelirken, yakıt hücresine dayalı dönüşüm süreçlerinde de yüksek performans elde edilmesi hedeflenmektedir. Söz konusu yaklaşımın, sürdürülebilir enerji üretimi alanında hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara yönelik önemli bir katkı sunması beklenmektedir.

Çalışmanın temel amacı; güneş ve hidrojen enerjisini entegre biçimde değerlendirerek, verimliliği yüksek ve sürdürülebilir bir enerji sistemi geliştirmektir. Tasarlanan hibrit yapı, enerji üretimi, depolama ve tüketim süreçlerinin bütüncül şekilde optimize edilmesini sağlayarak, konvansiyonel sistemlere teknik ve ekonomik açıdan güçlü bir alternatif oluşturma potansiyeline sahiptir. Fotovoltaik sistemle, elektrolizörler, yakıt hücreleri ve bataryaların uyumlu çalışmasını esas alan bu model, hem enerji verimliliği artırmakta hem de karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sunmaktadır.

Bu tez çalışmasının özgün değeri, yalnızca batarya temelli bir çözüm değil, aynı zamanda yakıt hücresiyle sürekli desteklenen çok katmanlı bir hibrit mimarisi geliştirilmiş olmasıdır. Bu mimari, özellikle elektrikli araçlar ve taşınabilir güç sistemlerinde daha uzun menzil, yüksek verimlilik ve düşük emisyon avantajları sunmaktadır. Ayrıca, yerli teknoloji geliştirme hedefi doğrultusunda tasarlanan özgün hibrit sistem kontrol devreleri, çalışmanın katma değerini artıran önemli bir mühendislik katkısı olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, fotovoltaik panellerden elde edilen enerjinin elektrolizör, yakıt hücresi ve batarya arasında dengeli bir şekilde dağıtılabildiğini sağlamak amacıyla özel bir elektronik kontrol kartı tasarlanmıştır. Hibrit enerji sistemlerinde enerji akışının güvenli, kararlı ve verimli şekilde yönetilebilmesi açısından bu kontrol birimi hayati öneme sahiptir. Kart, potansiyel, akım ve sıcaklık gibi temel parametreleri gerçek zamanlı izlemekte ve sistemin tüm bileşenleri arasındaki enerji transferini optimize etmektedir. Bu sayede hidrojen üretimi, yakıt hücresi performansı ve batarya şarj durumu sürekli olarak denetim altında tutulmakta; aşırı yük, kısa devre termal riskler engellenmektedir. Ayrıca, karta entegre edilen kontrol algoritmaları sistem geçişlerini ve enerji depolama süreçlerini optimize ederek genel verimlili ve güvenilirliği artırmaktadır (Riffonneau vd., 2010; Katiraei ve Iravani, 2006). Bu yapı, sistemin dinamik koşullar altında kararlı çalışmasını ve sürdürülebilir enerji yönetiminin sağlanmasını mümkün kılmaktadır.

Tez kapsamında, hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu ve bu süreçlerin enerji dönüşüm sistemlerinde kullanımı deneysel olarak incelenmiştir. Fotovoltaik (PV) modüller, yalnızca elektrik üretim kaynağı olarak değil, aynı zamanda enerji dönüşüm süreçlerinin deneysel analizi için de değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, PV paneller hibrit sistemin temel bileşenlerinden biri olarak konumlandırılmıştır. Sistem tasarımı, PV panellerden elde edilen elektrik enerjisi doğrudan elektrolizöre yönlendirilerek hidrojen üretimi sağlanmış, ardından üretilen bu hidrojen yakıt hücresi aracılığıyla yeniden elektrik enerjisine dönüştürülmüştür (Parra vd., 2019). Böylece, enerji zincirinin her aşaması hem teorik hem de deneysel olarak analiz edilmiş; sistemin çalışma prensibi bütüncül bir şekilde değerlendirilmiştir.

Ayrıca, güneş modüllerinin farklı ışıyım seviyelerindeki çıkış performansı deneysel olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilerle akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrileri çıkarılmış, modülün maksimum güç noktası (MGN) belirlenmiştir (Green vd., 2015). Bu analizler, sistemin gerçek çalışma koşullarındaki davranışını anlamaya ve PV modüllerin performansını optimize etmeye yönelik önemli girdiler sunmuştur.

Fotovoltaik modüllerin temel karakteristikleri, akım-gerilim (I-V) eğrileri üzerinden tanımlanmıştır. I-V eğrisinde maksimum güç noktası (MGN) parametreleri hesaplanarak modülün performansı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, güç-potansiyel (P-V) eğrisi kullanılarak modülün hangi çalışma noktasında en yüksek gücü ürettiği gözlemlenmiştir. Modül verimliliği, üretilen elektriksel gücün modül üzerine düşen güneş ışıyımına oranı olarak ifade edilmiştir. Bu parametreler, hibrit sistem tasarımlarında enerji akışının doğru modellenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Masters, 2013).

Çalışmanın ikinci aşamasında, suyun elektrolizi proton değişim membranlı (PEMEC) ve alkali (AEC) elektrolizörler kullanılarak gerçekleştirilmiş; ve bu süreçte temel reaksiyon olarak $2\text{H}_2\text{O}(\text{s}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ denklemi esas alınmıştır. Elektrolizör hücresinde oluşan anot ve katot yarı reaksiyonları ayrı ayrı analiz edilmiş, özellikle kullanılan elektrolit tipinin elektroliz performansına olan etkisi deneysel olarak değerlendirilmiştir (Carmo vd., 2013).

Üretilen hidrojen, PEM ve alkali tabanlı yakıt hücrelerinde elektrik üretimi amacıyla kullanılmış ve bu dönüşüm süreci $2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + \text{elektrik} + \text{ısı}$ tepkimsei çerçevesinde incelenmiştir. Yakıt hücresi içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal yarı

reaksiyonlar, elektron akışının sürekliliği ve proton iletiminin etkinliği açısından ayrıntılı olarak değerlendirilmiş, sistem verimliliği üzerindeki etkileri ortaya konmuştur (Dicks ve Rand, 2018).

Bu tez kapsamında, ayrıca hidrojen üretim süreçlerinin verimliliğini artırmaya yönelik deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Özellikle, farklı akım değerleri altında elektrolit derişimlerinin hidrojen (H_2) üretimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elektroliz sürecinde uygun katalizör ve elektrolit seçimi, sistemin performansı açısından kritiktir (Zeng ve Zhang, 2010). Hidrojen üretiminde elektrolit derişimi ve işletme sıcaklığı, yakıt hücresi performansını doğrudan etkileyen kritik parametrelerdir. Potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi, yüksek iyonik iletkenliği ve OH^- iyonu üretme kapasitesi nedeniyle elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatür çalışmaları, KOH derişiminin artırılmasının hem elektroliz hızını hem de verimliliği artırdığını göstermektedir (Verastegui vd., 2020). Örneğin, Saleh ve May (2024), 5 g/L KOH derişiminde 140 ml hidrojen üretmiş ve elektroliz hızının derişimle orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, yüksek derişimler elektrot yüzeylerinde karbonat birikimine yol açabilir ve OH^- iyon yoğunluğunu azaltarak verimliliği düşürebilir (Gouérec vd., 2004). Ayrıca, sıcaklığın artırılması elektroliz performansını olumlu yönde etkileyebilir; Verastegui ve arkadaşları (2020), %30 KOH ve 50 °C’de 9,6 L/dak hidrojen üretimi elde etmişlerdir. Bu bulgular, optimum hidrojen üretimi için KOH derişimi ve sıcaklığın dengeli şekilde seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, çalışmada hem potasyum hidroksit (KOH) hem de sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılarak karşılaştırmalı deneyler gerçekleştirilmiştir. Elektrolit derişimlerinin hidrojen üretimi üzerindeki etkilerini daha kapsamlı şekilde değerlendirmek amacıyla her iki elektrolit için de üç farklı derişim (0,5 M, 1,0 M ve 1,5 M) test edilmiştir. Bu yaklaşım, farklı elektrolitlerin performanslarının kıyaslanmasına imkân tanıyarak elektroliz sürecinin iyileştirilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır (Dincer ve Acar, 2015; Sanli vd., 2014).

Sonuç olarak, bu tez çalışması; mevcut hibrit enerji çözümlerinden farklı olarak, deneysel ve modelleme yöntemlerini birleştirerek daha verimli, sürdürülebilir ve uygulanabilir bir hibrit güç sistemi geliştirilmesi amaçlamakta ve hem akademik hem de endüstriyel düzeyde önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir. Gerçekleştirilen deneysel süreç, fotovoltaikelektrolizör-yakıt hücresi-batarya entegrasyonuna dayalı hibrit sistemlerin performansını ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, hem yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin

kullanılmasına hem de enerji depolama ve dönüşüm teknolojilerinde yeni çözüm yolları geliştirilmesine katkı sağlamıştır. Elde edilen bulguların, benzer hibrit enerji sistemlerinin gelecekteki tasarım, optimizasyon ve ticarileştirilme süreçlerine bilimsel alt yapı sağlayacağını ve bu alandaki uygulamalı araştırmalara yön verecek nitelikte önemli bir referans teşkil edeceği ön görülmektedir.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın temel amacı, yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş enerjisi ve hidrojen enerjisinin entegre kullanımıyla verimli ve sürdürülebilir bir enerji sistemi tasarlamaktır. Geliştirilen hibrit sistem, enerji üretimi, depolanması ve kullanımı süreçlerini optimize ederek, mevcut hibrit enerji sistemlerine alternatif oluşturabilecek bir potansiyel taşımaktadır. Ayrıca, fotovoltaik sistemlerin, elektrolizörlerin, yakıt hücrelerinin ve bataryaların birbirleriyle uyumlu bir şekilde çalıştığı bir modelin geliştirilmesi, enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan önemli kazançlar sağlayabilir.

Araştırmanın önemi

Bu araştırma, küresel enerji dönüşümünde önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Enerji depolama ve taşıma sorunları, özellikle güneş enerjisi gibi kesintili enerji kaynakları için büyük bir engel teşkil etmektedir. Hibrit sistem tasarımı, bu sorunu aşmayı ve sistemin verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, hidrojenin yeşil enerji kaynağı olarak kullanımı, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin çevresel etkilerini azaltmak adına atılmış bir adım daha olacaktır. Bu araştırmanın hem akademik alanda hem de endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir yenilik sunacağı düşünülmektedir.

Sınırlılıklar

Araştırmanın sınırlılıkları, kullanılan teknolojilerin mevcut durumuna, prototiplerin geliştirilmesindeki teknik zorluklara ve maliyetlere dayanmaktadır. Ayrıca, hibrit sistemin farklı coğrafi ve iklimsel koşullarda verimliliği değişkenlik gösterebilir. Bu çalışma, teorik ve laboratuvar ölçekli prototip düzeyinde kalacak olup, geniş ölçekli ticarileşme süreçleri bu tezin kapsamı dışındadır.

Tanımlar

- Fotovoltaik Sistem: Güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren bir sistemdir. Bu çalışmada, fotovoltaik sistemler güneş enerjisinin temel kaynağını oluşturacaktır.
- Elektrolizör: Su moleküllerini elektrik enerjisi kullanarak hidrojen ve oksijen gazlarına ayıran bir elektro-kimyasal dönüştürücü sistemdir. Bu çalışmada, hidrojen üretimi amacıyla kullanılan elektrolizörlere sağlanan akım, doğrudan güneş enerjisini kullanan ve depolayan bir kaynaktan sağlanmıştır.
- Yakıt Hücresi: Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir. Hidrojenin yakıt hücrelerinde elektrik enerjisine dönüştürülmesi, sistemin enerji üretim kapasitesini artıracaktır.
- Batarya: Enerji depolamak ve gerektiğinde kullanmak amacıyla kullanılan bir bileşendir. Bu tezde, bataryalar, elde edilen enerjinin depolanmasında ve ihtiyaca göre kullanılmasında rol almıştır.

Araştırma yöntemleri

Bu çalışma, deneysel ve modelleme yöntemlerini birleştirerek hibrit sistemin verimliliğini incelemiştir. Geliştirilen model, fotovoltaik sistemler, elektrolizörler, yakıt hücreleri ve bataryaların performanslarını karşılaştıran deneysel ortamda test edilmiştir. Aynı zamanda, farklı malzeme seçimlerinin ve teknolojilerin etkisi üzerinde analizler yapılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Fotovoltaik (PV) Sistemler

Fotovoltaik (PV) sistemler, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken tabanlı enerji dönüşüm teknolojileridir. Bu dönüşüm süreci, temel olarak yarı iletken malzemelerde gerçekleşen fotoelektrik etkiye dayanmaktadır. PV sistemler, fosil kaynaklara bağımlılığı azaltan, çevresel etkileri son derece düşük olan uzun vadede düşük işletme giderleriyle dikkat çelen sürdürülebilir enerji çözümleri arasında yer almaktadır. Bu bölümde, güneş enerjisinin temel fiziksel özellikleri, fotovoltaik hücre teknolojilerinin yapısal ve işlevsel çeşitliliği ile birlikte, sistem verimliliğini artırmaya yönelik maksimum güç noktası izleme (MPPT) teknikleri kapsamlı biçimde ele alınmıştır.

2.1.1. Güneş enerjisinin temelleri

Güneş enerjisi, elektromanyetik radyasyon şeklinde Dünya yüzeyine ulaşmakta olup, atmosfer tabakasından geçişi sırasında ışıının belirli bir bölümü yansımakta, saçılmakta ya da atmosferik gazlar ve partiküller tarafından absorbe edilmektedir. Yeryüzüne ulaşan güneş ışıını; doğrudan ışıınım, yaygın (diffüz) ışıınım ve albedo (yüzeylerden yansıyan) ışıınım olmak üzere üç temel bileşen altında sınıflandırılmaktadır (Boyle, 2012).

Fotovoltaik hücrelerde yaygın olarak tercih edilen yarı iletken materyal olan silikon, üzerine düşen fotonların enerjisini absorbe ederek, bağlı elektronların enerji seviyelerini artırmakta ve bu elektronların serbest hale geçmesini sağlamaktadır. Bu süreç sonucunda, hücre içerisinde yönlü bir elektriksel akım meydana gelmektedir. PV sistemlerin performansı; panelin yerleşim konumu, eğim açısı ve yönelimi gibi fiziksel parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Söz konusu parametrelerin yerel iklim koşullarına göre optimize edilmesi, sistemin toplam enerji üretim verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır (Messenger ve Ventre, 2010).

Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli açısından avantajlı bir konumda olup, yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi 2.640 saat, günlük ortalama ise 7,2 saat olarak raporlanmıştır

(Taşova, 2018). Bu veriler, fotovoltaik sistemlerin ulusal ölçekte uygulanabilirliği ve sürdürülebilir enerji arzı açısından yüksek bir potansiyele işaret etmektedir.

2.1.2. PV hücre teknolojileri

Fotovoltaik hücreler, üzerine düşen fotonları absorbe ederek elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerden üretilmektedir. Günümüzde ticari ve araştırma odaklı olarak kullanılan başlıca PVteknolojileri; monokristal silikon, polikristal silikon, ince film (CdTe, CIGS, amorf Si) ve yeni nesil perovskit hücrelerden oluşmaktadır (Green vd., 2023).

Monokristal silikon hücreler, düzenli kristal yapıları sayesinde %20–23 aralığında yüksek dönüşüm verimliliği sağlamakta; ancak karmaşık süreçleri nedeniyle maliyetleri görece yüksektir. Buna karşılık, polikristal hücreler daha basit üretim teknikleriyle elde edilmekte ve ekonomik olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilse de verimlilikleri genellikle %15–18 seviyesinde kalmaktadır (Razykov vd., 2011).

İnce film fotovoltaik hücreler, düşük üretim maliyetleri ve esnek yapıları sayesinde özellikle mobil ve entegre uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak bu tür hücreler, kristal tabanlı sistemlere kıyasla daha düşük verimliliğe sahiptir. Son yıllarda geliştirilen perovskit tabanlı PV hücreler ise laboratuvar ortamında %25'in üzerinde verimlilik değerine ulaşarak dikkat çekmiş ve ticari ölçekli uygulamalar için önemli bir potansiyel ortaya koymuştur (Green vd., 2023).

2.1.3. Maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmaları

PV panellerin üretim gücü; ışıınım ve sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, sistemin maksimum güç noktasında (MPP) çalışması gerekir. Bunu sağlamak için MPPT algoritmaları kullanılır (Esrarn ve Chapman, 2007).

Perturb and Observe (P&O) yöntemi; potansiyelde yapılan küçük değişikliklerle güç değişimini gözlemleyerek çalışır. Basitliği nedeniyle yaygındır ancak hızlı değişen koşullarda kararsızlık gösterebilir (Femia vd., 2005).

İnkremenal İletkenlik yöntemi, güç-Potansiyel eğrisinin türevine dayalı olarak daha doğru ve hızlı izleme yapar. Bu yöntem, özellikle ışıının ani değıştiğı durumlarda tercih edilir (Esrarn ve Chapman, 2007).

Yapay zekâ temelli yöntemler (bulanık mantık, yapay sinir ağıları) ise adaptif ve öğrenebilir yapılarıyla karmaşık çevresel koşullarda üstün performans sergileyebilir (Femia vd., 2005).

Fotovoltaik sistemler, temel fiziksel prensiplerden ileri malzeme teknolojilerine kadar geniş bir bilgi altyapısı üzerine kuruludur. Güneş ışıınının değerdendirilmesi, hücre teknolojilerinin seçimi ve MPPT tekniklerinin doğru kullanımı, PV sistemlerin verimli ve kararlı çalışmasını sağlamada kritik öneme sahiptir.

2.2. Elektrolizör Teknolojileri

Elektrolizörler, suyu hidrojen ve oksijen gazlarına ayıran cihazlardır ve fotovoltaik (PV) sistemlerle entegre edildiğinde sürdürülebilir hidrojen üretiminin temelini oluşturur. Bu yapı, güneşten elde edilen elektrik enerjisinin doğrudan kimyasal enerjiye (hidrojen) çevrilmesini sağlar. Böylece PV sistemlerin gündüz ürettiğı fazla enerji, uzun vadeli kullanılabilir hale gelir (İbrahim vd., 2008).

Elektroliz işlemi genel olarak şu şekilde gerçekleşir: Su, elektrik enerjisi ile iki elektroda ayrılır; anotda oksijen gazı, katotta ise hidrojen gazı açığa çıkar. Bu işlem, doğrudan doğruya DC enerjiyle gerçekleştiğı için fotovoltaik sistemlerin çıkışlarıyla yüksek uyumluluk gösterir. Ancak elektrolizörlerin seçimi ve tasarımı, sistem verimliliğı üzerinde belirleyici rol oynar (Zeng ve Zhang, 2010).

2.2.1. Elektrolizör türleri

Elektrolizörler temel olarak üç ana teknolojiye ayrılır:

Alkali elektrolizörler (AEC)

En eski ve en yaygın kullanılan tiptir. Potasyum hidroksit (KOH) gibi alkali elektrolitler kullanılır. Düşük maliyetli ve dayanıklıdır, ancak düşük akım yoğunluklarında verimli çalışırlar. Ayrıca gaz saflığı açısından sınırlamalar mevcuttur (Millet vd., 2010).

Proton değişim membranlı elektrolizörler (PEMEC)

Katı polimer membran kullanarak çalışır. Daha kompakt, yüksek verimli ve hızlı tepkilidir. PV sistemlerden gelen değişken enerjiyi doğrudan kabul edebilme yetenekleri sayesinde hibrit uygulamalarda sıklıkla tercih edilirler. Ancak platin gibi pahalı katalizörler gerektirirler (Zeng ve Zhang, 2010).

Katı oksit elektrolizörler (SOEC)

Yüksek sıcaklıklarda ($\sim 700\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) çalışırlar. Termal enerjiyi de kullanabildikleri için teorik olarak daha yüksek verimlidirler. Ancak yüksek sıcaklık gereksinimi malzeme dayanıklılığı ve sistem karmaşıklığı açısından sınırlayıcıdır (İbrahim vd., 2008).

2.2.2. Fotovoltaik sistemlerle uyum ve dinamik çalışma

Fotovoltaik sistemlerin karakteristikleri nedeniyle çıkış güçleri zamana bağlı olarak değişir. Bu nedenle PV-elektrolizör entegrasyonunda elektrolizörlerin değişken güçle çalışabilme kabiliyeti önem kazanır. PEM elektrolizörlerin bu anlamda diğerlerine üstünlükleri vardır; PV üretimi ile doğrudan senkronize çalışabilirler (Parra vd., 2015).

Bu entegrasyonda verimi artırmak ve sistem ömrünü korumak için araya güç dönüştürücü birimler (DC-DC dönüştürücüler) yerleştirilir. Bu dönüştürücüler, PV'den gelen potansiyeli düzenleyerek elektrolizörün sabit potansiyel aralığında çalışmasını sağlar (Serra vd., 2013).

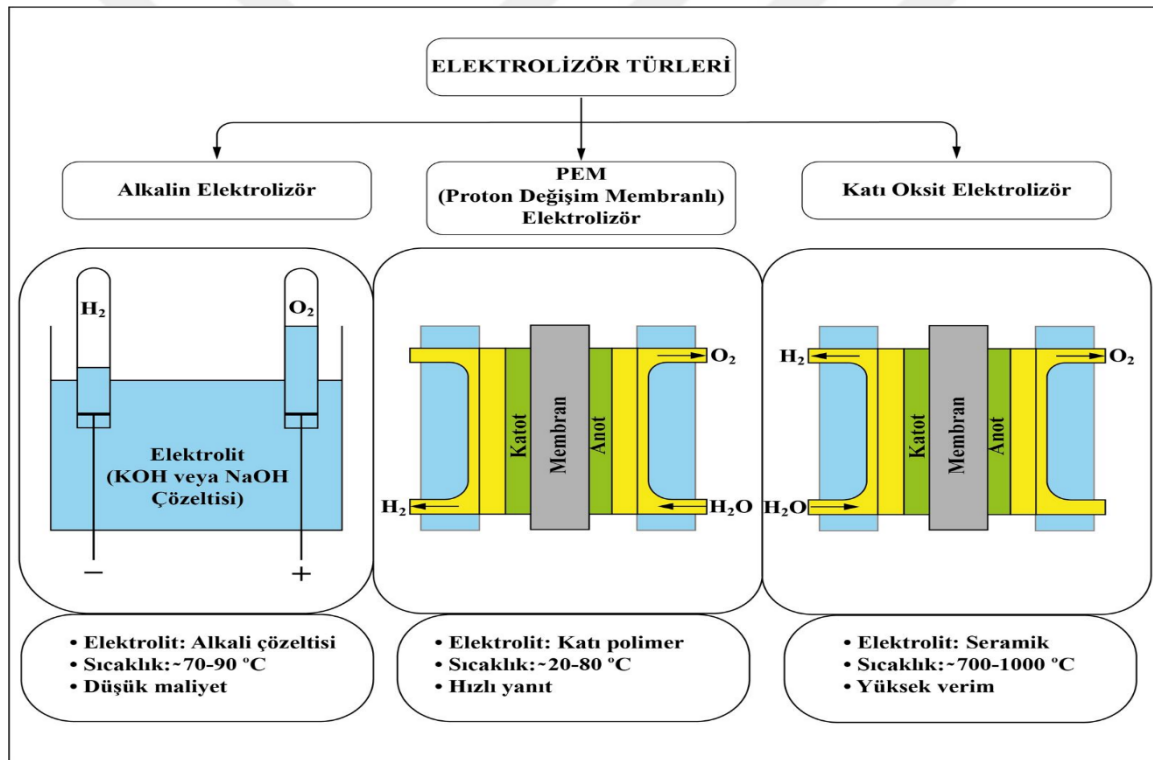
2.2.3. Verimlilik ve sistem performansı

Elektrolizörlerin verimliliği genellikle %60–80 arasında değişmektedir. Bu değer, kullanılan elektrolizör türüne, çalışma sıcaklığına, akım yoğunluğuna ve suyun saflığına

bağlıdır. PEM elektrolizörler kısa süreli uygulamalarda daha kararlı iken, alkali elektrolizörler uzun süreli sabit yüklerde avantaj sağlar (Millet vd., 2010).

2.2.4. Zorluklar ve gelişim alanları

PV-elektrolizör entegrasyonunun önündeki en büyük engellerden biri, düşük PV üretiminin elektrolizör çalışmasını durdurmasıdır. Bu nedenle bazı uygulamalarda batarya arayüzü de kullanılabilir. Ayrıca PEM teknolojisindeki yüksek maliyetler ve katalizör ömrü üzerine yapılan araştırmalar, bu sistemlerin ekonomik olarak daha erişilebilir hale getirilmesine yöneliktir (Zeng ve Zhang, 2010).



Şekil 2.1. Elektrolizör türleri

2.3. Yakıt Hücresi (Fuel Cell) Teknolojileri

Yakıt hücreleri, hidrojen gibi yakıtları doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren çevreci sistemlerdir. Fotovoltaik sistemlerle entegre edildiğinde kesintisiz ve sürdürülebilir enerji elde etmek mümkün hale gelir.

2.3.1. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi

Yakıt hücreleri, bir yakıt (genellikle hidrojen) ve oksitleyici (genellikle hava) arasında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonla elektrik üretir. Temel yapı; anot, katot ve bu ikisi arasında iyon iletimine izin veren bir membrandan oluşur. Hidrojen anotta protonlara ve elektronlara ayrışır. Elektronlar dış devre üzerinden geçerek elektrik üretir, protonlar ise elektrolit aracılığıyla katoda ulaşır. Katotta oksijenle birleşerek su oluşur (Larminie ve Dicks, 2003; Barbir, 2005).



2.3.2. Yakıt hücresi türleri

Yakıt hücreleri, temel çalışma prensipleri benzer olmakla birlikte, kullanılan elektrolit türü ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, hücrenin uygulama alanını, verimliliğini, tepki süresini ve kullanılan yakıt türünü doğrudan etkilemektedir. Yaygın yakıt hücresi türleri şu şekilde özetlenebilir:

Proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMFC)

Düşük sıcaklıkta ($\sim 80^\circ\text{C}$) çalışır ve otomotiv, taşınabilir cihazlar gibi alanlarda tercih edilir. Yüksek güç yoğunluğu ve hızlı tepkime avantajları vardır. Ancak, saf hidrojen ihtiyacı ve nem yönetimi zorluk yaratabilir (Larminie ve Dicks, 2003).

Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)

Yüksek sıcaklıkta ($600\text{--}1000^\circ\text{C}$) çalışır. Yakıt olarak hidrojenin yanı sıra metan gibi hidrokarbonları da kullanabilir. Verimi yüksektir, ancak uzun ısınma süreleri ve malzeme yıpranması gibi dezavantajlara sahiptir. (Singhal ve Kendall, 2003).

Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)

Orta sıcaklıkta ($\sim 150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$) çalışır. Uzun ömürlüdür, genellikle sabit güç uygulamalarında (ör. binalar) tercih edilir. Ancak düşük güç yoğunluğu bir dezavantajdır (Barbir, 2005).

Alkali yakıt hücresi (AFC)

Alkali yakıt hücreleri, potasyum hidroksit (KOH) gibi alkali bir elektrolit kullanır. Yüksek elektrokimyasal verimliliğe sahip olmaları ve düşük çalışma sıcaklığı ($60\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$) avantajdır. Alkali yakıt hücreleri (AFC), yüksek enerji verimleri ve hızlı tepki süreleri nedeniyle uzay uygulamalarında uzun yıllardır tercih edilmektedir. Ancak bu hücrelerin karbondioksit karışı yüksek düzeyde hassasiyeti bulunmaktadır., CO_2 gazı, elektrolitte karbonat iyonlarının oluşmasına neden olarak elektrolit iletkenliğini düşürmekte ve hücre performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, AFC sistemlerinde yalnızca yüksek saflıkta hidrojen ve oksijen gazlarının kullanımı zorunludur (Larminie ve Dicks, 2003; Barbir, 2005). Bu gereklilik, sistemin hem işletme maliyetini artırmakta hem de karasal uygulamalardaki kullanım alanlarını sınırlamaktadır.

Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC)

MCFC'ler, erimiş karbonat tuzlarını elektrolit olarak kullanır ve yüksek sıcaklıklarda ($650\text{ }^{\circ}\text{C}$) çalışır. Bu yüksek sıcaklık, yakıt olarak doğal gaz ve kömür gazı gibi hidrokarbonların doğrudan kullanılmasını sağlar. MCFC'ler yüksek verim ve yakıt esnekliği sunar ancak malzeme dayanıklılığı ve yüksek sıcaklığın getirdiği sorunlar dezavantajdır (Singhal ve Kendall, 2003).

Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMFC)

Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMFC), proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresi teknolojisinin bir alt türü olup, yakıt olarak doğrudan sıvı metanol kullanmaktadır. Metanolün sıvı fazda depolanabilmesi, hidrojenin yüksek basınç altında veya düşük sıcaklıklarda saklanması gerekliliğini ortadan kaldırarak, sistemin taşıma ve yakıt ikmal süreçlerini önemli ölçüde kolaylaştırır. Bu özelliği sayesinde DMFC'ler, özellikle düşük

güçlü, hafif ve taşınabilir enerji ihtiyaçlarına sahip uygulamalarda -örneğin taşınabilir elektronik cihazlar ve askeri ekipmanlar- önemli avantajlar sunmaktadır.

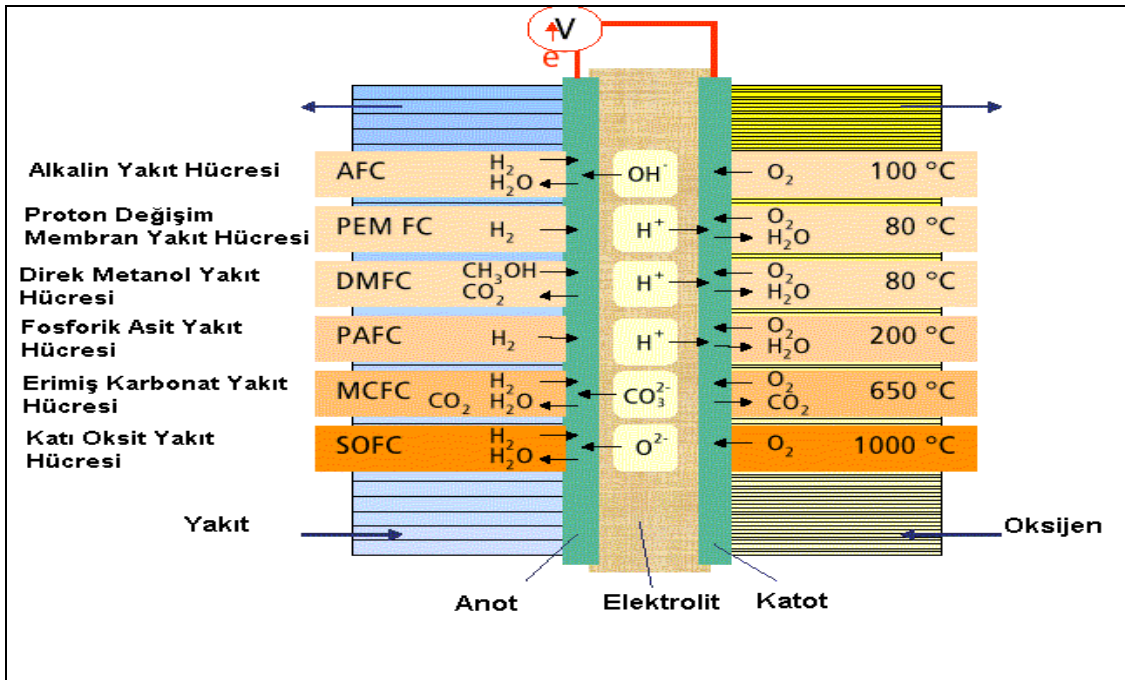
DMFC'nin çalışma prensibinde metanol anot tarafında oksitlenir ve elektron ile proton üretir:



Katotta ise oksijen indirgenerek su oluşturur:



Doğrudan metanol yakıt hücreleri (DMFC), taşınabilirlik açısından çeşitli avantajlar sunsa da bazı teknik sınırlamaları nedeniyle geniş ölçekli uygulamalarda dezavantajlıdır. Bu sistemlerin başlıca zayıf yönlerinden biri, düşük enerji verimliliğidir. Bunun temel nedenlerinden biri ise metanol kross-over olarak bilinen olgudur; metanol, anot tarafında tam olarak reaksiyona girmeden proton değişim membranını geçerek katoda ulaşır ve burada oksijenle reaksiyona girerek verimsiz enerji kaybına yol açar. Bu durum, sadece verimliliği düşürmekle kalmaz, aynı zamanda elektrot malzemelerinde performans bozulmasına da neden olabilir.



Şekil 2.2. Yakıt hücresi türleri (Larminie ve Dicks, 2003, Barbir, 2005)

Ek olarak, DMFC’lerde kullanılan platin bazlı katalizörler hem yüksek maliyetli hem de zamanla performans kaybına uğrayabilen yapılar olduğundan, sistem ömrü ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da sınırlayıcıdır (Larminie ve Dicks, 2003; Barbir, 2005). Bu nedenlerle, DMFC teknolojisi halen daha çok düşük güçlü, kısa süreli enerji ihtiyaçlarına yönelik niş uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.3.3. Yakıt hücresi performans parametreleri

Yakıt hücrelerinin performansı, sistem verimliliği ve kullanım alanları açısından büyük önem taşır. En temel performans göstergesi, hücrenin potansiyel-akım (polarizasyon) eğrisidir. Bu eğri, yakıt hücresinin çıkış potansiyelinin, uygulanan yük akımına bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Hücre potansiyeli, akım arttıkça çeşitli kayıplar nedeniyle düşer. Bu kayıplar, üç ana kategoride incelenir: Aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar ve derişim kayıpları. Aktivasyon kayıpları, elektrokimyasal reaksiyonların başlaması için gereken enerji bariyerlerinden kaynaklanır. Ohmik kayıplar, elektrotlar, elektrolit ve bağlantı elemanlarında elektron ve iyonların hareketine karşı gösterilen dirençten oluşur. Derişim kayıpları ise reaktant maddelerin hücreye ulaşımında yaşanan kısıtlamalardan kaynaklanır. Bu kayıpların toplamı, hücrenin çıkış potansiyelini düşürerek verim kaybına yol açar (Barbir, 2005; Larminie ve Dicks, 2003).

Yakıt hücresinin verimliliği, kimyasal enerjinin ne kadarının elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü gösterir. Teorik olarak yakıt hücrelerinin termodinamik verimi yaklaşık %83 seviyesindedir, ancak pratikte çeşitli kayıplar nedeniyle bu oran genellikle %40 ile %60 arasında değişir. Verim, yakıtın tam olarak kullanılma oranına, çalışma sıcaklığına ve sistemin genel tasarımına bağlıdır. Yüksek sıcaklık yakıt hücreleri genellikle daha yüksek verim sağlarlar ancak malzeme ve dayanıklılık sorunları doğurabilir (Barbir, 2005).

Bunun yanında, yakıt hücresinin güç yoğunluğu performansı da önemlidir. Güç yoğunluğu, birim hacim veya kütle başına elde edilen elektrik gücünü ifade eder ve uygulama alanına göre değişiklik gösterir. Örneğin, otomotiv sektöründe kritik olan yüksek güç yoğunluğu iken, sabit güç uygulamalarında daha çok uzun ömür ve dayanıklılık önem taşır. Yakıt hücresi sistemlerinin çalışma ömrü, elektrotların ve elektrolitin kimyasal ve mekanik stabilitesine bağlıdır. Bu nedenle sistemlerin uzun süreli operasyonlarında performans

kaybını minimize etmek için uygun malzeme seçimi ve bakım stratejileri gereklidir (Larminie ve Dicks, 2003).

Son olarak, yakıt hücrelerinde reaktan gazların saf ve sürekli beslenmesi sistem performansını etkiler. Özellikle proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde, su ve ısı yönetimi kritik bir parametredir; membranın nemli kalması, proton iletimini artırırken aşırı nem veya kuruma hücre performansını düşürür. Ayrıca, çalışma sıcaklığı, basınç ve gaz akış hızlarının optimize edilmesi yakıt hücresinin verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlar (Barbir, 2005).

2.3.4. Yakıt hücresi sistemleri ve yardımcı bileşenler

Yakıt hücreleri, temel olarak elektrokimyasal enerji dönüşümü sağlayan üniteler olmakla birlikte, bu hücrelerin güvenli, verimli ve kesintisiz çalışması için çeşitli sistem bileşenleri ve yardımcı donanımlar gereklidir. Bir yakıt hücresi sisteminin performansı ve kullanım kolaylığı, bu yardımcı bileşenlerin tasarımına ve entegrasyonuna bağlıdır.

Öncelikle, yakıt hücresine beslenen hidrojen ve oksijen gazlarının uygun kalitede, basınçta ve debide sağlanması gerekir. Bu amaçla, gaz temizleme ve arıtma sistemleri kullanılır. Hidrojen gazındaki safsızlıklar (özellikle karbon monoksit) yakıt hücresi katalizörlerini zehirleyerek performans düşüşüne sebep olabilir. Bu nedenle, hidrojen saflaştırma sistemleri kritik bir role sahiptir (Du vd., 2021).

Sistem içinde, gazların hücreye iletilmesi için kompresörler veya pompalar kullanılır. Bu bileşenler, doğru gaz akışını sağlamakla beraber, enerji tüketimi ve sistemin genel verimliliği açısından da önemlidir. Yüksek basınçlı gaz beslemesi, hücre performansını artırabilir ancak bileşenlerin dayanıklılığı ve maliyeti de artar (Barbir, 2005).

Yakıt hücresi çalışma sıcaklığının ve nem oranının kontrolü için termal yönetim sistemleri gerekir. Özellikle proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinde, membranın nemli kalması proton iletimi için en önemli şarttır. Fazla ısınma ise hücre malzemelerine zarar verebilir. Bu nedenle soğutma sistemleri, genellikle su veya hava bazlı soğutma devreleri olarak tasarlanır. Isı geri kazanım sistemleri de yüksek sıcaklıklı yakıt hücrelerinde verimliliği artırmak için kullanılabilir (O'Hayre vd., 2016).

Elektronik kontrol birimleri, yakıt hücresi sistemlerinin işleyişini denetler. Bunlar arasında enerji yönetim sistemi (EMS), gaz akışı kontrolü, sıcaklık ve basınç izleme ve arıza teşhis sistemleri yer alır. Bu kontrol mekanizmaları sayesinde sistem güvenliği sağlanır, performans optimize edilir ve olası arızalar önceden tespit edilir (Liu vd., 2024).

Son olarak, enerji depolama ve dönüştürme bileşenleri, yakıt hücresi sistemlerinin kullanıldığı uygulamaya göre farklılık gösterebilir. Bataryalar veya süperkapasitörler, ani güç taleplerinde destek sağlar ve sistemin dinamik performansını iyileştirir. İnverter ve güç elektroniği devreleri ise doğru akımı alternatif akıma çevirerek elektrik şebekesine veya yük cihazlarına uyum sağlar (Larminie ve Dicks, 2003)

Bu bileşenlerin uyum içinde çalışması, yakıt hücresi sistemlerinin güvenilir, verimli ve uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu nedenle sistem mühendisliği ve entegrasyon yaklaşımları, yakıt hücresi teknolojilerinin pratik uygulamalarda başarısı için hayati öneme sahiptir.

Yakıt hücreleri, PV sistemlerin geceleri ya da düşük ışınım koşullarında enerji üretiminde tamamlayıcı bir rol üstlenebilir. Hücre türü seçimi, sistem entegrasyonu ve yardımcı bileşenlerin optimizasyonu; hibrit enerji sistemlerinde verimlilik, maliyet ve güvenilirliği doğrudan etkiler.

2.4. Batarya Teknolojileri

Batarya sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamada ve enerji yönetiminde esneklik sunmada kritik rol oynar. Fotovoltaik-yakıt hücresi-batarya hibrit sistemlerinde batarya, hem enerji depolayıcı hem de yük dengeleyici görev üstlenir. Bu sistemlerde bataryanın seçimi, performansı ve yönetimi; sistem verimliliği, ömrü ve güvenliği açısından belirleyici öneme sahiptir. Bu bölümde, bataryaların temel çalışma prensibi, batarya türleri, performans parametreleri ve batarya yönetim sistemleri (BMS) kapsamlı biçimde ele alınmıştır.

2.4.1. Bataryaların temel çalışma prensibi

Bir batarya, anot ve katot adı verilen iki elektrot ile elektrolitten oluşan bir elektrokimyasal hücredir. Şarj sırasında elektrik enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek depolanır; deşarj

sırasında ise bu enerji tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek dış devreye aktarılır (Tarascon ve Armand, 2001).

Bu dönüşüm sırasında iyonlar elektrolit aracılığıyla anot ve katot arasında hareket ederken, elektronlar dış devreden geçerek elektrik akımı oluşturur. Şarj-deşarj çevriminde bu sürecin güvenli, kontrollü ve verimli olması için bataryanın hem kimyasal bileşimi hem de yönetim sistemi önemlidir (Nitta vd., 2015).

2.4.2. Batarya türleri

Kurşun-asit bataryalar

19. yüzyıldan beri kullanılan kurşun-asit bataryalar, düşük ilk yatırım maliyeti ve kolay temini ile bilinir. Ancak düşük enerji yoğunluğu (~30–50 Wh/kg), kısa çevrim ömrü (~300–500 döngü) ve çevresel toksisite gibi nedenlerle modern hibrit sistemlerde sınırlı kullanım bulurlar (Linden ve Reddy, 2002).

Lityum-iyon bataryalar

Yüksek enerji yoğunluğu (100–265 Wh/kg), düşük kendi kendinedeşarj oranı, uzun çevrim ömrü (1000–5000 döngü) ve hafiflik gibi avantajları sayesinde günümüz PV destekli enerji sistemlerinde en yaygın kullanılan batarya türüdür (Nagaura ve Tozawa, 1990; Nitta vd., 2015]. Fakat aşırı şarj veyadeşarj durumlarında yangın riski vardır; bu nedenle gelişmiş batarya yönetim sistemleri gereklidir.

Lityum demir fosfat (LiFePO₄)

Lityum-iyon bataryaların bir alt türeviden olan bu bataryalar, daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen (90–160 Wh/kg), daha uzun çevrim ömrü (~2000–7000 döngü) ve termal kararlılık sayesinde güneş enerjili şebeke dışı uygulamalarda popüler hale gelmiştir (Liu vd., 2021).

Nikel-Kadmiyum (NiCd) ve Nikel-Metal Hidrit (NiMH)

NiCd bataryalar aşırı sıcaklık dayanımıyla öne çıkar, fakat kadmiyumun çevresel zararı nedeniyle kullanımı azalmıştır. NiMH bataryalar ise daha çevreci alternatiftir, fakat lityum-iyon teknolojisine göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptir (Dunn vd., 2011).

Çizelge 2.1. Batarya çeşitlerinin karşılaştırılması (Özcan, vd., 2021)

Pil Türü	Üstün Yönleri	Zayıf Yönleri
Kurşun Asit (Pb-Asit)	-Düşük fiyat -Yüksek özgül güç	-Düşük özgül enerji -Kısa yaşam ömrü -Yüksek bakım maliyeti
Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu	-Geri dönüşüm maliyeti yüksek -Pahalı kadmiyum -Kadmiyumun zehirli madde olması -Çevreye zararlı -Hafıza etkisi
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	-Yüksek enerji yoğunluğu -Güvenli -Uzun yaşam ömrü	-Yüksek fiyat -Kendi kendine deşarj yüksek -Hafıza etkisi
Lityum-İyon (Li-İyon)	-Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu -Yüksek özgül enerji ve özgül güç -Yüksek nominal voltaj	-Kullanım ömrü az -Güvenilirlik -Yüksek maliyet
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	-Yüksek çevrim ömrü -Yüksek özgül güç -Düşük maliyet -Uzun ömürlü	-Düşük özgül enerji

2.4.3. Performans parametreleri

Batarya sistemlerinin performansını değerlendirmek için çeşitli teknik parametreler dikkate alınır. Bu parametreler, bataryanın kapasitesi, verimliliği, ömrü ve kullanım amacına uygunluğunu belirlemede kritik rol oynar. Özellikle fotovoltaik (PV) ve yakıt hücresi destekli hibrit sistemlerde, bataryanın doğru şekilde seçimi ve tasarımı bu parametrelerin dikkatli analizini gerektirir.

İlk olarak, enerji yoğunluğu (Wh/kg veya Wh/L), bataryanın birim ağırlık veya hacim başına ne kadar enerji depolayabildiğini gösterir. Bu değer, taşınabilirlik ve alan kullanımı açısından özellikle önemlidir. Lityum-iyon bataryalar genellikle yüksek enerji yoğunlukları sayesinde birçok mobil ve şebekeden bağımsız uygulamada tercih edilmektedir (Nitta vd., 2015).

Güç yoğunluğu ise (W/kg) bataryanın kısa sürede ne kadar enerji sağlayabileceğini ifade eder. Bu parametre, ani yük artışlarının olduğu uygulamalarda (örneğin elektrikli araçlarda) büyük önem taşır. Yüksek güç yoğunluğuna sahip bataryalar, hızlı deşarj yeteneğine sahiptir ancak bu durum, çevrim ömrü üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Tarascon ve Armand, 2001).

Çevrim ömrü, bataryanın tam şarj ve deşarj döngülerini kaç defa gerçekleştirebileceğini tanımlar. Çevrim sayısı arttıkça kapasite zamanla azalır. Lityum demir fosfat (LiFePO₄) gibi batarya türleri, 2000'in üzerinde döngüye ulaşabilirken, kurşun-asit bataryalar genellikle 300–500 çevrimle sınırlıdır (Liu vd., 2021).

Verimlilik, bataryanın şarj olurken aldığı enerji ile deşarj sırasında verdiği enerji arasındaki oranı temsil eder. İdeal sistemlerde verim %100 olsa da pratikte bu oran çoğu zaman %90–95 aralığındadır. Kurşun-asit bataryalar genellikle %70–85 verime sahipken, lityum-iyon bataryalar %95'e kadar çıkabilir (Dunn vd., 2011).

Bir diğer önemli parametre şarj ve deşarj oranıdır; bu genellikle C-oranı ile ifade edilir. Örneğin, 1C oranında şarj edilen bir batarya, kapasitesini 1 saatte tam olarak doldurur. Daha yüksek C oranları hızlı şarj veya deşarj anlamına gelir, fakat bu durum hücredeki kimyasal stresi artırarak ömrü kısaltabilir (Piller vd., 2001).

Sıcaklık dayanımı ve güvenlik de göz önünde bulundurulması gereken parametrelerdendir. Aşırı sıcaklık veya düşük sıcaklık, batarya performansını düşürebilir ve bazı kimyasal sistemlerde termal kaçak gibi ciddi güvenlik risklerine yol açabilir. Bu nedenle özellikle lityum tabanlı sistemlerde sıcaklık izleme ve kontrol sistemleri ile birlikte çalışmak zorunludur (Tarascon ve Armand, 2001).

Bu performans parametreleri birlikte ele alındığında, batarya teknolojisinin yalnızca kapasite değil; güvenlik, ömür, hız ve verim gibi çok boyutlu kriterlere göre seçilmesi gerektiği ortaya çıkar. Bu da özellikle hibrit enerji sistemlerinde batarya tasarımının sistem mühendisliği açısından entegre bir bakış açısı gerektirdiğini gösterir.

Çizelge 2.2. Batarya Çeşitlerinin Parametreleri (Özcan, vd., 2021)

Batarya Türü	Nominal Potansiyel (V)	Özgül Enerji (Wh kg ⁻¹)	Hacimsel Enerji Yoğunluğu (Wh L ⁻¹)	Özgül Güç (W kg ⁻¹)	Yaşam Döngüsü	Kendi Kendine Deşarj (aylık %)	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Kurşun Asit (Pb-Asit)	2,0	35	100	180	1000	< 5	-15 ila +50
Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd)	1,2	50-80	300	200	2000	10	-20 ila +50
Nikel Metal Hidrit (Ni-MH)	1,2	70-95	180-220	200-300	< 3000	20	-20 ila +60
Lityum-İyon (Li-İyon)	3,6	118-250	200-400	200-430	2000	< 5	-20 ila +60
Lityum-Demir Fosfat (LiFePO ₄) (LFP)	3,2	90-140	220	2000-4500	> 3000	< 5	-20 ila +70

2.4.4. Batarya yönetim sistemleri (BMS)

Modern batarya sistemlerinde güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir kullanım sağlayabilmek için Batarya Yönetim Sistemleri hayati öneme sahiptir. Bu sistemler birden fazla hücreden oluşan batarya paketlerinin çalışmasını sürekli izleyerek performansı optimize eder ve oluşabilecek arızaları önleyici işlevler üstlenir.

En temel düzeyde bir BMS, bataryanın potansiyel, sıcaklık, akım, şarj durumu (SOC) ve sağlık durumu (SOH) gibi kritik parametrelerini izler. Bu veriler, batarya hücrelerinin dengesini sağlamak, aşırı şarj/deşarj durumlarını engellemek ve yangın gibi güvenlik risklerinin önüne geçmek için kullanılır (Piller vd., 2001).

Özellikle lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve kimyasal kararsızlıkları nedeniyle gelişmiş izleme sistemlerine ihtiyaç duyar. Lityum batarya hücrelerinin her biri,

BMS tarafından ayrı ayrı izlenir ve potansiyelleri birbirine yaklaştırılarak hücre dengesi (cell balancing) sağlanır. Aktif dengeleme sistemlerinde enerji bir hücreden diğerine aktarılırken, pasif dengeleme sistemlerinde fazla enerji direnç yoluyla ısı olarak harcanır (Liu vd., 2021)

BMS ayrıca, batarya kapasitesinin zamanla nasıl azaldığını (degradasyon eğrileri) takip ederek, sağlık durumu (SOH) tahminleri ile kullanıcıyı veya sistem kontrol ünitesini bilgilendirir. Bu, özellikle uzun süreli enerji depolama sistemlerinde bakım planlaması açısından önemlidir (Piller vd., 2001).

Batarya sistemleri, sadece elektriksel değil, aynı zamanda termal risklere de açıktır. Aşırı ısınma, termal kaçak gibi ciddi güvenlik sorunlarına neden olabilir. BMS, batarya paketinde yer alan sıcaklık sensörlerinden aldığı verilerle gerekli durumlarda sistemi kapatabilir veya soğutma sistemlerini devreye alabilir (Dunn vd., 2011).

Günümüzde gelişmiş BMS yazılımları, yapay zekâ destekli veri analizi, bulut tabanlı izleme ve uzaktan güncelleme gibi fonksiyonları da içerecek şekilde geliştirilmektedir. Bu gelişmeler, batarya sistemlerinin sadece güvenliğini değil, aynı zamanda akıllı şebeke ve enerji yönetimi sistemleriyle entegrasyonunu da kolaylaştırmaktadır (Nitta vd., 2015).

Sonuç olarak, bir batarya sisteminin teknik başarısı yalnızca hücre kimyasıyla değil, aynı zamanda BMS'nin hassasiyet, doğruluk ve tepki süresiyle de doğrudan ilişkilidir. Özellikle fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi-batarya hibrit sistemlerinde BMS, sistemin omurgası konumundadır.

2.5. Fotovoltaik-Elektrolizör-Yakıt Hücresi-Batarya Hibrit Sistemleri

Geleneksel fotovoltaik (PV) sistemler yalnızca gün ışığıyla enerji üretir; bu nedenle enerji üretimi ile tüketim arasındaki zaman farkı büyük bir sistem zorluğu oluşturur. PV sistemlere batarya entegre edilerek bu dengesizlik kısmen azaltılsa da uzun süreli depolama ve gece enerji üretimi için alternatif sistem bileşenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen Fotovoltaik–Elektrolizör–Yakıt Hücresi–Batarya Hibrit Sistemleri, enerji üretiminde süreklilik ve esneklik sağlamak adına öne çıkan ileri teknoloji çözümlerdendir (İbrahim vd., 2008).

Bu sistemde PV paneller, gündüz saatlerinde elektrik üretir. Tüketim fazlası enerji, suyu ayrıştırmak için kullanılan elektrolizör sistemine yönlendirilir. Elektroliz işlemi ile elde edilen hidrojen gazı, özel tanklarda depolanır. Güneş ışığının yeterli olmadığı durumlarda ise hidrojen, yakıt hücresine beslenerek tekrar elektrik üretimi sağlanır. Ayrıca sistemde yer alan batarya, ani yük değişimlerine karşı tampon görevi üstlenerek Potansiyel-kararlılığını artırır (Serra vd., 2013).

Bu tür sistemlerin en önemli avantajı, hidrojeni bir enerji taşıyıcısı olarak kullanarak enerjinin uzun süreli ve yüksek yoğunlukta depolanmasını mümkün kılmasıdır. Elektrolizör ve yakıt hücresi bileşenleri, doğru seçildiği ve yönetildiği takdirde sistem, tamamen yenilenebilir, düşük karbonlu ve modüler bir yapıya kavuşur (Parra vd., 2015).

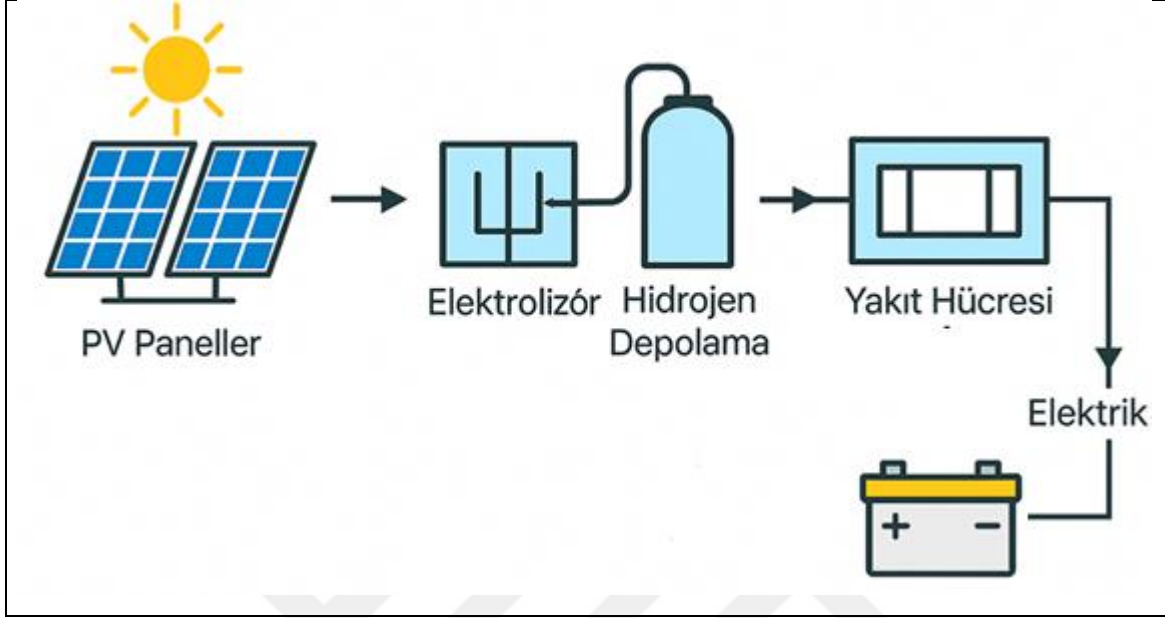
Sistem tasarımında kullanılacak elektrolizör türü, sistem verimliliğini doğrudan etkiler. Alkali elektrolizörler düşük maliyetlidir ancak daha yavaş tepki verirken, proton değişim membranlı (PEM) elektrolizörler daha hızlı ve yüksek saflıkta hidrojen üretir. Bu fark, PV kaynaklı dalgalı enerjiyle çalışan sistemlerde PEM elektrolizörleri avantajlı kılmaktadır (İbrahim vd., 2008).

Enerji yönetimi bu sistemlerde hayati rol oynar. Gün boyunca gelen enerji önce yükleri karşılamaya, ardından bataryaları şarj etmeye, son olarak ise elektroliz işlemi ile hidrojen üretmeye yönlendirilmelidir. Bu öncelik sıralaması, kural tabanlı enerji yönetim stratejileriyle kontrol edilir. Ayrıca, sistemin maliyet etkinliği açısından hidrojen üretim ve tüketim senkronizasyonu dikkatle yapılmalıdır (Serra vd., 2013).

Bununla birlikte bu sistemlerin bazı zorlukları da vardır. Elektrolizör ve yakıt hücresi bileşenlerinin yüksek maliyetli olması, sistemin ilk yatırım bedelini artırmaktadır. Ayrıca hidrojenin depolanması ve taşınması da özel güvenlik önlemleri gerektirir. Ancak bu teknolojilerin geliştirilmesiyle birlikte, bu hibrit yapıların kırsal alanlar, ada şebekeleri ve enerji özerkliği istenen yerler için ideal çözümler sunduğu literatürde sıkça belirtilmektedir (Parra vd., 2015).

Sonuç olarak, Fotovoltaik–Elektrolizör–Yakıt Hücresi–Batarya Hibrit Sistemleri, yalnızca elektrik üretimi değil aynı zamanda enerji depolama, dönüşüm ve yönetimi açısından

entegre çözümler sunar. Bu sistemler, karbon emisyonlarını azaltırken enerji arz güvenliğini artırmak için kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.3. Fotovoltaik–elektrolizör–yakıt hücresi–batarya hibrit sistemi

2.5.1. Sistem mimarisi ve enerji akış yapısı

Bu hibrit sistemin temel mimarisi; birincil enerji kaynağı olarak fotovoltaik paneller, enerji dönüştürücü olarak elektrolizör, enerji taşıyıcı olarak hidrojen, yedek güç ünitesi olarak yakıt hücresi ve kısa vadeli enerji depolayıcı olarak batarya bileşenlerinden oluşur. Sistem, çevresel koşullara ve yük ihtiyacına göre bu bileşenler arasında enerji yönlendirmesi yapar. Güneşli saatlerde PV paneller öncelikle mevcut yükleri besler. Yük ihtiyacından fazla üretilen elektrik ise bataryayı şarj eder. Batarya doluysa, fazla enerji elektrolizör vasıtasıyla kullanılarak su molekülleri ayrıştırılır ve hidrojen gazı elde edilir. Bu hidrojen, düşük ısıtım veya gece koşullarında yakıt hücresine beslenerek tekrar elektrik üretiminde kullanılır (İbrahim vd., 2008; Parra vd., 2015).

Fotovoltaik (PV), yakıt hücresi ve batarya teknolojilerinin entegrasyonu, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliği ve güvenilirliğini artırmak amacıyla geliştirilmiş karma sistemlerdir. Bu hibrit sistemler, her bir teknolojinin avantajlarını kullanarak, enerji arz güvenliğini maksimize eder ve sistem verimliliğini artırır.

Hibrit sistemlerde PV paneller, güneş enerjisinden elektrik üretirken; yakıt hücreleri, hidrojenin elektrokimyasal dönüşümüyle enerji sağlar. Bataryalar ise enerjiyi depolayarak ani talep artışlarına ve PV/yakıt hücresi çıkışındaki dalgalanmalara karşı tampon görevi görür (Kabalcı ve Özdemir, 2018).

Bu sistemlerde, enerji yönetimi ve kontrol stratejileri, kaynakların verimli kullanımı ve batarya ömrünün uzatılması açısından kritik öneme sahiptir (Pilo vd., 2009).

2.5.2. Elektrolizör teknolojileri ve seçimi

Elektrolizör, suyu bileşenlerine ayırarak hidrojen ve oksijen üreten elektro-kimyasal cihazdır. Bu sistemlerde en çok kullanılan iki tip elektrolizör; Alkali Elektrolizör ve PEM (Proton Değişim Membranlı) Elektrolizördür.

Alkali elektrolizörler daha düşük maliyetlidir ve endüstride yaygındır. Ancak sistem tepkisi daha yavaştır ve değişken enerji kaynaklarıyla çalışması sınırlıdır. PEM elektrolizörler ise daha kompakt, hızlı tepki veren ve yüksek saflıkta hidrojen üretebilen sistemlerdir. PV kaynaklı değişkenliklere daha uyumludur. Bu nedenle PV tabanlı hibrit sistemlerde genellikle PEM tercih edilir (Serra vd., 2013).

2.5.3. Hidrojen depolama ve yakıt hücresi ile elektrik üretimi

Elektrolizle üretilen hidrojen gazı, basınçlı tanklar, metal hidrür tüpler veya sıvı hidrojen sistemleri gibi yöntemlerle depolanabilir. Hidrojenin güvenli ve yüksek yoğunlukta depolanması, sistemin kesintisiz çalışmasını sağlayan temel unsurlardandır.

Gece veya güneşsizlik durumlarında, depolanan hidrojen, proton değişim membranlı yakıt hücresine (PEMFC) beslenerek elektrik enerjisine dönüştürülür. PEMFC sistemleri düşük sıcaklıkta çalışmaları ve hızlı tepki verebilmeleri sayesinde hibrit yapılar için idealdir. Aynı zamanda çıkan atık ürün olan su, çevre dostu bir sistem döngüsü oluşturur (Barbir, 2005).

2.5.4. Batarya rolü ve dinamik güç dengelemesi

Batarya, hem kısa vadeli enerji depolayıcı hem de sistemin hızlı tepki ihtiyacına cevap veren tampon bir bileşendir. PV çıkışındaki ani dalgalanmalar veya yükteki geçici artışlarda batarya devreye girer ve sistem kararlılığını sağlar. Ayrıca, yakıt hücresinin yavaş tepki karakteristiğini dengelemek amacıyla batarya sistemleri yüksek akım çıkışını geçici olarak üstlenir. Bu hibrit yapı sayesinde sistem, hem yüksek tepki hızı hem de uzun vadeli enerji sürekliliği sağlayabilir (Dunn vd., 2011).

2.5.5. Enerji yönetim stratejileri

Fotovoltaik–Elektrolizör–Yakıt Hücresi–Batarya hibrit sistemleri, birbirinden farklı tepki sürelerine, depolama kapasitesine ve üretim profiline sahip enerji bileşenlerini aynı yapı içinde bulundurur. Bu nedenle bu sistemlerde enerji yönetimi, hem teknik verimliliği hem de sistem güvenilirliğini belirleyen en önemli unsurlardan biridir (Serra vd., 2013).

Enerji yönetim stratejileri, sistemdeki her bir enerji bileşeninin ne zaman ne kadar ve hangi öncelik sırasına göre devreye alınacağını belirleyen kurallar bütünüdür. Bu stratejiler sayesinde, PV üretim fazlası boşa gitmez, batarya ömrü korunur ve yakıt hücresi sadece gerekli durumlarda çalıştırılarak hidrojen tüketimi optimize edilir (Parra vd., 2015).

Kural tabanlı stratejiler

En yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan kural tabanlı stratejilerde, enerji akışı önceden tanımlanmış sabit kurallara göre yönetilir. Örneğin:

- Gündüz PV üretimi varsa, önce yükler beslenir,
- Fazla enerji varsa batarya şarj edilir,
- Batarya doluysa elektrolizör çalıştırılır,
- Güneş yoksa önce batarya, o da yetersizse yakıt hücresi kullanılır.

Bu yöntem uygulama kolaylığı ve düşük hesaplama gereksinimi nedeniyle öne çıksa da değişken koşullarda her zaman en verimli çözümü sunmaz (İbrahim vd., 2008).

Optimizasyon tabanlı stratejiler

Matematiksel modeller ve yazılımlar yardımıyla sistemin gerçek zamanlı durumu analiz edilerek, enerji akışı maksimum verimlilik, minimum maliyet veya maksimum ömür gibi hedeflere göre optimize edilir. Bu stratejilerde genetik algoritmalar, doğrusal programlama ve yapay zekâ gibi yöntemler kullanılabilir.

Örneğin, güneş ışıınımı tahminiyle birlikte sistemin gelecekteki enerji üretimi öngörölür ve buna göre batarya boşlukları ya da elektrolizör devreye alma kararları alınır. Bu sayede, sistem sadece bugünkü değil, gelecek saatlerin enerji dengesini de göz önünde bulundurarak çalışır (Serra vd., 2013).

Tahmine dayalı yaklaşımlar

Bu stratejide, sistemin geçmiş verileri ve tahmini girdileri kullanılarak gelecekteki davranışı modellenir. Ardından bu modele göre en uygun kontrol sinyalleri hesaplanır. Özellikle hava durumu, tüketim profili ve şebeke fiyat değişimleri gibi dışsal faktörlerin hesaba katılması mümkündür.

Tahmine dayalı stratejiler, sistemin hem dinamik hem de kararlı çalışmasını sağlar. Fakat yüksek işlem gücü ve güvenilir veri tahmini gerektirir (Parra vd., 2015).

Maliyet/verimlilik optimizasyonu

Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi-batarya hibrit sistemlerinde, farklı enerji dönüşüm ve depolama yollarının birlikte çalışması sistemin teknik karmaşıklığını artırmakla birlikte maliyet açısından da dikkatli bir planlamayı zorunlu kılar. Bu nedenle sistemin yalnızca teknik verimle değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlikle de optimize edilmesi gerekir. Bu bağlamda geliştirilen maliyet/verimlilik optimizasyonu stratejileri, sistemdeki her bir bileşenin çalışma zamanını, yoğunluğunu ve sıklığını hem verim hem de maliyet parametreleri üzerinden değerlendirerek enerji akışını düzenlemeyi hedefler (Parra vd., 2015).

Bu stratejide öncelikle sistemin tüm değişkenleri tanımlanır: güneş ışıınımı seviyesi, elektrik tüketim profili, hidrojen depolama seviyesi, batarya doluluk durumu, elektrik birim maliyeti

(şebekeye bağlı sistemlerde), ekipman ömrü ve bakım maliyetleri gibi faktörler modele dahil edilir. Daha sonra matematiksel optimizasyon teknikleri (örneğin doğrusal programlama, genetik algoritmalar veya yapay sinir ağları) kullanılarak en düşük toplam maliyeti sağlayan enerji yönetim kararları hesaplanır (Serra vd., 2013).

Örneğin güneşin bol olduğu bir saatte, doğrudan yükleri beslemek yerine önce bataryanın şarj edilmesi, daha sonra elektrolizörle hidrojen üretilmesi gerekebilir. Ancak bu karar, bataryanın çevrim ömrünü tüketmeye değer mi sorusu ile değerlendirilir. Benzer şekilde, batarya dolu ve hidrojen seviyesi düşükse, PV enerjisinin doğrudan elektrolizöre yönlendirilmesi daha verimli olabilir. Bu kararlar, sistemin mevcut koşullarına göre dinamik olarak optimize edilir.

Sonuç olarak maliyet/verimlilik optimizasyonu, sistemin sadece enerji ihtiyacını karşılamasını değil, aynı zamanda uzun vadeli ekonomik faydayı maksimize etmesini sağlar. Bu strateji özellikle yatırım geri dönüş süresi kısa tutulmak istenen uygulamalarda önemlidir (Parra vd., 2015).

Enerji öncelikleme ve öncelik matrisleri

Bazı uygulamalarda enerji bileşenleri arasında önceliklendirme yapılır. Örneğin, acil durum yükleri için batarya her zaman hazır tutulur; bu yüzden hidrojen üretimi yalnızca batarya doluyken başlatılır. Bu tür öncelik matrisleri, sistemin görev-kritik uygulamalar için güvenilirliğini artırır (Zhou vd., 2010).

Enerji yönetim stratejileri, hibrit sistemlerin yalnızca verimli değil, aynı zamanda güvenli, sürdürülebilir ve maliyet-etkin şekilde çalışmasını mümkün kılar. Uygulama türüne göre farklı stratejiler tercih edilebilir. Kural tabanlı sistemler basitlik sunarken, optimizasyon ve tahmine dayalı yaklaşımlar daha karmaşık ama daha üstün sonuçlar verebilir. Fotovoltaik–Elektrolizör–Yakıt Hücresi–Batarya sistemlerinin başarısı, yalnızca donanım bileşenlerinin değil, bu bileşenlerin akıllı bir enerji yönetimi algoritması ile bütünleştirilmesine bağlıdır.

2.5.6. Sistem bileşenlerinin entegrasyonu

Fotovoltaik–elektrolizör–yakıt hücresi–batarya hibrit sistemlerinde başarı, yalnızca her bileşenin ayrı ayrı verimli çalışmasına değil; bu bileşenlerin birbirleriyle uyumlu, senkronize ve akıllı bir şekilde entegre edilmesine bağlıdır. Bu sistem entegrasyonu, hem donanım hem de yazılım düzeyinde gerçekleştirilir ve genel sistem performansını doğrudan etkiler (Serra vd., 2013).

Donanım düzeyinde entegrasyon, farklı enerji kaynaklarının (PV, batarya, yakıt hücresi) uygun şekilde birbirine bağlanmasını ve güç elektroniği ara birimleri (örneğin DC-DC dönüştürücüler, inverterler, akü şarj kontrolörleri) aracılığıyla enerji akışının düzenlenmesini içerir. Fotovoltaik sistem ile elektrolizör arasında DC bağlantı kurularak enerji kayıpları minimize edilir. Aynı şekilde batarya ile yükler arasında çift yönlü enerji akışı sağlayan kontrolörler yer alır (İbrahim vd., 2008).

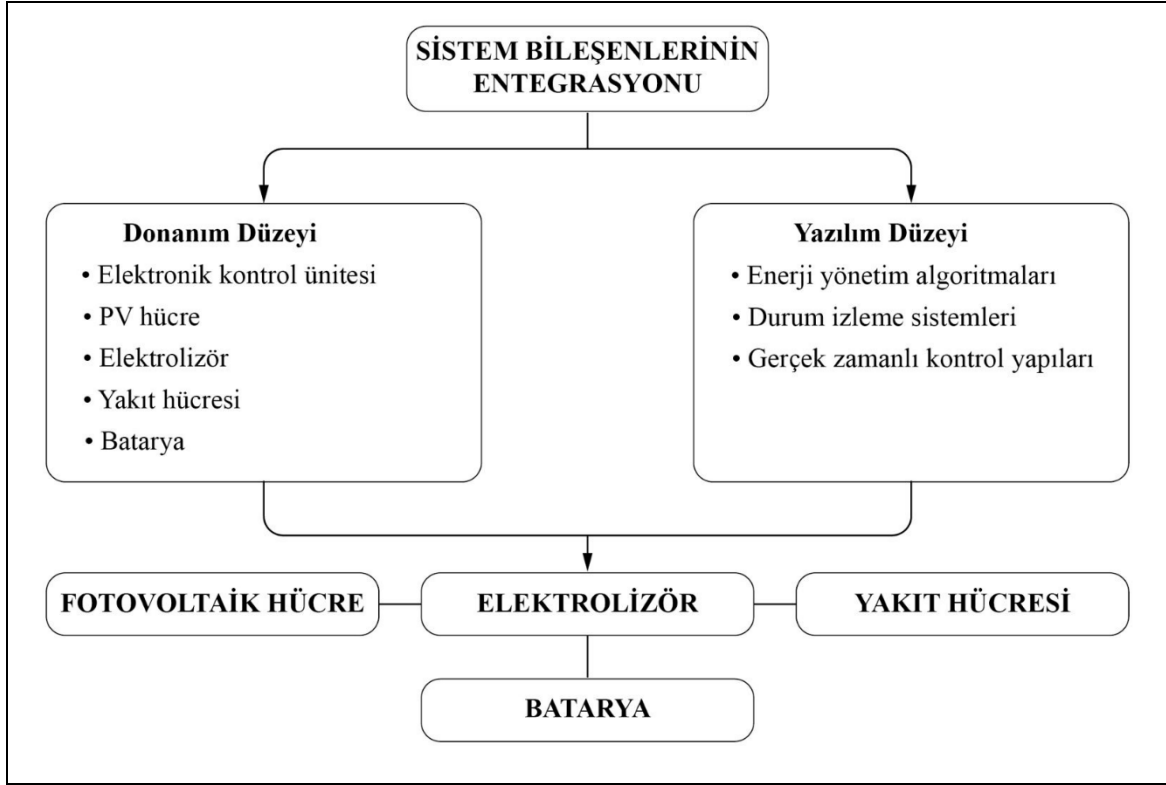
Yazılım düzeyinde entegrasyon ise enerji yönetim algoritmaları, durum izleme sistemleri (BMS, EMS) ve gerçek zamanlı kontrol yapıları ile sağlanır. Sistem, PV üretimini, batarya seviyesini, hidrojen depolama miktarını ve yük talebini aynı anda izleyerek hangi bileşenin devreye gireceğine karar verir. Bu entegrasyon olmadan, sistem bileşenleri birbirinden bağımsız çalışarak toplam verimi düşürür ve enerji kayıplarına yol açar (Parra vd., 2015).

Örneğin, güneş enerjisinin yeterli olduğu bir zamanda hem yük beslenebilir hem batarya şarj edilebilir hem de fazla enerji ile hidrojen üretilir. Ancak bu işlemlerin öncelik sırasına göre koordine edilmesi, yalnızca entegrasyon sayesinde mümkündür. Aynı şekilde, gece saatlerinde hidrojen yakıt hücresinin ne zaman devreye gireceği, batarya seviyesiyle birlikte değerlendirilir. Bu kararların doğru alınması için tüm bileşenler arasında karşılıklı veri iletişimi ve eşgüdüm gereklidir (Zhou vd., 2010).

Ayrıca, fiziksel entegrasyon kadar zamanlama da önemlidir. Örneğin elektrolizörlerin devreye girme süresi ile PV üretim artışı eşzamanlı olmalıdır. Yakıt hücresi sistemlerinin yavaş dinamiklerine karşı batarya, ara tampon olarak çalışarak sistem geçişlerini yumuşatır.

Sonuç olarak, sistem bileşenlerinin entegrasyonu, hibrit sistemin yalnızca parçalarının toplamı olmaktan çıkıp optimum verim, güvenlik ve sürdürülebilirlik sunan bir enerji

çözümüne dönüşmesini sağlar. Bu entegrasyonun sağlıklı şekilde tasarlanması, enerji yönetiminin başarısı kadar sistem ömrünü ve yatırım geri dönüşünü de etkiler (Serra vd., 2013).



Şekil 2.4. Sistem bileşenlerinin entegrasyonu

2.5.7. Hibrit sistemlerin avantajları ve dezavantajları

Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi-batarya hibrit sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarından daha etkin ve kesintisiz yararlanmak amacıyla geliştirilmiş bütünleşik çözümler sunar. Bu sistemlerin en büyük avantajlarından biri, enerji üretim süreksizliği gibi doğal kısıtları, farklı bileşenlerin görev paylaşımıyla aşabilmesidir. Gündüz saatlerinde güneşten elde edilen enerji, doğrudan yükleri beslemenin yanı sıra bataryaları şarj ederken ve elektrolizör vasıtasıyla hidrojen üretiminde kullanılırken; gece veya düşük ısıtım koşullarında bataryalar ve yakıt hücresi devreye girerek sistemin enerji ihtiyacını kesintisiz karşılar. Böylece sürekli ve güvenilir bir enerji arzı sağlanmış olur (Parra vd., 2015).

Hibrit yapının bir diğer önemli katkısı, fazla güneş enerjisinin doğrudan hidrojen formunda uzun vadeli olarak depolanabilmesidir. Kısa süreli talepler için batarya, uzun süreli enerji

ihtiyaçları için ise yakıt hücresi-hidrojen hattı görev üstlenir. Bu durum, güneş enerjisinin süreksiz doğasının dengelenmesine yardımcı olur. Aynı zamanda fosil yakıt kullanılmadığı için sistem karbon salımı yapmaz ve çevre dostu bir çözüm haline gelir (Serra vd., 2013). Bileşenlerin modüler ve ölçeklenebilir yapıları sayesinde sistem küçük bir evden büyük sanayi uygulamalarına kadar farklı ölçeklerde kullanılabilir. Ayrıca dış enerji kaynaklarına ihtiyaç duymadan çalışabilmesi, özellikle şebekeden uzak bölgeler için büyük avantaj sağlar (İbrahim vd., 2008).

Öte yandan, bu sistemlerin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. En belirgin zorluk, yüksek ilk yatırım maliyetidir. Elektrolizör, yakıt hücresi, batarya ve hidrojen depolama sistemlerinin maliyetleri, geleneksel sistemlere göre oldukça yüksektir. Ayrıca çok sayıda bileşenin senkronize çalışması için karmaşık kontrol algoritmalarına ve güçlü bir enerji yönetim sistemine ihtiyaç vardır. Uygun şekilde entegre edilmemiş sistemlerde verimlilik kayıpları yaşanabilir (Zhou vd., 2010).

Buna ek olarak, sistem bileşenleri arasındaki enerji dönüşümleri sırasında meydana gelen kayıplar nedeniyle toplam sistem verimliliği %30–40 gibi sınırlı değerlere inebilir. Örneğin, PV'den gelen enerji önce elektrolizörle hidrojen üretmekte, ardından yakıt hücresiyle yeniden elektriğe dönüştürülmektedir; bu zincirdeki her adımda belirli oranlarda enerji kaybı oluşur. Ayrıca hidrojenin yanıcı özellikleri, yüksek basınçta depolama gerekliliği ve güvenlik protokollerinin karmaşıklığı da sistemin uygulanabilirliğini etkileyen faktörlerdendir (Zeng ve Zhang, 2010). Son olarak, bu tür sistemlerin kurulumu, işletilmesi ve bakımı teknik bilgi gerektirir; özellikle elektrolizör ve yakıt hücresi gibi teknolojiler, uzmanlık ve düzenli izleme ister.

Sonuç olarak, fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi-batarya hibrit sistemleri sürdürülebilir enerji üretimi açısından büyük potansiyele sahiptir. Ancak bu potansiyelin gerçeğe dönüşmesi, maliyetlerin düşürülmesi, sistem kontrol yapılarının geliştirilmesi ve kullanıcı dostu tasarımların yaygınlaştırılmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Çalışmada elektrikli araç teknolojisinin temelinde yatan unsurlardan biri olan hibrit batarya sistemine alternatif olacak yeni bir fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi-batarya hibrit sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde Güneş panelinden gelen enerji genel denetleyici ile hem batarya aktarılırken hem de elektrolizöre aktarılarak elektroliz için gerekli olan enerji için

harcanabilmektedir. Elektroliz ile gerçekleşen reaksiyonların sonucunda teorik olarak diğerk yakıt hücrelerinden iki kat daha fazla elektrik üretilmesi planlanmaktadır. Bu şekilde üretilcek olan enerji genel denetleyici ile bataryaya aktarılarak sistem için gerekli olan enerji ihtiyacı doğrudan yakıt hücresinden karşılanmış olacaktır.

3. GEREÇLER VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Fotovoltaik panel

Fotovoltaik (PV) enerji sistemlerinin temel yapı taşı oluşturarak ve güneş ışığını doğrudan doğruya elektrik enerjisine dönüştüren bir enerji üretim birimidir. Hibrit sistemlere entegrasyon bağlamında değerlendirildiğinde, güneş modülü bu sistemin yenilenebilir enerji kaynağıdır ve sistemin elektrolizör, batarya ve diğer bileşenlerini beslemek için gerekli olan doğru akımı (DC) sağlar. Böylece, Güneş modülleri sayesinde, dış şebekeye ihtiyaç duymadan sürdürülebilir ve temiz enerji üretimi gerçekleştirilir.



Şekil 3.1. Fotovoltaik panel

Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik (PV) panel, Proton Değişim Membranı Elektrolizör Hücresi (PEMEC) ve Alkali Elektrolizör Hücresi (AEC) elektrolizörün çalışması için gerekli elektrik enerjisini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Panel, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek sistemin enerji kaynağını oluşturmuştur.

PV panelin temel teknik özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Hücre Alanı: 90 cm²
- Açık Devre Potansiyeli (Voc): 2 V
- Çıkış Akımı: 350 mA
- Maksimum Güç Noktası (MGN): 500 mW

Panelin bu özellikleri, deneysel çalışmalarda elektrolizörün nominal çalışma koşullarını sağlayacak düzeyde enerji üretimine olanak tanımıştır.

3.1.2. PEM elektrolizör hücresi (PEMEC)

PEM elektrolizör hücresi, suyun bileşenlerine ayrıştırılması için elektrik enerjisi kullanılan bir elektroliz türüdür. Bu sistem, proton değişim membranı (PEM) adı verilen yarı geçirgen, iyon iletkeni özelliğine sahip bir polimer membran aracılığıyla çalışır. PEM elektrolizörler, özellikle yüksek saflıkta hidrojen üretimi, kompakt yapı ve hızlı tepkime süresi gibi avantajları nedeniyle günümüzde en yaygın kullanılan elektroliz teknolojilerinden biri haline gelmiştir.

Bu hücreler, anot ve katot adı verilen iki elektrot arasında yer alan membran aracılığıyla suyu ayrıştırır. Sisteme gönderilen saf su, anot tarafında elektrik enerjisi ile oksijen, proton ve elektronlara ayrılır. Oksijen gazı dışarı atılırken, oluşan protonlar membran üzerinden katoda geçer. Katotta ise bu protonlar, anot tarafında ayrılan elektronlarla birleşerek moleküler hidrojen gazına dönüşür. Böylece elektrik enerjisi yardımıyla su molekülleri, hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılmış olur.

PEM elektrolizörlerde genellikle iridyum veya rutenyum gibi asil metaller anot elektrotlarında, platin ya da platin kaplı karbon gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemeler ise katot tarafında kullanılır. Proton değişim membranı olarak yaygın şekilde tercih edilen Nafion, florlu polimer bazlı yapısı sayesinde kimyasal ve termal dayanıklılığı yüksek bir malzemedir. Bu yapı, yüksek akım yoğunluklarında kararlı çalışmasını sağlar ve iyon iletkenliğini uzun süre korur.

Ayrıca, PEM elektrolizörlerin düşük sıcaklık aralığında (50–80 °C) işletilebilmesi, sistemin hem güvenli hem de enerji açısından verimli olmasını sağlar. Bu özellikler, yenilenebilir enerji kaynakları (örneğin fotovoltaik sistemler) ile entegre edildiğinde, çevre dostu ve yüksek verimlilikte yeşil hidrojen üretimi için önemli bir avantajdır.

PEM elektrolizörlerin en önemli avantajlarından biri, çok yüksek saflıkta hidrojen gazı (%99,999) üretebilmeleridir. Ayrıca küçük ve modüler yapıları sayesinde taşınabilir

uygulamalarda da kullanılabilirler. Bunun yanında, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla, özellikle de fotovoltaik sistemlerle kolaylıkla entegre edilebilirler.

Bunun yanı sıra, PEM membranların ömürleriin sınırlı olması zamanla performans kaybına sebep olabilir ve bu durum bir dezavantajdır. Yine de, çevresel sürdürülebilirlik bakış açısından PEM elektrolizör teknolojisi, karbon emisyonunu azaltmaya yönelik enerji dönüşüm sistemlerinde güçlü bir aday konumundadır.



Şekil 3.2. PEM elektrolizör hücresi

Bu çalışmada, suyun elektrolizi yoluyla Hidrojen (H_2) ve Oksijen (O_2) gazlarına ayrılması amacıyla Proton Değişim Membranlı (PEM) elektrolizör kullanılmıştır. Söz konusu sistem, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek hidrojen üretimini gerçekleştirmiştir. PEM elektrolizörler, yüksek enerji verimlilikleri ve kompakt yapıları sayesinde laboratuvar ölçekli deneylerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kullanılan PEM elektrolizör hücresinin teknik özellikleri şu şekildedir:

- Potansiyel: 2 V DC'ye kadar
- Akım: 2,0 A'e kadar
- Elektrot Alanı: 2,9 cm²
- Boyutlar (Y x G x D): 2,0" x 2,0" x 1,6" (51 x 51 x 41 mm)
- Ağırlık: Yaklaşık 58 g

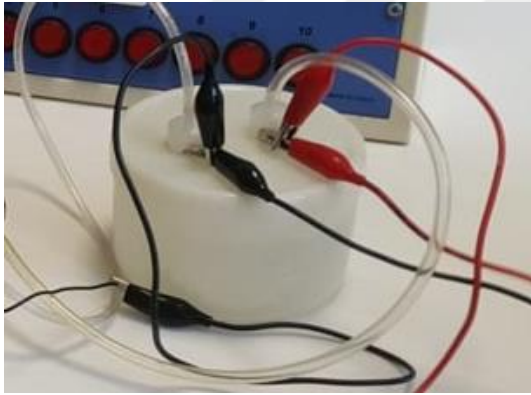
Bu hücre, düşük sıcaklıkta ve düşük potansiyel altında çalışarak yüksek saflıkta hidrojen

üretimi sağlamıştır. Ayrıca, membran yapısının iyon iletim performansı, sistemin genel verimliliği üzerinde doğrudan etkili olmuştur.

3.1.3. Alkali elektrolizör hücresi (AEC)

Bu çalışmada, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) gazlarının elde edilmesi amacıyla Alkali Elektrolizör Hücresi (AEC) kullanılmıştır. AEC sistemi, bazik elektrolit (KOH, NaOH vb.) ortamında çalışarak elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürmüş ve hidrojen üretimini gerçekleştirmiştir. Alkali elektrolizörler, dayanıklı yapıları ve yüksek verimlilikleri sayesinde laboratuvar ve pilot ölçekli deneylerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanılan AEC hücresinin elektrot alanı 10 cm^2 'dir.

Hücre, düşük sıcaklık ve düşük potansiyel koşullarında çalışarak yüksek saflıkta hidrojen üretimi sağlamaktadır. Elektrot ve elektrolit yapısı, sistemin genel verimliliği ve hidrojen üretim performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 3.3. Alkali elektrolizör hücresi (AEC)

3.1.4. PEM yakıt hücresi (PEMFC)

PEM yakıt hücresi, hidrojen ve oksijen gazlarını kimyasal reaksiyon yoluyla birleştirerek elektrik enerjisi üreten, düşük sıcaklıkta çalışan ve proton değişim membranı kullanan bir enerji dönüşüm cihazıdır. Hibrit sistemler içerisinde PEM yakıt hücresi, özellikle güneş enerjisinin yetersiz olduğu gece saatlerinde veya bulutlu havalarda, önceden elektrolizör tarafından üretilip depolanan hidrojenin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde görev alır. Böylece sistemdeki enerji sürekliliği ve güvenilirliği sağlanmış olur.

PEM yakıt hücresi, anot ve katot adı verilen iki elektrottan ve arada yer alan proton geçirgen bir polimer membrandan oluşur. Anot tarafında, depolanan hidrojen gazı (H_2), platin katalizör bazlı bir Membran Elektrot Düzeneği (MEA) yardımıyla protonlara (H^+) ve elektronlara (e^-) ayrıştırılır. Elektronlar dış devreden yükleri besleyerek katoda doğru akar. Protonlar ise yarı geçirgen olan PEM membranından doğrudan geçerek katot tarafına ulaşır. Katotta, oksijen (hava yoluyla alınır) protonlar ve elektronlarla birleşerek su buharı oluşturur. Bu sayede sistemin atık tek yan ürünü saf su ve ısı olur.

PEM yakıt hücresinin en önemli avantajlarından biri, düşük işletme sıcaklığıdır (yaklaşık 60–80 °C). Bu, hücrenin hızlı çalışmaya başlamasına ve ani enerji ihtiyaçlarına cevap verebilmesine olanak tanır. Ayrıca, kompakt yapısı sayesinde araçlar, taşınabilir sistemler ve konut uygulamaları gibi alanlarda kullanım kolaylığı sağlar. PEM yakıt hücreleri, yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle özellikle taşınabilirlik ve mobilite gerektiren hibrit sistem uygulamalarında tercih edilmektedir.

Bu tür yakıt hücreleri genellikle platinyum bazlı katalizörler kullandığı için maliyet açısından geleneksel çözümlere kıyasla daha pahalıdır. Ayrıca PEM membranı yalnızca proton geçirgen olduğu için yalnızca saf hidrojenle çalışır; hidrojenin içinde karışım hâlinde bulunan safsızlıklar, membran yapısına zarar verebilir. Bu nedenle sisteme entegre edilen hidrojen üretim biriminin (elektrolizör) saf su kullanması ve hidrojenin uygun koşullarda depolanması önemlidir.

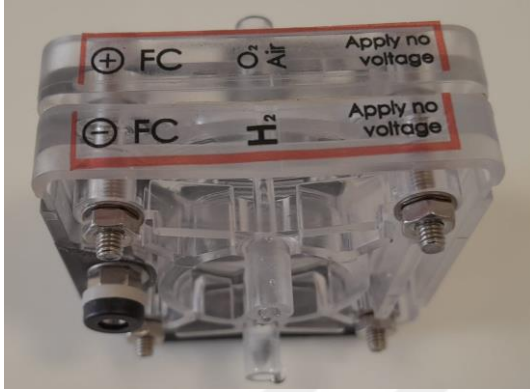
PEM yakıt hücresinden elde edilen elektrik enerjisi, doğrudan yükleri besleyebilir ya da batarya sistemine yönlendirilerek enerji talebinin dengelenmesinde kullanılabilir. Ayrıca açığa çıkan ısı da uygun durumlarda düşük sıcaklıkta ısıtma uygulamalarında geri kazanılabilir.

Sonuç olarak, PEM yakıt hücresi, fotovoltaik tabanlı hibrit sistemlerde güvenilir, sessiz, verimli ve çevre dostu bir enerji dönüşüm aracı olarak kritik bir rol oynar. Özellikle güneş ışığının yetersiz olduğu dönemlerde sistemin elektrik ihtiyacını karşılayarak enerji sürekliliğini garanti altına alır.

Bu çalışmada kullanılan Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt hücresi, hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) veya hidrojen ve hava karışımından elektrik enerjisi üretmek amacıyla

kullanılmıştır. PEM yakıt hücreleri, düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek verimlilikleri ve hızlı tepki süreleri nedeniyle hem taşınabilir sistemlerde hem de sabit enerji uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Bu sistemde kullanılan PEM yakıt hücresi, motorlu taşıtlar ve sabit güç kaynakları için geliştirilen uygulamalarda en yaygın kullanılan hücre tipi olup, elektrokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla doğrudan elektrik üretimi gerçekleştirmiştir.



Şekil 3.4. PEM yakıt hücresi H₂/O₂/hava

Kullanılan PEM yakıt hücresinin teknik özellikleri aşağıda verilmiştir:

- Elektrot alanı: 2,9 cm²
- Üretilen Potansiyel: 0,45 – 0,96 V DC
- Boyutlar (Y x G x D): 2,0" x 2,0" x 1,6" (51 x 51 x 41 mm)
- Ağırlık: Yaklaşık 58 g

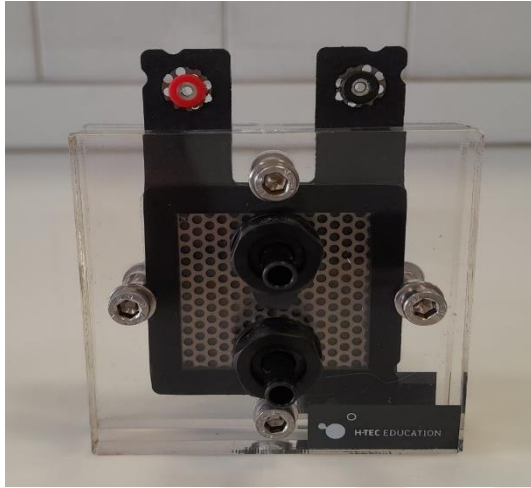
Bu yakıt hücresi, elde edilen hidrojenin kontrollü bir şekilde oksijen veya hava ile tepkimeye girmesi sonucu elektrik enerjisi üretmiştir. Hücrenin verimliliği, kullanılan membranın proton iletim kapasitesine ve elektrotların katalitik etkinliğine bağlı olarak değerlendirilmiştir.

3.1.5. PEM yakıt hücresi kiti

Bu çalışmada kullanılan PEM Yakıt Hücresi kiti, deneysel analizlerde yakıt hücresinin çalışma prensiplerinin incelenmesi ve sistemin performans parametrelerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Kiti oluşturan hücre tamamen sökülebilir ve

yeniden monte edilebilir yapıya sahiptir. Bu özellik, yakıt hücresinin elektrot, membran ve akış plakası gibi bileşenlerinin ayrı ayrı incelenmesine ve bakımının kolaylıkla yapılmasına imkân tanımaktadır.

PEMFC kiti, Hidrojen ve Oksijen ya da Hidrojen ve hava karışımıyla çalışabilmekte olup, düşük güçlü enerji üretim sistemlerinin laboratuvar ölçekli simülasyonları için uygundur.



Şekil 3.5. PEM FC kiti

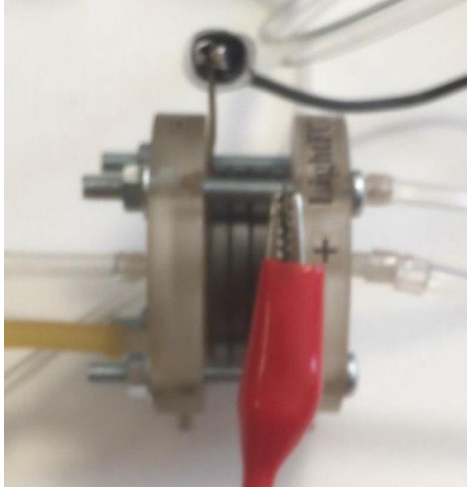
Kullanılan PEMFC kitinin teknik özellikleri şu şekildedir:

- Boyutlar (Y x G x D): 98 × 80 × 78 mm
- Ağırlık: 260 g

Bu kit ile gerçekleştirilen deneylerde, hücre çıkış gerilimi ve akım değerleri ölçülerek yakıt hücresinin verimliliği değerlendirilmiş; ayrıca sistemin modüler yapısı sayesinde farklı çalışma koşullarının hücre performansı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

3.1.6. Yakıt hücresi yığını (Stack)

Bu çalışmada beş adet tek hücrenin seri bağlanmasıyla oluşturulan bir yakıt hücresi yığını (stack) kullanılmıştır. Seri bağlantı sayesinde hücrelerin toplam çalışma gerilimi yaklaşık 3,0 V seviyesine ulaşmıştır. Sistemin toplam çıkış gücü, tek hücre gücünün yaklaşık beş katına yükselmiş olup, laboratuvar ölçekli uygulamalarda istikrarlı performans sağlamıştır.



Şekil 3.6. Yakıt hücresi yığı

3.1.7. Hidrojen ve oksijen depolama tankları

Bu çalışmada, elektroliz işlemi sonucunda üretilen hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) gazlarının biriktirilmesi amacıyla dereceli hidrojen, oksijen ve su depolama silindirleri kullanılmıştır. Bu silindirler, Hoffmann aparatında (suyun elektroliz yoluyla hidrojen ve oksijen gazlarına ayrılmasını gösteren klasik bir laboratuvar düzeneği) kullanılan klasik hidrojen ayırma sistemine benzer şekilde çalışmakta olup, gazların hacimsel olarak gözlemlenmesine ve ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Her bir tankın gaz veya su depolama kapasitesi 30 cm^3 olup, sistemde gaz üretim miktarının doğrudan takibi için kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Depolama tankları

3.1.8. Ayarlanabilir güç kaynağı

Deneylerde, elektrolizör hücresine sabit veya değişken akım uygulayabilmek amacıyla 0-30

V gerilim ve 0-3 A akım aralığında çalışabilen, laboratuvar tipi ayarlanabilir DC güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı, hem sabit potansiyel (CV) hem de sabit akım (CC) modlarında çalışabilme özelliğine sahiptir. Gerilim ve akım değerleri, ön panel üzerindeki dijital göstergeler aracılığıyla anlık olarak izlenmiştir. Çıkış gerilimi 0,01 V çözünürlükle, çıkış akımını ise 0,001 A çözünürlükle ayarlanabilmiştir. Güç kaynağının çıkış kararlılığı $\pm(0,1\% + 10 \text{ mV})$ düzeyinde olup, düşük dalgalanma değerine sahiptir ($<1 \text{ mVrms}$). Bu sayede elektroliz sürecinde sabit ve kararlı bir akım uygulanabilmiştir.

Cihaz, aşırı akım (OCP), aşırı gerilim (OVP) ve ısınma koruması (OTP) özellikleriyle donatılmıştır. Böylece hem elektrolizör hücresinin hem de cihazın güvenli çalışması sağlanmıştır. Ayrıca çıkış uçlarında kısa devre koruması mevcuttur. Güç kaynağının lineer regülasyonlu yapısı, düşük gürültü ve yüksek doğruluk gerektiren elektrokimyasal deneyler için uygun bir çalışma ortamı sağlamıştır.

Deney süresince uygulanan akım ve gerilim değerleri, veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamında kaydedilmiş ve zaman-serisi analizlerinde kullanılmıştır (Zeng ve Zhang, 2010; Carmo vd., 2013).



Şekil 3.8. Ayarlanabilir güç kaynağı

3.2. Elektronik Yönetim Sistemi (EYS)

Hibrit sistemler, çok sayıda enerji bileşeninin koordineli ve verimli bir biçimde çalışmasını gerektirir. Bu bileşenlerin yönetimi için kullanılan elektronik kontrol ünitesi (EKS), sistemin

“orquestra şefi” olarak görev yapar. Bu kart, enerji üretimi, depolama ve tüketimi arasında dinamik bir denge sağlayarak sistemin performansını ve güvenliğini doğrudan etkiler.

Elektronik kart tasarımı süreci, sistemin izleme ve kontrol ihtiyaçlarının belirlenmesiyle başlar. Kart, PV panelden gelen potansiyel ve akımı, bataryanın doluluk oranını, elektrolizörün çalışma durumunu, yakıt hücresinin çıkış değerlerini ve hidrojen tankının basıncını sürekli olarak ölçer. Bu veriler, kart üzerinde bulunan mikrodenetleyici tarafından analiz edilir ve sistemin hangi bileşeninin ne zaman çalışacağına dair kararlar bu analiz doğrultusunda alınır.

Kart üzerindeki sensör arabirimleri sayesinde sıcaklık, potansiyel, akım ve basınç gibi büyüklükler dijital olarak algılanır. Bu sinyaller, analog-dijital çeviriciler (ADC), sinyal koşullandırma devreleri ve izolasyon elemanları ile mikrodenetleyiciye güvenli şekilde aktarılır. Ayrıca, sistemin enerji akışını düzenlemek amacıyla kart üzerinde röleler, metal-oksit yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET) veya güç dönüştürücüler de yer alır.

Elektronik yönetim sistemi, yalnızca veri işlemekle kalmaz; aynı zamanda sistemin çeşitli tehlikeli durumlara karşı korunmasını da sağlar. Aşırı akım, düşük potansiyel, sıcaklık artışı gibi durumlar, önceden belirlenen eşik değerlerle karşılaştırılır ve gerekirse sistem bileşenleri otomatik olarak devreden çıkarılır. Bu tür güvenlik önlemleri, sistemin hem uzun ömürlü hem de güvenilir olmasını sağlar.

Gömülü yazılım, kartın tüm işleyişinin merkezindedir. Mikrodenetleyiciye yüklenen bu yazılım; enerji yönetim algoritmalarını, hata durumlarını, kontrol mantığını ve iletişim protokollerini içerir. Yazılım genellikle durum tabanlı bir yapıda tasarlanır ve sistemin her bir bileşeni, o anki durumuna göre belirli kurallara göre kontrol edilir.

Sonuç olarak, hibrit enerji sistemlerinde kullanılan elektronik yönetim sistemi, tüm sistem bileşenlerinin entegre şekilde çalışmasını sağlayan, çok işlevli ve güvenlik odaklı bir kontrol merkezidir. Başarılı bir elektronik yönetim sistemi, yalnızca elektriksel olarak uyumlu bir yapı değil; aynı zamanda verimli, güvenli ve ölçeklenebilir bir sistem mimarisi anlamına da gelmektedir.

3.2.1. Elektronik kontrol ünitesi tasarımının yapılması

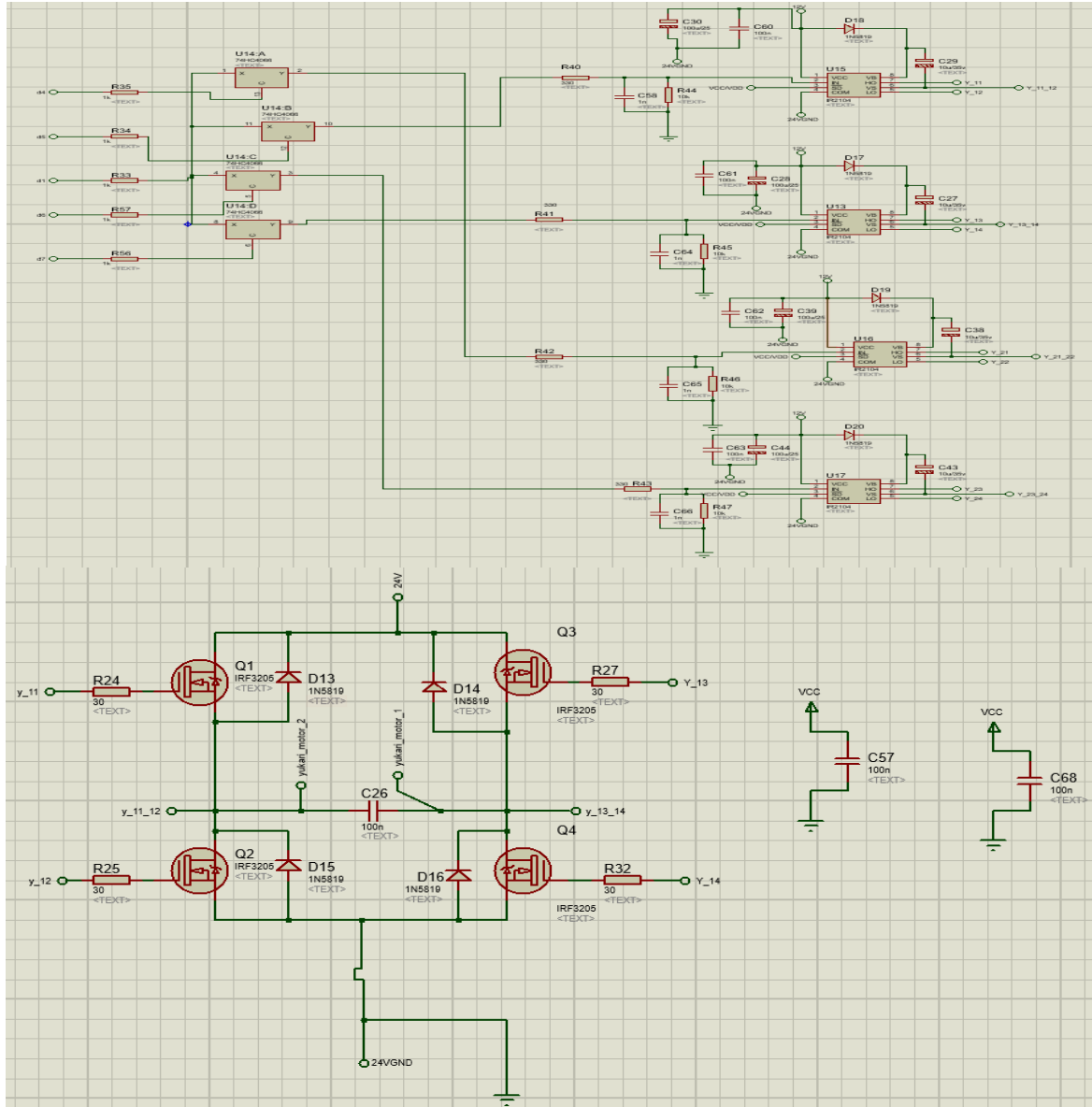
Bu çalışmada hibrit enerji sisteminin yönetimi için çok bileşenli bir elektronik kontrol sistemi geliştirilmiştir. Sistemin merkezinde, Microchip firmasının geliştirdiği PIC32MX795F512L mikrodenetleyicisi yer almaktadır. Bu mikrodenetleyici, 80 MHz hızında çalışan 32 bitlik bir işlemciye, 16 kanallı analog-dijital dönüştürücüye (ADC) ve 4 adet darbe genişlik modülasyonu (PWM-Pulse Width Modulation) kanalına sahiptir. Sinyal işleme birimi, sistemin genel kontrolünü sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Cihaz, Bluetooth arayüzü üzerinden bilgisayara bağlanmakta ve USB bağlantısı aracılığıyla veri iletişimi gerçekleştirilmektedir. Bu sayede kontrol algoritmasının geliştirilmesi sürecinde yazılım güncellemeleri, hata ayıklama işlemleri ve veri aktarımı kolaylıkla yapılabilmektedir.

Sistemin ikinci aşamasında DC/DC dönüştürücü birimi tasarlanmıştır. Bu birim, yakıt hücresinden elde edilen potansiyelin batarya potansiyeliyle uyumlu hâle getirilmesi amacıyla devreye eklenmiştir. Güç faktörü düzeltme (PFC- Power Factor Correction) devresinde, iki kanallı interleaved boost topolojisi kullanılmıştır. Her bir kanal, 200 kHz frekansta anahtarlama yapabilmektedir. Bu aşamada, özellikle sayısal sinyal işleme (DSP-Digital Signal Processing) algoritmasında ve devre elemanlarının (bobin, kapasitör vb.) seçimi konusunda önemli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

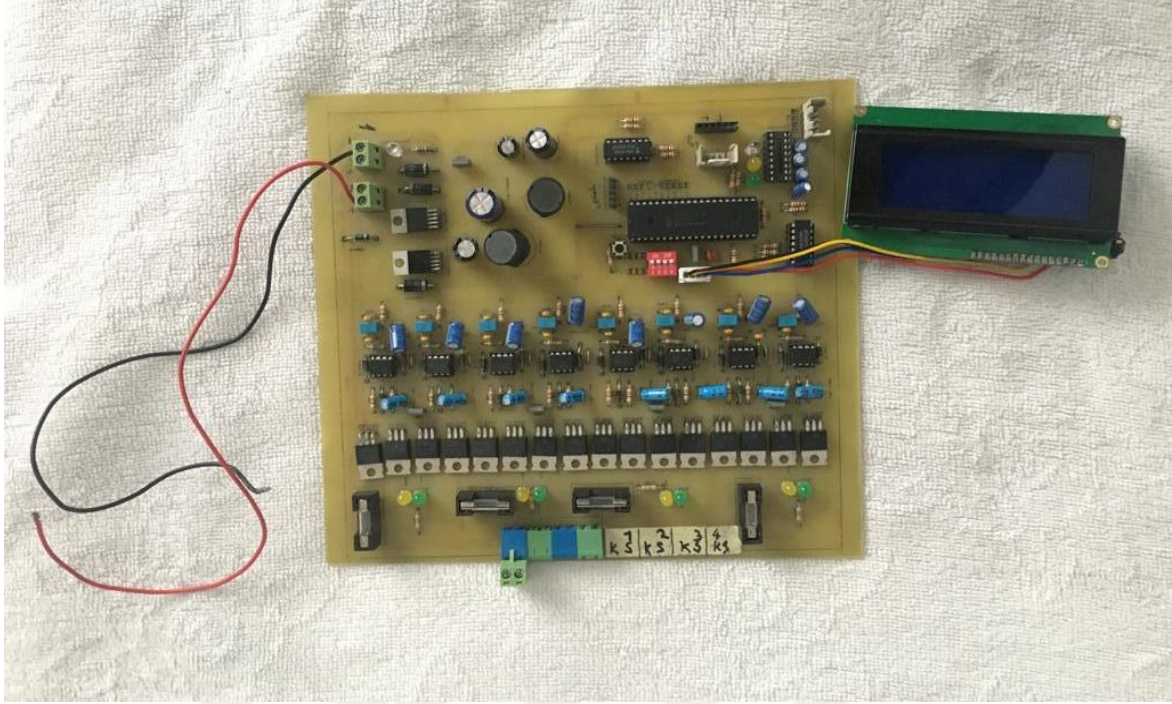
Motor kontrol birimi, sistemin enerji aktarım sürecinde kritik bir rol üstlenmiştir. PFC_3phMotor kartı üzerinde yer alan 6 PWM kanalı, motorun sürülmesi için kullanılmaktadır. Motor sürücü devresi üç adet yarım köprü (half-bridge) MOSFET içermekte olup, sistem 500 V ve 8 A seviyelerine kadar anahtarlama işlemi gerçekleştirebilmektedir.

Elektronik Yönetim Sistemi (EYS), sistemdeki akış, sıcaklık ve derişim sensörlerinden gelen verilerin toplanmasını ve işlenmesini sağlamaktadır. EKA; yarı iletken anahtarlar, röleler ve çeşitli sensörlerin bağlandığı konnektörlerden oluşmaktadır. Yakıt ve oksidan akışına ilişkin sıcaklık ve derişim verileri, bu sensörler aracılığıyla alınmakta ve DSP üzerindeki analog-dijital dönüştürücüler (ADC) tarafından sayısallaştırılmaktadır.

Geliştirilen anakart, sistemin çalışma parametrelerinin kaydedilmesi amacıyla gerçek zamanlı saat (RTC) ve SD kart birimine sahiptir. Ayrıca, Ethernet bağlantısı ile gelecekte farklı tümleşik sistemlere entegrasyon imkânı sunmaktadır. İletişim birimleri olarak iki adet Modbus/RS-485 ve bir adet RS-232 haberleşme noktası bulunmaktadır. Sistem, 15.1 inç'e kadar dokunmatik ekran bağlantısını desteklemekte ve olası arızalar için sesli uyarı mekanizması içermektedir.



Şekil 3.9. Kart tasarımı devre şeması

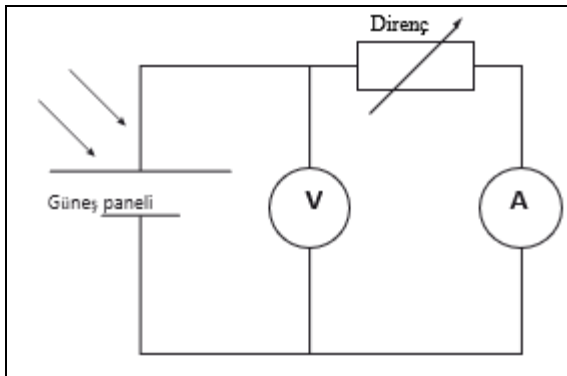


Şekil 3.10. Geliştirilen anakart

3.3. Güneş Panelinin Akım-Potansiyel Özellikleri, Güç Eğrisi ve Verimliliği

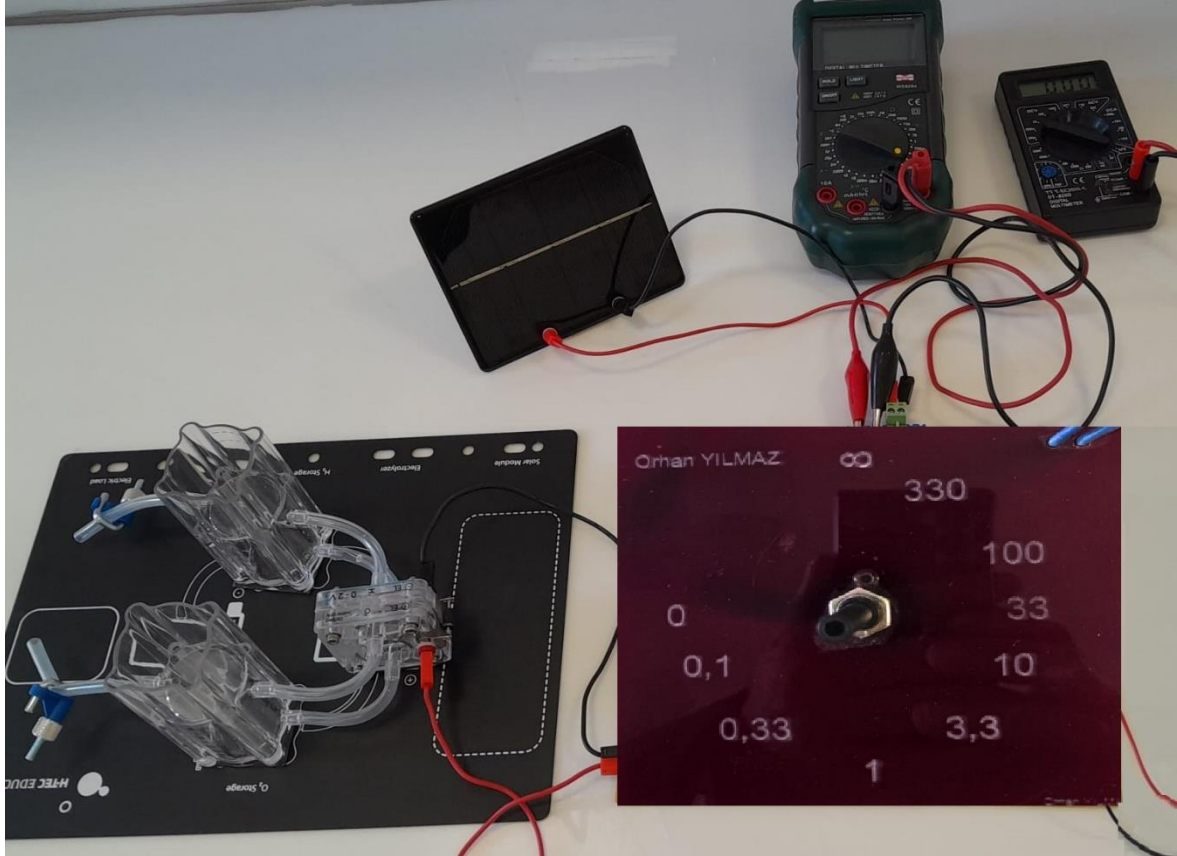
Akım-potansiyel karakteristiği, güneş modülünün performansı hakkında bilgi sağlar. Maksimum Güç Noktası (MGN) olarak adlandırılan değer, akım-potansiyel karakteristiğinden ve güç eğrisinden belirlenebilir. Güneş modülünün verimliliği, güneş modülünün elektrik enerjisine dönüştürdüğü gelen ışıyım gücünün miktarını gösterir.

$$\text{Verim } \eta = \text{elektriksel güç çıkışı} / \text{elektriksel güç girişi} = P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}}$$



Şekil 3.11. Güneş panelinin karakteristiğini belirlemek için kurulum şeması

Deney düzeneği şekildeki gibi kurulur. Işık kaynağı güneş paneline dik açıyla (90° açı) tutulur. Sıcaklık dalgalanmalarından kaynaklanan hataları önlemek için lambayı açtıktan sonra en az 1 dakika beklenir. Açık devre potansiyelini ($r = \infty$) kullanarak akım-potansiyel karakteristiği kaydedilir ve direnç art arda daha düşük dirençlere değiştirilir. Değerler sabitlenene kadar ilgili direnç için potansiyel ve akım kaydedilir.



Şekil.3.12. Güneş panelinin karakteristiğini belirlemek için deney düzeneği

3.4. PEM Elektrolizörü

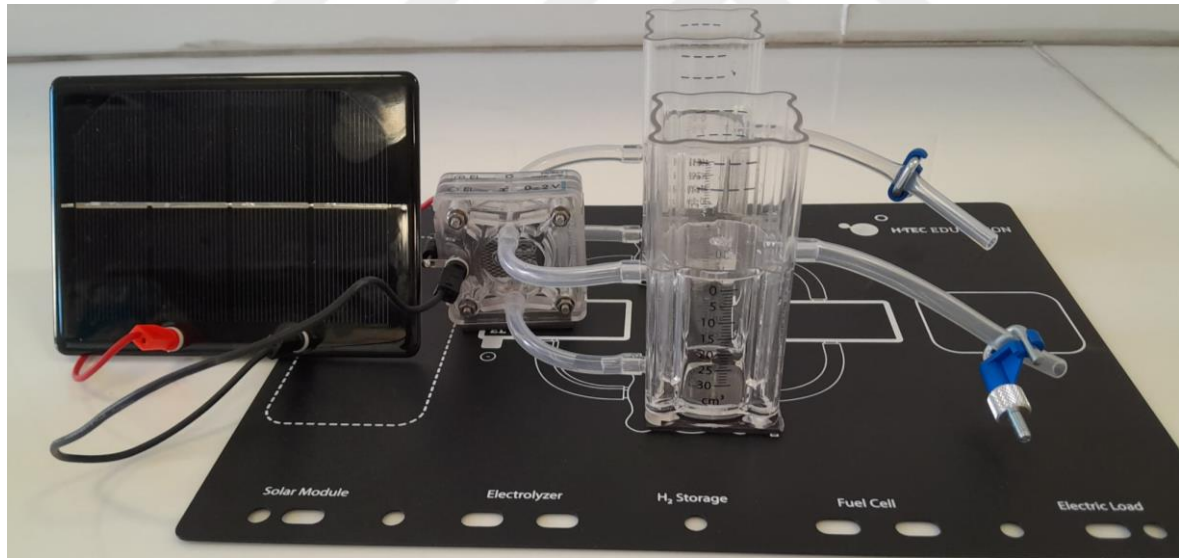
3.4.1. Hidrojen ve oksijen gazının oluşan hacmine göre suyun ayrışması

Bu çalışmada, suyun elektrolizi yoluyla üretilen hidrojen ve oksijen gazlarının hacimsel oranı incelenmiştir. Elektroliz sırasında suyun bileşenleri, elektrik enerjisi kullanılarak ayrıştırılmıştır. Suyun her molekülü (H_2O) iki hidrojen atomu ve bir oksijen atomundan oluştuğundan, ortaya çıkan hidrojen ve oksijen gazlarının hacminin teorik olarak 2:1 oranında olması beklenir.

Deney düzeneği Şekil.3.13’de gösterildiği gibi kurulmuştur. Deneyler, laboratuvar ölçeğinde kontrollü sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleştirilmiştir. Elektrolizör güç kaynağına bağlanmıştır. Çalışma tek hücreli elektrolizör ile yapılmış ve 1,6 V ile 2,0 V arasında potansiyel uygulanmıştır.

Elektroliz süresince üretilen gazlar, ayrı toplama kapları aracılığıyla ölçülmüştür. Hidrojen ve oksijen gazlarının hacimleri belirli aralıklarla kaydedilmiş ve hidrojen/oksijen hacim oranı hesaplanmıştır. Her koşul için deney üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır.

DeneySEL tasarım, teorik olarak beklenen 2:1 hidrojen-oksijen hacim oranının doğrulanmasını ve suyun elektrolizi sırasında gaz üretim hızının ölçülmesini sağlamıştır. Elde edilen veriler, elektroliz süresince gaz üretim oranının derişim, akım ve potansiyel gibi parametrelerden nasıl etkilendiğini incelemek için temel oluşturmuştur.

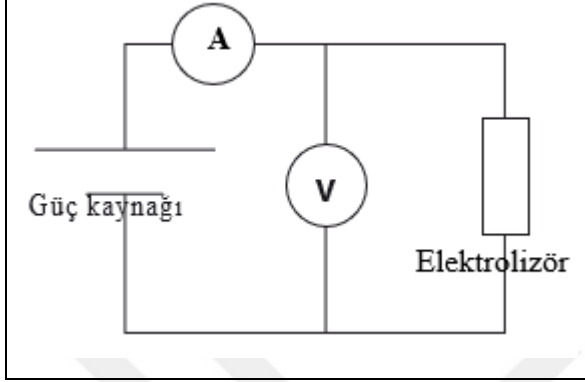


Şekil 3.13. Suyun elektrolizi deney düzeneği

3.4.2. PEM elektrolizörünün akım-potansiyel karakterizasyonu

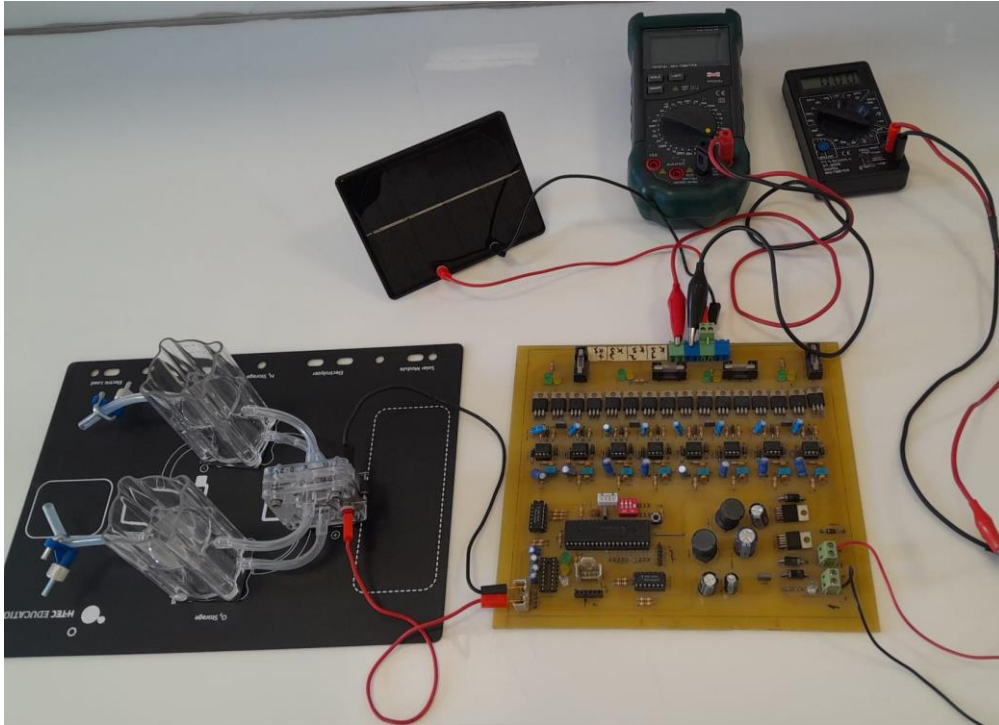
PEM elektrolizörlerde su moleküllerinin hidrojen ve oksijen gazlarına ayrıştırılabilmesi için, hücreye uygulanan elektrik potansiyelinin belirli bir eşik değerin üzerine çıkması gerekmektedir. Bu eşik değeri, suyun termodinamik ayrışma potansiyeli olarak tanımlanır ve bu değerin altında elektrokimyasal ayrışma reaksiyonları gerçekleşmez. Bu çalışma

kapsamında gerçekleştirilen deney, söz konusu ayrışma potansiyelinin büyüklüğünü deneysel olarak belirlemek ve elektrolizörün minimum çalışma koşullarını ortaya koymak amacıyla tasarlanmıştır.



Şekil 3.14. Ayarlanabilir bir güç kaynağı kullanarak elektrolizörün akım-potansiyel karakteristiğini belirlemek için devre kurulum şeması

Elektrolizör doğrudan değişken DC güç kaynağına bağlanır. DC güç kaynağı 0 V'a ayarlanır ve ardından maksimum 2,0 V'a yükseltilir. Devre Şekil 3.14'de devre şemasında gösterildiği gibi oluşturulur.

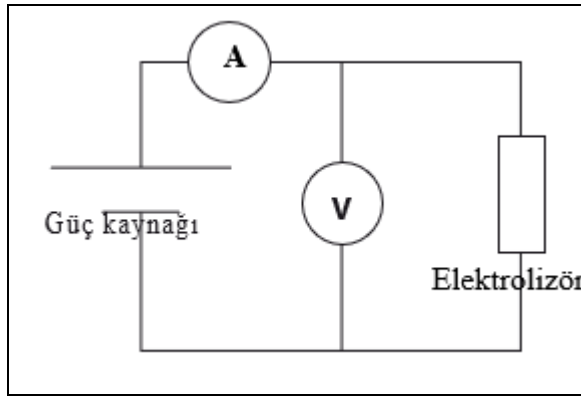


Şekil 3.15. PEM elektrolizörünün akım-potansiyel karakterizasyonu için deney düzeneği

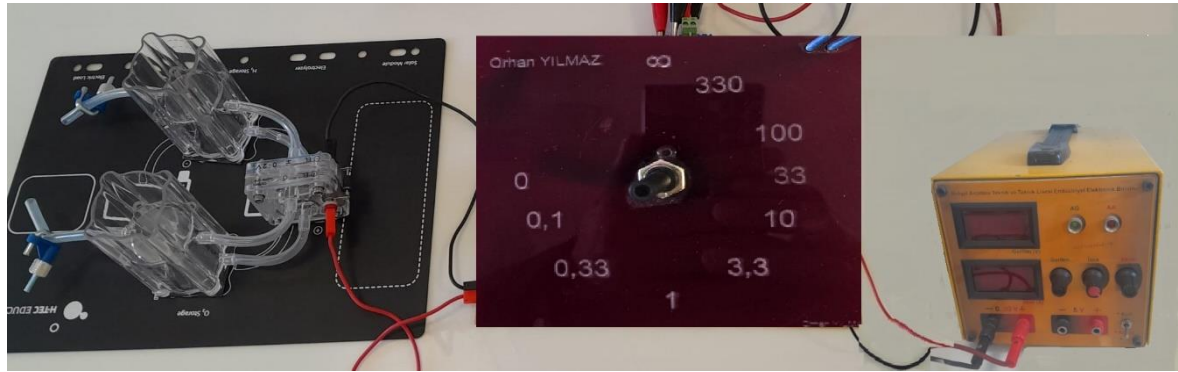
Deney düzeneği Şekil 3.15’de gösterildiği gibi kurulur. Güç kaynağındaki potansiyel 0,1 V’luk artışlarla 0,0 V’tan 2,0 V’a kadar sürekli olarak artırılır. Temsili değerleri elde etmek için değerler sabitlenene kadar ölçümler arasında beklenir. Hem ilgili potansiyeli hem de karşılık gelen akım çizelgeye kaydedilir. Gaz üretiminin başlangıcını gözlemlenir ve ilgili potansiyel çizelgeye işaretlenir.

3.4.3. PEM elektrolizörünün enerji verimliliği ve Faraday verimliliği

Elektrolizör doğrudan ayarlanabilir güç kaynağına bağlanır. Potansiyel 1,8 V’a ayarlanır.



Şekil 3.16. Ayarlanabilir bir güç kaynağı kullanarak elektrolizörün enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için kurulum devre şeması



Şekil 3.17. Ayarlanabilir bir güç kaynağı kullanarak elektrolizörün enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için deney düzeneği

Verileri kaydetmeye başlamadan önce birkaç dakika gaz üretimine izin verilir. Elektrolizöre giden güç kaynağı kapatılır. Üretilen gazları tamamen serbest bırakmak için gaz depolama tanklarının çıkış vanalarını açılır. Gazlar uzaklaştırıldıktan sonra, depolama tankları tamamen deiyonize su ile doldurulur. Su seviyesinin, yatay olarak bakıldığında 0 cm³

derecelendirme işaretine denk geldiğine dikkat edilir. Gaz depolama tankı çıkış vanaları kapatılır.

Elektrolizör güç kaynağına bağladığı andan itibaren süre ölçülmeye başlanır. Gaz miktarlarının kolayca okunabildiğinde zaman, elektrolizöre uygulanan potansiyel ve içinden geçen akım kaydedilir. Hidrojen depolama tankı tamamen gazla dolduğunda son ölçümleri yapılır.

3.5. Farklı Elektrolit Derişimlerinde ve Sürelerinde Elektrolizör İle Hidrojen Üretimi

Deneysel çalışmaların bu aşamasında, üretilen hidrojen miktarını etkileyen faktörler, özellikle zaman, elektrolit derişimi ve elektrolit türü, bir elektroliz hücresi modeli kullanılarak incelendi. Suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretim mekanizması, NaOH ve KOH olmak üzere iki farklı alkali elektrolit kullanılarak değerlendirildi. Bu elektrolitler, hidrojen üretim verimliliği ve elektroliz performansı üzerindeki etkileri açısından karşılaştırıldı (Sanli vd., 2013; Kumar ve Lim, 2023).

3.5.1. Elektrolit derişimlerinin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerine etkisi

Bu deney kapsamında, farklı akım değerleri altında elektrolit derişimlerinin hidrojen (H₂) üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hidrojen üretim sürecinde uygun katalizör seçimi, suyun elektroliz verimliliğini artırmada kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Zeng ve Zhang, 2010). Bu bağlamda, H₂ üretimini optimize edebilmek amacıyla farklı performans özelliklerine sahip çeşitli elektrolitlerin kullanımı önem arz etmektedir (Dincer ve Acar, 2015). Çalışmada hidrojen üretim sürecini analiz etmek için hem potasyum hidroksit (KOH) hem de sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmıştır. Ayrıca, bu iki elektrolit arasındaki karşılaştırmalar, derişim değişimlerinin elektroliz süreci üzerindeki etkilerini daha kapsamlı biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır (Sanli vd., 2013). Deneysel aşamada, her iki elektrolit için de üç farklı derişim seviyesi (0,5 M, 1,0 M ve 1,5 M) test edilmiştir.

3.5.2. Elektrolit derişimlerinin farklı potansiyellerde H₂ üretimi üzerine etkisi

Bu deney kapsamında, farklı potansiyel değerleri altında elektrolit derişimlerinin hidrojen (H₂) üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel düzenekte, alkali elektrolizör kullanılarak suyun elektrolizi gerçekleştirilmiştir. Elektroliz işlemi sırasında, elektrotlara uygulanan potansiyel farkı değiştirilerek (1,6 V, 1,8 V, 2,0 V) farklı koşullarda hidrojen üretim miktarı ölçülmüştür. Elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmış; her iki elektrolit için 0,50 M, 1,00 M ve 1,50 M konsantrasyonları hazırlanmış ve deneyler bu derişimler altında tekrarlanarak yürütülmüştür (Carmo vd., 2013; Zeng ve Zhang, 2010).

Sistem beslemesi ve kontrolü için güç kaynağı kullanılmış; böylece sabit akımda deneyler gerçekleştirilmiştir. Hidrojen üretim hacimleri; gaz toplama kabında ölçülerek kaydedilmiştir. Hücre sıcaklığı bir su banyosu ve ısı kontrollü hücre kılıfı ile sabit tutulmuştur.

Elektrolizör sisteminde, anot ve katot yarı reaksiyonları sırasıyla oksijenin ve hidrojenin oluşumunu sağlamaktadır. Uygulanan potansiyel arttıkça, elektrot yüzeyinde gerçekleşen reaksiyon kinetiği hızlanmakta ve hidrojen üretim oranı artmaktadır (Zeng & Zhang, 2010). Ancak, yüksek potansiyellerde oluşan enerji kayıpları ve aşırı potansiyel etkileri nedeniyle sistem verimliliği azalabilmektedir. Bu nedenle, optimum elektrolit derişimi ve potansiyel aralığının belirlenmesi, elektrolizör performansının değerlendirilmesinde kritik bir parametre olmuştur (Carmo vd., 2013).

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, elde edilen hidrojen miktarları belirlenmiş, ayrıca akım-potansiyel (I–V) eğrileri çıkarılarak sistemin enerji verimliliği analiz edilmiştir. Elektrolit derişiminin artması, çözeltilerin iletkenliğini artırarak elektrotlar arasındaki ohmik direnci azaltmış ve bu durum hidrojen üretim hızında belirgin bir artışa neden olmuştur (Mekhilef vd., 2012). Bununla birlikte, yüksek derişimlerde iyon taşınımının sınırlanması ve gaz kabarcıklarının elektrot yüzeyini kaplaması nedeniyle verimde azalma gözlemlenmiştir.

3.5.3. Farklı akımlarda zamanın H₂ üretimi üzerine etkisi

Bu deneyde farklı akımlarda farklı elektrolit derişimlerinde H₂ üretimine zamanın etkisi incelenmiştir. Deneysel düzeneğe, alkali elektrolizör kullanılarak suyun elektrolizi gerçekleştirilmiştir. Elektroliz işlemi sırasında, elektrotlara uygulanan akım değiştirilerek (1,0 A, 1,5 A, 2,0 A) farklı koşullarda hidrojen üretim miktarı ölçülmüştür. Elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmıştır; her iki elektrolit için 0,5 M, 1,0 M ve 1,5 M konsantrasyonları hazırlanmış ve deneyler bu derişimler altında tekrarlanarak yürütülmüştür (Carmo vd., 2013; Zeng ve Zhang, 2010).

3.5.4. Farklı potansiyellerde zamanın H₂ üretimi üzerine etkisi

Bu deneyde farklı potansiyellerde farklı elektrolit derişimlerinde H₂ üretimine zamanın etkisi incelenmiştir. Deneysel düzeneğe, alkali elektrolizör kullanılarak suyun elektrolizi gerçekleştirilmiştir. Elektroliz işlemi sırasında, elektrotlara uygulanan potansiyel farkı değiştirilerek (1,6 V, 1,8 V, 2,0 V) farklı koşullarda hidrojen üretim miktarı ölçülmüştür. Elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri kullanılmış; her iki elektrolit için 0,5 M, 1,0 M ve 1,5 M konsantrasyonları hazırlanmış ve deneyler bu derişimler altında tekrarlanarak yürütülmüştür (Carmo vd., 2013; Zeng ve Zhang, 2010).

3.6. PEM Yakıt Hücresi

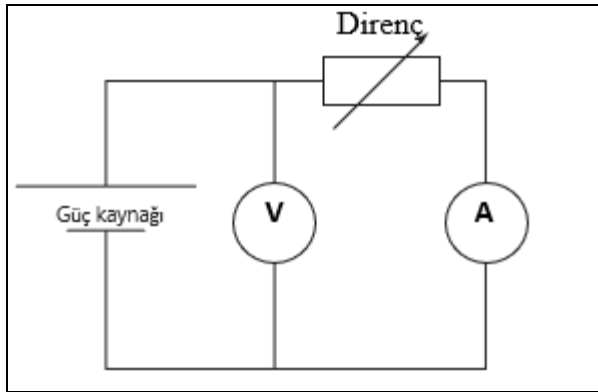
Yakıt hücresi ile yapılacak deneyler için yakıt hücresi iyice nemlendirilmelidir. Bununla birlikte, hücrenin içinde çok fazla su damlası varsa, gaz akışını engelleyebilir ve böylece hücre olması gerektiği gibi çalışmaz.

Yakıt hücresi açılır. Elektrolizöre giden güç beslemesi kesilerek yakıt hücresi geçici olarak durdurulur ve yük yakıt hücresinden ayrılır. Yakıt hücresine giden depolama tanklarındaki gaz besleme hortumları çıkarılır, yakıt hücresindeki havalandırma kelepçeleri açılır ve hücreye üflenerek su damlacıkları uzaklaştırılır. Yakıt hücresi çıkışları tekrar kapatılır ve hortumlar depolama tanklarına yeniden bağlanır.

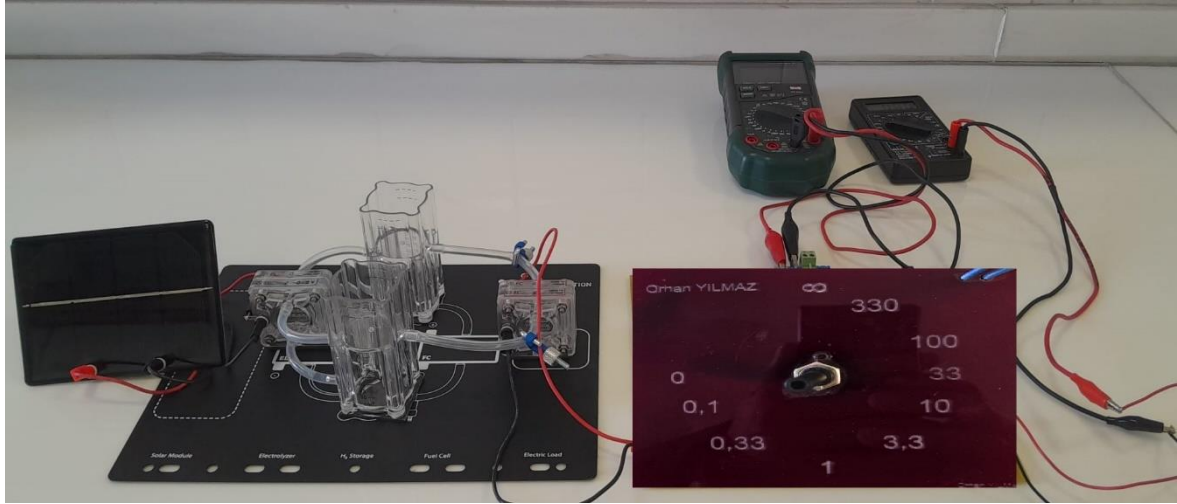
3.6.1. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristik özellikleri ve güç eğrisi

Hidrojen ve oksijen yakıt hücresine beslenir ve su üretmek için reaksiyona girer ve bu süreçte ısı ve elektriği serbest bırakır. Yakıt hücresinin çıkış gücü, yük direncine bağlıdır. Bu deney, maksimum güç çıkışının hangi dirençte ve hangi akımda elde edildiğini belirlemek için tasarlanmıştır. Bu deney için devre şeması Şekil 3.18’de gösterilmiştir.

Hidrojen ve oksijen üretmek için elektrolizör güç kaynağına bağlanır. Elektrolizörün çıkış bağlantıları gaz depolama tanklarının giriş bağlantılarına bağlanır ve çıkışları yakıt hücresinin giriş bağlantılarına bağlanır. Yakıt hücresi çıkışları kapatılır. Yaklaşık 5 cm³ hidrojen gazı ürettikten sonra, yakıt hücresi çıkışları açılır, gazla temizlendikten sonra tekrar kapatılır. Bu, ölçümü bozan artık gazları ortadan kaldırır. Ölçüm yapılmadan önce yakıt hücresinin herhangi bir Hidrojen kullanmasını önlemek için yakıt hücresi açık devreye geçirilir. Açık devre potansiyeli ($r = \infty$) kullanarak akım-potansiyel karakteristiği çizelgeye kaydedilir. Direnç kademeli olarak daha yüksek dirençlerden daha düşük dirençlere değiştirilir. Her potansiyel ve akım değeri kaydedilir. Sonuçlar elde etmek için ölçümler arasında 30 saniye beklenir.



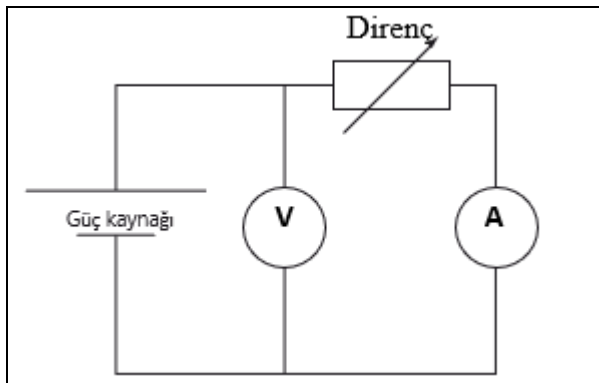
Şekil 3.18. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristiğini belirlemek için kurulum devre şeması



Şekil 3.19. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristik özellikleri ve güç eğrisi için deney düzeneği

3.6.2. PEM yakıt hücresinin enerji verimliliği ve Faraday verimliliği

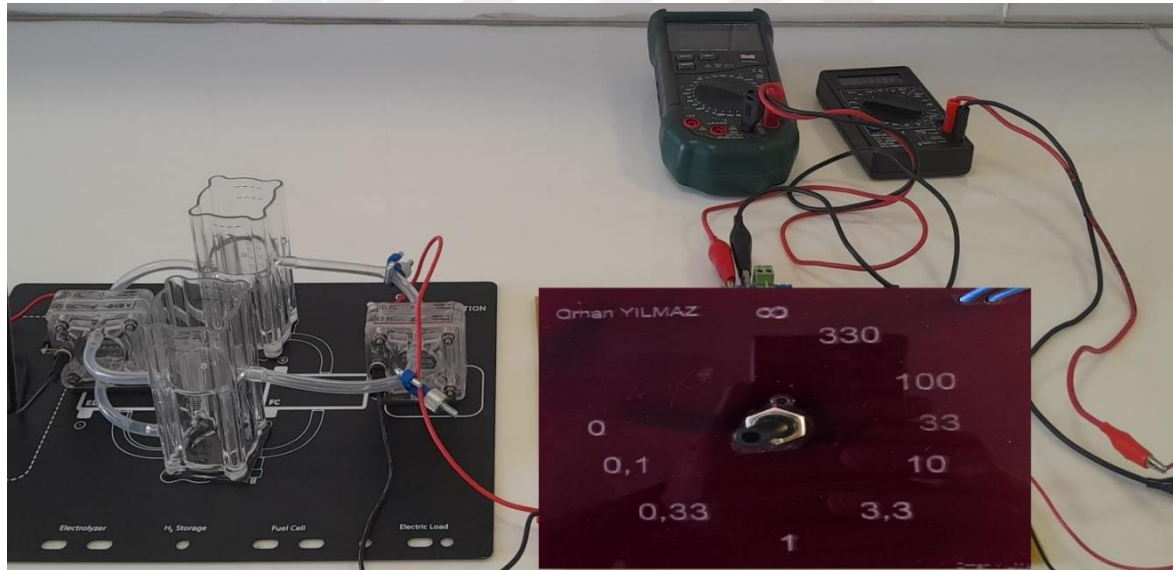
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deney, PEM yakıt hücresinin enerji dönüşüm performansını nicel olarak değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Deneysel düzenek, yakıt hücresinin enerji verimliliğini belirlemek için hücreye beslenen hidrojen miktarı ile elde edilen elektrik enerjisi arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı hedeflemektedir. Ayrıca, Faraday verimliliğinin hesaplanabilmesi için, teorik olarak tüketilmesi gereken hidrojen miktarı ile deneysel olarak ölçülen gerçek hidrojen tüketimi karşılaştırılmıştır. Böylece yakıt hücresinin elektrokimyasal reaksiyonları ne ölçüde ideal koşullara uygun olarak gerçekleştirdiği ve hidrojeni ne kadar etkin kullandığı bilimsel olarak değerlendirilmiştir. Bu deneye ait devre şeması Şekil 3.20.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Yakıt hücresinin enerji verimliliğini ve Faraday verimliliğini belirlemek için kurulum devre şeması

Elektrolizörün hidrojen depolama tankının çıkış bağlantıları yakıt hücresinin giriş bağlantılarına bağlanır. Ölçüm yapılmadan önce yakıt hücresinin herhangi bir hidrojen kullanmasını önlemek için, yakıt hücresi açık devreye geçirilir (kelepçeler açık, akım akışı yok). Yakıt hücresi çıkışları kapatılır. Yaklaşık 10 cm^3 hidrojen gazı üretilir, ardından sistemi havalandırmak için yakıt hücresi çıkışları kısa bir süre açılır ve ardından tekrar kapatılır. Sistemle mümkün olan maksimum hidrojen hacmini üretilir (30 cm^3). Elektrolizöre giden güç kaynağı kapatılır ve yakıt hücresi ile direnç arasındaki elektrik bağlantısı kesilir. Direnç, enerji verimliliğini belirlemek için direnç $0,33 \Omega$ 'a getirilir. Yakıt hücresi ile direnç arasındaki devre yeniden bağlanır ve bu andan itibaren zaman ölçülmeye başlanır.

Ölçülen zaman, potansiyel ve akım sabit hacim artışlarıyla (5 cm^3) kaydedilir. Ölçüm sırasında direnç değiştirilmez. Mevcut değerlerin çok fazla dalgalanmadığından emin olmak için deneyler tekrar edilir.



Şekil 3.21. Yakıt hücresinin enerji verimliliği ve Faraday verimliliğini belirlemek için deney düzeneği

3.7. Küçük Ölçekli Bir Güç Olarak Fotovoltaik-Elektrolizör-Yakıt Hücresi Hibrit Sisteminin DeneySEL Modelinin İncelenmesi

Fotovoltaik-yakıt hücresi hibrit sistemlerinin nispeten düşük verimliliğe sahip olduğu bilinmektedir (Abdin vd., 2023; Zhang vd., 2025). Bu nedenle, Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sistemi, fotovoltaik paneli bir güç kaynağı olarak kullanmak ve elektrolizördeki elektrolit çözeltisinin derişimini artırmak gibi yeniliklere sahip küçük

ölçekli bir enerji santrali olduğu düşünülebilir. Bu yöntemle, sistem verimliliği artırılabilir. Fotovoltaik performansı, aşağıdaki giriş gücü, çıkış gücü ve PV verimliliği aşağıdaki şekilde bir formülle ifade edilir.

$$P_{\text{giriş}} = I_r \times A; \quad (3.1)$$

$$P_{\text{çıkış}} = V \times I; \quad (3.2)$$

$$\eta = P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Burada, $P_{\text{giriş}}$ giriş gücü (W), I_r radyasyon yoğunluğu (W/m^2), A PV modülünün yüzey alanı (m^2), $P_{\text{çıkış}}$ PV'nin üretilen gücüdür (W), V Potansiyeldir (V) ve I elektrik akımıdır (A).

Elektrolizörün; KOH elektrolit kütlesi, hidrojen gazı akış hızı, elektrolizör giriş gücü, elektrolizör çıkış gücü ve elektrolizör verimliliği gibi parametrelerle ifade edilebilen bir referansı vardır.

$$M = g / M_r \times 1000 / V_L \quad (3.4)$$

$$g = M \cdot M_r \cdot V_L / 1000 \quad (3.5)$$

$$m = p \cdot Q; \quad (3.6)$$

$$P_{\text{giriş}} = V \times I; \quad (3.7)$$

$$P_{\text{çıkış}} = m \cdot LHV \quad (3.8)$$

$$\eta = P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}} \times \% 100 \quad (3.9)$$

Burada, M Molarite, g KOH kütlesi (g), M_r kütle eşdeğeri (g/mol), V_L çözelti hacmi, m (nokta) hidrojen kütlesinin akış hızı (kg/s), Q hidrojen deşarjı (m^3/s), $P_{\text{giriş}}$ elektrolizörün giriş gücü (W), V ölçülen Potansiyel (V), I ölçülen yük akımı (A), $P_{\text{çıkış}}$ elektrolizörün çıkış gücü (W), LHV alt ısıtma değeri (kJ/kg) ve η elektrolizör verimliliğidir.

Yakıt hücresindeki elektrokimyasal reaksiyonlar:



Yakıt hücresinin parametreleri; yakıt hücresi giriş gücü, yakıt hücresi çıkış gücü ve yakıt hücresi verimliliği ile belirtilir.

$$P_{\text{giriş}} = P_{\text{çıkış}} \text{ elektrolizör} \quad (3.13)$$

$$P_{giriş} = m \times LHV \quad (3.14)$$

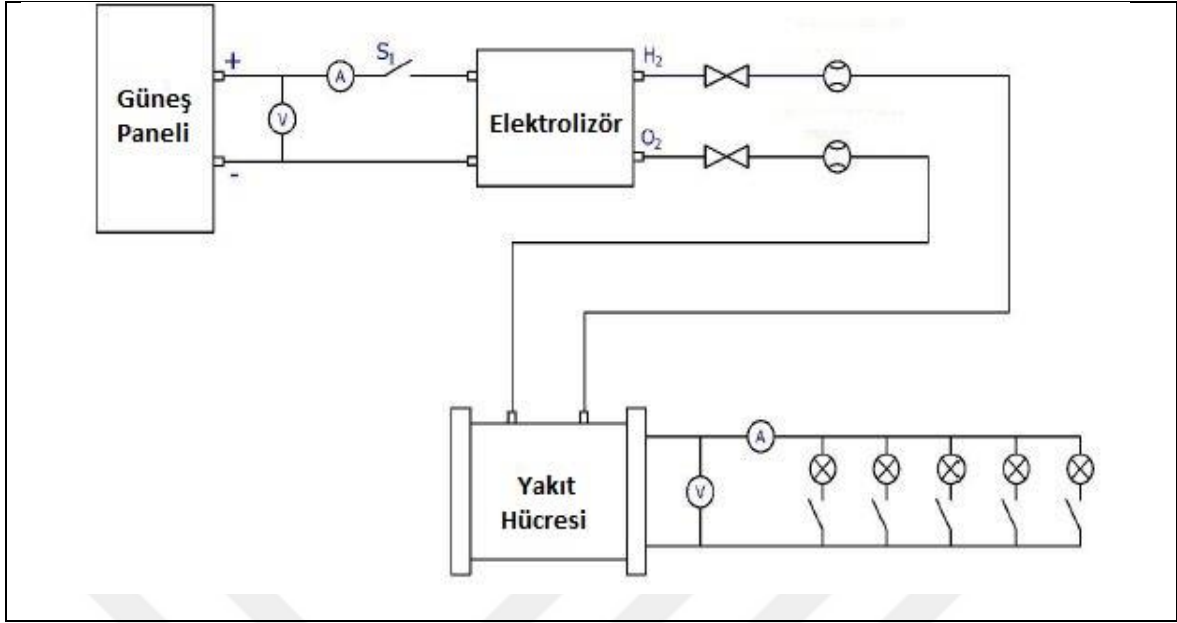
$$P_{çıkış} = V \times I \quad (3.15)$$

$$\eta = P_{çıkış} / P_{giriş} \times 100\% \quad (3.16)$$

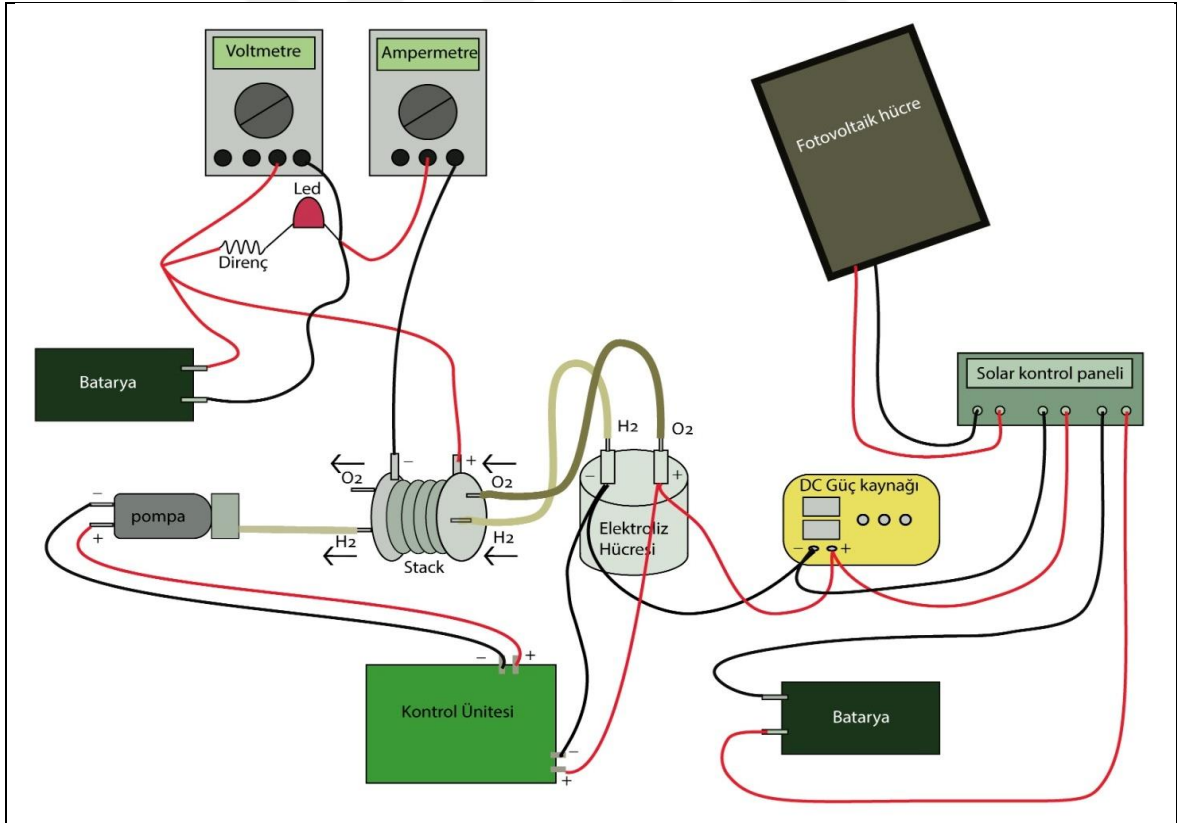
Burada, η yakıt hücresinin verimliliği (%), $P_{giriş}$ yakıt hücresinin giriş gücü (W), $P_{çıkış}$ yakıt hücresinin çıkış gücü (W), m hidrojen gazı kütlesinin akış hızı (kg/s), V ölçülen potansiyel (V), I akım (A) ve LHV , düşük ısıtma değeridir (kJ/kg).

Bu çalışmanın yürütülmesi; uygun malzeme seçimi, fotovoltaiik (FV) bileşenlerin, elektrolizörün ve yakıt hücresinin çalışma prensiplerinin dikkate alınması, sistem entegrasyonu ve montaj süreçlerini kapsamaktadır. Deneysel uygulamalar sonucunda elde edilen veriler, potansiyel–akım ve güç–akım karakteristik eğrileri şeklinde sunulmuş; her bir bileşenin performansı ayrı ayrı değerlendirilmiş ve bütüncül sistem davranışı analiz edilmiştir. Bu kapsamlı inceleme neticesinde, hidrojen yakıtının derişimindeki değışimlere bağılı olarak en yüksek verimle çalışan bir fotovoltaiik–elektrolizör–yakıt hücresi hibrit sistemi modellenmiştir.

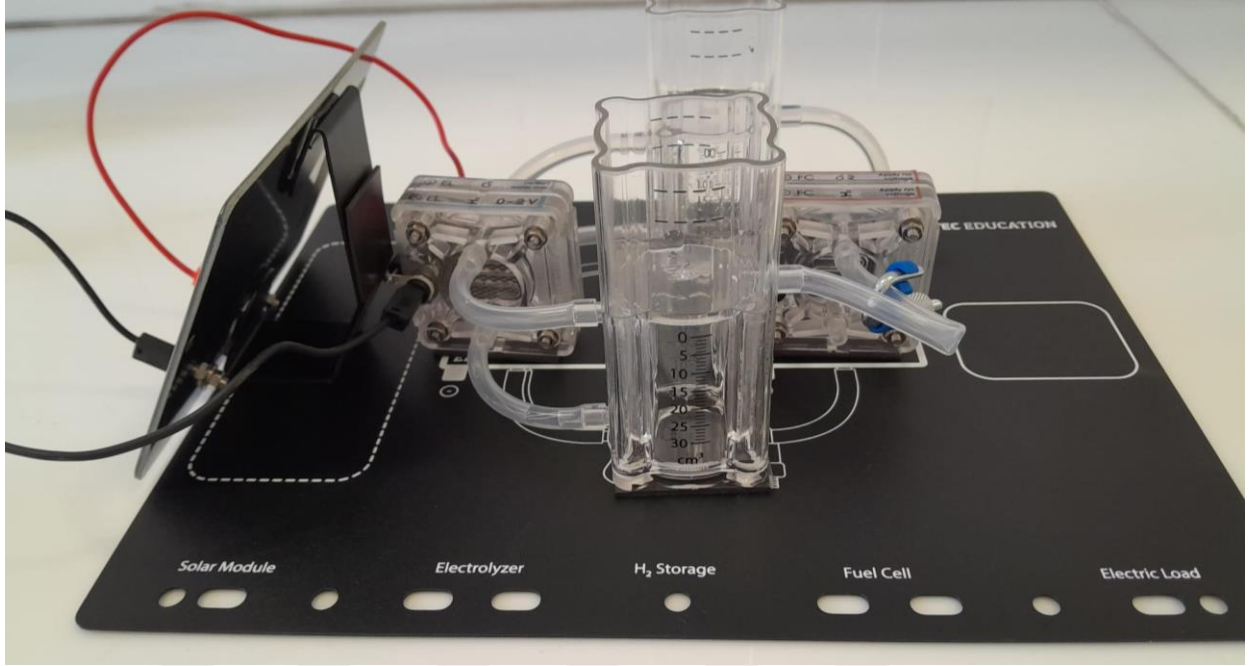
Çalışmada ayrıca, hidrojen üretimi açısından optimum elektrolit derişiminin belirlenmesi, fotovoltaiik kaynaktan elde edilen en uygun çıkış gücünün değerlendirilmesi ve PV kaynak ile beslenen sistemde yakıt hücresinin akım–potansiyel karakteristiklerinin test edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.22’de fotovoltaiik–elektrolizör–yakıt hücresi hibrit sistemine ait kablo bağlantı şeması, Şekil 3.23.’te tasarlanan şema, Şekil 3.24’te ise sistemin deneysel modeli sunulmuştur.



Şekil 3.22. Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin test devresi



Şekil 3.23. Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin tasarlanan devre akış şeması



Şekil 3.24. Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin deneysel modeli

3.7.1. Değişen KOH çözelti derişimlerinde fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü ve arasındaki ilişki

Bu çalışmada, farklı KOH çözelti derişimlerinin PV-elektrolizör-yakıt hücresi sistemi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler laboratuvar ortamında, kontrollü sıcaklık ve akım koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle fotovoltaik (PV) panellerden elde edilen elektrik enerjisi, belirlenen voltaj ve akım seviyelerinde proton değişim membranlı (PEM) elektrolizöre yönlendirilmiştir. Elektrolizörün içerisinde farklı derişimlerde (0,5 M, 1,0 M, 1,5 M) KOH çözeltisi kullanılmış ve hidrojen üretim miktarları, zamana bağlı olarak ölçülmüştür.

Elektroliz sırasında sistem, sabit akım değeri (2,0 A) ve farklı potansiyellerde (1,6 V, 1,8 V ve 2,0 V) çalıştırılmıştır. Her derişim için üretim hızı ve toplam hidrojen hacmi kaydedilmiştir. Üretilen hidrojen, aynı anda yakıt hücresine yönlendirilmiş ve hücrenin çıkış potansiyeli ile güç değeri ölçülmüştür.

Güç ölçümleri, farklı elektrolit derişimlerinin sistemin verimliliğine etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her deney, ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır.

3.7.2. Değişen KOH çözelti derişimlerinde fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliği arasındaki ilişki

Bu deneysel tasarım sayesinde, KOH çözelti derişimi ile PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin çıkış gücü ve genel enerji verimliliği arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Her koşul için elde edilen veriler, hidrojen üretimi ve elektrik enerjisi geri kazanımı açısından sistem performansının karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

3.7.3. Değişen sıcaklıklarda fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücünün incelenmesi

Çalışma sıcaklığı, yakıt hücresinde performans kayıplarını önlemek için önemli bir parametredir. Bununla birlikte çalışma sıcaklığının artırılması optimum hücre çalışma sıcaklığının belirlenmesi için önemlidir.

Bu çalışmada, PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminde sıcaklık değişiminin çıkış gücü ve enerji verimliliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sistem, fotovoltaiik panel, proton değişim membranlı (PEM) elektrolizör ve yakıt hücresinden oluşmaktadır. Deneyler laboratuvar ortamında, kontrollü sıcaklık ve standart atmosfer koşullarında yürütülmüştür.

1,5 M KOH çözeltisi hazırlanmıştır. Sıcaklığın elektroliz ve yakıt hücresi performansını üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneyler 20 °C, 40 °C ve 60 °C sıcaklıklarda yürütülmüştür. Sıcaklık, bir su banyosu ve termostat kontrollü sistem ile sabitlenmiştir. Enerji, sabit akım ve potansiyel koşullarında elektrolizöre yönlendirilmiştir. Elektroliz süresince üretilen hidrojen miktarı 5 dakikalık aralıklarla ölçülmüş ve toplam hacim kaydedilmiştir. Hücrenin çıkış potansiyeli ölçülerek güç değeri hesaplanmıştır. Sistemin genel enerji verimliliği, hidrojen üretimi ve yakıt hücresi çıkışı üzerinden hesaplanmıştır. Her sıcaklık koşulu için deney üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler alınmıştır. Bu yöntem, sistem performansının güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

3.7.4. Fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminde hidrojen ve oksijen tüketiminin zamana karşı değişiminin incelenmesi

Bu çalışma fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminde hidrojen ve oksijen tüketiminin zamana bağlı değişimini ölçmek, hücre potansiyeli, akım ve güç üretimi ile ilişkilendirmek ve optimum işletme koşullarını belirlemek amacıyla tasarlanmıştır. Yakıt

hücresi çalıştırılmış ve sistemin stabilize olması için yaklaşık beş dakika beklenmiştir. Stabil çalışma sağlandıktan sonra, hidrojen ve oksijen tüketimi elektronik yönetim sistemi yardımıyla zamana karşı kaydedilmiş, aynı zamanda hücre potansiyeli, akım ve güç yoğunluğu ölçülmüştür. Deney sırasında hidrojen ve oksijen tüketiminin zamana bağlı değişimi gözlemlenmiş, bu gözlem verileri kayıt altına alınarak grafik haline getirilerek sunulmuştur. Bu veriler hücre performansı ile ilişkilendirilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen zamana karşı tüketim eğrileri, akış hızının hücre performansı üzerindeki etkilerini ortaya koymuş ve optimum işletme koşulları belirlenmiştir. Tüm deneyler, hidrojen ve oksijenin yanıcı özellikleri göz önünde bulundurularak havalandırılmalı bir ortamda ve güvenlik önlemleri alınarak gerçekleştirilmiştir.



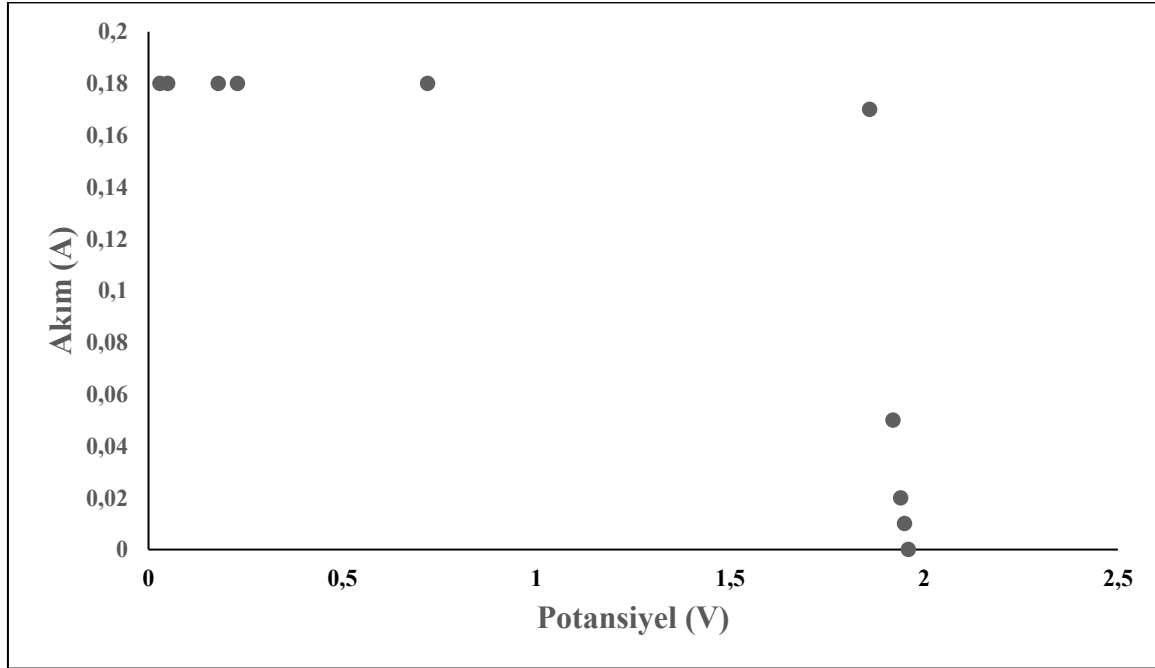


4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Güneş Panelinin Akım-Potansiyel Özellikleri, Güç Eğrisi ve Verimliliği

Çizelge 4.1. İlgili direnç için potansiyel-akım ölçümü

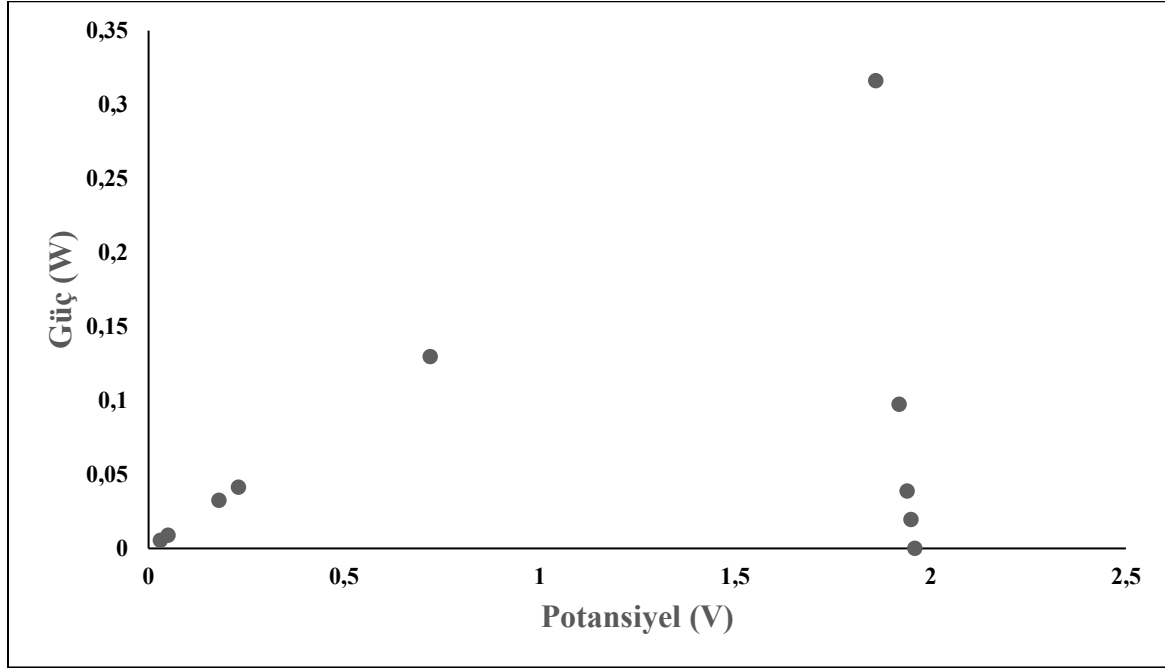
$r (\Omega)$	V (V)	I (A)	P (W)
∞	1,96	0	0
330	1,95	0,01	0,0195
100	1,94	0,02	0,0388
33	1,92	0,05	0,0975
10	1,86	0,17	0,3162
3,3	0,72	0,18	0,1296
1	0,23	0,18	0,0414
0,33	0,18	0,18	0,0324
0,1	0,05	0,18	0,0090
0	0,03	0,18	0,0054



Şekil 4.1. Güneş panelinin akım-potansiyel karakteristiği

Çizelge 4.1.'deki verilerden elde edilen akım-potansiyel grafiği Şekil 4.1.'de görülmektedir.

Burada maksimum gücün 0,3162 W olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. Güneş panelinin güç eğrisi

Maksimum elektrik gücünü veren nokta (Maksimum Güç Noktası = MGN) güç eğrisinin dönüm noktasıdır. Potansiyel ve akımın çarpımının en büyük olduğu yerde oluşur:

$$P_{MGN} = V_{MGN} \cdot I_{MGN} \quad (4.1)$$

Bu deneyde, dönüm noktası şu şekildedir:

$$P_{MGN} = 1.86 \text{ V} \cdot 0.17 \text{ A} = \underline{\underline{0.3162 \text{ W}}} \quad (4.2)$$

MGN, alanları ilgili güç değerini gösteren potansiyelin ve ilgili akımın çarpımlarını oluşturarak akım-potansiyel karakteristiğinden de belirlenebilir. En büyük alana sahip dikdörtgen, ilgili akım ve potansiyel değerleriyle maksimum güç çıkışına karşılık gelir.

Güneş panelinin verimliliği

Verimlilik η , maksimum güç noktasında *gelen ışıma gücü* $P_{\text{giriş}}$ 'in, *güneş paneli tarafından sağlanan elektriksel güç çıkışı* $P_{\text{çıkış}}$ 'a oranı olarak tanımlanır.

Güneş paneli, maksimum güç noktasında maksimum elektrik gücü verir. Deneyde $P_{\text{çıkış}}$ değeri $P_{\text{çıkış}} = 0.3162 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır.

Işığın birim alan başına ışıyım gücünü (ışınlama E_E) ölçmek için ışıyım gücü ölçüm cihazı kullanılır. Güneş piline çarpan güç olan $P_{\text{giriş}}$ 'i belirlemek için bu değerin güneş modülünün etkin alanı ile çarpılması gerekir.

$$P_{\text{giriş}} = E_E \cdot A \quad (4.3)$$

$$P_{\text{giriş}} = \text{Güneş modülüne çarpan ışığın gücü (W)} \quad E_E = \text{Işıyım} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$$

$$A = \text{Güneş modülünün etkin alanı (m}^2\text{)}$$

Verimlilik $\eta = P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}}$ formülüyle hesaplanabilir.

Işıyım gücünü ölçmek için herhangi bir ölçüm cihazı yoksa, multimetre ışığın gelen ışıyım gücünü tahmin etmek için kullanılabilir. Bu yöntem, kısa devre akımının (maksimum fotoelektrik akım) güneş piline çarpan fotonlarla (radyasyon) orantılı olduğu gerçeğini kullanır. Bu nedenle kısa devre akımı, ışığın gelen ışıma gücü ile orantılıdır.

Açık devre potansiyeli, güneş panelinin yapıldığı yarı iletken malzemeye bağlıdır. Işığın gelen ışıma gücü ile orantılı değildir ve bu nedenle bu ölçüm için kullanılamaz. Multimetreyi ışığın gücünü ölçmek amacıyla kullanmak için, niceliksel bir ifade elde etmek için multimetrede görüntülenen kısa devre akımının F faktörü ile çarpılması gerekir. Bu faktör, güneş pilinin kısa devre akımının maksimum değerine bağlıdır. Güneşli yaz koşullarında maksimum ışıyım yaklaşık 1000 W/m^2 'dir. Bu ışılamada üretici tarafından kısa devre akımı için belirtilen maksimum değere ulaşılır. Güneş modüllerinin özellikleri, 25°C 'lik bir hücre sıcaklığında 1000 W/m^2 güneş ışıyımına ilişkin standart test koşullarına dayanmaktadır.

Bu varsayıma dayanarak, standart test koşulları altında maksimum kısa devre akımı 600 mA 'dir. Aşağıdaki formülü kullanarak F faktörü kolayca hesaplanabilir.

$$F = P_{\text{max}} (\text{m}^2) / I_{K_{\text{max}}} = 1000 \text{ W/m}^2 / 600 \text{ mA} = 1,67 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{mA} \quad (4.4)$$

Multimetrede görüntülenen kısa devre akımını faktörle çarpılırsa;

$$F = 1,67 \text{ W / m}^2 \cdot \text{mA} \quad (4.5)$$

Güneş Modülüne çarpan birim alan başına gelen ışıyım gücünün yaklaşık değeri elde edilir. Güneş modülüne gelen ışıyım gücünü hesaplamak için, güneş modülünün etkin alanının ölçülmesi ve bunu birim alan başına gelen ışıyım gücüyle çarpmak gerekmektedir.

$$\text{Güneş modülü alanı: Her biri } 26 \text{ mm} \times 77 \text{ mm} \text{ olan } 4 \text{ hücre, } A = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.6)$$

Kısa devre akımı: $I_K = 200 \text{ mA}$

$$P_{in} = F \cdot I_K \cdot A = 1,67 \text{ (W / m}^2 \cdot \text{mA)} \cdot 200 \text{ mA} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 2,672 \text{ W} \quad (4.7)$$

Daha önce belirlendiği gibi, maksimum güç noktası $P_{out} = 0,3162 \text{ W}$ ($2,672 \text{ W}$ 'lık bir ışıyım gücünde).

Verimliliğin hesaplanması:

$$\eta = P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}} = 0,3162 / 2,672 = \%11,83 \quad (4.8)$$

A = Güneş modülünün etkin alanı (m^2)

I_K = Kısa devre akımı (mA)

P_{in} = Güneş modülüne çarpan ışıyım gücü (W)

P_{out} = Maksimum güç çıkışı (W)

η = Güneş modülünün verimliliği

Maksimum çıkış, güç eğrisinden kolaylıkla okunabilir. Bu noktaya MGN (Maksimum Güç Noktası) denir. Akım-potansiyel karakteristiğinde MGN, koordinat eksenleri (V ve I) arasında uzatılabilen ve karakteristik tarafından çevrelenebilen mümkün olan en büyük dikdörtgen alanı tanımlar. Maksimum çıkış gücünün en büyük olduğu nokta olan R_{MGN} direnci aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$R_{MGN} = V_{MGN} / I_{MGN}$$

Polikristal güneş panellerinin verimleri %14 ile %16 arasında değişmektedir. %11,83 olarak hesaplanan verimlilik biraz daha azdır. Bunun nedeni, gelen ışıyım gücünün belirlenmesindeki ölçüm hataları ve yanlışlıklardır.

Ayrıca, güneş modüllerinin verimliliği, bireysel güneş hücrelerinin verimliliğinden daha düşüktür. Bunun nedeni, tüm güneş panellerinin aynı özelliklere sahip olmaması nedeniyle meydana gelen eşleşme kayıplarından kaynaklanır. Güneş panelleri tek bir modül oluşturmak için seri olarak bağlanırsa, hepsi aynı maksimum güç noktasına sahip olmaz.

Güneş panelinin verimliliği, işlemler sırasında meydana gelen kayıplarla azalır: Işığın bir kısmı güneş paneli yüzeyine çarptığında yansıtıldığından güneş panellerine çarpan tüm fotonlar yük taşıyıcılarına dönüştürülemez; Ayrıca, metal temas noktalarında da gölge oluşur. Foton enerjisi enerji boşluklarına karşılık gelmediğinden, gelen enerjinin yarısından fazlası kullanılmaz. Ek olarak, enerji taşıyıcıları yeniden birleştirilir (elektronların atomik olarak yeniden bağlanması) ve güneş panelinin iç dirençlerinde (yarı iletken malzemedeki ohmik kayıplar) ve bunların temas noktalarında elektriksel kayıplar da vardır.

4.2. PEM Elektrolizörü

4.2.1. Hidrojen ve Oksijen gazının ortaya çıkan hacmine göre suyun ayrışması

Üretilen hidrojen gazının hacmi oksijen gazının hacmiyle karşılaştırılır. Elektrolizör, suyu hidrojen ve oksijen elementlerine ayırır. Teorik olarak 2:1'lik bir hidrojen/oksijen hacmi oranı beklenir. Aynı anda 10 cm³ hidrojen ve 5 cm³ oksijen oluşur. Deney sonucu bu varsayımı doğrulamaktadır.

Çizelge 4.2. Üretilen hidrojen ve oksijen hacminin ölçümü

Üretilen Hidrojen Hacmi	Üretilen Oksijen Hacmi
10 cm ³	5 cm ³

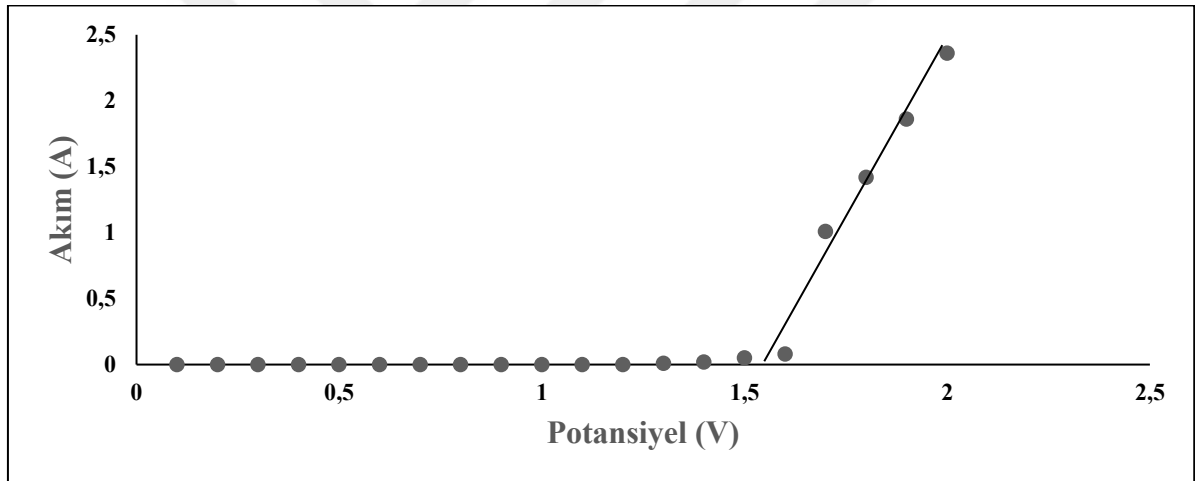
4.2.2. PEM elektrolizörünün akım-potansiyel karakterizasyonu

PEM elektrolizörü, belirli bir DC Potansiyel değeri aşıldıkça sürekli olarak hidrojen ve oksijen gazı üretmemiştir. Bu yüzden akım oluşmamıştır. Bu noktadan itibaren potansiyel arttıkça akım da artar.

Çizelge 4.3. Uygulanan farklı potansiyeller için ilgili akım ölçümü

V(V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I(A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V(V)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
I(A)	0	0	0,01	0,02	0,05	0,08	1,01	1,42	1,86	2,36

Elektrolizörün akım-potansiyel karakteristiğini belirlemek için akım-potansiyel grafiği çizilir. Ortaya çıkan eğri, elektrolizörün kesişen iki düz çizgi ile yaklaşılabilen potansiyel-akım karakteristiğidir (Şekil 4.3). 2 düz çizgi çizilerek ekstrapolasyon ile eğimli çizginin kesişme noktasını x eksenine ile işaretlenir. Bu kesişme noktası, suyun pratik ayrışma potansiyelini (V_a) gösterir. Bu değer teorik ayrışma potansiyeli ile karşılaştırılır.



Şekil 4.3. Elektrolizörün akım-potansiyel karakteristiği

Akımlar ve uygulanan potansiyel arasındaki ilişki Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Eğri, belirli bir potansiyel akmaya başlayana kadar hiçbir akımın akmadığını açıkça göstermektedir.

Su, ölçülebilir bir akımın gözlemlenmeye başladığı 1,6 V potansiyelinde Hidrojen ve Oksijen gazlarına ayrılmaya başlamıştır.

Ayrışma potansiyeli, daha dik çizginin ve apsisin (x eksenine) kesişme noktasında bulunur. Suyun teorik ayrışma potansiyeli 1,23 V'dur. Su bu potansiyelin altında ayrılmaz. Ancak pratikte, bu potansiyel, elektrolizördeki kayıplardan dolayı daha yüksektir. Teorik ve pratik değer arasındaki fark, örneğin elektrot malzemesinin türü ve bileşimi, elektrolitler ve

sıcaklık gibi çeşitli parametrelere bağlıdır.

4.2.3. PEM elektrolizörünün enerji verimliliği ve Faraday verimliliği

Çizelge 4.4. Zaman, potansiyel ve akım, üretilen hidrojen gazının hacimleri

Üretilen V(H ₂) (cm ³)	t (s)	V (v)	I (A)	P= V.I (W)
0	0	1,96	1,03	2,02
5	37	1,96	1,02	1,99
10	78	1,96	1,02	1,99
15	119	1,95	1,02	1,98
20	157	1,95	1,02	1,98
25	196	1,95	1,01	1,96
30	238	1,96	1,02	1,99

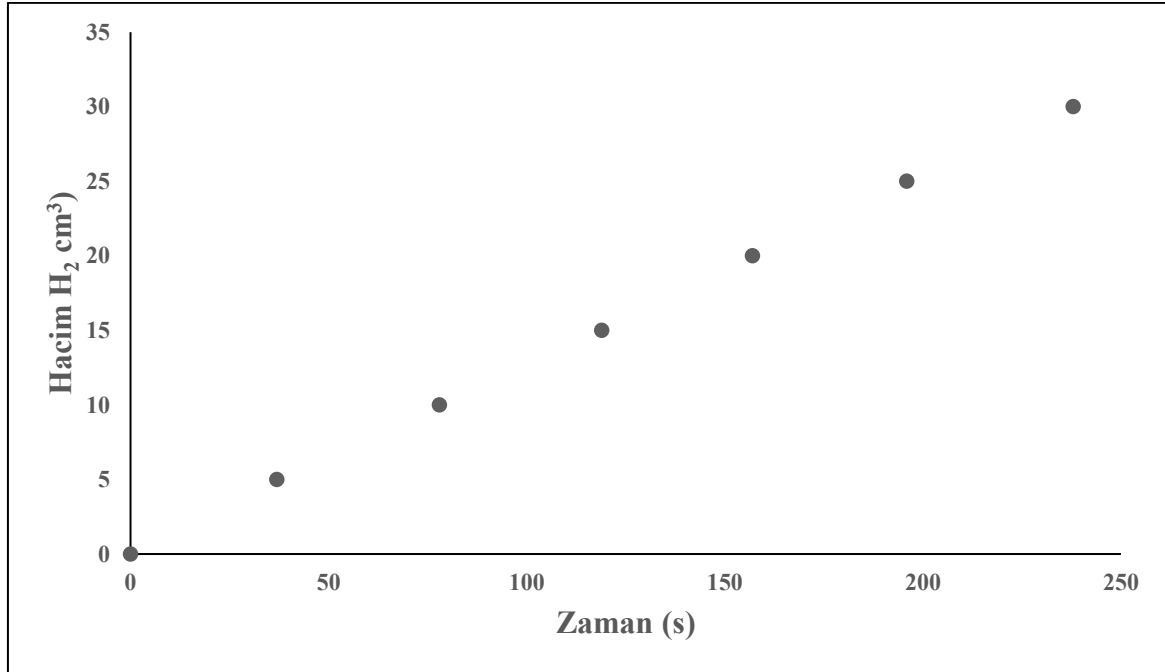
PEM elektrolizörüne uygulanan doğru akım (DC) potansiyeli belirli bir eşiğin üzerine çıktığında, hidrojen ve oksijen gazlarının sürekli üretimi gerçekleşmiş ve bu durum Çizelge 4.4.'te gösterilmiştir.

Verimlilik, η_{enerji} , giriş enerjisinin ($E_{\text{giriş}}$) ne kadarının elektrolizörde gerçek enerji ($E_{\text{kullanılabilir}}$) olarak harcandığını gösterir,

$$\eta_{\text{enerji}} = E_{\text{kullanılabilir}} / E_{\text{giriş}} = E_{\text{Hidrojen}} / E_{\text{elektrik}} \quad (4.9)$$

Verimlilik ne kadar yüksek olursa, enerji kullanımı o kadar iyi olur.

Üretilen gaz hacmini zamanın bir fonksiyonu olarak gösteren grafik Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Elektrolizörün gaz hacmi-zaman grafiği ($P = 1.96 \text{ W'ta}$) $V(H_2) \text{ cm}^3$

PEM elektrolizörünün enerji verimliliği

$$\eta_{\text{enerji}} = E_{\text{kullanılabilir}} / E_{\text{giriş}} = E_{\text{Hidrojen}} / E_{\text{elektrik}} = V H_2 \cdot H_h / V \cdot I \cdot t \quad (4.10)$$

$$\eta_{\text{enerji}} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot 12,745 \cdot 10^6 \text{ (J/m}^3\text{)} / 1,96 \text{ V} \cdot 1,02 \cdot 238 = 0,80 = \%80 \quad (4.11)$$

H_h = Hidrojenin kalori değeri = $12.745 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$

$V(H_2) = \text{m}^3$ cinsinden üretilen hidrojen miktarı

V = Potansiyel (V)

I = Akım (A)

t = Zaman (s)

Çizelge 4.4. elektrolizörün elektrik güç tüketiminin zaman içinde sabit olduğunu göstermektedir. Gaz hacmi/zaman grafiği, üretilen gazın hacminin doğrusal olarak zamana bağlı olduğunu gösterdiğinden, hidrojen üretimi de sabittir.

Bu deneyde, elektrolizörün enerji verimliliği %80'dir. Bu elektrolizörü çalıştırmak için kullandığımız elektrik enerjisinin %80'inin hidrojen gazında depolandığı anlamına gelir. Belirli elektrotlar (aşırı potansiyel genellikle teorik potansiyelin deneysel olarak belirlenen

gerçek ayrışma potansiyelinden sapması olarak tanımlanır). Elektrolizör hücresinin iç direnci ve hücre içindeki gazların difüzyon kayıpları nedeniyle aşırı potansiyel sırasında kayıplar meydana gelir.

PEM elektrolizörünün Faraday verimliliği

Faraday'ın ikinci yasası ve ideal gaz yasası kullanılarak, akan akım ile elektrolizörün teorik üretilen gaz hacmi arasında bir ilişki kurulabilir.

Elektrolizörün Faraday verimliliği, üretilen gerçek gaz hacminin hesaplanan teorik gaz hacmine oranından elde edilebilir.

İkinci Faraday yasası:

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad (4.12)$$

İdeal gaz yasası:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (4.13)$$

Faraday'ın ikinci yasası ve ideal gaz yasası kullanılarak, gaz hacmi 4.14'deki formülden hesaplanabilir:

$$V = R \cdot I \cdot T / F \cdot p \cdot z \quad (4.14)$$

$V = m^3$ cinsinden üretilen gazın teorik hacmi

R = Evrensel gaz sabiti = 8.314 J/mol.K

p = Pa cinsinden ortam basıncı (1 Pa=1N/m²)

F = Faraday sabiti = 96485 C/mol

T = K cinsinden ortam sıcaklığı

I = A'daki akım

t = s cinsinden zaman

Q = C cinsinden elektrik yükü

n = Mol cinsinden madde miktarı

z = bir molekülü serbest bırakacak elektron sayısı:

z (H₂) = 2, yani 1 mol hidrojen salmak için 2 mol elektron gerekir. z (O₂) = 4

$$V_{(\text{hesaplanan})} = 8,314 \text{ J/mol.K} \cdot 1,01 \text{ A} \cdot 298 \text{ K} \cdot 238 \text{ s} / 96485 \text{ C/mol} \cdot 1,013 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot 2 \quad (4.15)$$

$$V_{(\text{hesaplanan})} = 3,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 30,5 \text{ cm}^3 \quad (4.16)$$

Faraday verimliliği aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$\eta_{\text{Faraday}} = V(\text{H}_2(\text{deneysel})) / V(\text{H}_2(\text{hesaplanan})) \quad (4.17)$$

Bu deneyde üretilen hidrojenin hacmi:

$$V(\text{H}_2(\text{deneysel})) = 30 \text{ cm}^3 \quad (4.18)$$

Bu nedenle, Faraday verimliliği:

$$\eta_{\text{Faraday}} = 30 \text{ cm}^3 / 30,5 \text{ cm}^3 = 0,98 \quad (4.19)$$

$$\eta_{\text{Faraday}} = 98\% \quad (4.20)$$

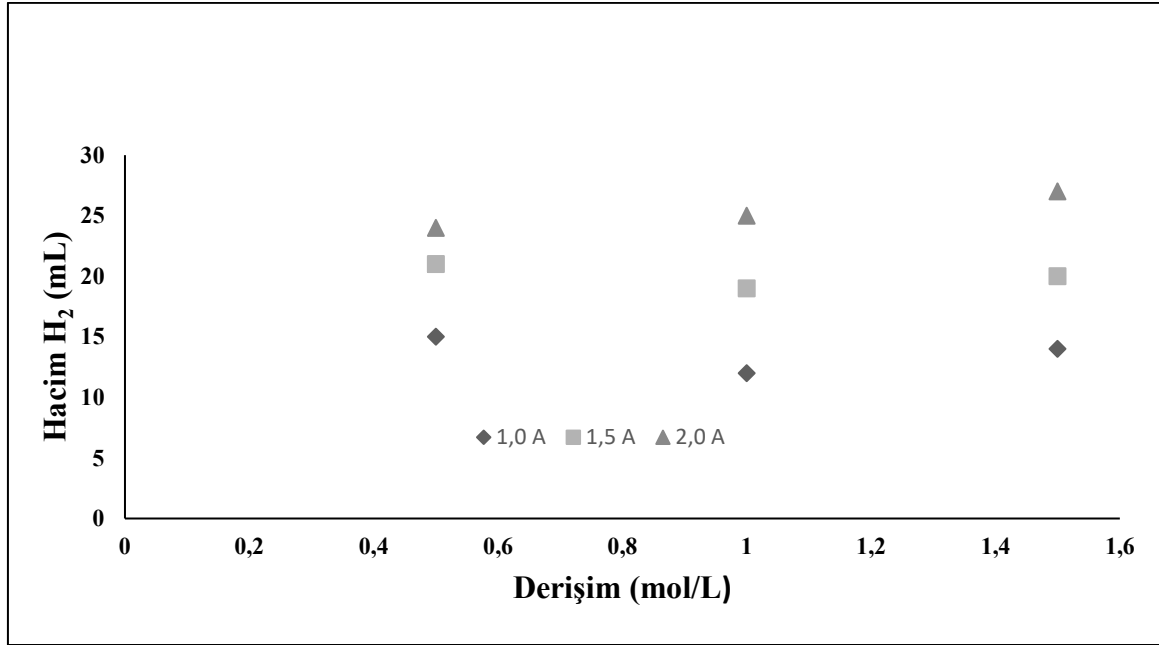
Üretilen gazın teorik ve gerçek hacmi arasındaki fark çok küçüktür, yani elektrik akımı neredeyse tamamen amaçlanan reaksiyona (suyun hidrojen ve oksijene ayrışması) dönüştürülür. Hiçbir yan reaksiyon meydana gelmez. Hücre içinde çok küçük gaz difüzyon kayıpları meydana gelebilir. Difüzyon kayıpları, gazın çok küçük bir kısmının elektrolizörün membranından difüzyonu katalizör ile reaksiyona girerek su oluşturması sonucu meydana gelir. Dolayısıyla üretilen gazların küçük bir kısmı, hücreden kaçamadan doğrudan dönüştürülür.

4.3. Farklı Elektrolit Derişimlerinde ve Sürelerinde Elektrolizör İle Hidrojen Üretimi

4.3.1. Farklı elektrolit derişimlerinin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerine etkisi

Çizelge 4.5. Farklı akımlarda değişen NaOH derişimlerinde üretilen H₂ hacmi çizelgesi

Derişim (M)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
0,5	15	21	24
1,0	12	19	25
1,5	14	20	27



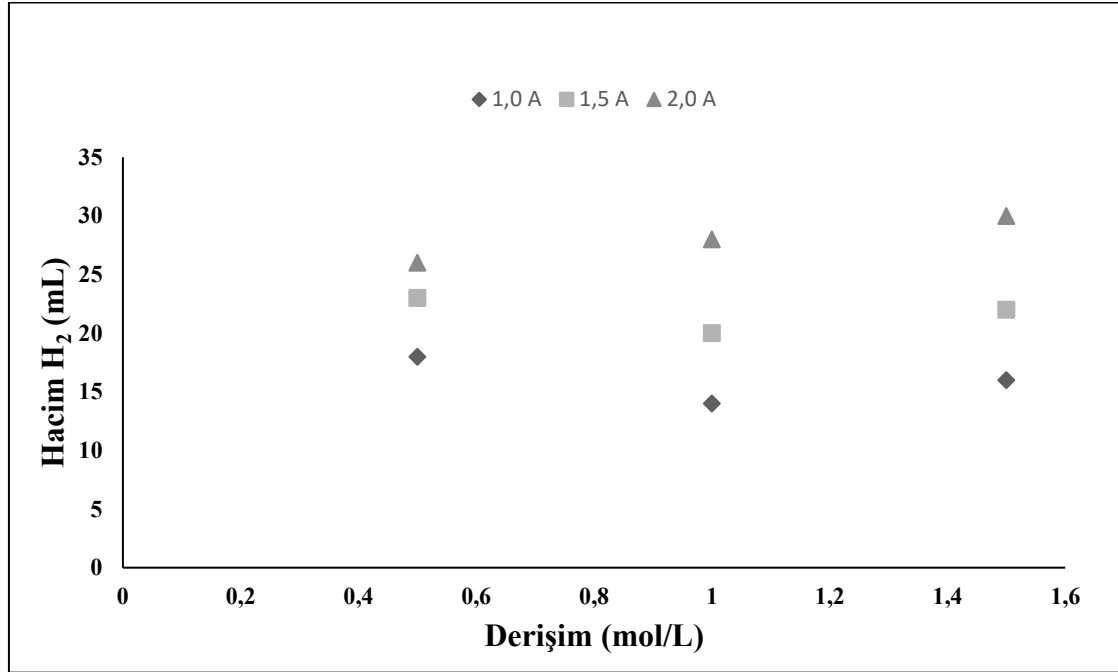
Şekil 4.5. NaOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Çizelge 4.6. Farklı akımlarda değişen KOH derişimlerinde üretilen H₂ hacmi çizelgesi

Derişim (M)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
0,5	18	23	26
1,0	14	20	28
1,5	16	22	30

Uygulanan tüm farklı akımlarda hidrojen üretmek için KOH kullanımının, NaOH kullanımına kıyasla daha iyi olduğunu göstermiştir. Uygulanan akımın etkileri açık bir şekilde gözlemlenmiştir, çalışma akımı arttıkça hidrojen üretimi de artmıştır. Bu, kullanılan her iki katalizörde de (NaOH ve KOH) görülmüştür. Bunun nedeni, akım arttıkça artan elektroliz işlemine bağlanabilir. Ek olarak, deneysel sonuç, tüm farklı akımlarda 1 M KOH'e kıyasla 1,5 M H₂ üretiminde (KOH) bir artış göstermiştir. Bu sonuç, özellikle (1,0 ve 1,5 M) aralığında elektroliz işleminden etkilenebilecek çözelti içindeki KOH'nin çözünürlüğü açısından açıklanabilir. Aynı eğilim, 0,5 ve 1,0 M'a kıyasla 1,5 M'da H₂ üretiminde hafif bir artış gösteren NaOH ortamında da gözlenmiştir. Ayrıca bu, çözünürlük ve uygulanan akımdaki (2 A) artış ile ilgili olabilir. Bununla birlikte, sonuç, her ikisi için de (1,0 A ve 1,5 A) 0,5 M'deki H₂ üretiminin değerinin, (1,0 ve 1,5 M) ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu, elektrot yüzeyindeki iyonların adsorpsiyonu üzerinde etkilenen

düşük elektrolit derişimi ile açıklanabilir. Katyonların taşınma sayısının, daha yüksek tuz derişimlerinde biraz azalma eğiliminde olduğu bildirilmiştir (Porciúncula, 2012).



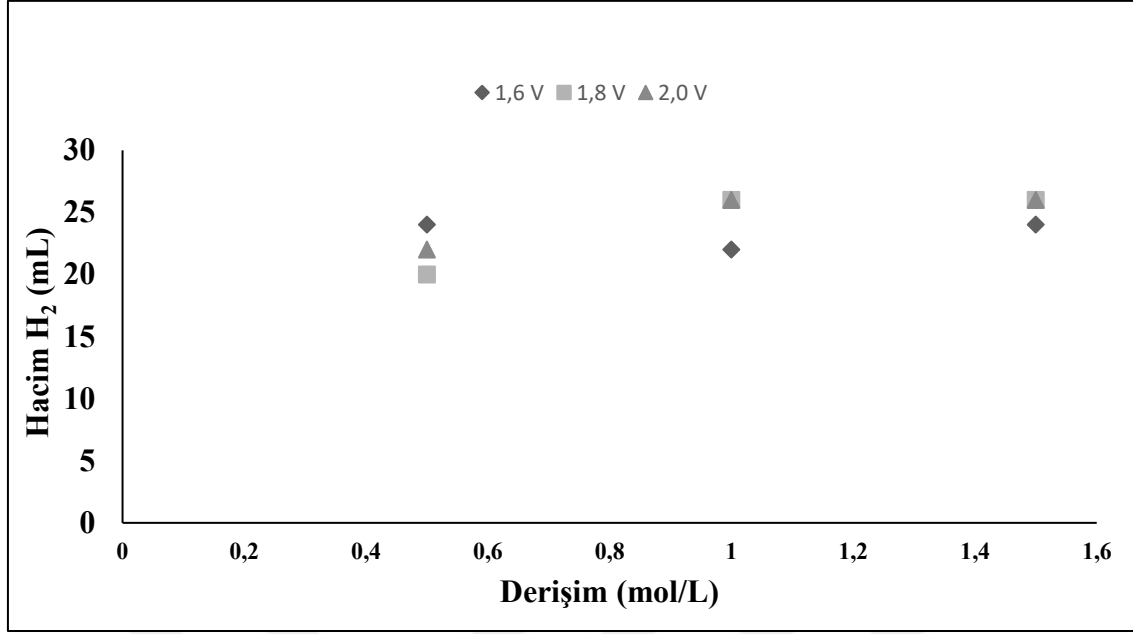
Şekil 4.6. KOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisi

4.3.2. Farklı elektrolit derişimlerinin farklı potansiyellerde H₂ üretimi üzerine etkisi

Bu deneyde farklı potansiyellerde elektrolit derişimlerinin H₂ üretimi üzerine etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.7. Farklı potansiyellerde değişen NaOH derişimlerinde üretilen H₂ hacmi çizelgesi

Derişim (M)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
0,5	24	20	22
1,0	22	26	26
1,5	24	26	26



Şekil 4.7. NaOH derişiminin farklı potansiyellerde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

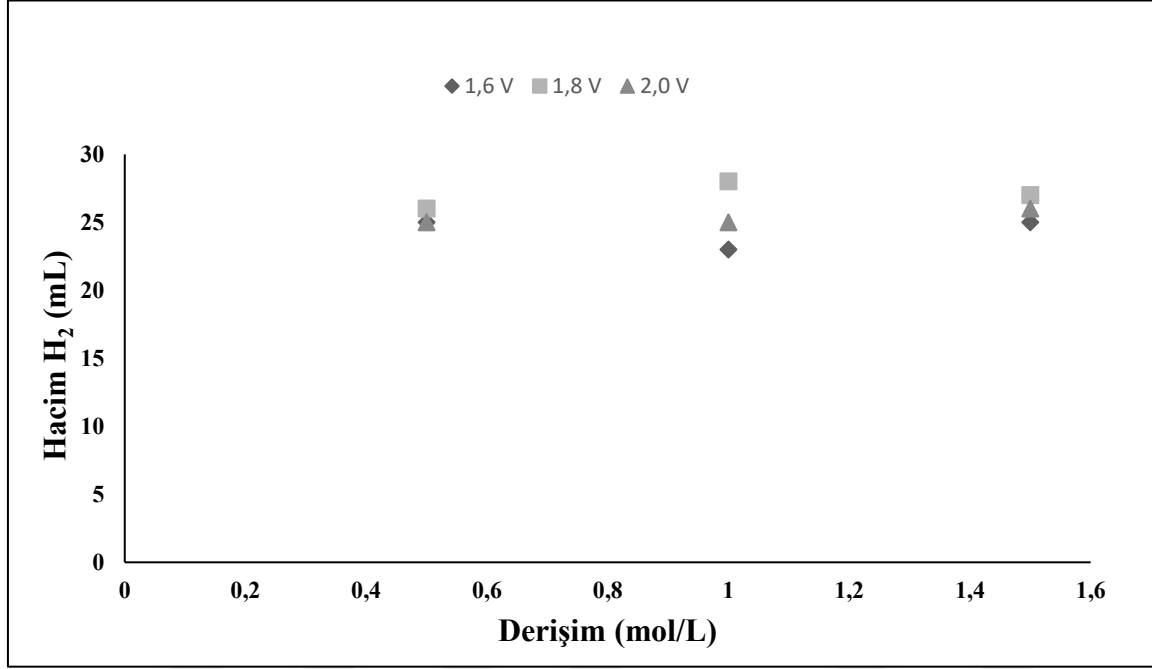
Çizelge 4.8. Farklı potansiyellerde değişen KOH derişimlerinde üretilen H₂ hacmi çizelgesi

Derişim (M)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
0,5	25	26	24
1,0	23	28	25
1,5	25	27	26

Düşük elektrolit derişiminde (0,5 M), KOH çözeltisinde elde edilen hidrojen üretim oranlarının, uygulanan her iki potansiyel seviyesinde de NaOH çözeltisine kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek derişim koşullarında (1,5 M), KOH ortamı yine NaOH'e göre üstün performans sergilemiş ve her iki potansiyel düzeyinde daha verimli hidrojen üretimi sağlamıştır. NaOH çözeltisinde ise 1,0 M derişimdeki hidrojen üretim oranı, 0,5 M'ye göre yalnızca sınırlı bir artış göstermiştir; bu durum, NaOH'un sınırlı çözünürlüğüne bağlanmaktadır. Bununla birlikte, elektrolit derişiminin artması genel olarak hidrojen üretim oranında bir artışa yol açmıştır.

Elde edilen veriler, uygulanan potansiyel yükseldikçe elektrolitin verimliliğinde bir azalma meydana geldiğini ve bu verimliliğin belirli bir derişim aralığında optimize edilebildiğini göstermektedir (Pinto vd., 2025). Bu durumun temelinde, çözeltide artan iyonik iletkenlik

yer alabilir. Ayrıca, potansiyel ile elektrolit derişimi arasındaki ters yönlü ilişkinin, sistemde oluşan derişim polarizasyonundan -yani elektrolit iç direncinin artmasıyla oluşan potansiyel kayıplarından- ve hidrojen iyonu ya da su molekülü derişimlerindeki değişimlerden kaynaklandığı sonucuna ulaşılabilir.



Şekil 4.8. KOH derişiminin farklı potansiyellerde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

4.3.3. Farklı akımlarda zamanın etkisi

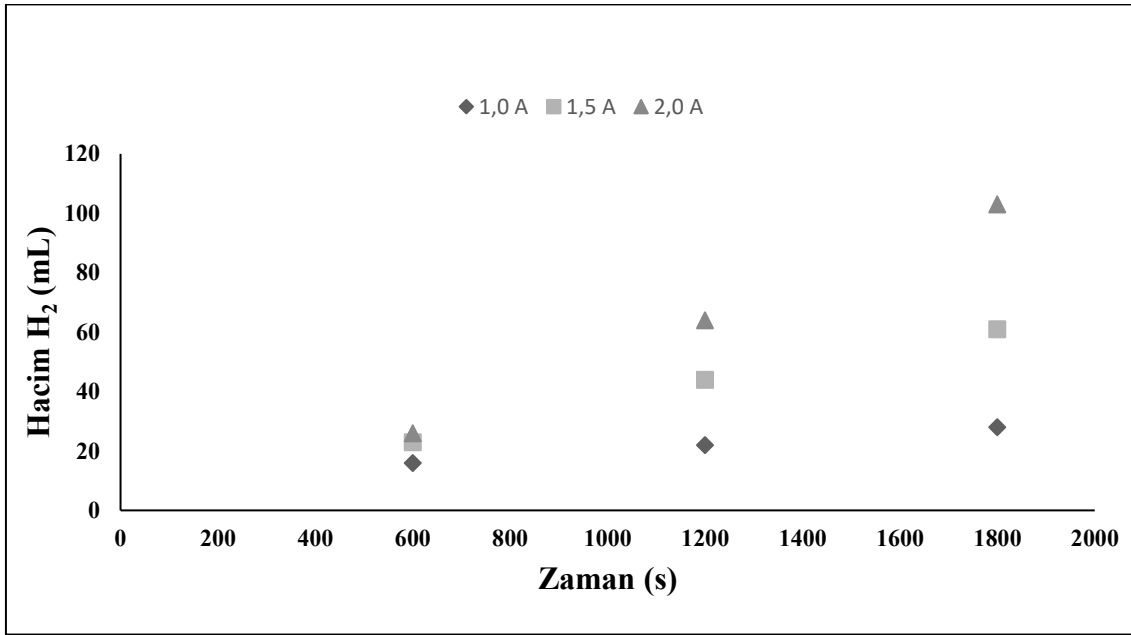
Bu deneyde sabit potansiyel altında farklı elektrolit ortamlarında uygulanan farklı akım değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği incelenmiştir.

0,5M NaOH ve KOH farklı akımlarda zamanın etkisi

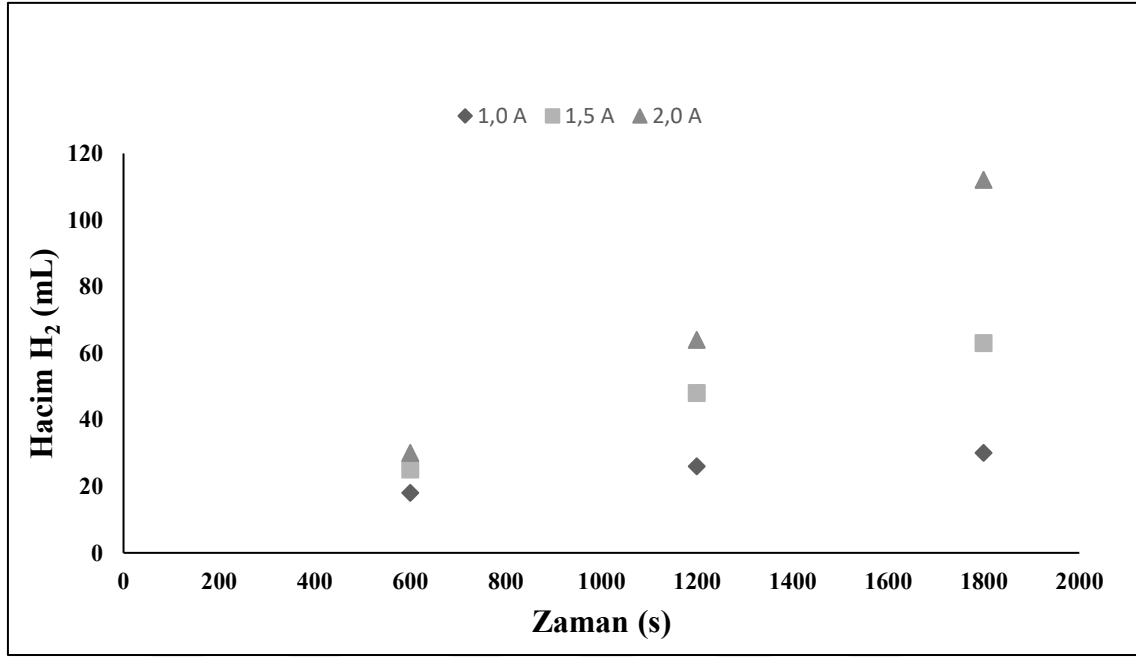
Bu deneyde 1,8 V sabit potansiyelde 0,5M NaOH ve KOH ortamlarında uygulanan farklı akım değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Çizelge 4.9. Farklı akımlarda 0,5 M NaOH derişiminde üretilen H₂ hacmi-zaman çizelgesi

Zaman (s)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
600	16	23	26
1200	22	44	64
1800	28	61	103

Şekil 4.9. 0,5 M NaOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisiÇizelge 4.10. Farklı akımlarda 0,5 M KOH derişiminde üretilen H₂ hacmi-zaman çizelgesi

Zaman (s)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
600	18	25	30
1200	26	48	64
1800	30	63	112



Şekil 4.10. 0,5 M KOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisi

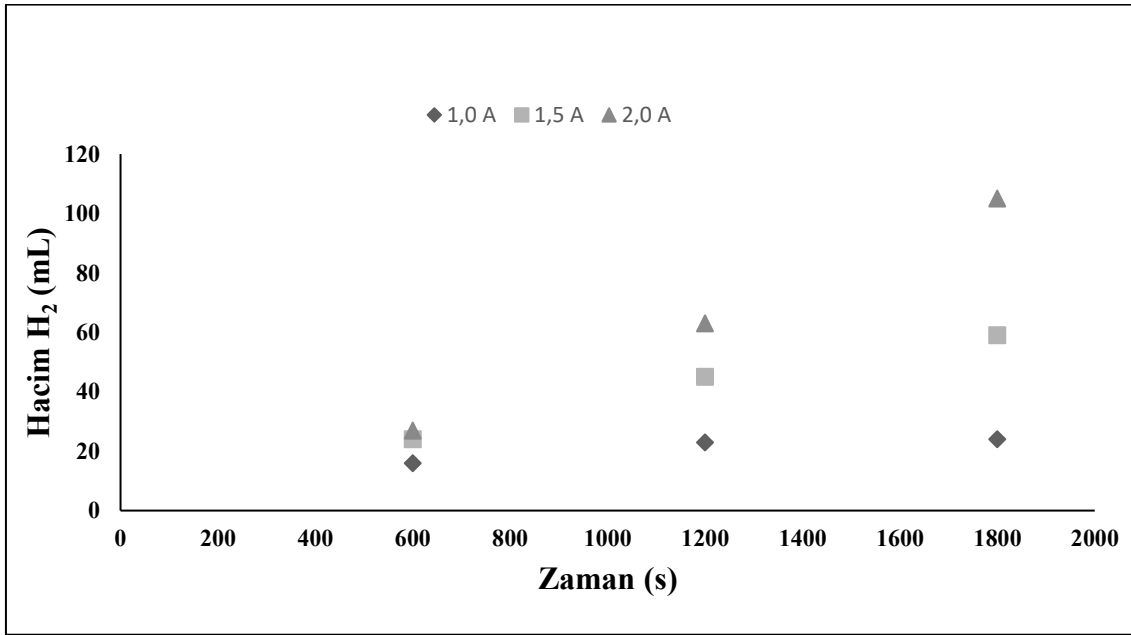
Bu deney potansiyelin 1,8 V ve derişimin 0,5 M olarak sabit tutulduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular genel olarak, her iki elektrolit ortamında da zaman arttıkça hidrojen üretim oranının yükseldiğini göstermektedir. Deneysel veriler, KOH elektrolitinde gözlenen performans artışının NaOH ortamına kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, KOH çözeltisinin daha yüksek iyonik iletkenliğe sahip olmasıyla açıklanmaktadır. Uygulanan 2,0 A akım koşullarında hidrojen üretiminin en yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiş; üretim miktarının reaksiyon süresiyle doğru orantılı olarak arttığı açıkça görülmüştür. Bununla birlikte, NaOH ve KOH ortamlarında gerçekleşen elektrokimyasal süreçlerin katalitik mekanizmaları arasında belirli farklılıklar bulunduğu literatürde de belirtilmektedir (Saleet, 2017). Özellikle KOH varlığında aktivasyon enerjisinin daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak reaksiyon hızının arttığı bildirilmektedir. Bu nedenle KOH elektrolitindeki daha yüksek üretim verimi, çözeltinin kinetik avantajlarıyla ilişkilendirilebilir.

1,0 M NaOH ve KOH farklı akımlarda zamanın etkisi

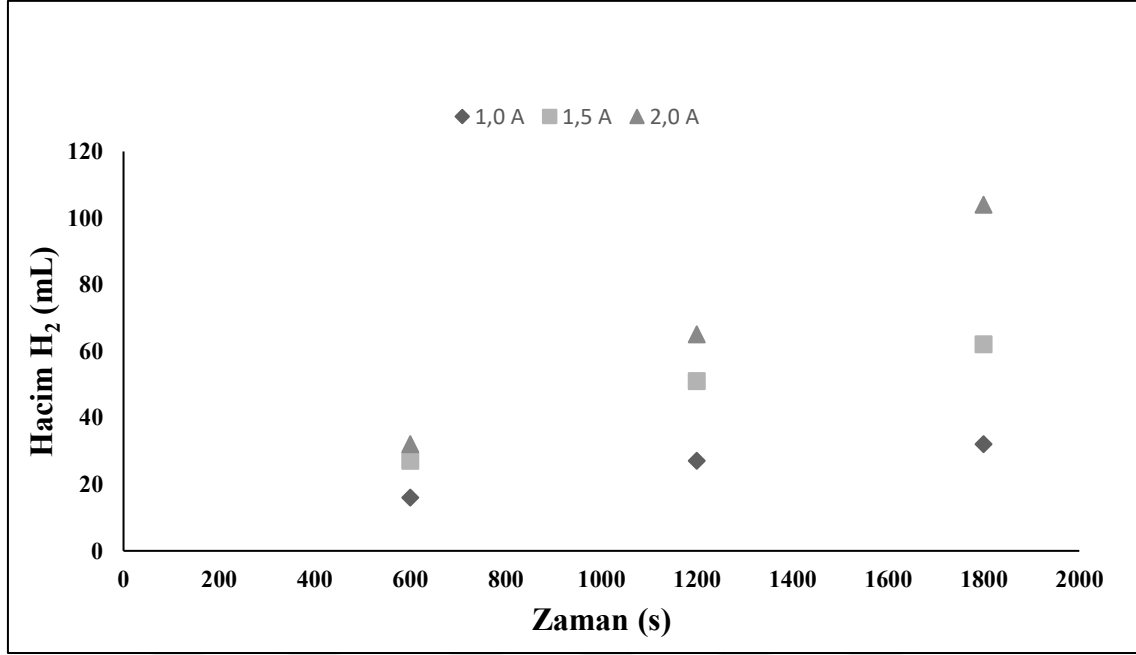
Bu deneyde 1,8 V sabit potansiyelde 1,0 M NaOH ve KOH ortamlarında uygulanan farklı akım değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Çizelge 4.11. Farklı akımlarda 1,0 M NaOH derişiminde üretilen H₂ hacmi-zaman çizelgesi

Zaman (s)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
600	16	24	27
1200	23	45	63
1800	24	59	105

Şekil 4.11. 1,0 M NaOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisiÇizelge 4.12. Farklı akımlarda 1,0 M KOH derişiminde üretilen H₂ hacmi-zaman çizelgesi

Zaman (s)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
600	16	27	32
1200	27	51	65
1800	32	62	104



Şekil 4.12. 1,0 M KOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Sabit potansiyel koşullarında (1,8 V) gerçekleştirilen deneylerde, elektrolit derişiminin artmasıyla hidrojen üretiminde her iki elektrolit ortamında da benzer eğilimlerin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Çalışma süresinin uzaması, sistem tarafından üretilen hidrojen miktarının artmasına doğrudan katkı sağlamıştır. Elde edilen bulgular, uygulanan akım yoğunluğunun yükselmesiyle test süresi boyunca hidrojen üretim veriminin arttığını ortaya koymaktadır (Pinto vd., 2025).

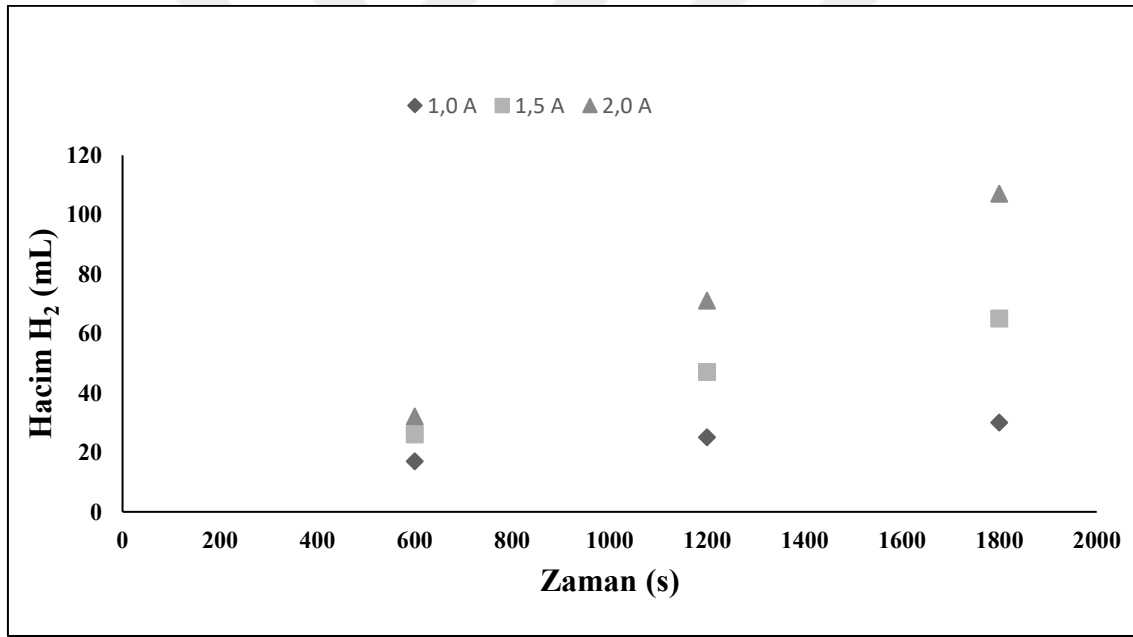
Daha yüksek hidrojen üretim değerleri, elektrolit çözeltisindeki iyon yoğunluğunun artması ve buna bağlı olarak iyonik iletkenliğin zamanla yükselmesiyle ilişkilidir. Elektroliz sürecinde çözeltide oluşan yüksek H⁺ iyon konsantrasyonu, hidrojen gazı (H₂) üretimini belirleyen temel parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Elektrokimyasal mekanizma içerisinde H₂ moleküllerinin oluşumuna ilişkin ardışık reaksiyon adımları, hidrojen üretim hızını kontrol eden kritik kinetik faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, deney süresinin artmasıyla birlikte daha fazla H₂ molekülünün oluşması, gözlenen zaman bağımlı üretim artışının temel açıklaması olarak değerlendirilebilir.

1,5 M NaOH ve KOH farklı akımlarda zamanın etkisi

Bu deneyde 1,8 V sabit potansiyel altında 1,5 M NaOH ve KOH ortamlarında uygulanan farklı akım değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Çizelge 4.13. Farklı akımlarda 1,5 M NaOH derişiminde üretilen H₂ hacmi-zaman çizelgesi

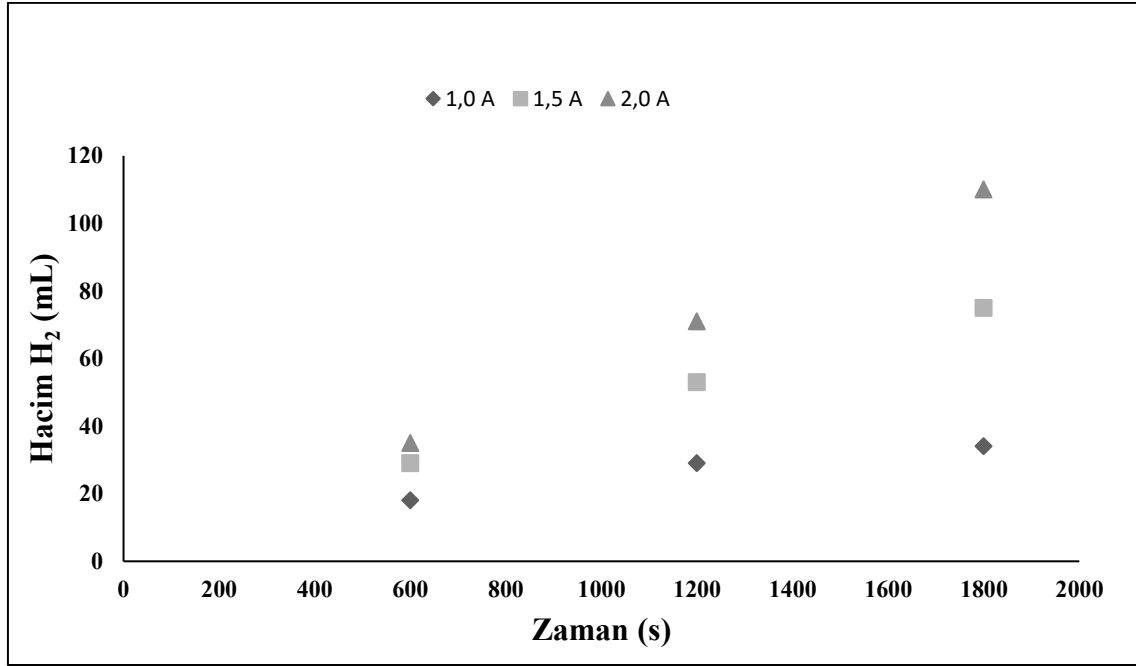
Zaman (s)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
600	17	28	32
1200	25	47	71
1800	30	65	107



Şekil 4.13. 1,5 M NaOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Çizelge 4.14. Farklı akımlarda 1,5 M KOH derişiminde üretilen H₂ hacmi-zaman çizelgesi

Zaman (s)	1,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)	1,5 A'de Üretilen H ₂ (mL)	2,0 A'de Üretilen H ₂ (mL)
600	18	29	38
1200	29	53	71
1800	34	75	110



Şekil 4.14. 1,5 M KOH derişiminin farklı akımlarda H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Genel olarak, zamanın artışıyla birlikte hidrojen (H₂) üretiminin her iki elektroliz ortamında da tüm farklı akım değerleri için yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, uygulanan akım yoğunluğundaki artışın hem NaOH hem de KOH elektrolit çözeltilerinde H₂ üretimini artırdığı belirlenmiştir. KOH ortamında elde edilen hidrojen üretim miktarının, NaOH ortamına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, KOH elektrolitinin NaOH'e göre daha yüksek iyonik iletkenliğe sahip olmasına ve bu farkın hidrojen üretimini artırdığı dolayısıyla elektrokimyasal reaksiyonların daha verimli gerçekleştiği bildirilmiştir (Gambou vd., 2023; Grigoriev ve Millet, 2020).

Elde edilen sonuçlar, daha yüksek elektrolit derişimlerinin (1,5 M ve 1,8 V potansiyel altında) zamanla hidrojen üretim oranlarında yalnızca sınırlı bir değişikliğe yol açtığını göstermektedir. Bu gözlem, elektrolit derişimindeki artışın çözeltinin iletkenliğini belirli bir noktaya kadar artırmasına karşın, bu etkinin belirli bir eşik değerden sonra sınırlı kalmasıyla açıklanabilir. Dolayısıyla, derişim değişikliklerinin hidrojen üretim hızına olan etkisi, çözeltinin iyonik iletkenliği ve elektrokimyasal kinetik sınırlamaları çerçevesinde değerlendirilmelidir ((Brauns ve Turek, 2020; Gambou vd., 2022; Pinto vd., 2025).).

4.3.4. Farklı potansiyellerde zamanın etkisi

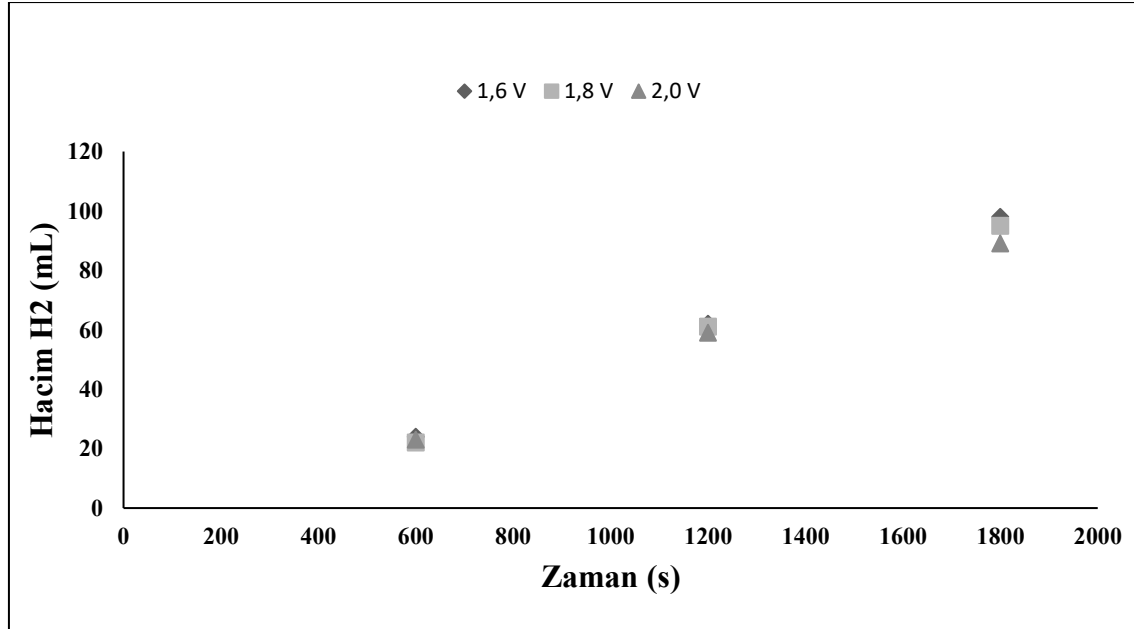
Bu deneyde sabit akım altında farklı elektrolit ortamlarında uygulanan farklı potansiyel değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği araştırılmıştır.

0,5M NaOH ve KOH farklı akımlarda zamanın etkisi

Bu deneyde 2,0 A sabit akım altında 0,5 M NaOH ve KOH ortamlarında uygulanan farklı potansiyel değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği incelenmiştir.

Çizelge 4.15. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5M NaOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

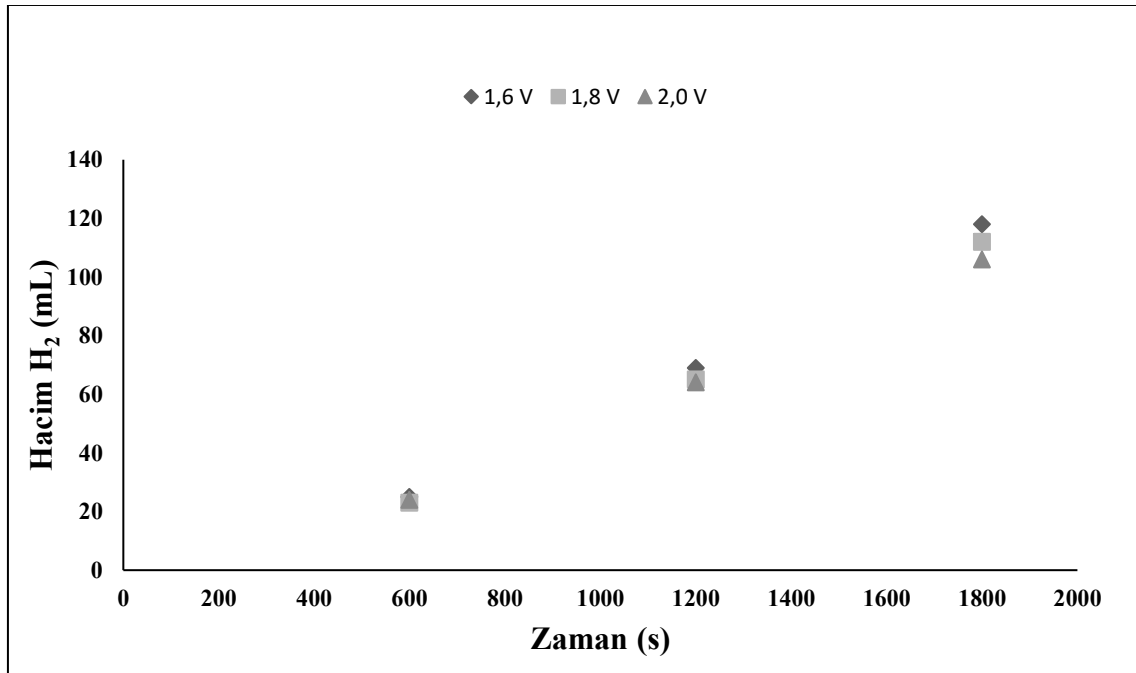
Zaman (s)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
600	24	22	23
1200	62	61	59
1800	98	95	89



Şekil 4.15. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5 M NaOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Çizelge 4.16. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5 M KOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Zaman (s)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
600	25	23	24
1200	69	65	64
1800	118	112	106



Şekil 4.16. Zamanın farklı potansiyellerde 0,5 M KOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Genel olarak, deneysel bulgular zamanın artmasıyla birlikte hidrojen (H₂) üretim oranının tüm uygulanan potansiyel koşullarında yükseldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca elektrolit olarak KOH kullanımı, NaOH'e kıyasla daha yüksek hidrojen üretim verimi sağlamıştır. Bu verimlilik farkının, K⁺ ve Na⁺ iyonlarının farklı iyonik özelliklerinden kaynaklandığı; özellikle 0,5 M derişim ve 2,0 A akım gibi koşullarda daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Literatürde de belirtildiği üzere, potasyum iyonlarının sodyum iyonlarına kıyasla daha yüksek iyonik mobiliteye ve çözeltide daha iyi iletkenlik özelliklerine sahip olması, elektrot yüzeyinde hidrojen oluşum kinetiğini hızlandırmakta ve elektrokimyasal sürecin etkinliğini artırmaktadır (Saleh ve May, 2024).

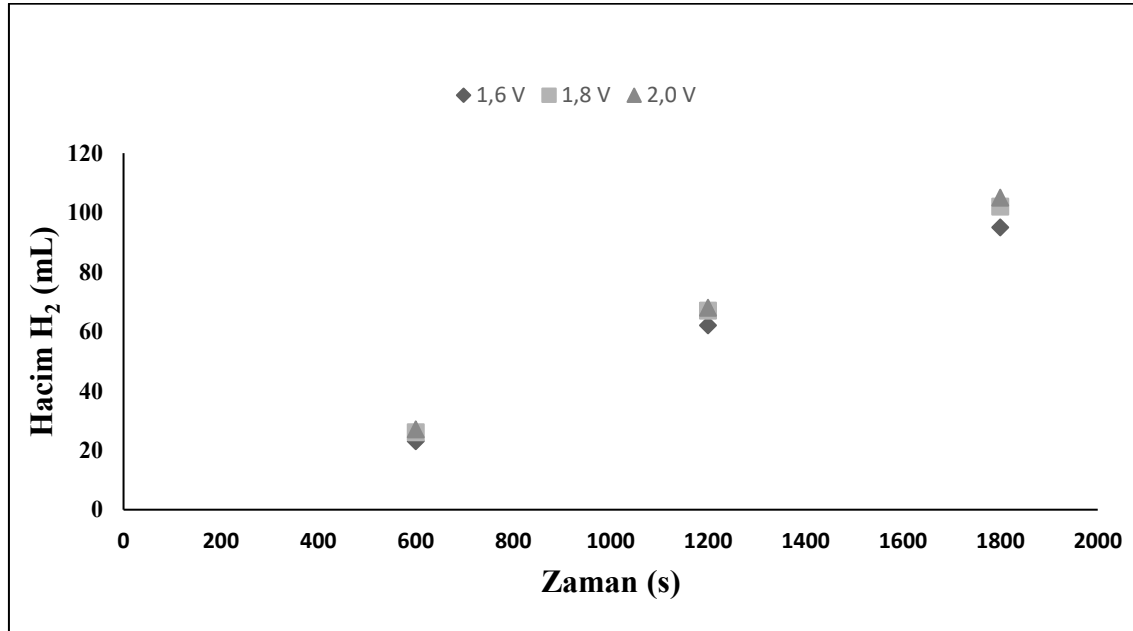
Bu bağlamda KOH elektrolitinin kullanımı, çözeltinin iyonik iletkenliğini yükselterek elektroliz verimini ve hidrojen üretim performansını anlamlı ölçüde iyileştirmektedir. Elde edilen sonuçlar, elektrolit türünün ve çözeltideki iyonik özelliklerin hidrojen üretim verimliliği üzerinde kritik bir belirleyici olduğunu açık şekilde göstermektedir.

1,0 M NaOH ve KOH farklı akımlarda zamanın etkisi

Bu deneyde 2,0 A sabit akım altında 1,0 M NaOH ve KOH ortamlarında uygulanan farklı potansiyel değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği incelenmiştir.

Çizelge 4.17. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0 M NaOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

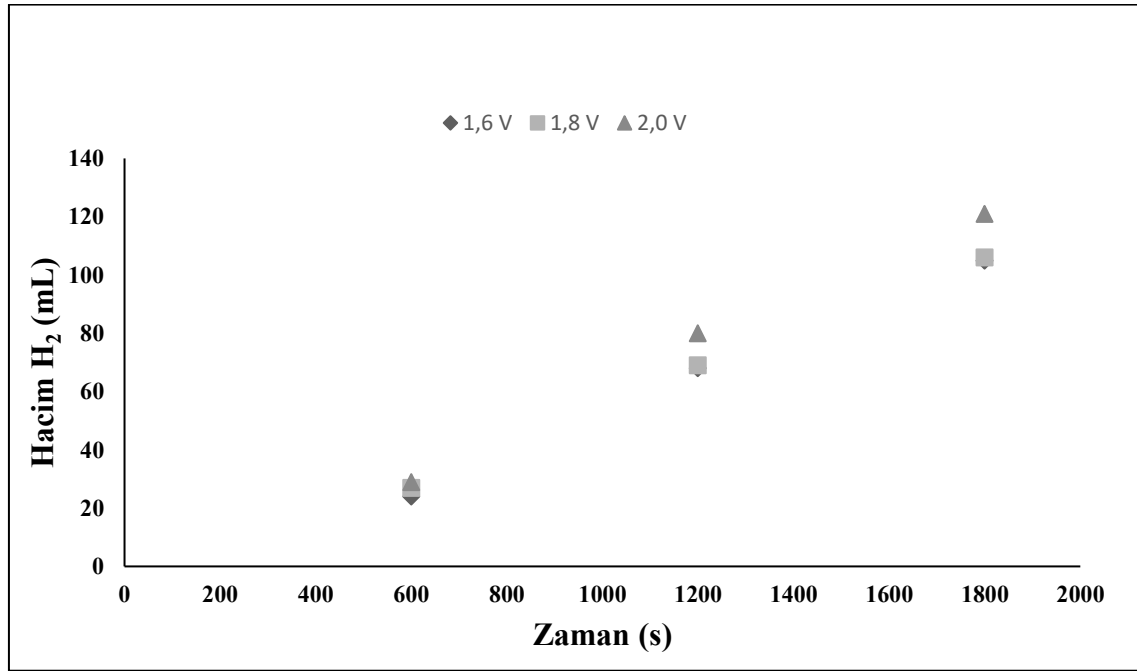
Zaman (s)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
600	32	26	27
1200	62	67	68
1800	95	102	105



Şekil 4.17. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0 M NaOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Çizelge 4.18. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0 M KOH derişiminde H₂ üretimine etkisi

Zaman (s)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
600	24	27	29
1200	68	69	80
1800	105	106	121

Şekil 4.18. Zamanın farklı potansiyellerde 1,0 M KOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Genel olarak, zamanın artmasıyla birlikte hidrojen (H₂) üretim oranının tüm uygulanan potansiyel değerlerinde yükseldiği belirlenmiştir. KOH elektrolit ortamında elde edilen veriler, eğrinin diğer potansiyellere kıyasla belirgin bir farklı eğilim sergilediğini göstermektedir. Uygulanan potansiyelin 1,8 V'tan 2,0 V'a çıkarılmasıyla ortaya çıkan bu farkın, artan güç girdisinin H₂ üretim sürecini etkilemesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Buna karşılık, NaOH elektrolit ortamında 1,8 V ve 2,0 V potansiyelleri arasında eğri eğiliminde anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, uygulanan potansiyel değerlerinin farklı zaman aralıklarında hidrojen üretimi üzerinde benzer etkiler oluşturmasıyla ilişkilendirilmekte ve NaOH ortamının potansiyel değişimlerine karşı daha kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir.

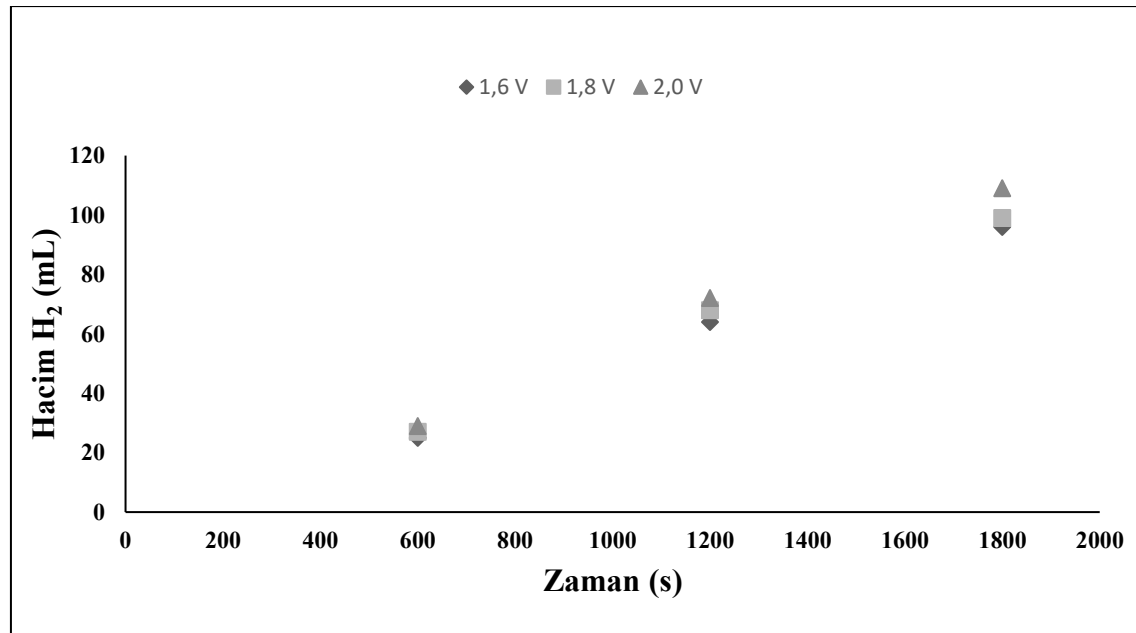
KOH elektrolit ortamında elde edilen sonuçlar, gözlemlenen farklılıkların potasyum iyonlarının (K^+) aktivitesinden kaynaklanabileceğini göstermektedir. K^+ iyonlarının, elektrokimyasal ayrışma sürecine etki ederek hidrojen oluşum kinetiğini değiştirebildiği değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, KOH varlığının katalizör yüzeyinde suyun ayrışma reaksiyonlarını kolaylaştırarak hidrojen ve oksijen gazı üretimini artırabileceğini ortaya koyan önceki çalışmalarla da tutarlılık göstermektedir (Zeng ve Zhang, 2010).

1,5 M NaOH ve KOH farklı akımlarda zamanın etkisi

Bu deneyde 2,0 A sabit akım altında 1,5 M NaOH ve KOH ortamlarında uygulanan farklı potansiyel değerlerinin hidrojen üretimini zaman içinde nasıl etkilediği incelenmiştir.

Çizelge 4.19. Zamanın farklı potansiyellerde 1,5 M NaOH derişiminde H_2 üretimi üzerindeki etkisi

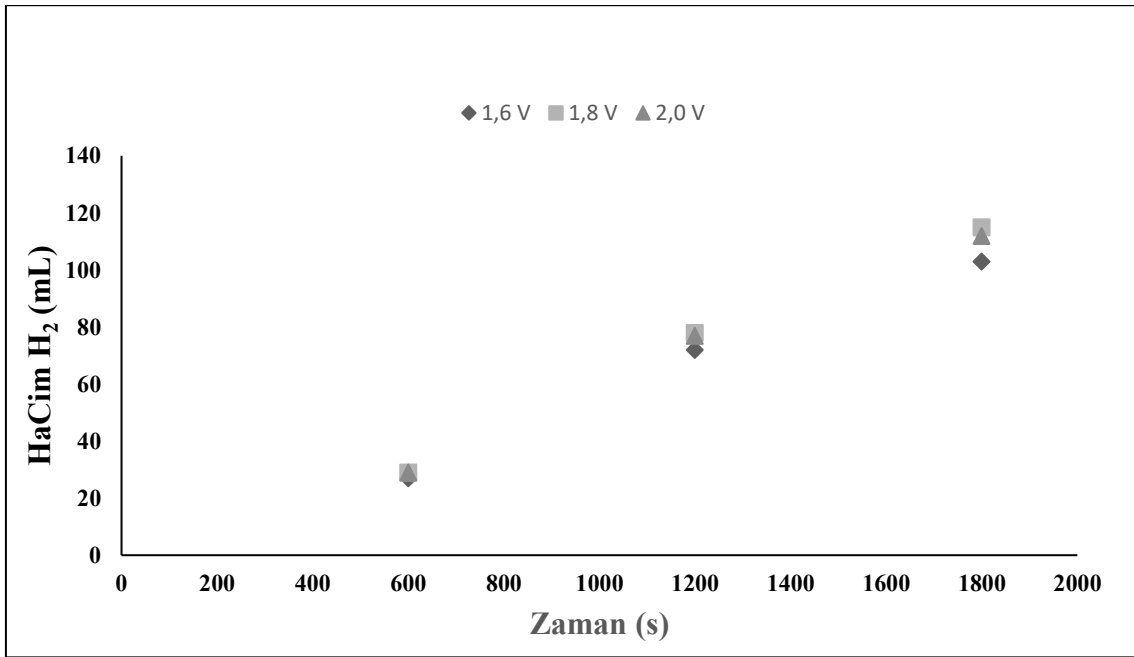
Zaman (s)	1,6 V'da Üretilen H_2 (mL)	1,8 V'da Üretilen H_2 (mL)	2,0 V'da Üretilen H_2 (mL)
600	25	27	29
1200	64	68	72
1800	96	99	109



Şekil 4.19. Zamanın farklı potansiyellerde 1,5 M NaOH derişiminde H_2 üretimi üzerindeki etkisi

Çizelge 4.20. Zamanın farklı potansiyelerde 1,5 M KOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

Zaman (s)	1,6 V'da Üretilen H ₂ (mL)	1,8 V'da Üretilen H ₂ (mL)	2,0 V'da Üretilen H ₂ (mL)
600	27	29	29
1200	72	78	77
1800	103	115	112



Şekil 4.20. Zamanın farklı potansiyelerde 1,5 M KOH derişiminde H₂ üretimi üzerindeki etkisi

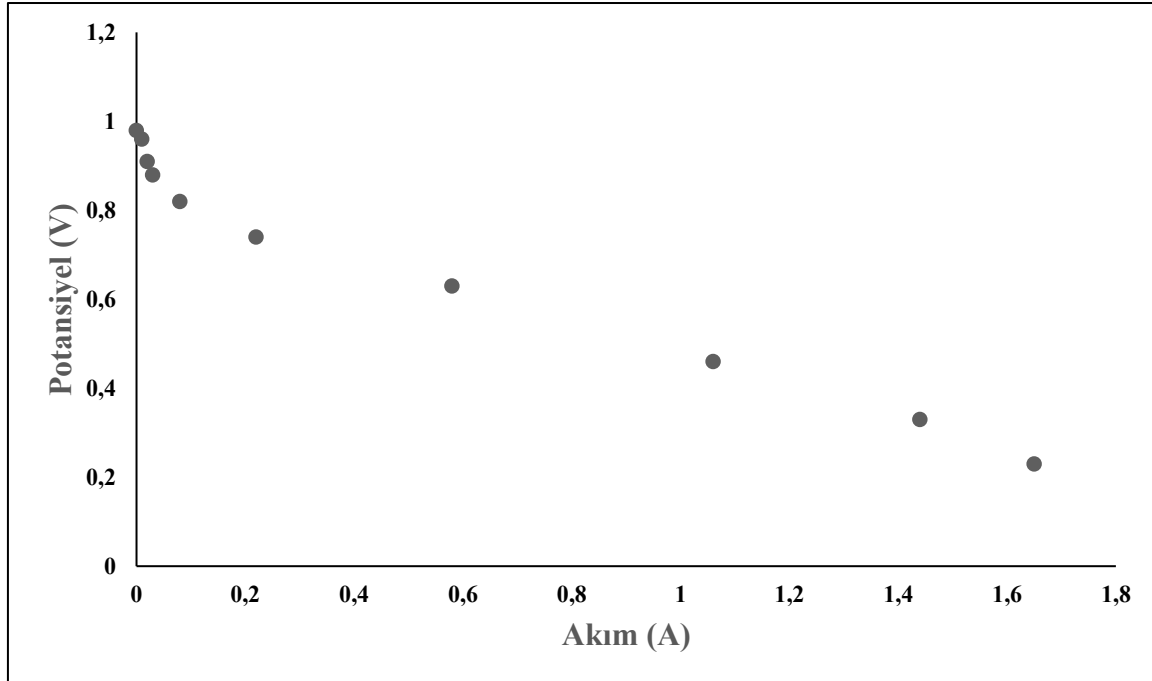
Genel olarak, her iki elektroliz ortamında da tüm farklı potansiyel değerleri için zamanla Hidrojen (H₂) üretiminde belirgin bir artış gözlenmiştir. KOH elektrolit ortamında elde edilen H₂ üretim miktarının, NaOH ortamına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 2,0 V potansiyelde, 1,6 V ve 1,8 V potansiyellere göre hidrojen üretiminde sınırlı ancak ölçülebilir bir iyileşme meydana gelmiştir. Uygulanan potansiyelin artmasıyla, sisteme aktarılan elektrik akımının da yükseldiği ve buna bağlı olarak suyun elektrolitik ayrışma reaksiyonunun hızlandığı belirlenmiştir. Bu durum, gaz (H₂) oluşum hızının ve miktarının artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, daha yüksek potansiyelerde elektrokimyasal aktivitenin artışı, Hidrojen üretim verimliliğinin iyileşmesiyle doğrudan ilişkilidir.

4.4. PEM Yakıt Hücresi

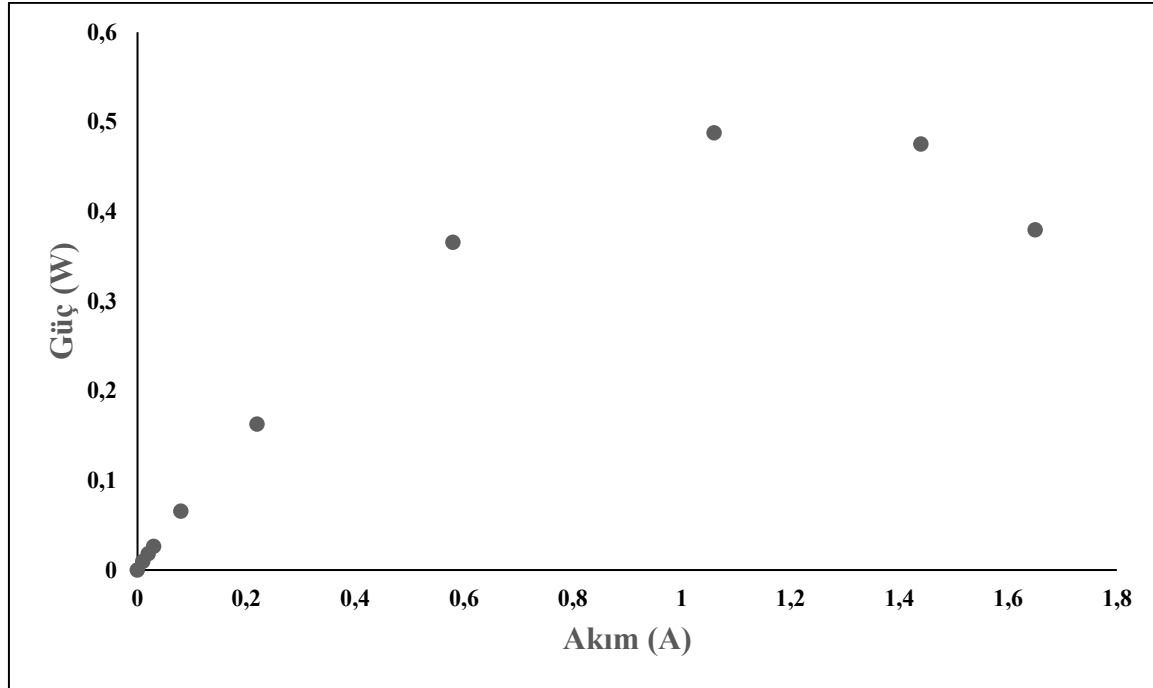
4.4.1. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristik özellikleri ve güç eğrisi

Çizelge 4.21. Farklı yük dirençlerinde yakıt hücresi için potansiyel ve akım değerlerinin ölçümleri

$r (\Omega)$	V (V)	I (a)	P (W)
∞	0,98	0	0
330	0,96	0,01	0,0096
100	0,91	0,02	0,0182
33	0,88	0,03	0,0264
10	0,82	0,08	0,0656
3,3	0,74	0,22	0,1628
1	0,63	0,58	0,3654
0,33	0,46	1,06	0,4876
0,1	0,33	1,44	0,4752
0	0,23	1,65	0,3795



Şekil 4.21. Yakıt hücresinin akım-potansiyel karakteristiği



Şekil 4.22. Yakıt hücresinin güç eğrisi

Güç eğrisi, yakıt hücresinin maksimum güç çıkışını gerçekleştirdiği akım değerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda, yakıt hücresinin $0,33 \Omega$ yük direncine karşılık gelen $1,06 \text{ A}$ akımda en yüksek güç çıkışını sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, yakıt hücresinin elektriksel karakteristiği açısından optimum çalışma noktasını temsil etmekte olup, sistemin enerji dönüşüm verimliliğinin en yüksek düzeyde gerçekleştiği koşulu göstermektedir.

4.4.2. PEM yakıt hücresinin enerji verimliliği ve Faraday verimliliği

Çizelge 4.22. Tüketilen hidrojen gazına göre zaman, potansiyel ve akım değerleri ölçü çizelgesi

$V(\text{H}_2) \text{ cm}^3$	$t \text{ (s)}$	$V \text{ (V)}$	$I \text{ (A)}$	$P \text{ (W)}$
30	0	0,74	0,23	0,1702
25	177	0,73	0,22	0,1606
20	358	0,73	0,22	0,1606
15	536	0,72	0,22	0,1584
10	695	0,73	0,21	0,1533
Ortalama		$V_{\text{ort}}=0,73$	$I_{\text{ort}}=0,22$	$P_{\text{ort}}=0,1606$

Hidrojen gazı bir yakıt hücresine beslenirse, hücre onu sürekli olarak elektrik enerjisine dönüştürür. Zaman, potansiyel ve akım değerleri, tüketilen hidrojen gazının belirli hacimleri (5cm^3 'lük artışlarla) için Çizelge 4.22.'de gösterilmiştir.

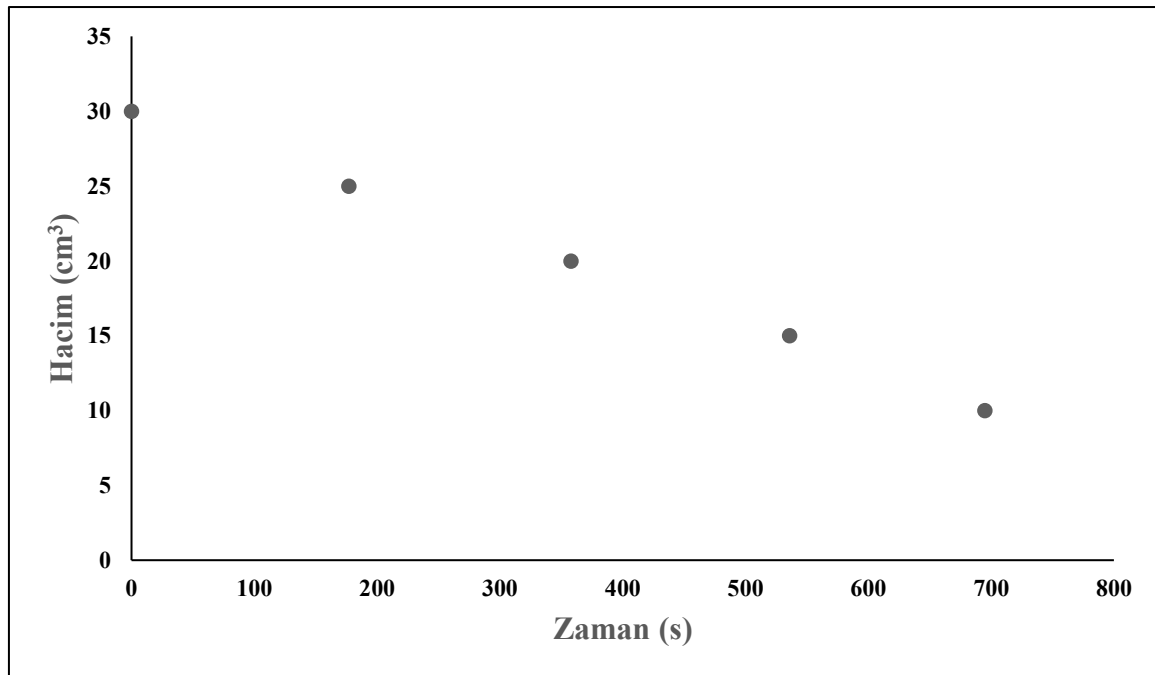
Ölçüm sırasında akımdaki herhangi bir önemli azalma, depolama tankında yakıt hücresinin çalışmasını bozan artık gazlardan kaynaklanıyor olabilir. Bu sorun, depolama tankında yalnızca az miktarda hidrojen kaldığında da ortaya çıkabilir. Bu yüzden 5 cm^3 değeri hesaplamaya alınmamıştır.

PEM yakıt hücresinin enerji verimliliği

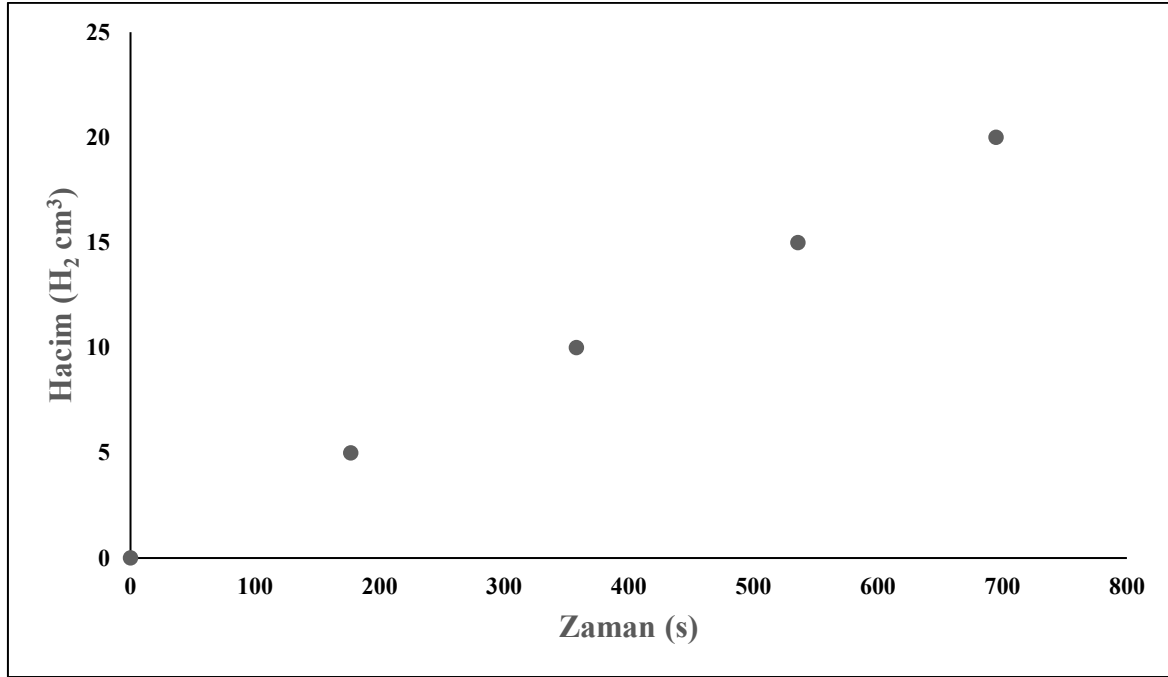
Enerji verimliliği η_{enerji} , giriş enerjisinin ($E_{\text{giriş}}$) ne kadarının yakıt hücresinde gerçek kullanılabilir enerji ($E_{\text{kullanılabilir}}$) olarak harcandığını gösterir. Verimlilik ne kadar yüksek olursa, enerji kullanımı o kadar iyi olur.

$$\eta_{\text{enerji}} = E_{\text{kullanılabilir}} / E_{\text{giriş}} = E_{\text{elektrik}} / E_{\text{hidrojen}} \quad (4.21)$$

Zamanın bir fonksiyonu olarak depolama tankının içeriği veya tüketilen gaz hacmi Şekil 4.23'te gösterilmektedir.



Şekil 4.23. P = 0.1606 W'ta bir yakıt hücresinin depolama tankı içeriği-zaman grafiği



Şekil 4.24. P = 0.1606 W'ta bir yakıt hücresinin hidrojen tüketimi-zaman grafiği

Yakıt hücresinin enerji verimliliği 4.22'deki denklemden hesaplanır.

$$\eta_{\text{enerji}} = E_{\text{elektrik}} / E_{\text{hidrojen}} = V \cdot I \cdot t / V(H_2) \cdot H_h \quad (4.22)$$

$$\eta_{\text{enerji}} = 0,73V \cdot 0,22A \cdot 720s / 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 10,8 \cdot 10^6 \text{ (J/m}^3\text{)} = 0,535 = \%54 \quad (4.23)$$

H_h = Hidrojenin ısıtma değeri = $10,8 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$

V = Üretilen hidrojen miktarı (m^3)

$V(H_2)$ = Potansiyel (V)

I = Akım (A)

t = Zaman (s)

Şekil 4.24., tüketilen gaz hacminin zamanla doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. İncelenen yakıt hücresinin enerji verimliliği %54 olup, bu değer kullanılan hidrojen gazında depolanan enerjinin %54'ünün elektrik enerjisine dönüştürülebildiğini ifade etmektedir. Yakıt hücresi aynı zamanda ısı açığa çıkarmakta; ancak bu ısının kullanılmaması durumunda söz konusu enerji kayıp olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, sistemin toplam enerji verimliliğini başlangıçtan itibaren sınırlandıran temel etmenlerden biridir.

İdeal verimlilik, η_{id} , serbest reaksiyon enerjisini temsil eden reaksiyon Gibbs serbest enerjisi

ΔG 'nin (elektriksel iş olarak açığa çıkan enerji) reaksiyon entalpisi ΔH 'ye (reaksiyon sırasında açığa çıkan toplam enerji) oranı şeklinde (Denklem 4.24) tanımlanmaktadır.

$$\eta_{id} = \Delta G / \Delta H \quad (4.24)$$

Reaksiyon entalpisi ΔH ile Gibbs serbest enerjisi ΔG arasındaki fark, açığa çıkan ısıdır. Isı (Q), T sıcaklığının ve reaksiyon entropisi ΔS 'nin bir ürünü olarak tanımlanabilir.

$$Q = T \cdot \Delta S \quad (4.25)$$

Reaksiyon entalpisi 4.26'daki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad (4.26)$$

İdeal verimlilik η_{id} 4.27'deki formül kullanılarak hesaplanır:

$$T = 298 \text{ K}$$

$$\Delta S = -162,985 \text{ J/K.mol (standart basınç ve sıcaklıkta)}$$

$$\Delta H = -285840 \text{ J/mol (standart basınç ve sıcaklıkta)}$$

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{298 \text{ K} \cdot (162,985 \frac{\text{J}}{\text{K.mol}})}{-285840 \text{ J/mol}} \quad (4.27)$$

$$\eta_{id} = 0,83 = \%83 \quad (4.28)$$

$\%83$ 'lük enerji verimliliği, süreç sırasında ısı şeklinde ortaya çıkan kayıplar nedeniyle daha da azalmaktadır. Elektrotlarda oluşan aşırı potansiyeller, yakıt hücresinin iç direnci ve hücre içerisindeki difüzyon kayıpları sonucunda ideal 1,23 V hücre potansiyeline erişmek mümkün olmamaktadır.

Yakıt hücresinin enerji verimliliği, tıpkı elektrolizörlerde olduğu gibi, güç talebiyle yakından ilişkilidir. Verimlilik yüksek olsa dahi, yükün elektriksel direncinin fazla olması durumunda hücre yalnızca kısmi yük aralığında çalışabilmekte ve bu nedenle üretebileceği güçten daha düşük bir güç çıkışı sağlamaktadır.

PEM yakıt hücresinin Faraday verimliliği

Faraday'ın ikinci yasası ve ideal gaz yasası kullanılarak, akan akım ile yakıt hücresinin teorik tüketilen gaz hacmi arasında bir ilişki kurulabilir.

Yakıt hücresinin Faraday verimliliği, hesaplanan teorik gaz hacminin tüketilen gerçek gaz hacmine oranından elde edilebilir.

İkinci Faraday yasası:

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad (4.29)$$

İdeal gaz yasası:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (4.30)$$

Formülleri birleştirerek, gaz hacmi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$V = R \cdot I \cdot T / F \cdot p \cdot z \quad (4.31)$$

V = üretilen gazın teorik hacmi (m^3)

R = Evrensel gaz sabiti = 8.314 J/mol.K

p = Ortam basıncı (Pa)

F = Faraday sabiti = 96485 C/mol ($1C=1as$)

T = Ortam sıcaklığı (K)

I = Akım (A)

t = Zaman (s)

Q = Elektrik yükü (C)

n = Madde miktarı (mol)

z = bir molekülü serbest bırakacak elektron sayısı:

$z (H_2) = 2$, yani 1 mol hidrojen salmak için 2 mol elektron gerekir.

$z (O_2) = 4$

Faraday verimliliği (4.32) denkleminde elde edilir:

$$\eta_{\text{Faraday}} = V(H_2)_{\text{(hesaplanan)}} / V(H_2)_{\text{(harcanan)}} \quad (4.32)$$

$$V(H_2)_{(harcanan)}=20 \text{ cm}^3 \quad (4.33)$$

$$V(H_2)_{(hesaplanan)}=R.I.T.t / F.p.z \quad (4.34)$$

$$V(H_2)_{(hesaplanan)}= 8,314 \text{ (J/mol.K) } .0,22A.298K.695s / 96485 \text{ (C/mol) } . 1,013.105 \text{ Pa.2} \quad (4.35)$$

$$V(H_2)_{(hesaplanan)}=19,36 \text{ cm}^3 \quad (4.36)$$

$$\eta_{Faraday}= 19,36/20=0,968 =\%97 \quad (4.37)$$

Yakıt hücresinde, elektrolizör sistemlerinde gözlenenlere benzer şekilde difüzyon kaynaklı kayıplar meydana geldiğinden, gerçekte tüketilen gaz hacmi teorik olarak hesaplanan hacimden bir miktar daha yüksek olmaktadır.

Deneyisel bulgular, yakıt hücresinin Faraday verimliliğinin elektrolizöre kıyasla bir miktar daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, sistemde taşınan akım yoğunluğunun daha düşük olmasına bağlanmaktadır. Belirli bir miktarda suyun oluşumu, suyun elektroliz yoluyla ayrıştırılmasına göre daha uzun bir zaman gerektirdiğinden, süreç boyunca proton değişim membranı üzerinden bir miktar hidrojen gazının difüze olduğu belirlenmiştir. Bu hidrojen gazı elektrik üretiminde etkin şekilde değerlendirilemediği için, membran üzerinden gerçekleşen gaz geçişi, sistemin toplam enerji dönüşüm verimliliğinde bir azalmaya neden olmaktadır.

4.5. Küçük Ölçekli Bir Güç Olarak Fotovoltaik-Elektrolizör-Yakıt Hücresi Hibrit Sisteminin Deneyisel Modelinin İncelenmesi

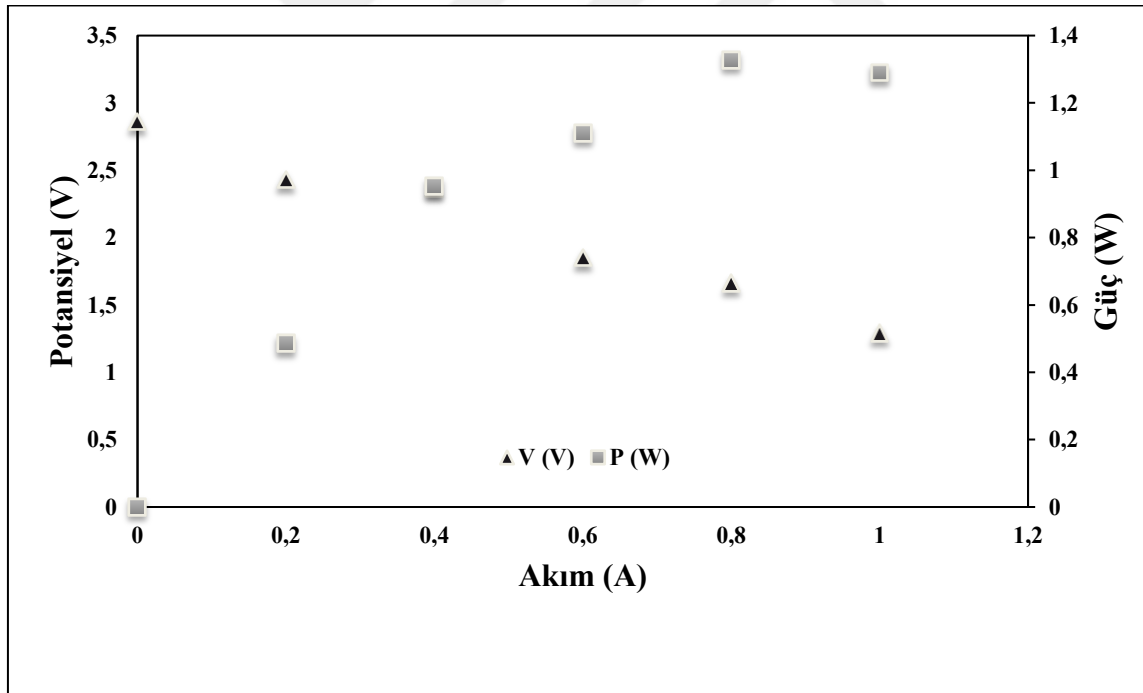
Fotovoltaik sistemler ile yakıt hücrelerinin görece düşük enerji dönüşüm verimliliklerine sahip olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda, Fotovoltaik–Elektrolizör–Yakıt Hücresi hibrit sistemi; fotovoltaik modülü birincil güç kaynağı olarak kullanan, elektrolizördeki elektrolit çözeltisinin derişimini artırmaya yönelik yenilikler içeren küçük ölçekli bir enerji üretim yapısı olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım sayesinde sistemin genel enerji verimliliğinin artırılması mümkündür. Fotovoltaik modülün performansı ise giriş gücü, çıkış gücü ve fotovoltaik verimliliği dikkate alan bir formülasyon aracılığıyla nicel olarak ifade edilebilmektedir.

4.5.1. Değişen KOH çözelti derişimlerinde fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

0,50 M'lik KOH çözelti derişiminde fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

Çizelge 4.23. 0,50 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi

I (A)	V (V)	P (W)
0,00	2,86	0
0,20	2,43	0,4860
0,40	2,37	0,9520
0,60	1,85	1,1100
0,80	1,66	1,3280
1,00	1,29	1,2900



Şekil 4.25. 0,50 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

Şekil 4.25.'te, 0,50 M derişimindeki KOH elektrolit çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen PV–elektrolizör–yakıt hücresi sisteminde akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yük devresindeki akımın artırılmasıyla birlikte, yakıt hücresinin potansiyelinde bir düşüşün meydana gelmesi beklenmektedir. Bu durum, proton değişim

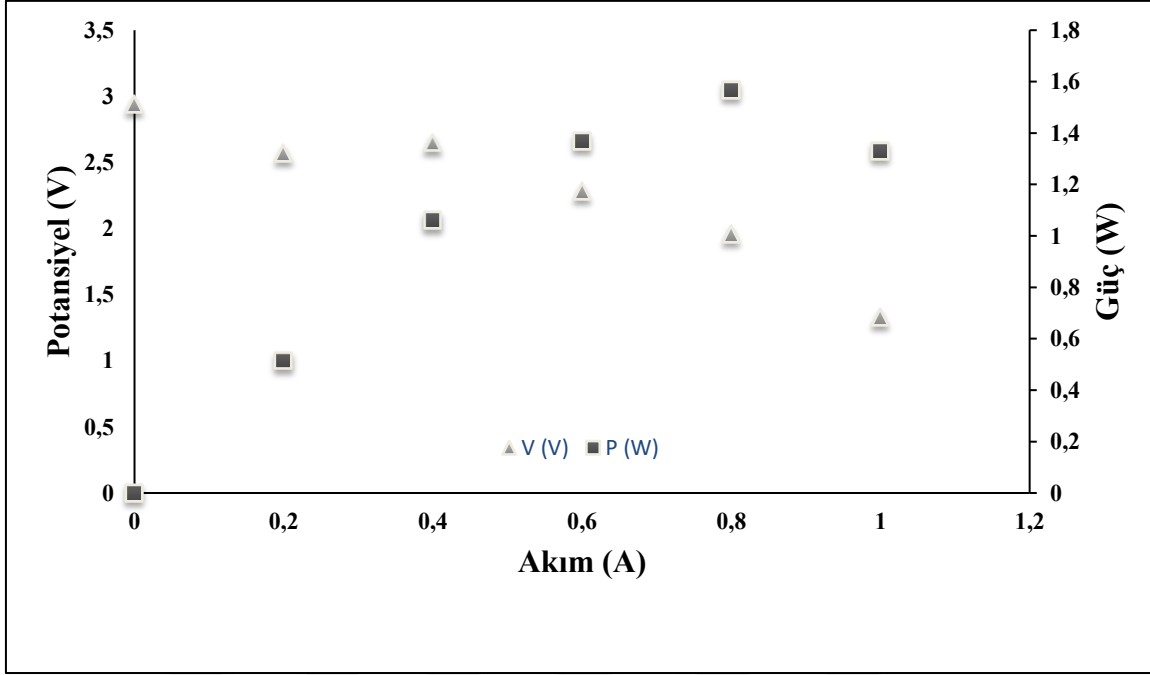
membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin karakteristik davranışını yansıtmaktadır. Nitekim Şekil 4.25.'te de görüldüğü üzere, akım yükü arttıkça potansiyelde belirgin bir azalma gözlenmiştir.

0,50 M derişiminde gerçekleştirilen deneyde, 1,66 V potansiyel ve 0,80 A akım değerinde sistemin en yüksek çıkış gücüne ulaşıldığı belirlenmiştir. Yük akımındaki artış, yakıt hücresinin çıkış gücünü artırmakta ve sistemin enerji dönüşüm etkinliğini yükseltmektedir. Bu kapsamda, 0,50 M KOH çözeltisinde 0,80 A akımda 1,3280 W değerinde en yüksek çıkış gücü elde edilmiştir. Bu sonuç, sistemin optimum çalışma koşullarında yüksek verimlilikle enerji üretimi gerçekleştirebildiğini göstermektedir.

1,00 M'lik KOH çözelti derişiminde fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

Çizelge 4.24. 1,00 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi

I (A)	V (V)	P (W)
0,00	2,94	0
0,20	2,57	0,5140
0,40	2,65	1,0600
0,60	2,28	1,3680
0,80	1,96	1,5680
1,00	1,33	1,3300



Şekil 4.26. 1,00 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

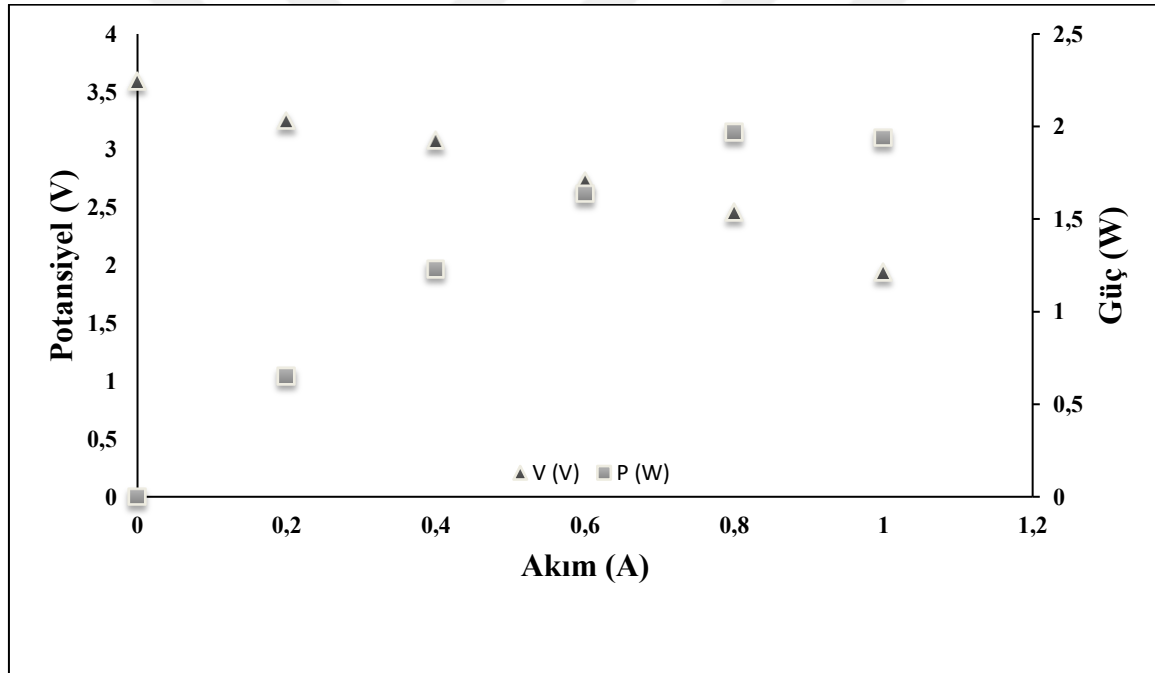
Şekil 4.26.'da, 1,00 M derişimindeki KOH elektrolit çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen PV–elektrolizör–yakıt hücresi sisteminde akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yük devresindeki akımın artırılmasıyla birlikte, yakıt hücresinin potansiyelinde bir düşüşün meydana gelmesi beklenmektedir. Bu durum, proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin karakteristik davranışını yansıtmaktadır. Nitekim Şekil 4.26'da da görüldüğü üzere, akım yükü arttıkça potansiyelde belirgin bir azalma gözlenmiştir.

1,00 M KOH derişiminde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 1,96 V potansiyel ve 0,80 A akım değerinde sistemin en yüksek çıkış gücüne ulaşıldığı belirlenmiştir. Yük akımındaki artış, yakıt hücresinin çıkış gücünü artırarak sistemin enerji dönüşüm performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bu kapsamda, 1,00 M KOH çözeltisinde 0,80 A akımda 1,5680 W değerinde en yüksek çıkış gücü elde edilmiştir. Bu sonuç, daha yüksek elektrolit derişiminin sistemin iletkenliğini artırarak enerji üretim verimliliğini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

1,50 M'lik KOH çözelti derişiminde fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

Çizelge 4.25. 1,50 M'lik KOH çözelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü çizelgesi

I (A)	V (V)	P (W)
0,00	3,59	0
0,20	3,25	0,6500
0,40	3,08	1,2320
0,60	2,73	1,6380
0,80	2,46	1,9680
1,00	1,94	1,9400



Şekil 4.27. 1,5 M KOH çözelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

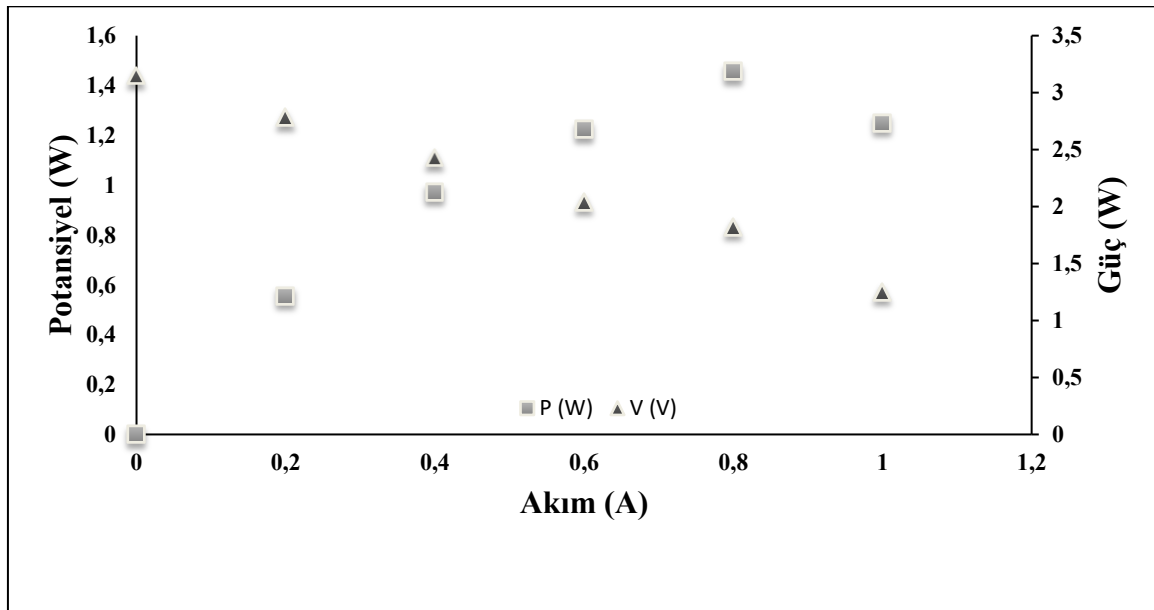
Şekil 4.27'de, 1,5 M derişimindeki KOH elektrolit çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen PV–elektrolizör–yakıt hücresi sisteminde akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yük devresindeki akımın artırılmasıyla birlikte yakıt hücresinin potansiyelinde bir azalma meydana gelmesi beklenmektedir. Bu durum, proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin karakteristik davranışına dayanmaktadır.

1,5 M KOH derişiminde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 2,46 V potansiyel ve 0,80 A akım değerinde sistemin en yüksek çıkış gücüne ulaşıldığı tespit edilmiştir. Yük akımındaki artış, yakıt hücresinin çıkış gücünü artırarak sistemin enerji dönüşüm performansını iyileştirmektedir. Bu bağlamda, 1,5 M KOH zeltisinde 0,80 A akımda 1,9680 W değerinde en yüksek çıkış gücü elde edilmiştir. Bu sonuç, elektrolit derişiminin artmasıyla birlikte çözeltinin iyonik iletkenliğinin yükseldiğini ve bunun da yakıt hücresinin enerji üretim verimliliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

2,00 M'lik KOH zelti derişiminde fotovoltaiķ-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki

Çizelge 4.26. 2,00 M'lik KOH zelti derişiminde akım, potansiyel ve çıkış gücü izelgesi

I (A)	V (V)	P (W)
0,00	3,15	0
0,20	2,78	0,5560
0,40	2,43	0,9720
0,60	2,04	1,2240
0,80	1,82	1,4560
1,00	1,25	1,2500



şekil 4.28. 2,0 M KOH zelti derişiminde PV-elektrolizör ve yakıt hücresi sisteminin akım, potansiyel ve çıkış gücü, arasındaki ilişki

Şekil 4.28’de, 2,0 M derişimindeki KOH elektrolit çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilen PV–elektrolizör–yakıt hücresi sisteminde akım, potansiyel ve çıkış gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yük devresindeki akımın artırılmasıyla yakıt hücresinin potansiyelinde bir düşüş meydana gelmesi beklenmektedir; bu, proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinin karakteristik davranışını yansıtmaktadır. Nitekim Şekil 4.28’de de görüldüğü üzere, akım yükü arttıkça potansiyelde belirgin bir azalma gözlenmiştir.

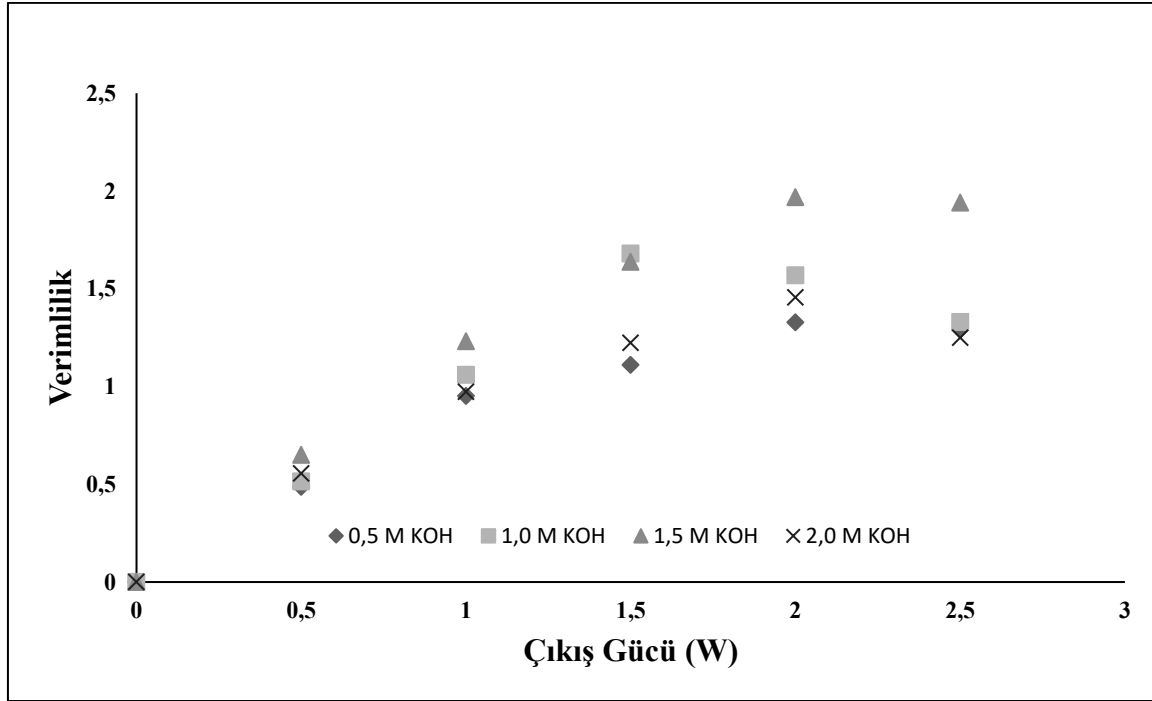
Deneysel sonuçlar, 1,82 V potansiyel ve 0,80 A akım değerinde sistemin en yüksek çıkış gücüne ulaştığını göstermektedir. Yük akımındaki artış, yakıt hücresinin çıkış gücünü artırmakta ve sistemin enerji dönüşüm performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bu doğrultuda, 2,0 M KOH çözeltisinde 0,80 A akımda 1,4560 W değerinde en yüksek çıkış gücü elde edilmiştir. Bu bulgu, elektrolit derişiminin artmasının çözeltinin iyonik iletkenliğini artırarak yakıt hücresinin enerji üretim verimliliğini etkileme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre; en iyi sonucun 1,5 M KOH çözeltisinde 0,80 A akımda 1,9680 W değerinde en yüksek çıkış gücü elde edildiğini göstermektedir.

4.5.2. Değişen KOH çözelti derişimlerinde fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliği arasındaki ilişki

Çizelge 4.27. Değişen KOH çözelti derişimlerinde PV-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimlilik çizelgesi

KOH Derişim (M)	Çıkış Gücü $P_{\text{çıkış}}$ (W)	Verimlik %100
0,50	1,3280	1,6582
1,00	1,5680	1,8568
1,50	1,9680	2,3940
2,00	1,9586	0,7586



Şekil 4.29. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin değişen KOH çözelti derişiminde çıkış gücü ve verimliliği arasındaki ilişki

Şekil 4.29’da, PV–elektrolizör–yakıt hücresi hibrit sisteminin çıkış gücü ve verimliliğinin, farklı KOH çözelti derişimleri ile olan ilişkisi analiz edilmiştir. Akım yükünün artmasıyla birlikte, çıkış gücünün ve sistem verimliliğinin artacağı öngörülmektedir. Deneysel bulgular, farklı derişimlerde elde edilen çıkış güçlerini göstermektedir: 0,5 M KOH çözeltisinde 1,3280 W, 1,0 M KOH çözeltisinde 1,5680 W, 1,5 M KOH çözeltisinde 1,9680 W ve 2,0 M KOH çözeltisinde 1,9586 W olarak ölçülmüştür.

Sistem verimliliği en yüksek olarak, 1,5 M KOH çözeltisinde ve 1,9680 W çıkış gücünde 2,3940 değerinde hesaplanmıştır. Daha düşük veya daha yüksek elektrolit derişimlerinde, hidrojen üretim miktarı ve çıkış gücü sınırlı kalmıştır. Bu bulgular, PV–elektrolizör–yakıt hücresi sisteminde elektrolit derişiminin hidrojen üretimi ve genel enerji dönüşüm verimliliği üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen veriler, fotovoltaiik panellerden elde edilen elektrik enerjisinin doğrudan elektrolizöre yönlendirilmesi ve üretilen hidrojenin yakıt hücresine aktarılması zincirleme enerji dönüşüm sürecinin deneysel olarak doğrulandığını göstermektedir. Sistem performansının en yüksek olduğu koşullar, teorik beklentilerle uyumlu bulunmuştur. Bu

deneysel sonuçlar, hibrit enerji sistemlerinin hem Hidrojen üretimi hem de elektrik enerjisi geri kazanımı açısından optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır (Parra vd., 2019).

4.5.3. Değişen sıcaklıklarda fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin çıkış gücünün incelenmesi

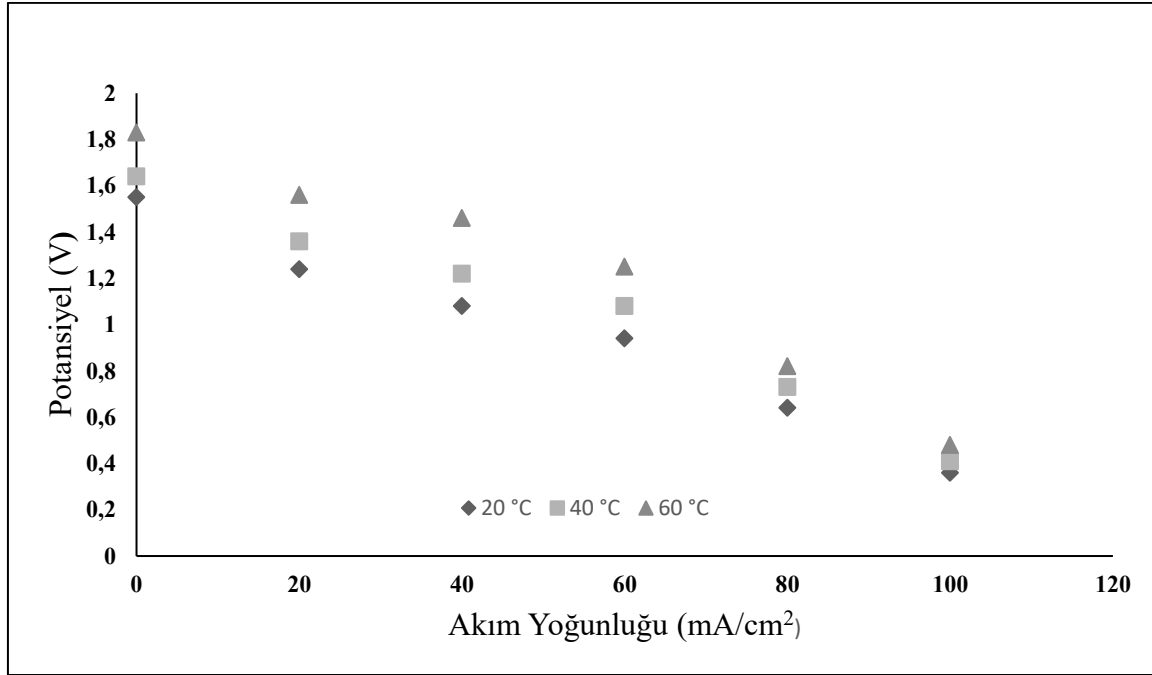
Çalışma sıcaklığı, yakıt hücresinde performans kayıplarını önlemek ve sistemin optimum çalışma koşullarını belirlemek açısından kritik bir parametre olarak ele alınmıştır. Sıcaklığın yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deneyler 20 °C, 40 °C ve 60 °C sıcaklıklarda yürütülmüştür.

Fotovoltaiik-elektrolizör-yakıt hücresi deneysel modelinde, her sıcaklık koşulunda 1,5 M KOH çözelti derişimi kullanılmıştır. Elektroliz sırasında PV panellerden elde edilen elektrik enerjisi, sabit akım ve potansiyel değerlerinde elektrolizöre yönlendirilmiştir. Üretilen hidrojen miktarı ve hidrojenin yakıt hücresine yönlendirilmesi ile elde edilen çıkış voltajı kaydedilmiş ve güç değerleri hesaplanmıştır.

Deneyler, her sıcaklık için üç kez tekrarlanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sıcaklık ile PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin çıkış gücü ve enerji verimliliği arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Bulgular, sıcaklığın artmasıyla hücre potansiyelinde yükselme ve güç yoğunluğunda artış olduğunu göstermiştir.

Çizelge 4.28. Değişen sıcaklıklarda PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım yoğunluğu-potansiyel çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	20 °C Potansiyel (V)	40 °C Potansiyel (V)	60 °C Potansiyel (V)
0	1,55	1,64	1,83
20	1,24	1,36	1,56
40	1,08	1,22	1,46
60	0,94	1,08	1,25
80	0,64	0,73	0,82
100	0,36	0,41	0,48

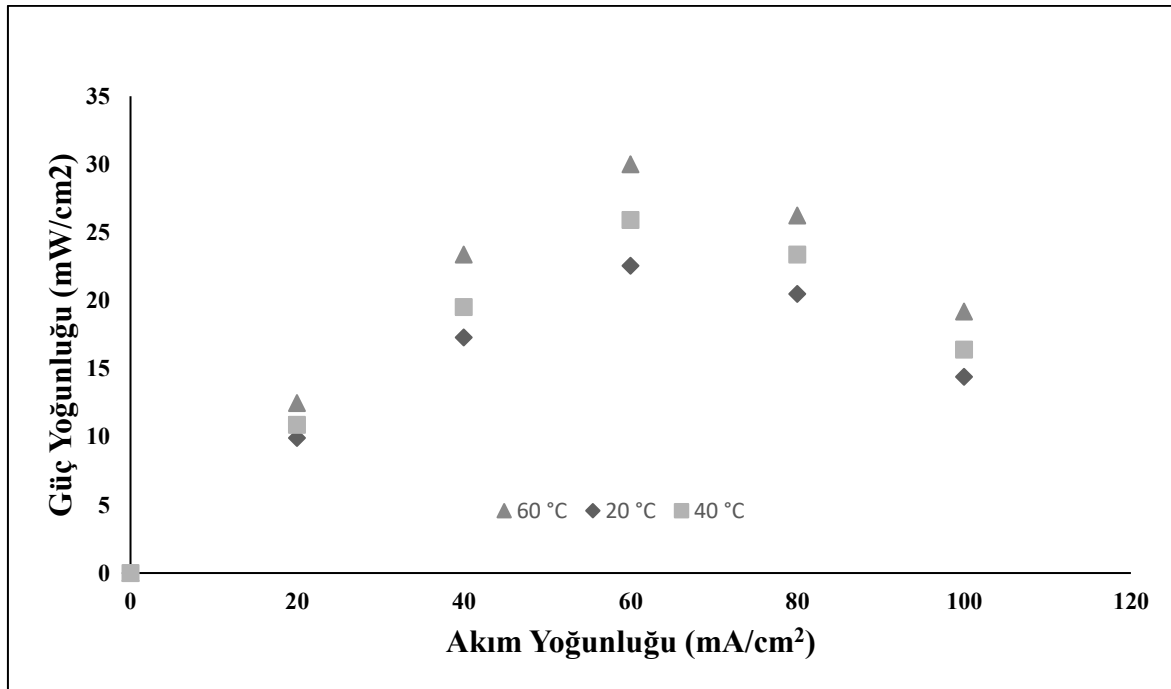


Şekil 4.30. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin değişen sıcaklıklarda akım yoğunluğu-potansiyel arasındaki ilişki

PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, optimum hücre sıcaklığının belirlenmesinde sıcaklık parametresinin sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, 60 °C sıcaklıkta PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, sıcaklığın artırılmasıyla birlikte hücre potansiyelinde de bir artış gözlenmiştir; bu durum, sıcaklığın elektrokimyasal reaksiyon kinetiği ve iyonik iletkenlik üzerindeki pozitif yöndeki etkisine bağlanabilir.

Çizelge 4.29. Değişen sıcaklıklarda PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin akım yoğunluğu-çıkış gücü çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	20 °C Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	40 °C Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	60 °C Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)
0	0	0	0
20	69,44	76,16	87,36
40	120,96	136,64	163,52
60	157,92	181,44	210
80	143,36	163,52	183,68
100	100,8	114,8	134,4



Şekil 4.31. PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminin değişen sıcaklıklarda akım yoğunluğu-güç yoğunluğu arasındaki ilişki

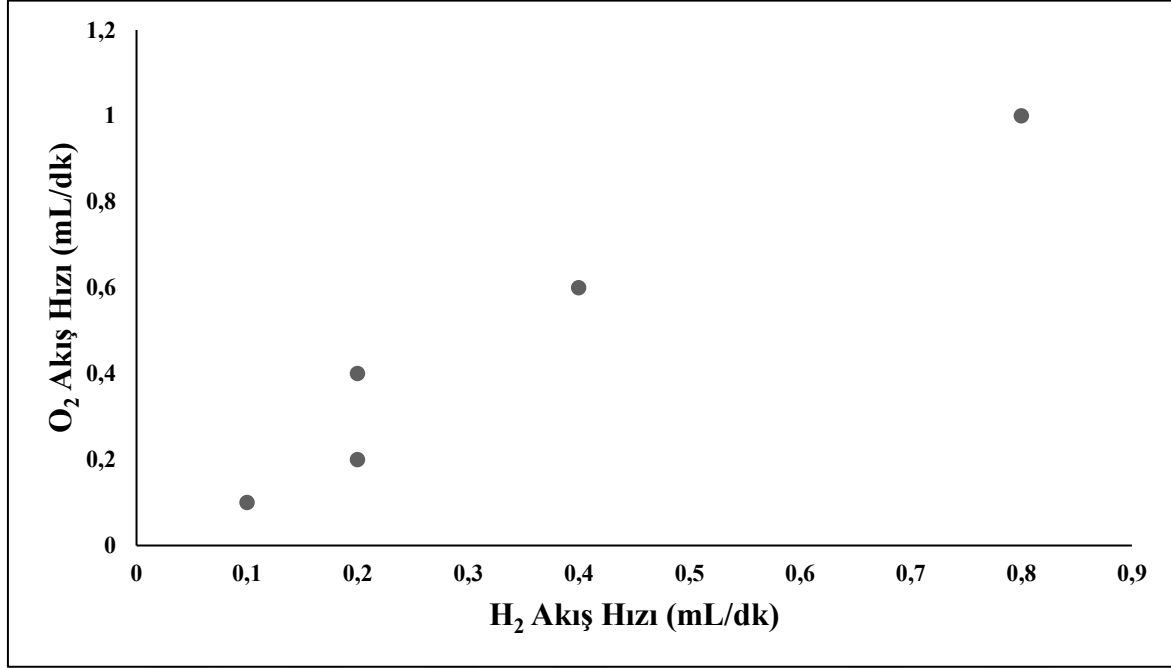
PV-elektrolizör-yakıt hücresi sisteminde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneysel veriler, sıcaklığın artmasıyla birlikte sistemin güç yoğunluğunun da arttığını göstermektedir. Bu gözlem, sıcaklık yükselmesinin elektrokimyasal reaksiyon kinetiğini ve iyonik iletkenliği iyileştirerek sistemin enerji dönüşüm performansını artırdığına işaret etmektedir.

4.5.4. Fotovoltaik-elektrolizör-yakıt hücresi hibrit sisteminde Hidrojen ve Oksijen tüketiminin zamana karşı değişiminin incelenmesi

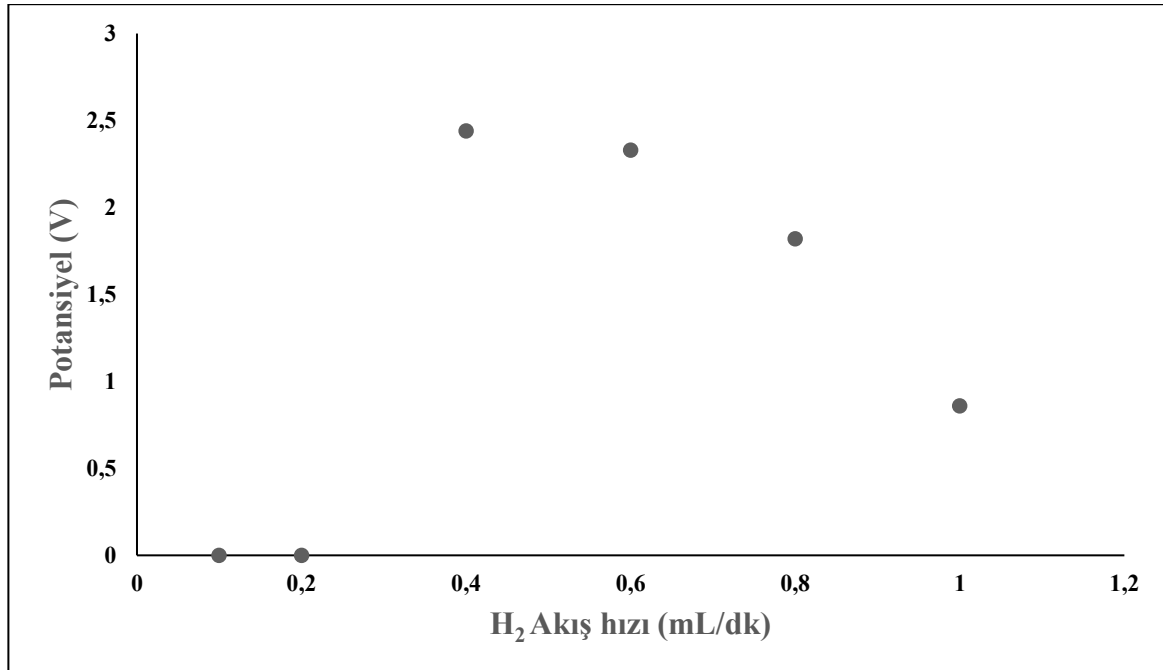
Yapılan deneysel çalışmalarda, polimer elektrolit membranlı yakıt hücresinde (PEMFC) farklı gaz akış hızlarının hücre potansiyeli üzerindeki etkisi incelenmiştir.

H₂ gazı için akış hızı değeri 0,2 ml/dk, O₂ gazı için ise akış hızı değeri 0,1 ml/dk değerinin altında elektrik üretimi olmamıştır. Hidrojen akış hızı 0,2 ml/dk ve oksijen akış hızı 0,1 ml/dk olduğunda hücre potansiyeli 2,44 V, Hidrojen akış hızı 0,4 ml/dk ve oksijen akış hızı 0,2 ml/dk olduğunda hücre potansiyeli 2,33 V, Hidrojen akış hızı 0,6 ml/dk ve oksijen akış hızı 0,4 ml/dk olduğunda hücre potansiyeli 1,82 V, Hidrojen akış hızı 1,0 ml/dk ve oksijen akış hızı 0,8 ml/dk olduğunda hücre potansiyeli 0,86 V olarak kaydedilmiştir.

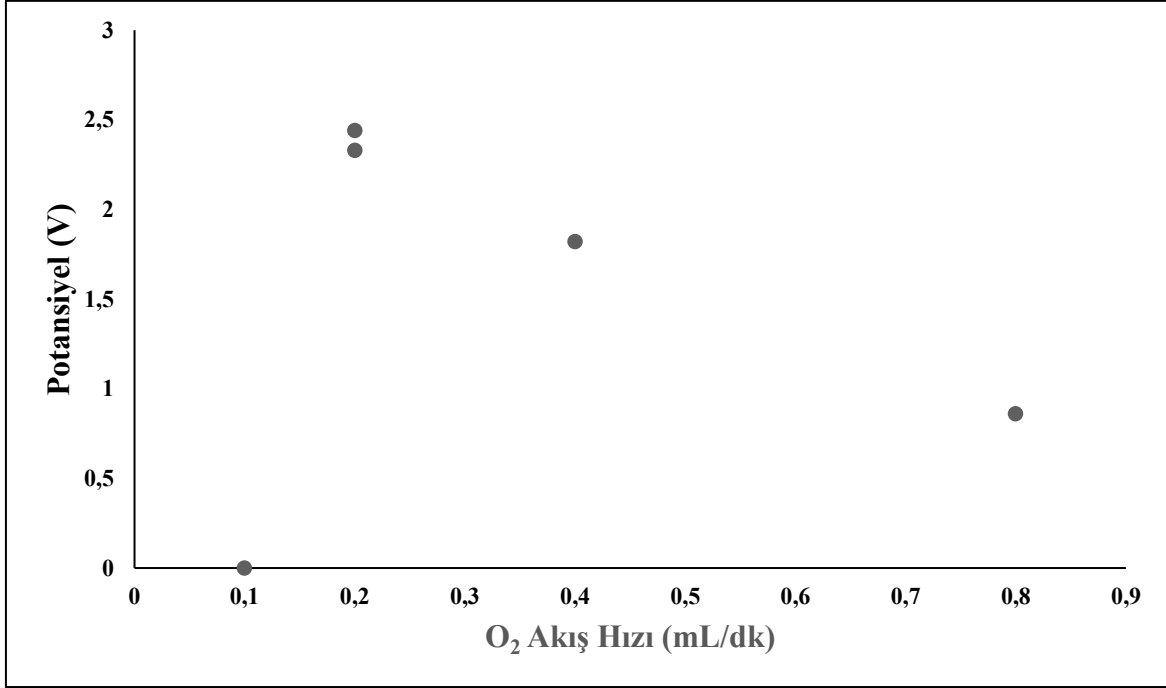
Elde edilen veriler, gaz akış hızlarının artmasıyla birlikte PEMFC hücre potansiyelinde belirgin bir azalma meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, yüksek akış hızlarında maskeleme ve difüzyon kayıplarının artmasına bağlı olarak hücredeki etkin potansiyelin düşmesiyle açıklanabilir.



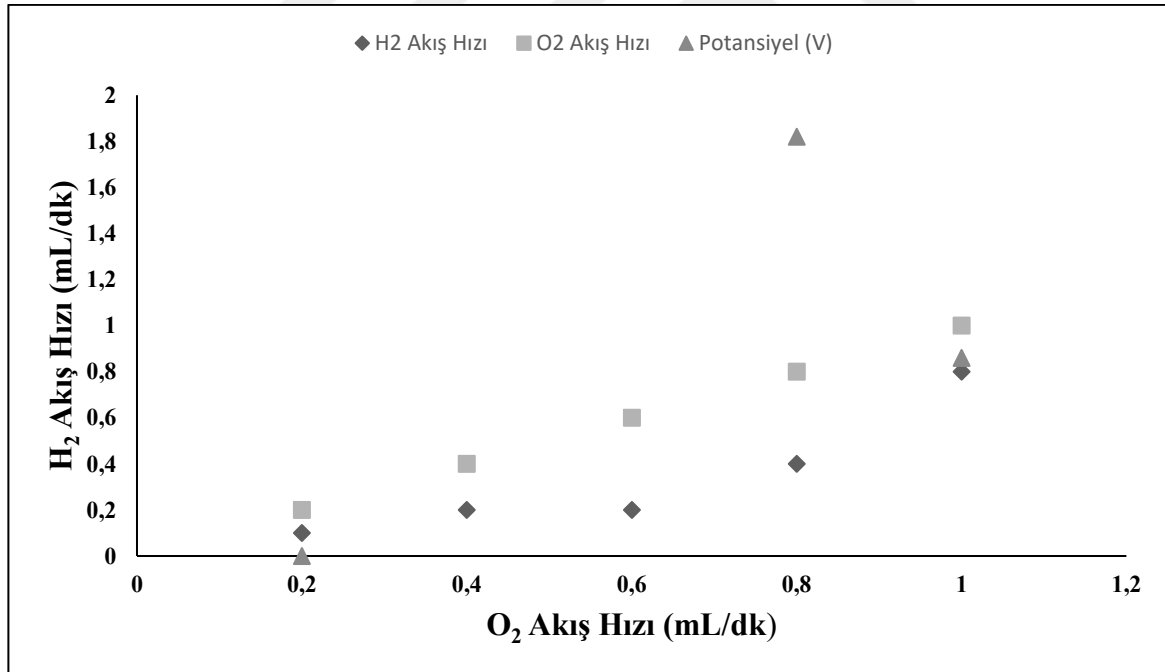
Şekil 4.32. H₂ ve O₂ akış hızı-zaman grafiği



Şekil 4.33. H₂ akış hızı - potansiyel grafiği



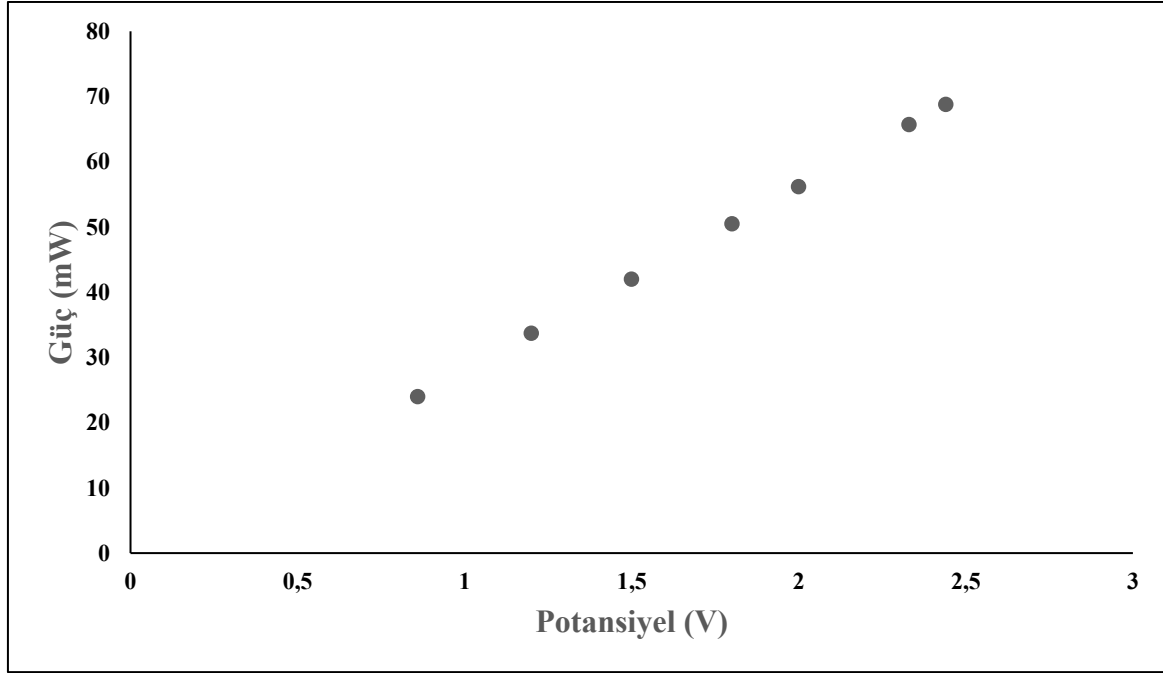
Şekil 4.34. O₂ akış hızı - potansiyel grafiği



Şekil.4.35. H₂- O₂ akış hızı - potansiyel grafiği

Şekil 4.35'te, PEMFC'nin ürettiği güç değerlerinin, oksijen ve hidrojen gazlarının akış hızı oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Hücre voltajı 0,86 V ile 2,44 V arasında değişirken, üretilen güç değerleri 24,0 mW ile 68,8 mW arasında hesaplanmıştır. Bu

bulgular, gaz akış hızlarının yakıt hücresinin elektriksel performansı ve güç üretim kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil.4.36. Potansiyel - güç karşılaştırma grafiği

PEMFC’de hidrojen akış hızı 0,2 ml/dk ve oksijen akış hızı 0,1 ml/dk olarak sabitlendiğinde, elde edilen 2,44 V değeri sistemin maksimum potansiyelini temsil etmektedir. Bu koşullar altında üretilen güç, 68,8 mW olarak ölçülmüş olup, söz konusu gaz akış hızlarının yakıt hücresinin optimum elektriksel performansına karşılık geldiğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, fotovoltaik (PV) panel–elektrolizör–yakıt hücresi–batarya entegrasyonuna dayalı hibrit enerji sistemlerinin sürdürülebilir enerji dönüşümü açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur. PV modülünün akım-potansiyel (I–V) ve güç-potansiyel (P–V) karakteristikleri başarıyla çıkarılmış, maksimum güç noktası (MGN) belirlenmiş ve modülün hibrit sistem içerisindeki uygun çalışma koşulları net bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar, güneş enerjisi tabanlı hidrojen üretimi için gerekli giriş gücünün doğru modellenmesi bakımından kritik öneme sahiptir.

Hibrit sistemde PV panelden sağlanan enerjinin elektrolizöre aktarılmasıyla hidrojen üretimi gerçekleştirilmiş; potansiyel, akım, elektrolit tipi ve derişimi gibi temel parametrelerin H_2 üretim hızı üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Farklı derişimlerde ve değişen potansiyel–akım koşullarında yapılan deneyler, elektrolit derişiminin ve uygulanan potansiyelin hidrojen üretimini doğrudan etkilediğini göstermiştir. Özellikle KOH ortamında derişim arttıkça üretim veriminin belirgin şekilde yükseldiği, NaOH elektrolitinde ise orta derişim seviyelerinde daha kararlı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Bu durum, elektrolizör performansının optimizasyonunda elektrolit seçiminin stratejik bir parametre olduğunu kanıtlamaktadır. Karşılaştırmalı değerlendirmeler, KOH elektrolitinin NaOH’a kıyasla belirgin şekilde daha yüksek hidrojen üretim verimliliği sağladığını göstermiştir. Bu performans farkı, literatürle de uyumlu şekilde, potasyum iyonlarının sodyum iyonlarına göre daha yüksek iyonik mobiliteye sahip olması ve KOH çözeltilerinin genel olarak daha yüksek iletkenlik sunmasıyla ilişkilendirilmiştir. Artan iyonik iletkenlik, hücre içi ohmik kayıpların azalmasına ve elektrokimyasal reaksiyonların daha etkin gerçekleşmesine katkı sağlamıştır.

Zamanın hidrojen üretimine etkisi değerlendirildiğinde, artan akım ve derişim koşullarında üretimin zamanla yükseldiği, en yüksek üretim değerlerinin KOH elektrolitinde elde edildiği görülmüştür. Farklı akımlar altında hidrojen üretimi açısından en uygun koşulun 1,0 M ve 2,0 A olduğu belirlenmiştir. Potansiyel ve elektrolit derişimi birlikte değerlendirildiğinde ise en yüksek hidrojen üretiminin 1,5 M ve 2,0 V koşullarında gerçekleştiği ortaya konmuştur.

Hibrit sistemde üretilen hidrojenin yakıt hücresine beslenmesiyle elektrik üretimi

gerçekleştirilmiş ve sistem performansı gaz akış hızı ve sıcaklık koşulları açısından analiz edilmiştir. Hidrojen için 0,2 mL/dk ve oksijen için 0,1 mL/dk akış hızının en uygun koşul olduğu, bu değerlerle 2,44 V potansiyel ve 68,8 mW güç elde edildiği görülmüştür. Bu bulgular, yakıt hücresi performansının gaz besleme oranlarına son derece duyarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca sıcaklık artışının hücre potansiyelini ve güç yoğunluğunu yükselttiği belirlenmiştir. Deneyler 60 °C’de maksimum hidrojen üretiminin elde edildiğini göstermiştir. Ancak daha yüksek sıcaklıkların membran stabilitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği bilindiğinden, optimum çalışma sıcaklığının bu sıcaklıkta olduğu söylenebilir.

Genel olarak deneysel bulgular, PV-elektrolizör-yakıt hücresi-batarya tabanlı hibrit enerji sistemlerinin enerji verimliliğini artırmada ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmada önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Sistem performansının iyileştirilmesi için enerji yönetim stratejilerinin geliştirilmesinin ve kullanılan elektrolit ve modül bileşenlerinin optimize edilmesinin gerekli olduğunu ortaya koymuştur. PV, elektrolizör ve yakıt hücresi entegrasyonunda toplam verimlilik, özellikle güç elektroniği birimlerinden kaynaklanan kayıplar nedeniyle teorik değerlerin altında gerçekleşmiştir. Bu durum literatürde belirtilen sonuçlarla da örtüşmektedir (Bahrami ve Shahhosseini, 2023; O’Hayre vd., 2016).

Ayrıca, sistemde kullanılan enerji yönetim sistemi elektroliz sürecinin kararlılığı ve genel verimliliği açısından kritik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Bu birim, uygulanan potansiyel ve akım değerlerini gerçek zamanlı olarak düzenleyerek hücre üzerinde meydana gelebilecek dalgalanmaları en aza indirmiş, böylece elektrokimyasal reaksiyonların optimum koşullarda sürdürülmesini sağlamıştır. Enerji yönetim sisteminin sağladığı hassas kontrol, ohmik kayıpların ve enerji tüketimindeki gereksiz artışların önüne geçerek hidrojen üretiminin hem güvenli hem de yüksek verimle gerçekleştirilmesine katkıda bulunmuştur. Bu yönüyle kontrol ünitesinin, özellikle uzun süreli ve değişken yük koşullarında hibrit sistemin performansının sürdürülebilirliğini destekleyen temel bir unsur olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, yapılan deneysel çalışmalar göstermektedir ki hidrojen üretimi ve hibrit sistem performansı elektrolit tipi, derişim, potansiyel, akım, sıcaklık ve gaz akış hızı parametrelerine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Özellikle KOH elektrolit ortamında elde edilen verimlilik sonuçları, hidrojen üretim sistemlerinin geliştirilmesi

açısından umut verici bulgular sunmaktadır (Dunn vd., 2011; Carmo vd., 2013; Kumar ve Lim, 2023; Sebbahi vd., 2024).

Çalışmada yalnızca KOH ve NaOH elektrolitleri değerlendirilmiş, diğer elektrolit türleri incelenmemiştir. Deneyler laboratuvar ölçeğinde yürütüldüğünden sonuçların endüstriyel sistemlere doğrudan aktarılması sınırlıdır. Sıcaklık etkisi deneysel olarak gözlenirse de farklı sıcaklık aralıklarında sistematik bir karşılaştırma yapılmamıştır. Dolayısıyla bulgular belirlenen deneysel koşullar ile sınırlı kalmaktadır.

Hidrojen üretim veriminin artırılması için farklı membran tiplerinin, elektrot malzemelerinin ve çeşitli elektrolit karışımlarının test edilmesi önerilmektedir. Elektrolizör performansının geliştirilmesi amacıyla elektrot yüzey kaplama tekniklerinin ve düşük aşınma özellikli katalizörlerin değerlendirilmesi yararlı olacaktır.

Fotovoltaik panel tarafında, ışıyım değişimlerinin sisteme etkisini daha doğru modellemek için maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) güç elektroniği modüllerinin kullanımı tavsiye edilmektedir. Yakıt hücresi performansının artırılması için sıcaklık ve nem kontrolünün daha hassas yapılabileceği gelişmiş bir termal yönetim sisteminin entegrasyonu uygun olacaktır. Enerji depolama birimlerinin sisteme entegrasyonunda batarya-süperkapasitör hibrit yapıların kullanılması, ani yük değişimlerinde sistem kararlılığını artırabilir. Güç elektroniği devrelerinin daha yüksek frekanslı ve düşük kayıplı anahtarlama elemanlarıyla yeniden tasarlanması da sistemin toplam verimliliğini yükseltecektir.

Gelecek çalışmalarda sistemin daha büyük ölçekli prototiplerle test edilmesi, gerçek kullanım senaryoları için daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır. Ayrıca farklı sıcaklık aralıklarında, yüksek akım yoğunluklarında ve uzun süreli deneylerle sistem dayanıklılığı ve ekonomik sürdürülebilirlik analizlerinin yapılması önemlidir. Hibrit sistemlerin farklı yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonunun araştırılması, hidrojen tabanlı enerji sistemlerinin pratik uygulanabilirliğini güçlendirecektir (Hosseini ve Wahid, 2016; Kumar ve Lim, 2023).



KAYNAKLAR

- Al-Mamoori, A. (2023). Optimization of electrode surface structure for enhanced electrolysis performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(15), 5521–5532.
- Abdin, Z., Al Khafaf, N., McGrath, B., Catchpole, K., Gray, E. (2023). A review of renewable hydrogen hybrid energy systems towards a sustainable energy value chain. *Sustainable Energy & Fuels*, 7, 2042–2062.
- Bahrami, A., Shahhosseini, S. (2023). Hydrogen production and renewable-based hybrid energy systems: Performance, challenges, and optimization strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(12), 4567–4582.
- Blaabjerg, F., Ma, K., Yang, Y. (2019). Power electronics for renewable energy systems: Status and trends. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 7(3), 1312–1324.
- Barbir, F. (2005). *PEM fuel cells: Theory and practice*. (1st ed.). Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- Boyle, G. (2012). *Renewable energy: Power for a sustainable future* (3rd ed.). Oxford, England: Oxford University Press.
- Brauns, J., Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes*, 8(2), 248.
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901–4934.
- Dicks, A. L., Rand, D. A. J. (2018). *Fuel cell systems explained* (3rd ed.). Wiley, 7-19.
- Dincer, I., Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111.
- Dunn, S., (2002). Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(3), 253–264.
- Dunn, S., Kamath, H., Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058), 928–935.
- Du, Z., Liu, C., Zhai, J., Guo, X., Xiong, Y., Su, W., He, G. (2021). A Review of Hydrogen Purification Technologies for Fuel Cell Vehicles. *Catalysts*, 11(3), 393.
- Esrar, T., Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.

- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M. (2005). Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963–973.
- Gambou, F., Guilbert, D., Zasadzinski, M., Rafaralahy, H. (2022). A comprehensive survey of alkaline electrolyzer modeling: Electrical domain and specific electrolyte conductivity. *Energies*, 15(9), 3452.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., ve Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(1), 1–9.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Ho-Baillie, A. W. Y. (2023). Solar cell efficiency tables (version 63). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–13.
- Gouérec, P., Millet, P., Andolfatto, L., Dumas, P. (2004). The evolution of the performance of alkaline fuel cells with time. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(11), 1123–1130.
- Hosseini, S. E., Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866.
- Huang, Z., Zhang, C. Z., Zeng, T., Lv, C., Chan, S. H. (2019). Modeling and energy management of a photovoltaic-fuel cell-battery hybrid electric vehicle. *Energy Science & Engineering*, 7(5), 1835–1848.
- Hwang, J. (2009). Effect of applied voltage on hydrogen generation efficiency in alkaline water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 192(2), 567–572.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221–1250.
- Ji, C., Wang, H. (2024). An energy management strategy for fuel-cell hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 379, 115859.
- Ji, C., Kamal, E., Ghorbani, R. (2024). Reliable energy optimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles considering fuel cell and battery health. *Energies*, 17(18), 4686.
- Kabalci, E., Özdemir, E. (2018). Design and control of a photovoltaic-fuel cell-battery hybrid power system for remote applications. *Renewable Energy*, 115, 822–834.
- Kasimalla, V. K. R., Srinivasulu, G. N., Velisala, V. (2018). A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 42(14), 4263–4283.

- Katiraei, F., Iravani, M. R. (2006). Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4), 1821–1831.
- Kumar, S. S., Lim, H. (2023). Recent advances in hydrogen production through proton exchange membrane water electrolysis – a review. *Sustainable Energy & Fuels*, 7(15), 3560–3583.
- Larminie, J., Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2nd ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons, 207–225.
- Linden, D., Reddy, T. B. (2002). *Handbook of batteries* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Li, M., Deng, H., Zhang, Y., Hou, C. (2021). A small hybrid power system of photovoltaic cell and sodium borohydride hydrolysis-based fuel cell. *Micromachines*, 12(3), 278.
- Liu, J., Bao, Z., Cui, Y., Dufek, E. J., Goodenough, J. B., Khalifah, P., Zhang, J.-G. (2019). Pathways for practical high-energy long-cycling lithium metal batteries. *Nature Energy*, 4(3), 180–186.
- Liu, X., Zhang, Y., Chen, H. (2022). Hybrid fuel cell systems for renewable energy integration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112076.
- Liu, L., Zhang, M., Gong, J. (2024). Enhancing fuel cell performance through a dual MPC strategy for coordinated temperature management. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1358468.
- Luo, Y., Wu, Y., Li, B., Qu, J., Feng, S.-P., Chu, P. K. (2021). Optimization and cutting-edge design of fuel-cell hybrid electric vehicles. *International Journal of Energy Research*, 45(13), 18392–18423.
- Masters, G. M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley, 20–39.
- Mekhilef, S., Saidur, R., Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981–989.
- Meyer, R. T., DeCarlo, R. A., Pekarek, S. (2016). Hybrid model predictive power management of a battery-supercapacitor electric vehicle. *Asian Journal of Control*, 18(1), 150–165.
- Messenger, R., Ventre, J. (2010). *Photovoltaic systems engineering* (3rd ed.). CRC Press, Boca Raton, FL, 21–46.
- Miller, H. A., Bouzek, K., Hnat, J., Loos, S., Bernäcker, C. I., Weißgärber, T., Röntzsch, L., Dyck, A. (2020). Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: A review of recent developments in critical materials and operating conditions. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(5), 2114–2133.

- Millet, P., Andolfatto, F., Durand, R. (1996). Design and performance of a PEM water electrolyzer for hydrogen generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 21(2), 87–91.
- Millet, P., Grigoriev, S. (2013). Water electrolysis technologies. In C. Wieckert & A. Meier (Eds.), *Renewable hydrogen technologies: Production, purification, storage, applications and safety*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 19–41.
- Mohamed, N., Flah, A., Altamimi, A., Khan, Z. A., Lassaad, S. (2022). Power Management and Control of a Hybrid Electric Vehicle Based on Photovoltaic, Fuel Cells, and Battery Energy Sources. *Sustainability*, 14(5), 2551.
- Mohanty, S. B., Mohanty, S. (2024). A novel state machine-fractional order pid control strategy for energy management framework to optimize the consumption from fuel cell in dc microgrid. *IEEE Access*, 12, 136160-136182
- Nagaura, T., Tozawa, K. (1990). Lithium ion rechargeable battery. *Progress in Batteries and Battery Materials*, 9, 209–217.
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264.
- O’Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W., Prinz, F. B. (2016). *Fuel cell fundamentals* (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley, 3-21.
- Özcan, Ö. F., Karadağ, T., Altuğ, M., & Özgüven, Ö. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan pil kimyasallarının özellikleri ve üstün yönlerinin kıyaslanması üzerine bir derleme çalışması. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(2), 276-298.
- Parra, D., Valverde, L., Patel, M. K., Paredes, J. R. (2015). Techno-economic evaluation and social life cycle assessment of a PV hydrogen-battery hybrid energy system. *Renewable Energy*, 83, 396–404.
- Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279–294.
- Piller, S., Perrin, M., Jossen, A. (2001). Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, 96(1), 113–120.
- Pilo, F., Pisu, P., Soma, G. (2009). Energy management of a hybrid fuel cell/photovoltaic/battery system for residential applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3618-3625.
- Pinto, R., Oliveira, M., Borges, A. (2025). An experimentally validated model of electrolyte effects in alkaline water electrolysis. *Scientific Reports*, 15, 41865.

- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608.
- Riffonneau, Y., Benachaiba, C., Diallo, D. (2010). Control strategies for fuel cell hybrid systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17), 9151–9161.
- Saleh, N. May, M. (2024). Study the influences of both NaOH and KOH at different electrolyte concentrations and times on hydrogen production. *Journal of Solar Energy And Sustainable Development*, 14(1), 73-86
- Sanli, A. E., Yilmaz, O., Aytaç, A. (2013). A novel H_2S/H_2O_2 fuel cell operating at the temperature of 298 K. *International Journal of Energy Research*, 37(10), 1205–1212.
- Sanlı, A. E., Yılmaz, O., Aytaç, A., Mat, M. D. (2014). Investigation of the electro-oxidation of artificial Black Sea water using cyclic voltammetry on metal sulfide electrodes (I). *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(14), 7236-7246.
- Sebbahi, S., Assila, A., Alaoui Belghiti, A., Laasri, S., Kaya, S., Hlil, E. K., Rachidi, S. (2024). A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 82(28), 583–599.
- Serra, E., Barrenechea, J. F., Manzano-Agugliaro, F. (2013). Energy management strategies for photovoltaic-fuel cell-battery hybrid power systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 74, 306-318.
- Shboul, B., Zayed, M. E., Abdelrazik, A. S., Alrbai, M., Khawaldeh, H. A., & Almomani, F. (2025). A novel hybrid photovoltaic/thermal-fuel cell system for efficient hydrogen, heat, and power generation: techno-economic and environmental evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 136, 1041-1060.
- Singhal, S. C., Kendall, K. (Eds.). (2003). *High-temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications*. (1st ed.). Oxford, UK: Elsevier Science, 83-112.
- Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491.
- Tarascon, J.-M., Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, 414(6861), 359–367.
- Taşova, M. (2018). Türkiye'nin Güneş enerjisi parametre değerleri ve Güneş enerjisinden faydalanma olanakları. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(3), 10–17.
- Verastegui, J. E. E., Antuñano, M. A. Z., Reséndiz, J. R., García, R. G., Kañetas, P. J., Ordaz, D. L. (2020). Electrochemical hydrogen production using separated gas electrolyzer for soybean oil hydrogenation. *Processes*, 8(7), 832.

- Wang, J., Chen, Z. (2021). Performance optimization of fuel cell hybrid systems in microgrids. *Journal of Power Sources*, 512, 230456.
- Zeng, K., Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326.
- Zhang, Q., Shan, Y., Pan, J., Kumar, P., Keevers, M. J., Lasich, J., Lu, X. (2025). A photovoltaic-alkaline water electrolysis system with high solar-to-hydrogen efficiency under practical current densities. *Science Advances*, 11(9).
- Zhang, Y., Li, H. (2021). Direct utilization of hydrogen in fuel cells and combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(12), 6789–6802.
- Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L., Yang, H. (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Applied Energy*, 87(2), 380–389.



Gazili olmak ayrıcalıktır