

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN PEM TİPİ YAKIT PİLİ ÜRETİLMESİ  
VE TEST EDİLMESİ**

**LEVENT SEMİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MİKRO VE NANO TEKNOLOJİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2012**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Turgut BAŞTUĞ  
Anabilim Dalı Başkanı

Levent SEMİZ tarafından hazırlanan İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN PEM TİPİ YAKIT PİLİ ÜRETİLMESİ VE TEST EDİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Doç. Dr. Mehmet SANKIR  
Tez Danışmanı

---

Yrd. Doç. Dr. Nurdan D. SANKIR  
Tez Ortak Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan :Prof. Dr. Turgut BAŞTUĞ

Üye :Doç. Dr. Mehmet SANKIR

Üye :Doç. Dr. Derek BAKER

Üye :Yrd. Doç. Dr. Nurdan D. SANKIR

Üye :Yrd. Doç. Dr. Teyfik DEMİR

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Levent SEMİZ

<b>Üniversitesi</b>	<b>: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi</b>
<b>Enstitüsü</b>	<b>: Fen Bilimleri</b>
<b>Anabilim Dalı</b>	<b>: Mikro ve Nano Teknoloji</b>
<b>Tez Danışmanı</b>	<b>: Doç. Dr. Mehmet SANKIR</b>
<b>Tez Türü ve Tarihi</b>	<b>: Yüksek Lisans – Ağustos 2012</b>

**Levent SEMİZ**

## **İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN PEM TİPİ YAKIT PİLİ ÜRETİLMESİ VE TEST EDİLMESİ**

### **ÖZET**

Yakıt pilleri ağırlık-uçma süresi oranı bakımından hâlihazırda kullanılan aynı ağırlıktaki lityum polimer pillere oranla 3 kata varan daha fazla uçma süresi sağlayabilmesi ve yakıt pilindeki gelişmelerin hızla devam etmesi nedeniyle, bu enerji kaynağının insansız hava araçlarında kullanılması çok iyi bir seçenek olarak görünmektedir. Bu konudaki gelişmeler ve başarılar da yakıt pilinin yaygınlaşmasını ve uygulanabileceği alanların genişlemesini sağlayacaktır. Bu amaçlar ışığında T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen proje kapsamında yapılan çalışmalarda elde edilen bilgilerle insansız hava araçlarında kullanılmak üzere 50, 110, 150 ve 200 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili üretilmiştir. Yakıt pilinin performansı ana olarak zar elektrot montajı performansına bağlı olduğundan bu yakıt pillerinde kullanılacak zar elektrot montajlarının performanslarının artırılması çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla farklı kalınlıklarda kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajları test edilmiş; ağırlık altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın, katot kataliz tabakasının saçınım sistemi kullanılarak platinle kaplanmasının, gaz difüzyon tabakalarının iyonomer ve kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının ve gaz difüzyon tabakalarının saçınım sistemi kullanılarak platinle kaplanmasının zar elektrot montajlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yakıt pillerinin montajı sırasındaki sıkıştırma miktarının, yakıt pilinin çalışması esnasında basınçlandırma valfinin kullanılmasının ve bu basınçlandırma valfinin açık ve kapalı kalma sürelerinin hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve üretilen yakıt pilinin performansının zamana karşı değişimi gözlenmiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile bilğimiz dahilinde insansız hava uçağında kullanılabilecek kalitede yakıt pilleri ilk defa ülkemizde üretilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt pili, zar elektrot montajı, insansız hava aracı

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Micro and Nano Technology  
**Supervisor** : Associate Professor Dr. Mehmet SANKIR  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – August 2012

**Levent SEMİZ**

**NOVEL MANUFACTURING AND TESTING PROCESSES OF PEM FUEL  
CELLS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES**

**ABSTRACT**

Fuel cells are one of the good candidates for powering unmanned aerial vehicles due to their low weight and high durability when compared to well known batteries, e.g. lithium polymer batteries. Fuel cells especially with recent developments in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) provide longer flying times up to three times that of lithium batteries. This makes them highly suitable in unmanned aerial vehicles. For these reasons, the intellectual property obtained from a project supported by Ministry of Science, Industry and Technology was used for manufacturing PEM fuel cells producing 50, 110, 150 and 200 Watts to make them available for unmanned aerial vehicles. Since the heart of the any fuel cell is the membrane electrode assembly, the performance of a fuel cell is mainly dependent on the structure of the membrane electrode assembly. Therefore, we mainly concentrated on increasing the performances of the membrane electrode assemblies that will eventually be used in these fuel cells manufactured within this study. For this purpose membrane electrode assemblies with various catalyst surfaces and thicknesses were tested. The influence of several other parameters such as the amount of pressure applied on the membrane electrode assembly, platinum sputtering on cathode as well as gas diffusion layers and laminating the gas diffusion layer to the membrane electrode assembly with ionomer and catalyst solution on the PEMFC performance were evaluated. Also, other critical parameters such as compression of the whole stack of the fuel cell and the purging time with the purge valve were analyzed to better utilize them in unmanned air vehicles. With this work, to the best of our knowledge for the first time in Turkey, fuel cells at various powers available for unmanned aerial vehicles were produced and tested.

**Keywords:** Fuel cell, membrane electrode assembly, unmanned aerial vehicle

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve uzun süreli çalışma saatleri boyunca çalıőmalarımda bana yardımcı olan danıőmanım Sayın Doç. Dr. Mehmet SANKIR'a ve yardımcı danıőmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Nurdan D. SANKIR'a, çalıőmalarımın son zamanlarında sonuca ulaőmamda büyük emeği olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan SANKIR'a, aldığım eğitim için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Mikro ve Nano Teknoloji Yüksek Lisans Bölümü öğretim görevlisi sayın hocalarıma, sağladığı kaynaklar ve olanaklar için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, projede destekleri için Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na, testlerde kullanılan zar elektrot montajlarını sağlayan NT Nanoteknoloji firmasına ve En-Ar Lab. ve Membran Bilimi ve Nanoteknoloji Laboratuvarı'nda beraber çalıştığım çalışma arkadaşlarıma yardımlarından ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Havacılığın Çevresel Etkisi	2
1.2. Enerji Santralleri Arasında Spesifik Enerji Kıyaslaması	2
2. YAKIT PİLİ	8
2.1. Yakıt Pili Çeşitleri	9
2.2. PEM Yakıt Pili	12
2.2.1. PEM Yakıt Pili Bileşenleri	13
2.2.1.1. Tek/Çift Kutuplu Plakalar	13
2.2.1.2. Gaz Difüzyon Tabakası	14
2.2.1.3. Kataliz Tabakası	15
2.2.1.4. Zar	16
2.2.1.5. Zar Elektrot Montajı	17
2.3. Literatür Araştırması	
2.3.1. Yakıt Pillerinin Kullanıldığı İnsansız Hava Uçağı Tarihçesi	17
3. YAKIT PİLİ TERMODİNAMİĞİ VE KİNETİĞİ	21
3.1. Temel Kimya ve Termodinamik	21
3.1.1. Temel Reaksiyonlar	21
3.1.2. Hidrojenin Üst ve Alt Isıl Değeri	22

3.1.3. Teorik Elektriksel İş	22
3.1.4. Teorik Yakıt Pili Potansiyeli	23
3.1.5. Sıcaklığın Etkisi	25
3.1.6. Basınç Etkisi	28
3.1.7. Teorik Yakıt Pili Verimliliği	29
3.1.7.1. Voltaj Verimliliği	29
3.1.7.2. Akım Verimliliği	29
3.1.7.3. Tersinir Enerji Verimliliği	29
3.1.7.4. Toplam Verimlilik	30
3.2. Yakıt Pili Elektrokimyası	31
3.2.1. Voltaj Kayıpları	35
3.2.1.1. Aktivasyon Polarizasyonu	35
3.2.1.1.1. Katodik Aşırı Potansiyel	37
3.2.1.1.2. Anodik Aşırı Potansiyel	38
3.2.1.2. Konsantrasyon Polarizasyonu	38
3.2.1.3. Direnç Kayıpları	39
3.2.1.4. İç Akımlar ve Crossover Kayıpları	40
3.2.2. Gerçek Yakıt Pili Potansiyeli	40
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	41
4.1. Kataliz Tabaka Kalınlığının Zar Elektrot Montajı Performansı Üzerindeki Etkisi	41
4.2. Zar Elektrot Montajının Ağırlık altında Sıkıştırılmasının ve Sıkıştırılma Esnasındaki Sıcaklığın Performansa Etkisi	48
4.3. Zar Elektrot Montajının Katot Tarafının Saçtırma (Sputter) Yöntemi Kullanılarak Platin Metali ile Kaplanması Performansa Etkisi	61
4.4. Gaz Difüzyon Tabakasının İyonomerle Zar Elektrot Montajına Yapıştırılmasının Performansa Etkisi	66



4.5. Gaz Difüzyon Tabakasının Kataliz Karışımıyla Zar Elektrot Montajına Yapıştırılmasının Performansa Etkisi	70
4.6. Gaz Difüzyon Tabakalarının Sputter Yöntemi Kullanılarak Platin Metali ile Kaplanmasının Zar Elektrot Montajının Performansına Etkisi	74
4.7. Yakıt Pili Montajı Esnasında Sıkıştırma Miktarının Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili Performansı Üzerindeki Etkisi	81
4.8. Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Hidrojen Yakıt Pili Basınçlandırma Valfinin Kullanılmasının Performansa Etkisi	84
4.9. 50, 110 ve 150 Wattlık Olarak Dizayn Edilen Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Hidrojen Yakıt Pili Performans Eğrileri	91
4.10. NT Nanoteknoloji Firmasından Sağlanan Zar Elektrot Montajlarının ve Üretilen Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Hidrojen Yakıt Pili Performanslarının Zamana Karşı Değişimi	95
5. DEĞERLENDİRME	101
6. GELECEK ÇALIŞMALAR	104
KAYNAKLAR	106
EK	115
PATENT BAŞVURUSU	115
1. Tarifname	115
2. İstemler	127
3. Özet	131
4. Şekiller	132
ÖZGEÇMİŞ	141

## ÇİZELGE LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Yakıt pili türleri, tanımları ve temel bilgileri	9
Çizelge 2.2. Farklı tür ve uygulama alanlarındaki yakıt pillerinin uygulamaları ve ana avantajları	11
Çizelge 2.3. Yayınlanmış yakıt piliyle güçlendirilmiş hava araçları	19
Çizelge 4.1. Normal zar elektrot montajı ve gaz difüzyon tabakaları iyonomerle yapıştırılmış zar elektrot montajı performanslarının zamana bağlı değişimi	97
Çizelge 5.1. Sektöründe lider firmaların ürettikleri yakıt pilleri ve kendi ürettiğimiz yakıt pili arasındaki ağırlık-hacim-performans kıyaslamaları	103
Çizelge 6.1. Hidrojen kaynaklarının avantaj ve dezavantajları	105

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Anahtar girdilerin düşük seviye güç santrali karşılaştırmalarına ölçeklendirilmesi	5
Şekil 1.2. Düşük seviye güç santrali kıyaslamasının sonuçları	6
Şekil 1.3. İnsansız hava araçları için Yakıt Pili Üretilmesi ve Test Edilmesi konulu tez kapsamındaki deneylerin işleyiş şeması	7
Şekil 2.1. Lynntech/Aerovironment Hornet Yakıt Pili	18
Şekil 4.1. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	41
Şekil 4.2. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	42
Şekil 4.3. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-akım yoğunluğu grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	42
Şekil 4.4. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	45
Şekil 4.5. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	45
Şekil 4.6. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-akım yoğunluğu grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	46
Şekil 4.7. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	49
Şekil 4.8. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	50
Şekil 4.9. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	51

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.10. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	51
Şekil 4.11. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	53
Şekil 4.12. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	53
Şekil 4.13. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	54
Şekil 4.14. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	55
Şekil 4.15. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	56
Şekil 4.16. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	56
Şekil 4.17. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	57
Şekil 4.18. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	58
Şekil 4.19. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	58
Şekil 4.20. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	59

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.21. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	59
Şekil 4.22. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	60
Şekil 4.23. Katot kataliz tabakasının platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	61
Şekil 4.24. Katot kataliz tabakasının platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	62
Şekil 4.25. Katot kataliz tabakasının platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:8.0 Nl/dk)	64
Şekil 4.26. Katot kataliz tabakasının platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:8.0 Nl/dk)	64
Şekil 4.27. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performans etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	66
Şekil 4.28. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performans etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	66
Şekil 4.29. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performans etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	68
Şekil 4.30. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performans etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	69
Şekil 4.31. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performans etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	70

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.32. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	70
Şekil 4.33. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	72
Şekil 4.34. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	73
Şekil 4.35. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	74
Şekil 4.36. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	75
Şekil 4.37. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	77
Şekil 4.38. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	77
Şekil 4.39. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	79
Şekil 4.40. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,12 Nl/dk, Hava:0,30 Nl/dk)	80
Şekil 4.41. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	80
Şekil 4.42. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği (H <sub>2</sub> :0,24 Nl/dk, Hava:0,60 Nl/dk)	81

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.43. Yakıt pili montajı esnasındaki sıkıştırma miktarının hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pili performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği	82
Şekil 4.44. Yakıt pili montajı esnasındaki sıkıştırma miktarının hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pili performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği	83
Şekil 4.45. Yakıt pili montajı esnasındaki sıkıştırma miktarının hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pili performansına etkisini gösteren güç-akım yoğunluğu grafiği	83
Şekil 4.46. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.5 sn, kapalı kalma süresi 1.0 sn)	86
Şekil 4.47. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-3.0 sn, kapalı kalma süresi 2.0 sn)	86
Şekil 4.48. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-3.0 sn, kapalı kalma süresi 2.0 sn) (büyütülmüş grafik)	87
Şekil 4.49. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 3.0 sn)	87
Şekil 4.50. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 3.0 sn) (büyütülmüş grafik)	88
Şekil 4.51. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 4.0 sn)	88
Şekil 4.52. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 4.0 sn) (büyütülmüş grafik)	89

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.53. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.5 sn, kapalı kalma süresi 5.0 sn)	89
Şekil 4.54. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.5 sn, kapalı kalma süresi 6.0 sn)	90
Şekil 4.55. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 1.0-6.0 sn aralığında değişen durumlarda elde edilen en yüksek performanslar)	90
Şekil 4.56. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 1.0-6.0 sn aralığında değişen durumlarda elde edilen en yüksek performanslar) (büyütülmüş grafik)	91
Şekil 4.57. 7 yığından oluşan 50 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren voltaj-akım grafiği	92
Şekil 4.58. 7 yığından oluşan 50 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren güç-voltaj grafiği	92
Şekil 4.59. 15 yığından oluşan 110 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren voltaj-akım grafiği	93
Şekil 4.60. 15 yığından oluşan 110 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren güç-voltaj grafiği	93
Şekil 4.61. 20 yığından oluşan 150 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren voltaj-akım grafiği	94
Şekil 4.62. 20 yığından oluşan 150 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren güç-voltaj grafiği	94



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.63. 20 yığından oluşan 150 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansının zamana bağlı değişimini gösteren akım- zaman grafiği	99
Şekil 4.64. 20 yığından oluşan 150 wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansının zamana bağlı değişimini gösteren güç- zaman grafiği	100
Şekil Ek.1a. Buluş konusu proton geçirgen zarlı doğrudan hava soluyan tipi hidrojen yakıt pilinin ve bileşenlerinin gösterildiği perspektif görünüşü	132
Şekil Ek.1b. Buluş konusu proton geçirgen zarlı doğrudan hava soluyan tipi hidrojen yakıt pilinin ve bileşenlerinin gösterildiği perspektif görünüşü	133
Şekil Ek.1c. Buluş konusu proton geçirgen zarlı doğrudan hava soluyan tipi hidrojen yakıt pilinin ve bileşenlerinin gösterildiği perspektif görünüşü	134
Şekil Ek.2. Son plakanın perspektif görünüşü	135
Şekil Ek.3. Epoksinin perspektif görünüşü	135
Şekil Ek.4. Akım toplayıcının perspektif görünüşü	136
Şekil Ek.5. Grafit plakanın perspektif görünüşü	136
Şekil Ek.6. Gaz difüzyon tabakası 1'in perspektif görünüşü	137
Şekil Ek.7. Zar elektrot montajının perspektif görünüşü	137
Şekil Ek.8. Gaz difüzyon tabakası 2'nin perspektif görünüşü	137
Şekil Ek.9. Silikon sızdırmazlık contasının perspektif görünüşü	138
Şekil Ek.10. Silikon borunun perspektif görünüşü	138
Şekil Ek.11. Kör tıpanın perspektif görünüşü	138
Şekil Ek.12. Su püskürtmeli nemlendirme sisteminin perspektif görünüşü	139
Şekil Ek.13. Cıvatanın perspektif görünüşü	139
Şekil Ek.14. 20 yığınlı yakıt pili performans eğrisi	140

## KISALTMALAR

<b>Kısaltma</b>	<b>Açıklama</b>
PEMFC	: Proton geçirgen zarlı yakıt pili
GDL	: Gaz difüzyon tabakası
ZEM	: Zar elektrot montajı

## SEMBOL LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\Delta$	: değişim
H	: entalpi
G	: Gibbs serbest enerjisi
T	: sıcaklık
Q	: denge kesir
P	: basınç
R	: gaz sabiti
E	: hücre potansiyeli
S	: entropi
U	: iç enerji
V	: hacim
$\eta$	: verimlilik
r	: reaksiyon hızı
k	: hız sabiti
C	: konsantrasyon
i	: akım yoğunluğu
$k_b$	: Boltzman sabiti
h	: Planck sabiti
$\alpha$	: transfer katsayısı
F	: Faraday sabiti
$\eta$	: polarizasyon kaybı
I	: akım
m	: kütle
n	: eşdeğer değişim sayısı
A	: alan
$\beta$	: Tafel sabiti
D	: tepkiyenin yayılma gücü
$\delta$	: mesafe
R	: direnç

<b>İndisler</b>	<b>Açıklama</b>
0	: standart koşullar
f	: ileri yönde
r	: geri yönde
pot	: potansiyele ait
tn	: termonötral
a	: anoda ait
c	: katoda ait
conc	: konsantrasyona ait
L	: limitleyici koşulda
act	: aktivasyona ait

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

Yakıt pilleri, geleneksel enerji kaynaklarına oranla hava araçlarında kullanıldığında birçok konuda üstünlük sağlama potansiyeliyle ön plana çıkmaktadır. Bunlar çevresel ve performans olarak iki gruba ayrılrsa da en önemli etkileri özellikle insansız hava araçlarında sağlayabilecekleri performans geliştirmeleridir. İçten yanmalı motorların bu hava araçlarında kullanılması, özellikle askeri kullanımlarda önemli olan dayanım, ağırlık ve ses ve gaz emisyonları konularında uygun olmaması insanların batarya kullanımına yönelmesine neden olmuştur. Fakat uçuş sürelerindeki performans ve ağırlık oranı istenen seviyede olmadığından, alternatif enerji kaynağı arayışına gidilmiştir. Solar enerji bu konuda öne geçer gibi gözüke de hava şartlarına çok bağlı olması ve verimdeki düşüklük nedeniyle tek başına yeterli olamayacağı görülmüştür. Yakıt pilleri ise ağırlık-uçma süresi oranı bakımından hâlihazırda kullanılan aynı ağırlıktaki lityum polimer pillere oranla 3 kata varan daha fazla uçuş süresi sağlayabilmesi ve yakıt pilindeki gelişmelerin hala devam etmesi nedeniyle, bu enerji kaynağının insansız hava araçlarında kullanılması çok iyi bir seçenek olarak gözükmektedir. Bu konudaki gelişmeler ve başarılar da yakıt pilinin yaygınlaşmasını ve uygulanabileceği alanların genişlemesini sağlayacaktır. Daha büyük hava araçları, otomobiller ya da yerleşik enerji santrallerinde bu çevre dostu yenilenebilir enerji kaynağının kullanılmasına ön ayak olabilecektir.

Yakıt pillerinin hava araçlarında kullanılması konusu konvansiyonel teknolojilere göre arttırılmış çevre uyumu, konvansiyonel teknolojilere göre daha yüksek güvenilirlik, daha düşük ses ve termal emisyon sayesinde fark edilebilirlikte düşüş ve mevcut teknolojilere oranla daha yüksek spesifik enerji artıları sayesinde ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu konulardaki kıyaslamalar iki ana başlık altında aşağıda daha detaylı olarak anlatılmıştır.

## 1.1. Havacılığın Çevresel Etkisi

Havacılığın çevre uyumluluğu yakıt pili teknolojisinin yararlı etki sağlayabileceği iki konu altında incelenebilir: kirlenme ve enerji sürdürülebilirliği. Öngörülebilir gelecek için havacılık karbon monoksit, nitrojen oksit, hidrokarbon, katı parçacık, sülfür oksit, hidrojen sülfid, karbondioksit ve su formlarında bölgesel ya da küresel atmosfer kirlenmesine katkıda bulunacaktır. Havacılık ulusal nitrojen oksit miktarının yaklaşık %0.4'ünden sorumludur. Bölgesel alanlarda bu oran daha büyük olabilir. Dallas-Ft, Worth, Teksas, Birleşik Devletler bölgesinde havacılık 1996'daki nitrojen oksit miktarının %6.1'inden sorumludur. Havacılık ayrıca bölgesel ses kirliliği üzerinde taksi ve uçuş işlemleri sırasındaki motor sesi emisyonu formunda belirgin ölçüde etkiye sahiptir. Karbondioksit, nitrik oksit ve üst atmosfer su emisyonu havacılığın neden olduğu birincil küresel aktif kirleticilerdir. 2015 itibariyle havacılık iklim değişikliği ölçüsü olan insan kökenli ısınimsal zorlama miktarının tamamının kabaca %5'inden sorumluk olacaktır. Ayrıca havacılığın küresel petrol tüketiminde küçük etkisi vardır. Birleşik Devletler için 2006'da havacılık ülkenin enerji akışının %4.8'ini ve petrolünün %8.4'ünü tüketmiştir [1]. Havacılığın çevresel etkisi otomotiv ya da yerleşik güç üretimi gibi uygulamalara oranla düşüktür. Bu nedenle yakıt pillerinin havacılık endüstrisine adaptasyonu sadece çevresel uyumluluğun artırılması konusuyula bağdaştırılamaz. Buna karşın bazı havacılık uygulamalarında yakıt pili enerji santralleri çevresel yararların dışında ileriki gelişmeleri ve ticarileştirmelere hak verilmesini sağlayacak performans yararlarını gösterebilirler [1-3].

## 1.2. Enerji Santralleri Arasında Spesifik Enerji Kıyaslaması

Birçok çalışma belirli uygulama alanlarında yakıt pili enerji santrallerinin içten yanmalı ve elektrokimyasal batarya enerji santrallerine kıyasla daha yüksek spesifik enerji gösterebileceğini ortaya koymuştur. Fakat hala geniş çaplı havacılık uygulamalarına uygun güç çeşitliliği ve enerji ölçeklendirmesi konularında yakıt pili ve konvansiyonel enerji santrallerini kıyaslayacak bir çalışma yapılmamıştır [1].

Bu bölümde yakıt piliyle güçlendirilmiş uçaklar için mevcut yakıt ve enerji santralleri arasında kavramsal bir kıyaslama yapılmıştır. Söz konusu enerji santralleri benzinle beslenen içten yanmalı motor, gaz hidrojen depolu PEM yakıt pili, sıvı hidrojen depolu PEM yakıt pili, propanla beslenen katı oksit yakıt pili ve katkısız düzenli metanolla beslenen PEM yakıt pilidir [1].

Söz konusu enerji santralleri yakıt deposu ve yakıt olarak saklanan enerjiyi itici enerjiye dönüştüren enerji dönüşüm bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle enerji santralının spesifik enerjisi yakıtın spesifik enerjisi ve enerji dönüşüm bileşenlerinin kütle ve veriminin bir fonksiyonudur. Yakıt pilinin spesifik enerjisi, enerji santralının dönel mekanik enerji çıkışının yakıt, yakıt tankı ve enerji dönüştürücüsü olan motor ya da yakıt pilinin kütlesine oranıdır [1].

İçten yanmalı motor için, analizler motor freni spesifik yakıt harcaması ölçeği Şekil 1.1'de gösterilmiştir [1,4-6]. Motor ağırlığı 1.7 kW/kg olarak ölçeklendirilmiş [5] ve tank ağırlığı yakıt ağırlığının %0'ıdır [1].

Hidrojenle beslenen PEM yakıt pili için, hidrojenin alt ısı değerine göre her ölçekte yakıt pili sistemi yeterliliği %60 olarak varsayılmıştır [7]. Gaz [7- 9] ve sıvı [10-12] hidrojen depo sistemlerinin ağırlık fraksiyonları figürde gösterilmiştir. Hidrojen PEM sistemlerinin kütlesi 500 W/kg olarak ölçeklendirilmiş [13] ve direkt metanol PEM sistemlerinin kütlesi de (direk hidrojene göre ulaşılabilir akım yoğunluğuyla) 167W/kg [14] olarak ölçeklendirilmiştir. Elektrik motorunun verimliliği de %90 olarak varsayılmıştır. Katı oksit yakıt pili için de yığın kütlesi 1kW [15]'dan az yığınlar için 20 W/kg olarak ölçeklendirilmiş ve 1kW'dan [16] büyük olanlar yığınlar için de 70W/kg olarak ölçeklendirilmiştir. Yığının spesifik propan tüketimi 287 g/kWh DC'dir [15] ve elektrik motor verimliliği %90 olarak kabul edilmiştir [1]. Her teknoloji için enerji santrali spesifik enerjisi 1 ile 100000 dk ve 10 ile 100000 W arasındaki dayanımlar için hesaplanmıştır. Sonuçlar ve önemsenen birkaç nokta Şekil 1.2'de işaretlenmiştir.

Nokta 1 düşük güç (10 W) ve çoklu saat (1000 dk) dayanımı için şartı gösterir. Bu şartta, direk metanol yakıt pili 1000-2000 Wh/kg arasında spesifik enerji gösterir. Bu şartta direk metanol yakıt pili topluluğu için önemsenen düşük güç, yüksek enerji ve küçük ölçekli uygulamalarla çok iyi uyur. Bu uygulamalar elde taşınabilir elektronikler, küçük APUlar ve diz üstü bilgisayarları içerir [1,17,18].

Nokta 2 küçük ölçekli insansız hava uçağı uygulamasıyla ilgili küçük ölçek (100 W) ve uzun dayanım (10000 dk) durumunu gösterir. Teknolojiler arası kıyaslama bu ölçekte içten yanmalı enerji santralinin 330 Wh/kg gibi düşük spesifik enerjiye sahip olduğunu gösterir. Yakıt pili enerji santralinin bu ölçekteki spesifik enerjisi ise 1800 Wh/kg'dır. Sıvı hidrojen yakıtlı yakıt pili enerji santralleri daha da yüksektir. Bu kıyaslamaya göre küçük ölçekli insansız hava uçağı uygulamaları için yakıt pili enerji santralleri içten yanmalı motor enerji santraline oranla daha yüksek spesifik enerji sağlarlar. Bu ölçekteki ticari olarak mevcut lityum polimer bataryaların spesifik enerjisi ise 149 Wh/kg'dır [1,19].

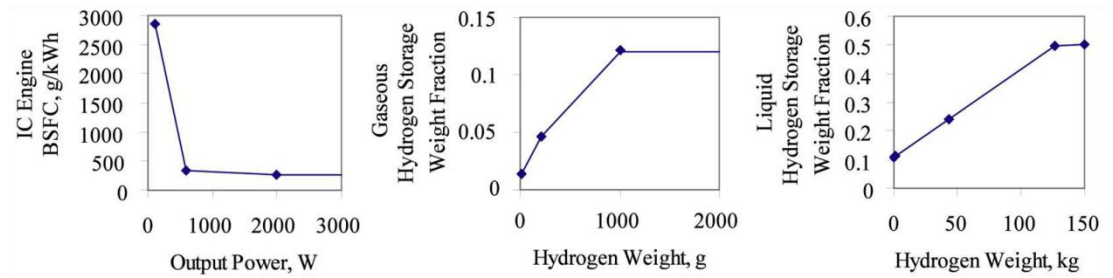
Nokta 3 içten yanmalı motorun uzun dayanım ve daha yüksek güç durumlarındaki spesifik enerjisini göstermektedir. Nokta 2 koşulları altında motor verimliliği küçük motor ölçeğı nedeniyle düşüktür. Nokta 3 koşullarında, içten yanmalı motorun verimliliği benzinin alt ısı değerine göre yaklaşık %31'dir. Benzer şekilde, içten yanmalı motorun spesifik enerjisi yaklaşık 3700 Wh/kg'a yükselmiştir. Enerji santralinin enerji ihtiyacı arttıkça içten yanmalı motor gaz hidrojen ve direk metanol PEM yakıt pili enerji santrallerinden daha yüksek spesifik enerji gösterebilir [1].

Son olarak nokta 4 yüksek güç ve uzun dayanım koşullarında sıvı hidrojen PEM yakıt pilinin mevcut teknolojilere üstünlük kurabildiğini gösterir. Bu uzun dayanım yüksek irtifa insansız hava uçakları tasarımcılarının önem verdiği uygulama sahasıdır [1,20].

Yakıt pili gücü ile çalıştırılan uçak konvansiyonel güçlerle çalıştırılan uçaklara göre farklı amaç ve uygulamalarda üstünlük kurma potansiyeli gösterir. Düşük ölçek ve uzun dayanımlarda, sıkıştırılmış hidrojen PEM yakıt pili enerji santralleri spesifik

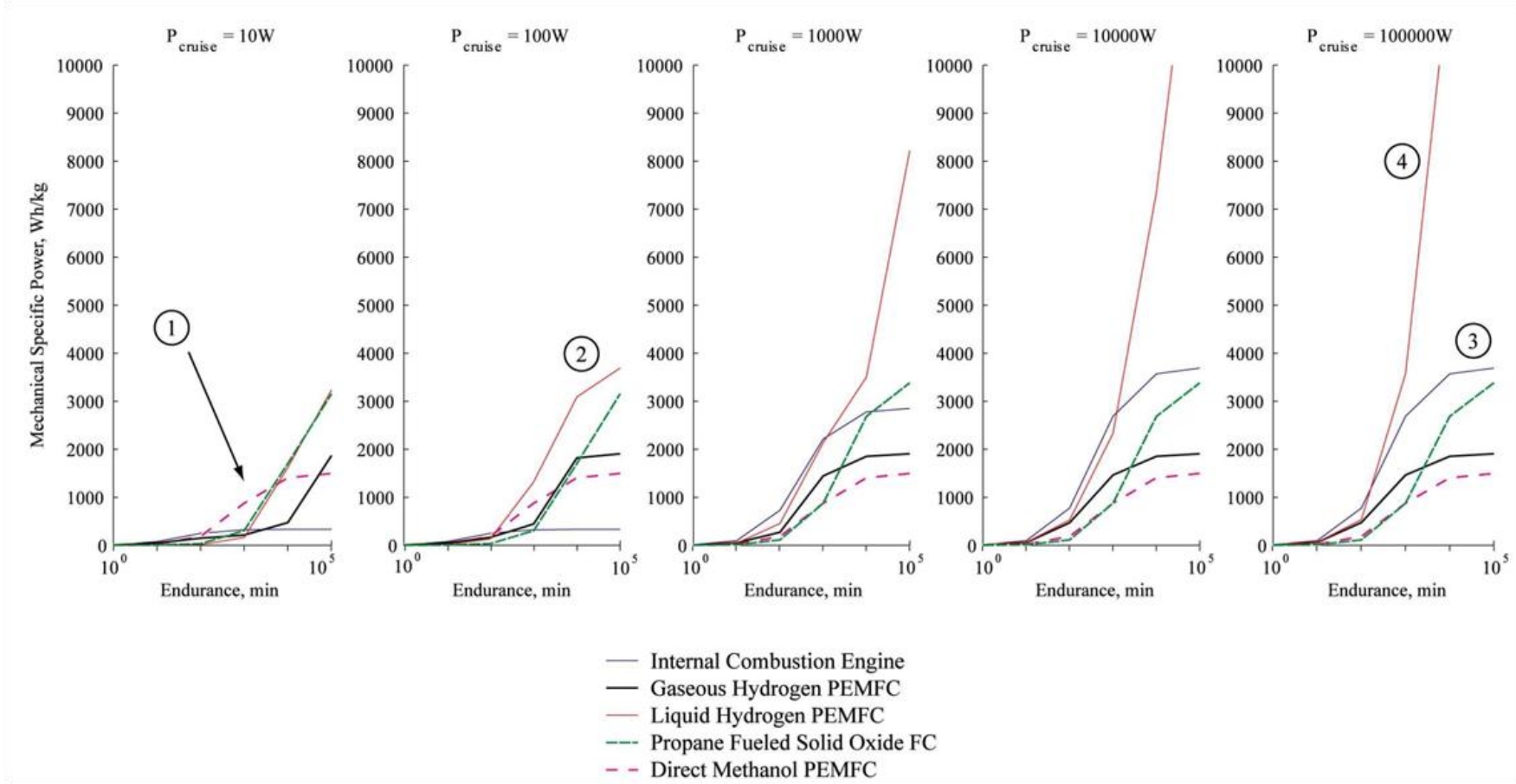
enerjide içten yanmalı motor enerji santrallerine oranla önemli iyileştirmeler gösterebilir. Orta ölçekte, katı oksit yakıt pili ve içten yanmalı motor enerji santralleri sıkıştırılmış enerji sistemlerine üstünlük sağlarlar. Daha yüksek ölçek ve dayanımlarda, içten yanmalı motor enerji santralleri sıvı hidrojen yakıt pili dışındakilere üstünlük sağlar [1].

Yakıt pilinin yukarıda anlatılan artıları göz önüne alınarak belirlenen bu tezin amacı, insansız hava araçlarında kullanılmak üzere proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili sistemi üretilmesi, geliştirilmesi ve test edilmesidir. Bu kapsamda ilk olarak NT Nanoteknoloji firması tarafından sağlanan ve üretilen yakıt pilinde kullanılacak olan zar elektrot montajlarının performans artırma çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla NT Nanoteknoloji firması tarafından sağlanan farklı kalınlıklarda kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajları test edilmiş; ağırlık altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın, katot kataliz tabakasının saçınım sistemi kullanılarak platinle kaplanmasının, gaz difüzyon tabakalarının iyonomer ve kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının ve gaz difüzyon tabakalarının saçınım sistemi kullanılarak platinle kaplanmasının zar elektrot montajlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ardından üretilen yakıt pillerinin montajı sırasındaki sıkıştırma miktarının, yakıt pilinin çalışması esnasında basınçlandırma valfinin kullanılmasının ve bu basınçlandırma valfinin açık ve kapalı kalma sürelerinin hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve üretilen yakıt pilinin performansının zamana karşı değişimi gözlenmiştir. İşleyiş Şekil 1.3'te özetlenmiş şekliyle gösterilmektedir.

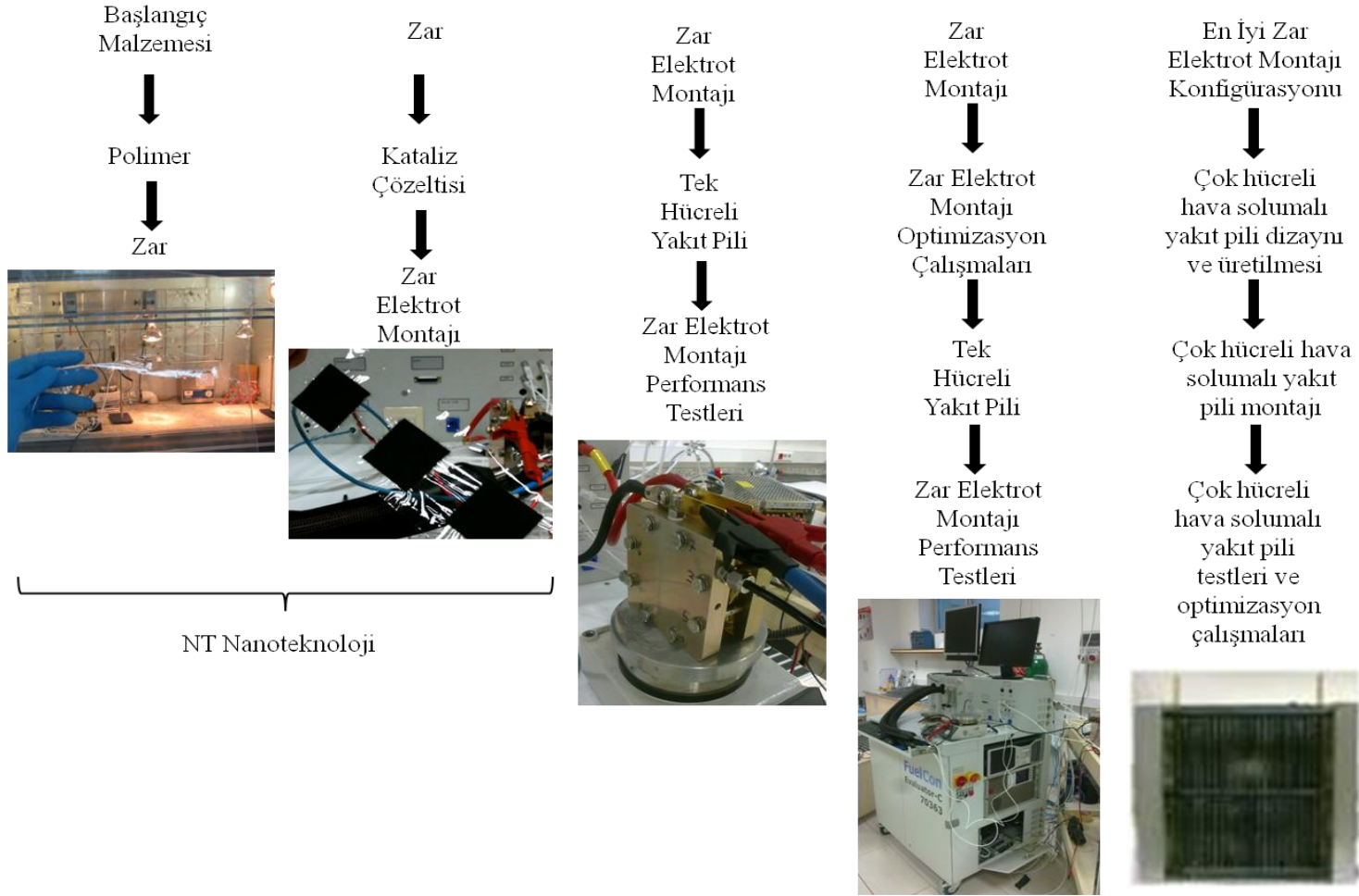


Şekil 1.1. Anahtar girdilerin düşük seviye güç santrali karşılaştırmalarına ölçeklendirilmesi [1]





Şekil 1.2. Düşük seviye güç santrali kıyaslamasının sonuçları [1]



Şekil 1.3. İnsansız hava araçları için Yakıt Pili Üretimi ve Test Edilmesi konulu tez kapsamındaki deneylerin işleyiş şeması

## BÖLÜM 2

### 2. YAKIT PİLİ

Yakıt pili, yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi doğrudan DC elektriğine çeviren bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüsüdür. Tipik olarak, yakıtlardan elektrik üretimi işlemi birçok enerji dönüşüm basamağı içerir:

1. Yakıtın yanması yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi ısıya dönüştürür,
2. Bu ısı daha sonra suyu kaynatmaya ve buhar oluşturmada kullanılır,
3. Buhar termal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren işlemde türbini çalıştırmada kullanılır ve son olarak
4. Mekanik enerji elektrik üreten jeneratörü çalıştırmada kullanılır.

Bir yakıt pili tüm bu işlemleri atlayarak herhangi bir hareketli parça içermeyen tek bir basamakta elektrik üretir. Dikkati çeken işte bu basitliktir. Bir yakıt pili bazı açılardan bir bataryaya benzer. Elektrolit ve negatif ve pozitif elektrotları vardır. Elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla DC elektriği üretir. Fakat bataryadan farklı olarak bir yakıt pili sabit yakıt ve oksitleyici madde beslemesine gereksinim duyar. Ayrıca bataryadan farklı olarak yakıt pilindeki elektrotlar kimyasal değişimlere uğramazlar. Bataryalar kendilerinde bulunan materyalleri içeren elektrokimyasal reaksiyonlarla elektrik üretirler. Bu yüzden elektrokimyasal reaksiyonlarda yer alan materyaller tükendiğinde deşarj olur. Bazı bataryalar şarj edilebilirdir. Elektrokimyasal reaksiyonlar, dışarıdan elektrik uygulandığında ters yönde sürdürülebilir. Bu bataryayı yeniden şarj etme işlemidir. Bir yakıt pili ise yakıt ve oksitleyici madde ile beslendiği sürece deşarj olmaz. Yakıt pilleri için tipik tepkiyenler hidrojen ve oksijendir. Fakat her ikisi de saf halde olmak zorunda değildir. Hidrojen diğer gazlarla ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ) karışım halinde olabileceği gibi doğal gaz,  $\text{CH}_4$ , içerisinde ya da metanol,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , gibi sıvı hidrokarbonlar içerisinde bulunabilir [21].

## 2.1. Yakıt Pili Çeşitleri

Çeşitli yakıt pili çeşitleri ve özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yakıt pili türleri, tanımları ve temel bilgileri [22]

Yakıt Pili Türü	Elektrolit Materyali	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Ana Zehir (Katalitik aktiviteyi yavaşlatan ve durduran)	Avantajlar	Dezavantajlar	En Gelecek Vaat Eden Uygulamalar
Alkalın Yakıt Pili	Potasyum hidroksit su içerisindeki çözümü	60-250	CO <sub>2</sub>	Yüksek verim, düşük oksijen indirgenme reaksiyonu kayıpları	CO <sub>2</sub> kirlenmesi olmayan saf oksijenle çalıştırılmak zorunda	Saf O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> mevcut olduğu uzay uygulamaları
Fosforik Asit Yakıt Pili	Fosforik asidin delikli silikon karbür matrisi içindeki çözümü	160-220	Sülfür, yüksek seviyede CO	%1-%2 CO toleranslı, iyi kalite atık ısı, ispat edilmiş dayanıklılık	Düşük güç yoğunluğu, pahalı, platin kataliz kullanılır, yavaş başlangıç, elektrolit kaybı	Yüksek kaliteli yerleşik güç
Katı Oksit Yakıt Pili	Yttria (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (ZrO <sub>2</sub> )	600-1000	Sülfür	CO toleranslı, yakıt esnek, yüksek kalite atık ısı, pahalı olmayan kataliz	Uzun başlangıç zamanı, termal devir altında dayanıklılık, 600°C altında elektrolitlerin aktif olmaması	Ortak üretimli yerleşik güç, sürekli güç uygulamaları

<b>Yakıt Pili Türü</b>	<b>Elektrolit Materyali</b>	<b>Çalışma Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Ana Zehir (Katalitik aktiviteyi yavaşlatan ve durduran)</b>	<b>Avantajlar</b>	<b>Dezavantajlar</b>	<b>En Gelecek Vaat Eden Uygulamalar</b>
Eriyik Karbonat Yakıt Pili	Delikli matris içindeki eriyik alkali metal (Li/K ya da Li/Na)	600-800	Sülfür	CO toleranslı, yakıt esnek, yüksek kalite atık ısı, pahalı olmayan kataliz	Elektrolit katot katalizini çözer, aşırı uzun başlangıç süresi, karbondioksit katoda enjekte edilmeli, elektrolit korunumu	Ortak üretimli yerleşik güç, sürekli güç uygulamaları
Polimer Elektrolit Yakıt Pili	Esnek katı perflorosülfonik asit polimeri	30-100	CO, sülfür, metal iyonları, peroksit	Düşük sıcaklıkta çalışabilmesi, yüksek verim, yüksek H <sub>2</sub> güç yoğunluğu, görece hızlı başlangıç	Pahalı kataliz, bileşenlerin dayanıklılığı henüz yeterli durumda değil, düşük kalite atık ısı, CO toleranssızlığı, termal ve su yönetimi	Portatif, otomotiv ve yerleşik uygulamalar

Çizelge 2.2. Farklı tür ve uygulama alanlarındaki yakıt pillerinin uygulamaları ve ana avantajları [24]

Tipik Uygulamalar	Portatif Elektronik Cihazlar			Arabalar, botlar, evsel kombine ısı ve güç sistemleri			Dağıtılmış güç üretimi, kombine ısı ve güç sistemleri, otobüsler	
GÜÇ (Watt)	1	10	100	1k	10k	100k	1M	10M
Ana avantajlar	Bataryalardan daha yüksek enerji yoğunluğu, daha hızlı yeniden şarj			Sıfır emisyon için potansiyel, daha yüksek verim			Daha yüksek verim, daha az kirlilik, sessiz	
Farklı Tip Yakıt Pillerinin Uygulama Aralığı	Direk Metanol Yakıt Pili			Alkalin Yakıt Pili			Eriyik Karbonat Yakıt Pili	
					Katı Oksit Yakıt Pili			
	Polimer Elektrolit Yakıt Pili							
						Fosforik Asit Yakıt Pili		

Bunlardan başka asıl olarak polimer elektrolit yakıt pili tipinde olan fakat yakıt olarak farklı maddeler kullanan yakıt pilleri de vardır. Direkt metanol yakıt pilleri, bunlara alternatif olarak formik asit, dimetil eter, etilen glikol, dimetil okzalat temelli yakıt pilleri ve başka adlı direk alkol yakıt pilleri. Tamamen farklı bir kavram ise biyolojik temelli yakıt pilleridir. Bu yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için biyokatalizler kullanılır ve iki temel kategoride sınıflandırılabilirler: (1) mikrobiyal yakıt pilleri ve (2) enzim temelli yakıt pilleri. Mikrobiyal yakıt pillerinde elektrik organik materyallerin bakteri tarafından anaerobik oksidasyonu ile üretilir [21].

## **2.2. PEM Yakıt Pili**

Polimer elektrolit zar yakıt pillerinin (polymer electrolyte fuel cells, PEMFs), diğer çeşitli yakıt pilleri arasında en dominant olanıdır. Görece düşük sıcaklıklarda çalışabilirler (20-80°C), yüksek güç yoğunluklarına sahiptirler, çıkış güçlerini güç taleplerindeki değişimleri karşılayabilecek kadar hızlı bir şekilde değiştirebilirler ve hızlı başlangıç gerektiren otomotiv uygulamalarına uygundur [24-29]. Şu anki PEM yakıt pili maliyeti seri üretime ekstrapole edilince 100 dolar/kW'ı [30] aşmaktadır. İçten yanmalı motorlarla yarışabilmek için maliyetin 30 dolar/kW'ya [30,31] ulaşması gerekir. Maliyeti iki katından daha fazla düşürülmesi gereği, yakıt pillerinin otomotiv uygulamaları için uzun bir yolu olduğunu gösteriyor [32].

PEM tipi yakıt pillerinin anahtar bileşenlerinden birisi karbon yüklü platin bazlı katalizden oluşan delikli elektrottur. İnce delikli anot ve katot katı organik polimer olan elektrolit zara yapıştırılır. Oluşan kompozite zar elektrot montajı denir. Gaz difüzyon tabakası gaz fazındaki hidrojen ve oksijen tepkiyenlerini beslemek için anot ve katodun delikli elektrotlarına çok yakın şekilde birleştirilir. Hidrojen anot tarafına beslenir ve kataliz hidrojen atomlarının elektronlarını vererek hidrojen iyonu olan proton haline gelmesini sağlar. Bu reaksiyon hidrojen yükseltgenme reaksiyonu olarak bilinir. Elektronlar elektrik akımı formunda hareket eder ve yakıt pilinin oksijen beslendiği katot tarafına dönmeden önce kullanılabilirler. Bu esnada protonlar zar boyunca katoda nüfuz eder ve oksijen ulaşan protonlar ve elektronlarla

birleşerek su oluşturur. Bu reaksiyon oksijenin indirgenmesi reaksiyonu olarak adlandırılır. Böylelikle tüm süreç tamamlanmış olur [32].

Anotta:



Katotta:



Toplamda:



## 2.2.1. PEM Yakıt Pili Bileşenleri

### 2.2.1.1. Tek/Çift Kutuplu Plakalar

Akış plakaları tepkiyenler için akış yolu sağlarlar. Tek kutuplu plakalar tek hücreli yapılar için kullanılır. Çift kutuplu plakalar ise çok hücreli olan yığınlarda kullanılır. Zar elektrot montajının her iki tarafındaki iki plaka, çift kutuplu plakanın iki yarısı olarak düşünülebilir. Yakıt pili yığında çift kutuplu plakalar birçok kritik fonksiyon görevinde bulunurlar. Plakalar hücreden hücreye elektrik iletim yolu olarak hizmet ederler, akım toplayıcı olarak iş görürler, yığın için yapısal destek sağlarlar ve tek hücreleri ayırırlar. Tepkiyen akış kanalları çift kutuplu plakanın her iki tarafında da millenmiştir ve her birim hücrenin ters taraflarındaki anot ve katodu oluşturur. Bu kanallar suyu hücreden uzaklaştırabildikleri gibi soğutma için de yollar sunarlar [21]. Çift kutuplu plakaların çalışma performansı ağırlıklı olarak malzeme ve kanal konfigürasyonlarına bağlıdır. Çift kutuplu plaka yüksek derecede iletken, hafif ve gazlara karşı sızdırmaz olmalıdır. Tepkiyenler ve suyun varlığı nedeniyle malzemeler paslanmaya dirençli ve kimyasal olarak kararlı olmalıdırlar [21]. Çoğu PEM yakıt pili çift kutuplu plakaları reçine emdirilmiş grafit, çelik ya da alüminyum gibi metalik malzeme ya da kompozit malzemelerden yapılır [21]. Grafit arzulanan plaka



özelliklerinin çoğunluğuna sahiptir, fakat üretimi maliyetli ve kırılımandır. Çelik ve alüminyum ise ekonomiktir fakat dayanıklılık problemleri yaşarlar. Paslanan yapıları nedeniyle özel kaplamalara gerek duyulur. Aksi takdirde kataliz katmanının ve zarın metal iyonlarıyla kontamine olmasına yol açar. Yakın çalışmalar gösteriyor ki karbon polimer kompozitler en iyi performansı gösterirler [21]. Çift kutuplu plaka malzemeleri ve üretimi yakıt pili toplam maliyetinin %50'sini oluştururlar ve yeni malzemeler bulmak amacıyla kapsamlı çalışmalar yapılmaktadır [33].

Çok sayıda araştırmacı başarılı şekilde hücre geometrisinin ve akış konfigürasyonunun hücre potansiyeli üzerindeki etkisini incelemektedir. Scholta ve arkadaşları [34] büyük yığın araştırmalarında ribin kanala oranının 1 ve 2 arasında en iyi performans verdiğini görmüşler. Küçük boyutlar daha yüksek akım yoğunluğu için en iyiyken, büyük boyutlar düşük akım yoğunluklarında daha iyi çalışırlar. Bazı araştırmacılar da akış kanalı genişliğindeki artışın genelde daha iyi performansa yol açtığı konusunda hemfikirdirler [21]. En yaygın kanal konfigürasyonları düz, paralel, birbirine geçirimli ve serpentinlidir [33].

#### **2.2.1.2. Gaz Difüzyon Tabakası**

Gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajı ile çift kutuplu plakalar arasında yer alır. Kataliz tabakasına mekanik destek sağlar ve tepkiyen gazların kataliz tabakasına akması için ulaşım yolu sağlar. Katotta oksijen akış kanallarından gaz difüzyon tabakası boyunca kataliz tabakaya nüfuz eder. Burada proton ve elektronla tepkimeye girer ve su oluşturur. Oluşan su gaz difüzyon tabakası tarafından çift kutuplu plakaların akış kanallarına taşınır ve hava akışıyla birlikte uzaklaştırılır. Anotta da hidrojen gaz difüzyon tabakası boyunca kataliz tabakaya akar ve elektron vererek yükseltgenir. Oluşan bu elektronlar anot gaz difüzyon tabakası, dış devre ve katot gaz difüzyon tabakası yolunu izleyerek katot kataliz tabakasına varıp reaksiyona girer. Ayrıca ısı iletkenliği sayesinde zar elektrot montajında oluşan ısının atılmasına yardımcı olur.

Bu tarz çeşitli ihtiyaçları karşılamak amacıyla gaz difüzyon tabakaları karbon fiber temelli malzemelerden yapılır. Karbon kâğıt ve karbon kumaş var olan iki gaz difüzyon tabakası türüdür. Basit üretim yöntemi ve maliyeti nedeniyle en çok karbon kâğıt kullanılır. Difüzyon ortamı hidrofobiktir ve suyun uzaklaştırılması ve hücre performansı üzerinde önemli etkisi olan boğulmayı engellemek için genellikle politetrafloroetilen ve karbon siyahıyla işlem görmüştür. Bu tip gaz difüzyon tabakaları çift katmanlı olarak da yapılır. Mikro delikli bir yapı makro delikli gaz difüzyon tabakası üzerine karbon ve politetrafloroetilen gibi hidrofobik bir malzemeyle oluşturulan yapıştırıcıyla yapıştırılır [35-39]. Bunun nedeni eğer katot gaz difüzyon tabakası çok su emerse gaz geçirgenliğini önemli ölçüde yitirir ve bu da yakıt pili performansını düşürür. Yoğun mikro delik tabakası ise su bariyeri olarak görev yapar ve oluşan suyun katot kataliz tabakasından dışarı akmasını engeller ve anot tarafına yönlendirilmesini sağlar. Bu şekilde de hem katotta boğulmanın engellenmesi sağlanmış, hem de zar elektrot montajının nemlenmesine katkıda bulunmuş olur [21,33,40,41].

### **2.2.1.3. Kataliz Tabakası**

PEM yakıt pilleri düşük sıcaklıklarda çalıştığından, hidrojenin yükseltgenme ve oksijenin indirgenme elektrokimyasal reaksiyonlarının kinetiği çok yavaştır. Bu nedenle her iki reaksiyonu da istenen hızlara çıkartabilmek amacıyla kataliz kullanılır. Kullanılan katalizin yüksek performans göstermesi için elektriksel iletkenlik, iyonomerle iyi etkileşim, tepkiyen gazlar için ulaşılabilir olma, tepkiyen gazlar, ürünler ve zar elektrolitine karşı kararlı olma ve hem anot hem de katot tarafındaki reaksiyonların termodinamik potansiyelle olabildiğince yakın meydana gelmesi gibi özellikler gerekmektedir [41]. Bu özellikleri sağlayan ve genellikle kullanılan kataliz son derece aktif ve kararlı olan platindir. PEM yakıt pillerinin ilk zamanlarında 28 mg/cm<sup>2</sup> gibi yüksek miktarlara kadar platin kullanılmaktaydı ve bu da çok yüksek maliyete yol açıyordu. Çünkü reaksiyon kataliz yüzeyinde gerçekleşir ve bu nedenle aktif yüzeyin mümkün olduğunca yüksek olması gerekir. Yüzeyi arttırmanın bir yolu parçacık boyutunu küçültmektir. Ayrıca kullanılan platinin aynı özellikleri karşılayabilecek kararlı bir malzeme üzerinde dağılmış olması gerekir ve

bu amaçla kullanılan en yaygın malzeme de karbon karasıdır. İyi elektrik ve termal iletkenliğe, düşük termal genleşmeye ve tepkiyen gaz ve su taşınımını sağlamak için yüksek gözenekliliğe sahiptir [41-43]. Malzeme bilimi ve nanoteknolojideki gelişmeler sayesinde kullanılan platin miktarları  $0,3 \text{ mg/cm}^2$ 'ye kadar düşürülmüştür ve bu da üretim maliyetini olumlu yönde etkilemiştir [44].

#### **2.2.1.4. Zar**

Polimer elektrolit zar hücre mimarisinin en karmaşık ve duyarlı bileşenidir. Görevi anotta oluşan protonu katoda taşımak, çift kutuplu plakalar arasında yalıtkan olmak ve tepkiyen gazların karışmasını engellemektir. Bu nedenle proton iletkenliği yüksek, elektriksel iletkenliği ve gaz geçirgenliği yok ya da çok az olmalıdır. Ayrıca yüksek mekanik, kimyasal ve termal dayanıklılığa sahip olmakla beraber maliyeti de düşük olmalıdır. Hidronyum iyonunun anottan katoda hızlı şekilde taşınması için iyi nemlendirilmiş olmak zorundadır. Kuru zarın iyon iletkenliği çok düşüktür ve sahip olduğu nem oranı arttıkça iletkenliği de artar [45]. Bu nedenle zar nemli tutulmalıdır. Fakat bu konuda dikkat edilmesi gereken iki nokta vardır. Fazla su katot boğulmasına, az su ise kuru anoda neden olur. Tipik olarak zarlar politetrafloroetilenin temel malzeme olduğu yapılara sülfonik asit yan zincirlerinin eklenmesiyle yapılır. Bu konuda en yaygın ticari zar DuPont firmasının Nafion adlı ürünüdür [21]. Farklı kalınlıktaki zarların farklı su tutma, proton iletkenliği, su taşınımı ve gaz geçirgenliği özellikleri vardır [44]. Daha ince zarlar açık devre koşullarında daha düşük voltaj değeri gösterirler. Çünkü daha yüksek hidrojen geçiş oranı vardır ve bu yakıt kullanılabilirliğini düşürür. Fakat daha yüksek akım yoğunluklarında önemli derecede performans avantajına sahiptirler. Çünkü diren kayıpları daha azdır ve zarın nemlenmesi daha iyidir. Kalın zarlar ise daha az gaz geçirgenliği nedeniyle düşük akım yoğunluklarında daha iyi performans gösterirler. Fakat daha yüksek proton direnci de daha düşük güç yoğunluklarına yol açar [37,43].

### **2.2.1.5. Zar Elektrot Montajı**

Zar elektrot montajları anot ve katot kataliz tabakaları ve bunların arasında zardan meydana gelir. Genellikle iki şekilde hazırlanır. İlk metotta karbon destekli kataliz ve iyonomer denilen zar sıcak presle gaz difüzyon tabakasına preslenir. İkinci ve günümüzde daha çok kullanılan yöntemde ise ince film yaklaşımıyla kataliz tabaka doğrudan zara uygulanır ve 3 katlı zar elektrot montajı elde edilmiş olur. İnce film yöntemiyle elde edilen zar elektrot montajının diğer yöntemle elde edilenlere göre iyileştirilmiş yakıt kullanımı ve kütle taşınımı ve daha düşük üretim maliyeti gibi artıları vardır [44].

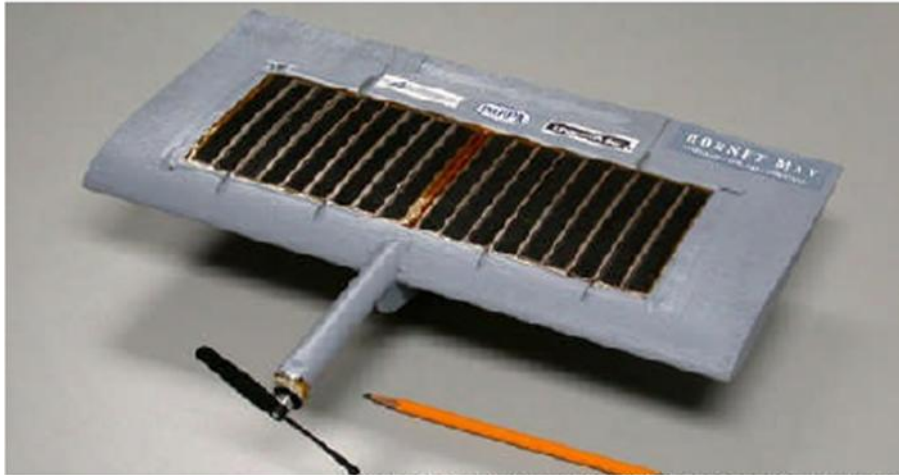
## **2.3. Literatür Araştırması**

### **2.3.1. Yakıt Pillerinin Kullanıldığı İnsansız Hava Uçağı Tarihçesi**

Yakıt pillerinin kullanıldığı atmosferik uçuşlar akademik literatürde ilk olarak çok günlük yakıt ikmali yapılmayan dayanımları mümkün kılmak içindi. Çok günlük dayanım fikri Gelişmiş Araştırma Projesi Ajansı (Advanced Research Project Agency) (ARPA) ve NASA Çevresel Araştırma Hava Taşıtı ve Algılayıcı Teknoloji (ERAST) Programı (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology (ERAST) program) gibi solar güçlendirilmiş hava taşıtı gelişmelerinden doğmuştur. [46] NASA Langley [47] ve NASA Glenn'deki [48] araştırmacılar yakıt pillerini yeterli solar güç mevcut olmadığında uçuşu devam ettirmek için batarya ya da süzülme gibi yöntemlere alternatif olarak desteklemeye başladılar. ERAST projesinin parlak davranışı olarak NASA solar güçlendirilmiş Helios araçlarının dayanımını arttıran bir yakıt pili sistemi geliştirdiler. Yakıt pili sistemi ağırlığı nedeniyle uçak dinamiklerini öngörmedeki başarısızlık yakıt pili gücü altında uçmadan önce aracın kaybına yol açtı [49,50].

2003'teki Helios kazası zamanında, AeroVironment ve Dragoneye gibi küçük batarya ile güçlendirilmiş insansız hava uçakları limitli dayanımlarına rağmen yakın savaş alanı destekleri sağlamada çok değerli olduklarını kanıtıyorlardı. Oto

endüstrisi sonucu yakıt pillerindeki yenileştirilmiş araştırmalar ve heyecan, yakıt pillerinin küçük insansız hava araçlarına uygulanması sonraki mantıklı basamak olarak gözüküyordu. İlk yakıt pili ile güçlendirilmiş hava aracı uçuşu Lynntech tarafından Savunma İleri araştırma Projeleri Ajansı'nın (DARPA) Sentetik Çok Fonksiyonel Malzemeler Programı (The Defense Advanced Research Projects Agency's, DARPA's, Synthetic Multifunctional Materials program) altında başarılıdır [51]. Lynntech Hornet diye adlandırılan modifiye edilmiş Wasp kullanarak batarya ile güçlenmiş aracın 100 dakikalık dayanımını ikiye katlamanın yolunu aradılar. Laboratuar şartlarında Wasp'ın lityum-iyon polimer bataryasının enerjisinin 2.5 katına ulaşmalarına rağmen, Hornet yakıt pili çalışmak için fazlasıyla kuru hale gelene kadar sadece 5 dakika uçabildi. Yakıt pili gücü altında ulaşılan ilk uçuşa rağmen, ulaşılmış nokta ile Hornet'in potansiyel dayanımı arasındaki fark ileriki yakıt pili tasarımları ve geliştirme işlerine ihtiyaç duyulduğunu gösterdi [50].



Şekil 2.1. Lynntech/Aerovironment Hornet Yakıt Pili [52]

Hornet'in uçuşu 2003 ile 2009 arasında uçmayı başaran en az 19 yakıt pili hava aracı dökümanlanmıştır.

Çizelge 2.3. Yayınlanmış yakıt piliyle güçlendirilmiş hava araçları

Sistem İntegratörleri	Uçak Adı	Tür	Yakıt Pili Üreticisi	Yakıt Stoğu	Kanat genişliği (m)	Toplam Ağırlık (kg)	Maksimum Güç (W)	Dayanım (saat)	Yıl	Kaynak
Lynntech/AeroVironment	Hornet	PEM	Lynntech	H <sub>2</sub> Sodyum Borohydride	0.381	0.17	-	0.25	2003	51
AeroVironment	Global Observer	PEM	-	Sıvı H <sub>2</sub>	15.24	-	-	24	2005	53
FH-Wiesbaden	Hy-Fly	PEM	Heliocentris	Gaz H <sub>2</sub>	2	1.75	65	0.025	2005	54
Naval Research Lab	Spider-Lion	PEM	Protonex	Gaz H <sub>2</sub>	2.2	3.1	115	3.3	2005	55
Adaptive Materials (AMI)	-	SOFC	AMI	Propan	-	-	60	4.3	2006	56
Georgia Inst. of Tech.	-	PEM	BCS	Gaz H <sub>2</sub>	6.58	16.4	550	0.75	2006	57, 58
Cal State LA	-	PEM	Horizon	Gaz H <sub>2</sub>	5.49	12.9	513	0.25	2006	59
SmartFish/DLR	HyFish	PEM	Horizon	Gaz H <sub>2</sub>	1	6.1	1300	0.25	2007	60, 61
AFRL/AeroVironment	Puma	PEM	Protonex	Sodyum Borohydride	2.6	6.5	-	9	2007	62, 63
Cal State LA/Oklahoma State Univ.	Pterosoar	PEM	Horizon	Gaz H <sub>2</sub>	4	5	150	12	2007	64, 65
Korea Advanced Institute of Science and Tech.	-	PEM	-	Propan	1.2	2	-	10	2007	66

Sistem İntegratörleri	Uçak Adı	Tür	Yakıt Pili Üreticisi	Yakıt Stoğu	Kanat genişliği (m)	Toplam Ağırlık (kg)	Maksimum Güç (W)	Dayanım (saat)	Yıl	Kaynak
Boeing	Dimona	PEM	Intelligent Energy	Gaz H <sub>2</sub>	16.3	841	-	0.5	2008	67-69
AMI/AeroVironment	Puma	SOFC	AMI	Propan	2.6	-	-	7	2008	70
United Technologies Research Center	FC Helicopter	PEM	UTRC	Gaz H <sub>2</sub>	-	-	-	-	2008	71
Adaptive Materials/U. of Michigan	Endurance	SOFC	Adaptive Materials	Propan	1.524	5.3	-	10.25	2008	72
DLR	Antares	PEM	BASF	Gaz H <sub>2</sub>	20	660	25000	5	2009	73-75
BlueBird Aero Systems	Boomerang	PEM	Horizon	H <sub>2</sub> Hydride	2.75	9	500	9	2009	76-78
Naval Research Lab	XFC	PEM	Protonex					6	2009	79
Naval Research Lab	Ion Tiger	PEM	Protonex	Gaz H <sub>2</sub>			500	24	2009	80

## BÖLÜM 3

### 3. YAKIT PİLİ TERMODİNAMIĞI VE KİNETİĞİ

#### 3.1. Temel Kimya ve Termodinamik

Yakıt pili yakıtın, özellikle hidrojen, kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüsüdür. Bu nedenle termodinamiğin kurallarına uymak zorundadır.

##### 3.1.1. Temel Reaksiyonlar

Yakıt pilindeki elektrokimyasal reaksiyonlar zarın her iki tarafında anot ve katotta kendiliğinden gerçekleşir ve yarı-hücre reaksiyonları olarak adlandırılırlar. Her yakıt pilinde kullanılan yakıt ve yükseltgeyici madde farklıdır ve yarı tepkimeler bu yüzden farklılık gösterir. PEM yakıt pili için kullanılan hidrojen gazının yükseltgenme ve oksijen gazının indirgenme reaksiyonları aşağıdaki gibidir.

Anotta:



Katotta:



Toplamda:



Yukarıdaki reaksiyon bir yanma reaksiyonudur. Yanma ekzotermik bir süreç olduğundan dış ortama ısı enerjisi salınır.





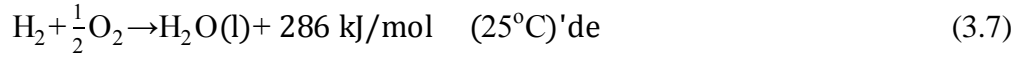
Reaksiyon sonunda üretilen ısı ya da entalpi ürünler ile girenlerin oluşum ısıları ya da entalpileri arasındaki fark kadardır. Bu şekilde hidrojen yakıt pilinde meydana gelen yukarıdaki reaksiyonun oluşum ısısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Delta H^0 = (H_f^0)_{H_2O} - (H_f^0)_{H_2} - \frac{1}{2}(H_f^0)_{O_2} \quad (3.5)$$

Elementlerin oluşum ısıları tanım itibarıyla sıfıra eşit ve sıvı haldeki suyun 25°C'deki oluşum ısısı -286 kJ/mol olduğundan reaksiyonun ısısı

$$\Delta H^0 = -286 \text{ kJ/mol} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ/mol} \quad (25^\circ\text{C}'de) \quad (3.6)$$

olarak bulunur. Negatif işaret ısının reaksiyonda salındığını ve tepkimenin ekzotermik olduğunu gösterir. Bu bakımdan yukarıdaki reaksiyonu



şeklinde de yazabiliriz [81].

### 3.1.2. Hidrojenin Üst ve Alt Isıl Değeri

Hidrojen yanma reaksiyonunun ısısı, hidrojenin ısıl değeri olarak adlandırılır. Eğer yanma sonunda atmosferik basınçta sadece sıvı su kalırsa buna hidrojenin üst ısıl değeri denir ve reaksiyonda 286 kJ/mol ısı salınır. Fakat eğer reaksiyon sonunda oluşan su buhar halinde olursa daha az ısı salınır ve bu değer hidrojenin alt ısıl değeri olan 241 kJ/mol'dür. Üst ve alt ısıl değerindeki fark suyun buharlaşma ısısıdır.

### 3.1.3. Teorik Elektriksel İş

Yakıt pilindeki reaksiyon sonucunda her kimyasal reaksiyonda olduğu gibi entropi üretilir ve bu nedenle hidrojenin üst ısıl değerinin tamamı kullanışlı iş olan elektriğe

çevrilemez. Elektriğe çevrilebilen kısmı Gibbs serbest enerjisiyle ilişkilidir ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\Delta G_{f,\text{reaksiyon}}^0 = \Delta G_{f,\text{ürünler}}^0 - \Delta G_{f,\text{girenler}}^0 \quad (3.8)$$

Yukarıdaki durum standart şartlarda geçerlidir. Farklı sıcaklık ve basınç durumunda ise

$$\Delta G_{f,\text{reaksiyon}} = \Delta G_{f,\text{ürünler}} - \Delta G_{f,\text{girenler}} \quad (3.9)$$

formülü kullanılır ve yakıt pili reaksiyonu için aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Delta G_{f,\text{reaksiyon}} = \Delta G_{f,H_2O} - \frac{1}{2} \Delta G_{f,O_2} - \Delta G_{f,H_2} \quad (3.10)$$

Standart şartlar dışındaki Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 + RT \ln Q \quad (3.11)$$

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln \frac{1}{Q} \quad (3.12)$$

Yakıt piline uyarlandığında da aşağıdaki formül elde edilir [81].

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.13)$$

### 3.1.4. Teorik Yakıt Pili Potansiyeli

Yakıt pilinde kullanışlı işe dönüştürülecek maksimum iş reaksiyonun Gibbs serbest enerji değişimi kadardır.

$$\Delta G_f^0 = -nFE^0 \quad (3.14)$$

Gibbs serbest enerjisinin yakıt pili potansiyeliyle bağlantısından

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{nF} = \frac{-237340 \text{ J/mol}}{2 \times 96485 \text{ C/mol}} = 1.229 \text{ Volts} \quad (3.15)$$

elde edilir.

Yukarıdaki durum standart koşullarda geçerlidir. Diğer koşullarda ise

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 + RT \ln Q \quad (3.16)$$

denklemini geçerlidir ve 3.14 denklemini de kullandığımızda

$$\frac{-nFE}{-nF} = \frac{-nFE^0}{-nF} + \frac{RT}{-nF} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (3.17)$$

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (3.18)$$

elde edilir ve yakıt pili potansiyeli de aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.19)$$

$$E = 1,229 + \frac{8,314 \text{ J/Kmol} \times 298 \text{ K}}{2 \times 96485 \text{ C/mol}} \times \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.20)$$

$$E = 1.229 + 0.0128V \times \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (25^\circ C' de) \quad (3.21)$$

$$E=1.229+0.0128V \times \ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \quad (3.22)$$

### 3.1.5. Sıcaklığın Etkisi

Hücre potansiyeli sıcaklıkla değişir. Çünkü

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (3.23)$$

olduğundan ve Gibbs serbest enerjisi de sıcaklığa bağlı olduğundan

$$G = H - TS \quad (3.24)$$

ve entalpi de iç enerji, basınç ve hacmin fonksiyonu olduğundan

$$H = U + PV \quad (3.25)$$

aşağıdaki açılım ve türevler sonucunda

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (3.26)$$

$$dG = TdS - PdVPdV + VdP - TdS - SdT \quad (3.27)$$

$$dG = VdP - SdT \quad (3.28)$$

Gibbs serbes enerjisinin entropiye

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S \quad (3.29)$$

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_P = -\Delta S \quad (3.30)$$

hacime bağılı olduğu görülür.

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V \quad (3.31)$$

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial P}\right)_T = \Delta V \quad (3.32)$$

Hücre potansiyeli Gibbs serbest enerjisinin bir fonksiyonu olduğundan ve onun da sıcaklığa bağılı olan entropiye bağılı olmasından

$$E(T,P) = -\frac{\Delta G(T,P)}{nF} \quad (3.33)$$

$$\left(\frac{\partial E(T,P)}{\partial T}\right)_P = -\frac{\partial\left(\frac{\Delta G(T,P)}{nF}\right)}{\partial T} = -\frac{1}{nF} \left(\frac{\partial \Delta G(T,P)}{\partial T}\right)_P = -\frac{1}{nF} [-\Delta S(T,P)] \quad (3.34)$$

$$\left(\frac{\partial E(T,P)}{\partial T}\right)_P = \frac{\Delta S(T,P)}{nF} \quad (3.35)$$

$$E(T,P) = -\frac{\Delta S(T,P)}{nF} \Delta T \quad (3.36)$$

hücre potansiyelinin sıcaklıkla değıştiğı görülür [81].

Herhangi bir reaksiyon için,

eğer  $\Delta S < 0$  ise  $\left(H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g)\right)$ , tersinir hücre potansiyeli hücre çalışma sıcaklığıyla düşer.

eğer  $\Delta S > 0$  ise  $(C(s) + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO(g))$  tersinir hücre potansiyeli hücre çalışma sıcaklığıyla artar

eğer  $\Delta S = 0$  ise tersinir hücre potansiyeli sıcaklıktan bağımsızdır [81].

Bu durumda hücre potansiyeli

$$E = E^0(T^0, P) + \frac{\Delta S^0}{nF} (T - T^0) \quad (3.37)$$

$$E = 1.229 + \frac{-163.11 \text{ J/molK}}{2 \times 96485 \text{ C/mol}} (T - 298)K \quad (3.38)$$

$$E = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T - 298) \quad (3.36)$$

$$E_{Nernst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T - 298) + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.39)$$

$$E_{Nernst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T - 298) + 4,308 \times 10^{-5} T \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.40)$$

şeklinde ve Nernst eşitliği olarak bilinen denklemlerle tanımlanır [81].

Ayrıca hem  $\Delta H$ , hem de  $\Delta S$  sıcaklığın birer fonksiyonudur [81] :

$$H_T = H_{298.15} + \int_{298.15}^T c_p dT \quad (3.41)$$

$$S_T = S_{298.15} + \int_{298.15}^T \frac{1}{T} c_p dT \quad (3.42)$$

### 3.1.6. Basınç Etkisi

Hücre potansiyeli basıncın bir fonksiyonudur. Hücre potansiyelini belirleyen Gibbs serbest enerjisi hacme bağlı olduğundan [81]

$$\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{-\partial\left(\frac{\Delta G}{nF}\right)}{\partial P}\right)_T = \frac{-\Delta V}{nF} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial G}{\partial P} = \Delta V \quad (3.44)$$

ve hacimdeki değişimin

$$\Delta V = V_{\text{ürünler}} - V_{\text{girenler}} \quad (3.45)$$

basıncı ile bağlantılı olması sebebiyle

$$\Delta V = \frac{n_{\text{ürünler}}RT}{P} - \frac{n_{\text{girenler}}RT}{P} = \frac{\Delta nRT}{P} \quad (3.46)$$

hücre potansiyeli de basınca bağlıdır.

$$\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_T = \frac{-\Delta V}{nF} = \frac{-\Delta nRT}{nF} \frac{1}{P} \quad (3.47)$$

$$dE = \frac{-\Delta nRT}{nF} \frac{dP}{P} \quad (3.48)$$

$$E = \frac{-\Delta nRT}{nF} \ln \frac{P}{P_0} \quad (3.49)$$

$$E = E^0(P^0, T) - \frac{\Delta nRT}{nF} \ln \frac{P}{P_0} \quad (3.50)$$

$$E = E^0(P^0, T) - \Delta n \times 4,308 \times 10^{-5} T \ln P \quad (3.51)$$

Eğer  $\Delta n > 0$  ise  $(C(s) + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO(g))$ , hücre potansiyeli basınçla azalır.

Eğer  $\Delta n < 0$  ise  $(H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g))$ , hücre potansiyeli basınçla artar.

Eğer  $\Delta n = 0$  ise, hücre potansiyeli basınçtan bağımsızdır [81].

### 3.1.7. Teorik Yakıt Pili Verimliliği

Hücre verimliliği üç verimlilik çeşidinden oluşur.

#### 3.1.7.1. Voltaj Verimliliği

$$\eta_{pot} = \frac{E}{E_r} \quad (3.52)$$

$E_r$ : Mümkün olan hücre potansiyeli (1.229 V)

$E$ : Gerçek hücre potansiyeli [81]

#### 3.1.7.2. Akım Verimliliği

$$\eta_{akım} = \frac{I}{nF\left(\frac{dN_f}{dt}\right)} \quad (3.53)$$

$I$ : Üretilen akım [81]

$\left(\frac{dN_f}{dt}\right)$ : Yakıt pilindeki yakıt tüketim hızı (mol/sn)

$$\eta_{akım} = 1 \quad (3.54)$$

#### 3.1.7.3. Tersinir Enerji Verimliliği

$$\eta_{tersinir} = \frac{E_r}{E_{tn}} \quad (3.55)$$



$$E_{\text{termonötral}} = \frac{-\Delta H}{nF} \quad (3.56)$$

$E_{\text{termonötral}}$ : Bütün kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüştüğü durumdaki voltaj  
Üst ısıl değer için (HHV),

$$\eta_{\text{tersinir}} = \frac{1.229}{1.48} = 0.83 \quad (3.57)$$

Alt ısıl değer (LHV) için,

$$\eta_{\text{tersinir}} = \frac{1.229}{1.25} = 0.98 \quad (3.58)$$

### 3.1.7.4. Toplam Verimlilik

Toplam verimlilik bu üç verimliliğin çarpımından oluşur.

$$\eta_{\text{yakıt pili}} = \eta_{\text{tersinir}} \times \eta_{\text{pot}} \times \eta_{\text{akım}} \quad (3.59)$$

$$\eta_{\text{yakıt pili}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \times \frac{E}{E_{\text{ters}}} \times 1 = \frac{E_{\text{ters}}}{E_{\text{tn}}} \times \frac{E}{E_{\text{ters}}} \times 1 \quad (3.60)$$

$$\eta_{\text{yakıt pili}} = \frac{E}{E_{\text{tn}}} \quad (3.61)$$

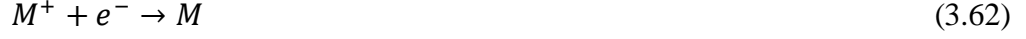
E: Gerçek potansiyel

$E_{\text{tn}}$ : Termonötral potansiyel

Mesela, 0.6 V'da çalışan bir yakıt pilinin verimliliği:

$$\eta_{\text{yakıt pili}} = \frac{0.6}{1.48} = 0.41 \text{ (LHV)} \quad \eta_{\text{yakıt pili}} = \frac{0.6}{1.25} = 0.48 \text{ (HHV)}$$

### 3.2. Yakıt Pili Elektrokimyası



Reaksiyonunun ileri ve geri yöndeki tepkime hızlarının hesaplanma formülü aşağıda gösterilmiştir [81].

$$r_f = k_f C_{M^+} \quad (3.63)$$

$$r_r = k_r C_M \quad (3.64)$$

r: hız

k: s<sup>-1</sup>

C: mol/cm<sup>2</sup>

Reaksiyonun net hızı ise ileri ve geri yöndeki reaksiyonların hızları arasındaki farktır [81].

$$r_{net} = k_f C_{M^+} - k_r C_M \quad (3.65)$$

Bir elektrokimyasal reaksiyonun hızı aktivasyon enerji bariyeriyle belirlenir.

Akım yoğunluğu, *i*, transfer edilen yük, tepkiyenlerin harcanması ve yüzey alanıyla ilgilidir [81].

$$i = nFU \quad (3.66)$$

U: Harcanan tepkiyen (mol/cm<sup>2</sup>sn)

Reaksiyon hızı, net akım yoğunluğu demektir.

$$i = nF(k_f C_{M^+} - k_r C_M) \quad (3.67)$$

Dengede net akım sıfırdır. İleri yöndeki reaksiyonun hızı geri yöndeki reaksiyonun hızına eşittir. Bu durumdaki akım yoğunluğuna,  $i_0$ , denge akım yoğunluğu denir [81].

$$i_0 = nF k_f C_{M^+} = nF k_r C_M \quad (3.68)$$

Yavaş reaksiyon düşük  $i_0$ , hızlı reaksiyon yüksek  $i_0$ 'a yol açar [81].

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3.69)$$

$E_a$ : Aktivasyon enerjisi

Geçiş durumu teorisine göre elektrokimyasal reaksiyonun hız sabiti Gibbs serbest enerjisinin bir fonksiyonudur [81].

$$k = \frac{k_b T}{h} \exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right) \quad (3.70)$$

$k_b$ : Boltzman sabiti

$h$ : Planck sabiti

İleri ve geri yöndeki reaksiyonların Gibbs serbest enerjileri

$$\Delta G_f = \Delta G_r + \alpha nF E_c \quad (3.71)$$

$$\Delta G_r = \Delta G_f - (1-\alpha)nF E_c \quad (3.72)$$

olduğundan bu reaksiyonların hızları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_r = k_r^0 \exp\left[\frac{(1-\alpha)nF E_c}{RT}\right] \quad (3.73)$$

$$k_f = k_f^0 \exp\left[\frac{-\alpha nF E_c}{RT}\right] \quad (3.74)$$

$k^0$ : standart hız sabiti

Bu bilgilerle denge akım yoğunluğunu hesaplamayı sağlayan ve Butler-Volmer denklemi olarak bilinen denkleme ulaşılır.

$$i_0 = nF \left( k_f^0 C_{M^+} \exp \left[ \frac{-\alpha n F E_c}{RT} \right] \right) - nF \left( k_r^0 C_M \exp \left[ \frac{(1-\alpha) n F E_c}{RT} \right] \right) \quad (3.75)$$

$$i_0 = nF k_f^0 C_{M^+} \exp \left[ \frac{-\alpha n F E_{eq}}{RT} \right] = nF k_r^0 C_M \exp \left[ \frac{(1-\alpha) n F E_{eq}}{RT} \right] \quad (3.76)$$

$E_{eq}$ : Tersinir denge potansiyeli

$C_{M^+}^p, C_M^q$ : Bulk konsantrasyonlar

Denge akım yoğunluğundan katot akım yoğunluğu hesaplanabilir.

$$\frac{i_c}{i_0} = \frac{C_{M^+}}{C_{M^+}^p} \exp \left[ \frac{-\alpha n F (E_c - E_{eq})}{RT} \right] - \frac{C_M}{C_M^q} \exp \left[ \frac{(1-\alpha) n F (E_c - E_{eq})}{RT} \right] \quad (3.77)$$

$$i_c = i_0 \left( \frac{C_{M^+}}{C_{M^+}^p} \exp \left[ \frac{-\alpha n F (E_c - E_{eq})}{RT} \right] - \frac{C_M}{C_M^q} \exp \left[ \frac{(1-\alpha) n F (E_c - E_{eq})}{RT} \right] \right) \quad (3.78)$$

$$\eta_c = E_c - E_{eq} < 0 \quad (3.79)$$

$$\eta_a = E_a - E_{eq} > 0 \quad (3.80)$$

$$C_{M^+} = C_{M^+}^p \quad (3.81)$$

$$C_M = C_M^q \quad (3.82)$$

varsayımı yapılırsa

$$i_c = i_{0,c} \left( \exp \left[ \frac{-\alpha_c n F \eta_c}{RT} \right] - \exp \left[ \frac{(1-\alpha_c) n F \eta_c}{RT} \right] \right) \quad (3.83)$$

benzer şekilde

$$i_a = i_{0,a} \left( \exp \left[ \frac{-\alpha_a n F \eta_a}{RT} \right] - \exp \left[ \frac{(1-\alpha_a) n F \eta_a}{RT} \right] \right) \quad (3.84)$$

Reaksiyona giren tepkiyenlerin miktarları ise aşağıdaki formülden hesaplanabilir [81].

$$m = \frac{Ita}{nF} \quad (3.85)$$

m: Reaksiyona giren kütle

I: Akım (elektron akışı akım olarak ölçülür)

a: atom ağırlığı

n: Eşdeğer değişim sayısı

F: Faraday sabiti

$$\frac{m}{At} = \frac{Ita}{AtnF} = \frac{ia}{nF} = r \quad (3.86)$$

r: hız

Dengede,

$$r_f = r_r = \frac{i_0 a}{nF} \quad (3.87)$$

$i_0$ : Denge akım yoğunluğu

Denge akım yoğunluğu yüzeyden güçlü şekilde etkilenir.

$$i_0 = 10^{-12} \frac{A}{cm^2} \rightarrow \text{cıva yüzeyinde} \quad (3.88)$$

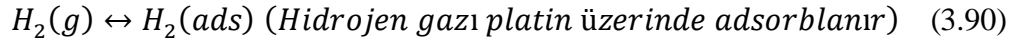
$$i_0 = 10^{-12} \frac{A}{cm^2} \rightarrow \text{platin yüzeyinde} \quad (3.89)$$

### 3.2.1. Voltaj Kayıpları

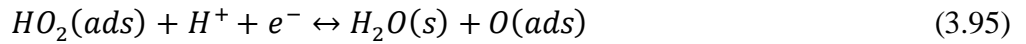
#### 3.2.1.1. Aktivasyon Polarizasyonu

Yarı tepkime reaksiyonları tek basamaklı reaksiyonlardan oluşmamaktadır ve bu nedenle tepkime hızını belirleyen limitleyici bir basamak vardır. Bu basamak elektron akış hızını belirler ve bu durumda reaksiyon aktivasyon ya da yük transferi kontrolü altındadır denir.

Anotta hidrojen yükseltgenmesi reaksiyonu:



Katotta oksijen indirgenmesi reaksiyonu:



Bu basamaklardan herhangi biri reaksiyon hızını kontrol edebilir ve aktivasyon polarizasyonuna neden olabilir [82-86].

Aktivasyon polarizasyonu ya da aşırı polarizasyon,  $\eta$ , ve reaksiyon hızı arasındaki ilişki akım yoğunluğu,  $i_a$  ya da  $i_c$ , ile ifade edilir [81].

Anodik polarizasyon [81]

$$\eta_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_0} \quad (3.98)$$

Katodik polarizasyon [81]

$$\eta_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_0} \quad (3.99)$$

$\eta_a$ ,  $\eta_c$ ,  $\beta_a$ ,  $\beta_c$ : Tafel sabitleri

$$\beta_c = \frac{2.3RT}{\alpha nF} \quad (3.100)$$

$$\eta_c = E - E_{eq} \quad (3.101)$$

Elektronlar yüzeye beslenir ve metalde toplanır. Yavaş reaksiyon hızı nedeniyle yüzey potansiyeli,  $E$ , denge potansiyeline,  $E_{eq}$ , göre negatif olur. Bu nedenle  $\eta_c$  tanımı olarak negatiftir [81].

$$\eta_a = E - E_{eq} \quad (3.102)$$

Elektronlar metalden uzaklaştırılır ve bu eksilme pozitif potansiyel değişmesi olarak sonuçlanır. Yüzey reaksiyonu tarafından elektronların yavaş salınımı nedeniyle  $\eta_a$  pozitif olmalıdır [81].

Anodik,  $i_a$ , ve katodik,  $i_c$ , akım yoğunlukları ters yönde akarlar [81].

İleri ve geri yöndeki reaksiyonların hızları aşağıdaki gibi hesaplanır

$$\Delta G = \Delta G_f - \Delta G_r = -nFE \quad (3.103)$$

$$r_f = K_f \exp\left[\frac{-\Delta G_f}{RT}\right] \quad (3.104)$$

$$r_r = K_r \exp\left[\frac{-\Delta G_r}{RT}\right] \quad (3.105)$$

$K_f, K_r$ : İleri ve geri reaksiyonların reaksiyon hız sabitleri

ve dengede bu iki hız birbirine eşittir ve bu da denge akım yoğunluğunu verir.

$$r_f = r_r = \frac{i_0 a}{nF} \quad (3.106)$$

$$i_0 = K_f' \exp\left[\frac{-\Delta G_f}{RT}\right] = K_r' \exp\left[\frac{-\Delta G_r}{RT}\right] \quad (3.107)$$

$i_0$ : Aktivasyon enerjisinin fonksiyonu

### 3.2.1.1.1. Katodik Aşırı Potansiyel

Katodik aşırı potansiyel,  $\eta_c$ , elektroda uygulandığında deşarj ( $H^+ \rightarrow H_2$ ) reaksiyon hızı düşer ve iyonlaşma hızı artar [81].

Bu deşarj aktivasyon enerjisinin  $\alpha nF\eta_c$  kadar düşürülmesiyle ve iyonlaşma enerjisinin de  $(1 - \alpha)nF\eta_c$  kadar artırılmasıyla başabilir [81].

Katot deşarj reaksiyon hızı [81]

$$i_c = K_f' \exp\left[-\frac{\Delta G_f - \alpha nF\eta_c}{RT}\right] \quad (3.108)$$



Anodik iyonlaşma reaksiyonu hızı [81]

$$i_a = K'_r \exp \left[ -\frac{\Delta G_f + (1-\alpha)nF\eta_c}{RT} \right] \quad (3.109)$$

$\alpha$  katot deşarj reaksiyonu tarafından alınan  $\eta_c$ 'nin fraksiyonudur.

Uygulanan net akım [81]

$$i_{app,c} = i_c - i_a = i_0 \exp \left[ \frac{\alpha n F \eta_c}{RT} \right] - i_0 \exp \left[ -\frac{(1-\alpha)nF\eta_c}{RT} \right] \quad (3.110)$$

### 3.2.1.1.2. Anodik Aşırı Potansiyel

$H^+$ 'ya iyonlaşmayı meyilli kılan uygulanan anodik akım için

$$i_{app,a} = i_a - i_c = i_0 \exp \left[ \frac{\alpha n F \eta_a}{RT} \right] - i_0 \exp \left[ -\frac{(1-\alpha)nF\eta_a}{RT} \right] \quad (3.111)$$

$\alpha$  anodik iyonlaşma reaksiyonu tarafından alınan  $\eta_a$ 'nın fraksiyonudur [81].

Yüksek  $\eta_c$ 'de denklem aşağıdaki denkleme sadeleşir.

$$i_{app,c} = i_0 \exp \left[ \frac{\alpha n F \eta_c}{RT} \right] \quad (3.112)$$

### 3.2.1.2. Konsantrasyon Polarizasyonu

Tüklenen yüzeyin yarı hücre potansiyeli  $E_{H^+/H_2}$  Nerst denklemiyle verilir [81]:

$$E_{H^+/H_2} = E_{H^+/H_2}^0 + \frac{2.3RT}{nF} \log \frac{[H^+]^2}{P_{H_2}} \quad (3.113)$$

Görüldüğü üzere yarı hücre potansiyeli, E, yüzeydeki  $[H^+]$  bittikçe azalmaktadır. Bu azalma (potansiyel değişimi) konsantrasyon polarizasyonudur,  $\eta_{conc}$ , ve akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak verilir [81]:

$$\eta_{conc} = \frac{2.3RT}{nF} \log \left( \frac{i_c}{i_L - i_c} \right) \quad (3.114)$$

$i_L$  = Limitleyici akım yoğunluğu (çözeltideki  $H^+$ 'nin sınırlı difüzyon hızı yüzünden aşılamayacak maksimum reaksiyon hızı ölçüsüdür)

Limitleyici akım yoğunluğu,  $i_L$ , aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$i_L = \frac{D_z n F C_B}{\delta} \quad (3.115)$$

$D_z$ : Tepkiyen tür z'nin ( $H^+$ ) yayılma gücüdür

$C_B$ : Çözelti konsantrasyonu

Buna göre daha yüksek çözelti konsantrasyonu, yayılma hızını arttıran daha yüksek sıcaklık ve  $\delta$ 'yi azaltan daha yüksek çözelti karıştırması limitleyici akım yoğunluğunu arttırır.

Konsantrasyon polarizasyonu anodik polarizasyon için genellikle yoktur.

### 3.2.1.3. Direnç Kayıpları

Direnç kayıpları elektrolitteki iyon akışına ve yakıt pili boyunca elektron akışına olan direnç ve kontak nedeniyle oluşan dirençlerden kaynaklanır ve Ohm kanunu ile açıklanabilir.

$$\Delta\eta_{ohm} = iR_i \quad (3.116)$$

$$R_i = R_{i,i} + R_{i,e} + R_{i,c} \quad (3.117)$$

Akım toplayıcı olarak grafit ya da grafit/polimer kompozitler kullanıldığında, elektronik direnç neredeyse önemsizdir. İyonik ve kontak dirençleri yaklaşık olarak aynı mertebededirler [87].

#### 3.2.1.4. İç Akımlar ve Crossover Kayıpları

Elektrolit polimer zar uygulamada elektriksel olarak iletken ve etkiyen gazlara karşı geçirgen olmasa da, hidrojenin az bir miktarı anottan katoda difüz edebilir. Ve bazı elektronlar zar boyunca kestirme yollar bulabilirler. Bu kayıplar yakıt pilinin çalışmasında önemsiz olabilir. Çünkü hidrojen geçirgenliği ya da elektron geçişi hidrojen harcanma hızı ya da oluşturulan elektriksel akımdan birkaç mertebe daha düşüktür. Fakat, yakıt pili açık devre potansiyelindeyse ya da çok düşük akım yoğunluklarında çalışıyorsa, bu kayıpların hücre potansiyeli üzerinde dramatik etkisi olabilir. Bu nedenle açık devrede voltajında hücre voltajı tersinir hücre potansiyelinden önemli ölçüde düşük olur.

#### 3.2.2. Gerçek Yakıt Pili Potansiyeli

Üç önemli kayıp dikkate alındığında hücre potansiyeli aşağıdaki gibi hesaplanır [81].

$$E_{\text{hücre}} = E_r - (\Delta\eta_{\text{act}} + \Delta\eta_{\text{conc}})_a - (\Delta\eta_{\text{act}} + \Delta\eta_{\text{conc}})_c - \Delta\eta_{\text{ohm}} \quad (3.118)$$

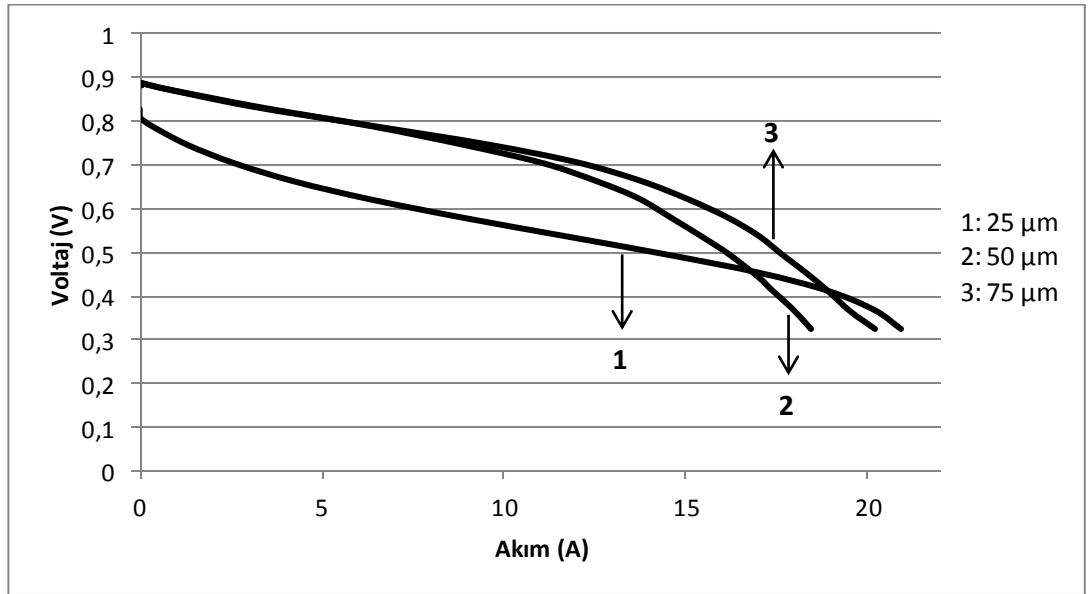
$$E_{\text{hücre}} = E_{r,T,P} - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left( \frac{i}{i_{0,c}} \right) - \frac{RT}{\alpha_a F} \ln \left( \frac{i}{i_{0,a}} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{i_{L,c}}{i_{L,c} - i} \right) - \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{i_{L,a}}{i_{L,a} - i} \right) - iR_i \quad (3.119)$$

## BÖLÜM 4

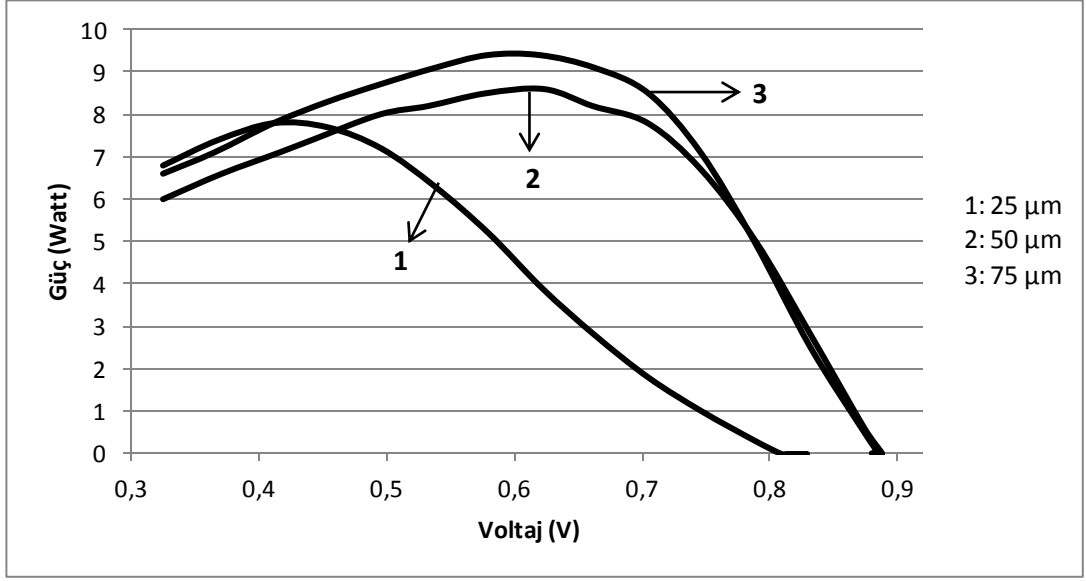
### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

NT Nanoteknoloji firması tarafından sağlanan farklı kalınlıklarda kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajları test edilmiş; ağırlık altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın, katot kataliz tabakasının saçınım sistemi kullanılarak platine kaplanmasının, gaz difüzyon tabakalarının iyonomer ve kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının ve gaz difüzyon tabakalarının saçınım sistemi kullanılarak platine kaplanmasının zar elektrot montajlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiş; yakıt pillerinin montajı sırasındaki sıkıştırma miktarının, yakıt pilinin çalışması esnasında basınçlandırma valfinin kullanılmasının ve bu basınçlandırma valfinin açık ve kapalı kalma sürelerinin hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve üretilen yakıt pilinin performansının zamana karşı değişimi gözlenmiştir.

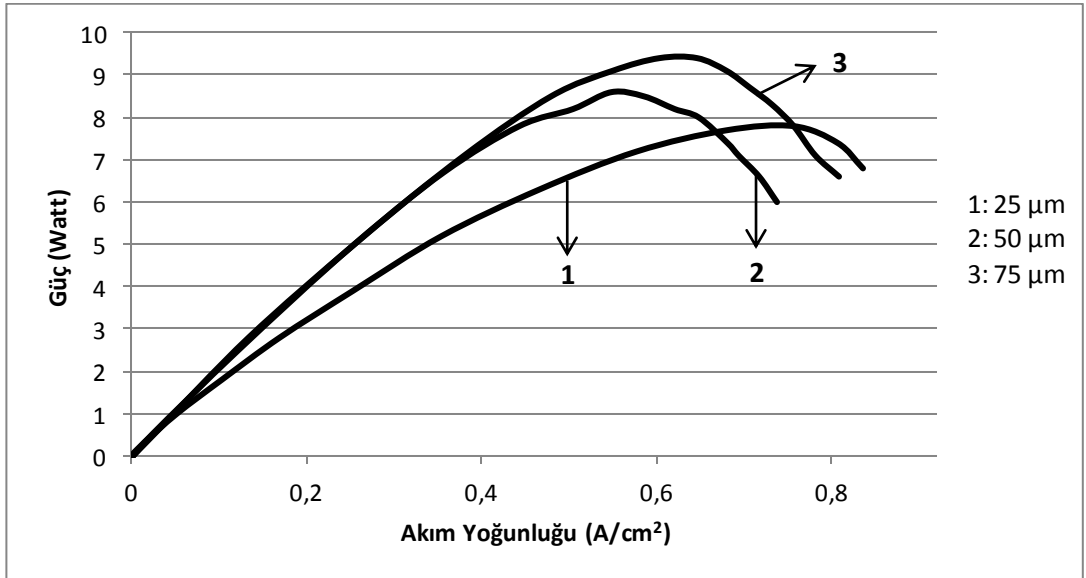
#### 4.1. Kataliz Tabaka Kalınlığının Zar Elektrot Montajı Performansı Üzerindeki Etkisi



Şekil 4.1. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının voltaj-akım grafiği



Şekil 4.2. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-voltaj grafiği



Şekil 4.3. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-akım yoğunluğu grafiği

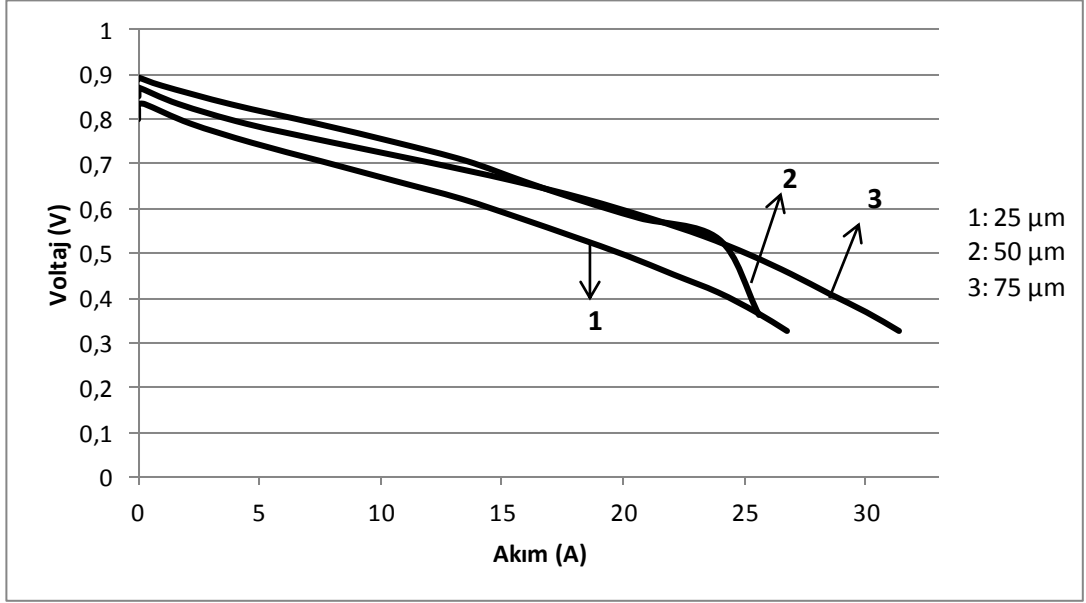
(Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te görüldüğü üzere zar elektrot montajının ihtiva ettiği kataliz miktarı arttıkça, performansında da artış gözlenmektedir. Daha fazla kataliz tabakası

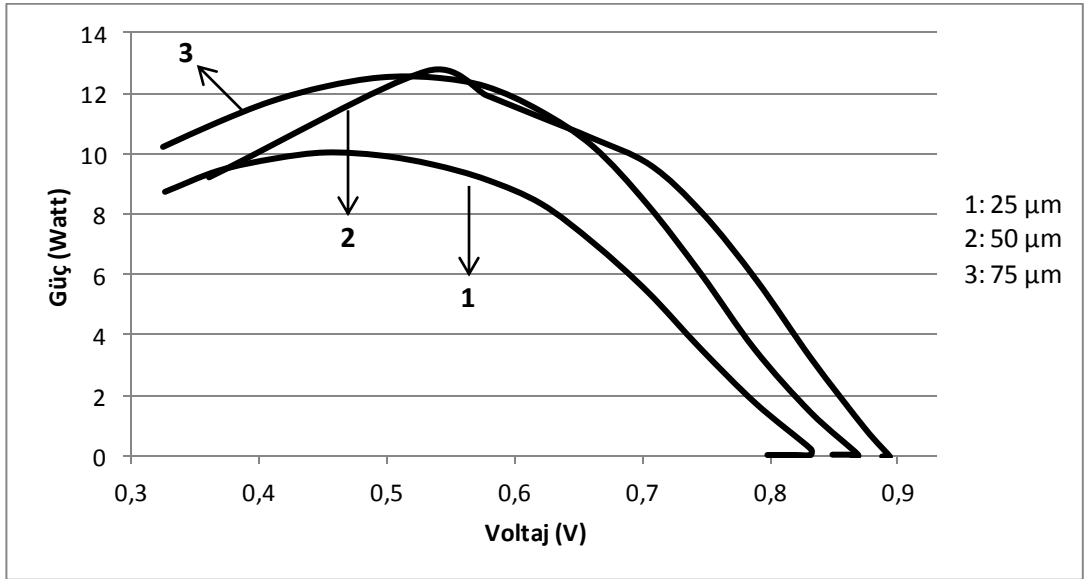
zar elektrot montajı yüzeyinde daha fazla platin manasına gelmekte ve bu da daha çok gazın reaksiyona girmesini sağlamaktadır. Bunun sonucunda da daha çok hidrojen molekülü atomlarına ayrılmakta ve elektronunu vererek proton haline gelmektedir. Fakat performanstaki artış zar elektrot montajı yüzeyinde bulunan kataliz tabaka kalınlığıyla doğru orantılı değildir. Eğer performanstaki artış sadece zar elektrot montajındaki kataliz miktarına bağlı olsaydı, her üç zar elektrot montajındaki performansın birbirlerinin katı olması gerekirdi. 75 µm kalınlığındaki kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajının performansının 25 µm kalınlığında kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajının performansının 3 katı olması gerekirdi. Fakat durum böyle değildir. Bunun nedeni olarak da kataliz tabakanın daha derinlerine inildikçe bu bölgelere olan gaz difüzyonunun azaldığını öngörmekteyiz. Kataliz tabakada bulunan ve hidrojen ve oksijen gazlarıyla etkileşime giren platin metallerinin efektif olarak etkileştiği gaz miktarları kataliz tabakanın derinlerine inildikçe platin metal atomu başına ortalama olarak düşmektedir. Daha kalın kataliz tabakaya sahip olan zar elektrot montajında en derinde, zar yüzeyinde olan platin metallere nüfuz eden gaz miktarı kataliz tabaka yüzeyindeki platin metallerin etkileştiklerine oranla çok daha az miktardadır. Bu yüzden platin metali başına düşen gaz etkileşimi azalır. Bu da zar elektrot montajındaki kataliz miktarıyla performans arasında doğrusal olmayan bir bağlantıya yol açar. Kataliz miktarı arttıkça performans artar, fakat bu artış doğrusal değildir.

Devreden geçen elektron sayısındaki artış akımın artmasını sağlamakta, dolayısıyla elde edilen güç miktarında da artış olmaktadır. Anot tarafından katot tarafına zar elektrot montajı içindeki suyla taşınan proton, katot tarafında elektron olarak -2 yükle yüklenmiş oksijenle birleşerek tekrar su üretmektedir. Üretilen suyun bir kısmı zar elektrot montajının neminin korunmasında kullanılmaktadır. Fazla olan miktar hava çıkış hortumlarından uzaklaştırılmaktadır. Zar elektrot montajının performansını azaltan kayıplardan olan konsantrasyon kaybı, daha önce bahsedildiği üzere anot tarafından katot tarafına taşınan proton miktarının elektron miktarına oranının azalmasıyla oluşmaktadır. Daha fazla reaksiyon sonucu katot tarafında oluşan su miktarındaki artış, zar elektrot montajının ihtiva ettiği su miktarında da artışa neden olmakta ve daha fazla protonun daha rahat katot tarafına geçmesini sağlamaktadır.

Bu nedenle performansı sınırlandıran konsantrasyon kaybının etkisi azalmaktadır. Fakat artan kataliz tabaka miktarı aynı zamanda zar elektrot montajının kalınlığının artması manasına gelmekte ve protonların katot tarafına geçmesi için daha çok yol kat etmeleri gerekmektedir. Bunun da konsantrasyon kaybının artmasına neden olduğunu düşünmekteyiz. Bu iki etki, daha çok hidrojen gazının reaksiyona girmesiyle daha çok elektronun devreden ve daha çok protonun katot tarafına geçmesinin sağlanmasıyla katot tarafında daha çok su oluşup zar elektrot montajının daha çok nemlenmesi ve zar elektrot montajı üzerinde artan kataliz tabakasıyla birlikte protonların kat etmeleri gereken yolun uzaması, birbirleriyle yarışmaktadır. İlk iki bölgede, daha düşük akımın olduğu bölgede, kataliz tabakasındaki artış pozitif etki yaptığı görülmektedir. Fakat üçüncü bölgede, daha yüksek akımın olduğu bölgede, daha çok protonun zar elektrot montajının anot tarafından katot tarafına geçmesi gerektiği için fazladan oluşan kalınlığın etkisi kataliz miktarı fazlasının etkisine baskın gelmiş ve performansta daha hızlı düşüşler gözlenmiştir. İkinci bölge davranışları aynı olmasına rağmen üçüncü bölgeye geçiş 50 ve 75 µm kalınlıklarda daha çabuk olmuştur. 50 ve 75 µm kalınlığında kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajı performanslarından görüldüğü üzere kataliz miktarıyla kalınlık arasında doğrusal bir ilişki gözlenmemiştir. 25 µm kalınlığa göre 50 µm kalınlıkta performans daha erken ve daha hızlı düşmesine rağmen, 75 µm kalınlığında performans düşüşü 50 µm ye göre daha geç başlamış ve daha az bir eğimle gerçekleşmiştir. Maksimum güç değerlerine 50 ve 75 µm kalınlığında kataliz tabaka ihtiva eden zar elektrot montajları 0,6 V civarlarında ulaşmışlardır. 25 µm kalınlığında kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajı ise en yüksek güç değerine daha düşük voltaj değeri olan 0,41 V'de ulaşmıştır. Bunun nedeni olarak da yukarıda da bahsedildiği gibi daha kalın kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajlarında birinci ve ikinci bölgede fazla olan kataliz miktarının, kalınlık fazlasının olumsuz etkisine baskın geldiği düşünülmektedir. 25 µm kalınlığında kataliz tabakası olan zar elektrot montajında birinci ve ikinci bölgedeki performans daha kalınlarınkine oranla paralel seyretse de kataliz miktarındaki azlık yüzünden daha alt bir noktada ilerlemektedir. Fakat üçüncü bölgede, zar elektrot montajının daha ince olması sebebiyle artan proton geçişi miktarına karşı oluşan etki daha az olmakta ve bu yüzden performans düşüşü hem daha geç hem de daha az eğimle gerçekleşmektedir.

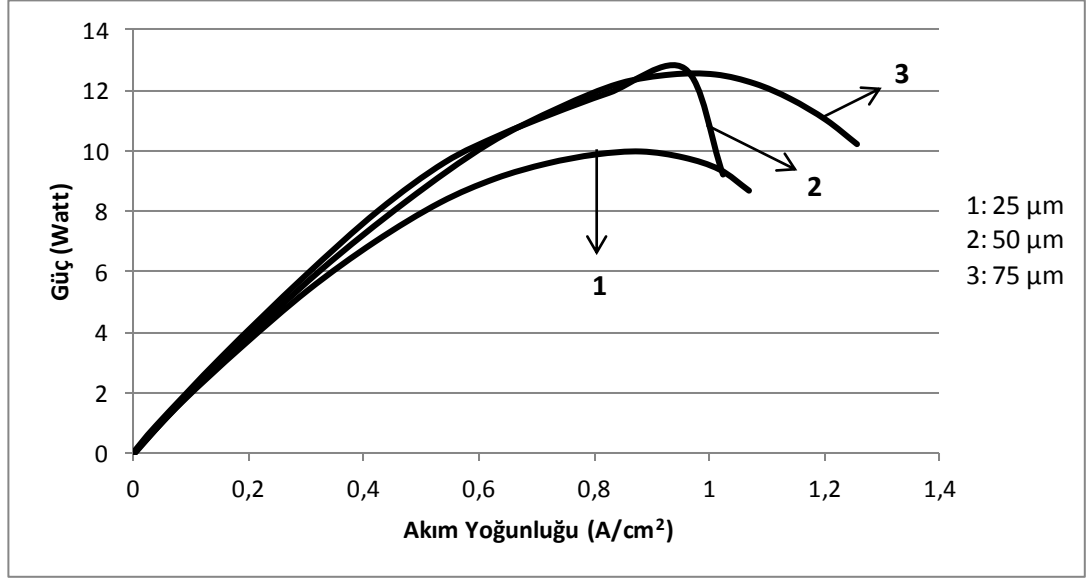


Şekil 4.4. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının voltaj-akım grafiği



Şekil 4.5. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-voltaj grafiği





Şekil 4.6. Farklı kalınlıktaki zar elektrot montajlarının güç-akım yoğunluğu grafiği

(Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakıt Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da görüldüğü üzere kullanılan gaz miktarları iki katına çıkartıldığında her üç farklı kataliz tabaka kalınlığına sahip zar elektrot montajlarının performanslarında artış gözlenmektedir. Bu artış 25 µm kalınlığında kataliz tabakası olan zar elektrot montajında %28,2, 50 µm kalınlığında kataliz tabakası olanda %47,7 ve 75 µm kalınlığında kataliz tabakası olanda ise %37,2'dir. Beslenen gaz miktarındaki artış zar elektrot montajlarının üzerindeki kataliz tabakaya birim zamanda daha fazla gazın daha yüksek basınçla nüfuz etmesi anlamına gelmektedir ve bu da reaksiyona giren gaz miktarındaki artışa neden olmaktadır. Daha çok gazın reaksiyona girmesi de devreden daha çok elektronun geçmesini sağlayacağından elde edilen akım miktarında ve dolayısıyla güç miktarında artış gözlenecektir. Farklı kalınlıktaki kataliz tabakaya sahip olan zar elektrot montajlarındaki performans artış yüzdelерinin aynı olmadığı görülmektedir. Bunun nedeninin ise kataliz tabakadaki bütün platin metallерinin efektif olarak etkileşime girdiği hidrojen gazı miktarındaki artışın aynı olmaması ve birim zamanda anot tarafından katot tarafına geçen proton miktarındaki değişimin kataliz tabakadaki kataliz miktarı kadar zar elektrot

montajının kalınlığındaki artış ve ihtiva ettiği nem miktarına bağlı olması olabileceğini düşünmekteyiz.

Eğer performanstaki artış sadece zar elektrot montajındaki kataliz miktarına bağlı olsaydı, her üç zar elektrot montajında da artışın benzer olması gerekirdi. Hatta artış yüzdesinin 75 µm kalınlığında kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajından 25 µm kalınlığında kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajına doğru gidildikçe azalması gerekirdir. Çünkü kataliz tabakanın daha derinlerine inildikçe bu bölgelere olan gaz difüzyonu azalır. Kataliz tabakada bulunan ve hidrojen ve oksijen gazlarıyla etkileşime giren platin metallerinin efektif olarak etkileştiği gaz miktarları platin metal atomu başına ortalama olarak düşmektedir. Daha kalın kataliz tabakaya sahip olan zar elektrot montajında en derinde, zar yüzeyinde olan platin metallere nüfuz eden gaz miktarı kataliz tabaka yüzeyindeki platin metallerin etkileştiklerine oranla çok daha az miktardadır. Bu yüzden platin metali başına düşen gaz etkileşimi azalır. Kullanılan gaz miktarı iki katına çıkarıldığında da derinlere inildikçe nüfuz eden gaz miktarındaki oran dış yüzeydeki artışa oranla daha az olduğu için toplam ortalama artışın daha kalın kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajlarında daha az olması beklenmektedir. Fakat durum böyle değildir. Bunun nedeni de performansın sadece zar elektrot montajında bulunan kataliz miktarıyla orantılı olmamasıdır. Kataliz miktarı yanında zar elektrot montajının kalınlığı ve zar elektrot montajının ihtiva ettiği su miktarı da etkilidir.

50 ve 75 µm kataliz tabakası kalınlığına sahip zar elektrot montajlarında grafiklerden de görüldüğu üzere daha çok kataliz nedeniyle 25 µm kalınlığında kataliz tabakası olan zar elektrot montajına göre daha fazla güç elde edilmektedir. Bu daha çok elektronun ve protonun anot tarafından katot tarafına geçtiği, dolayısıyla katot tarafında daha çok suyun oluşması manasına gelir. Oluşan bu su zar elektrot montajının nemlenmesini sağlamaktadır. Bir kısmı da beslenen oksijen gazıyla katot çıkışından uzaklaştırılmaktadır. Zar elektrot montajındaki nem protonun anot tarafından katot tarafına taşınmasında etkin rol üstlenmektedir. Zar elektrot montajının performansını belirleyen faktör elektronun hareketinden çok protonun hareketi ve birim zamanda hareket eden miktardır. 25 µm kalınlığında kataliz

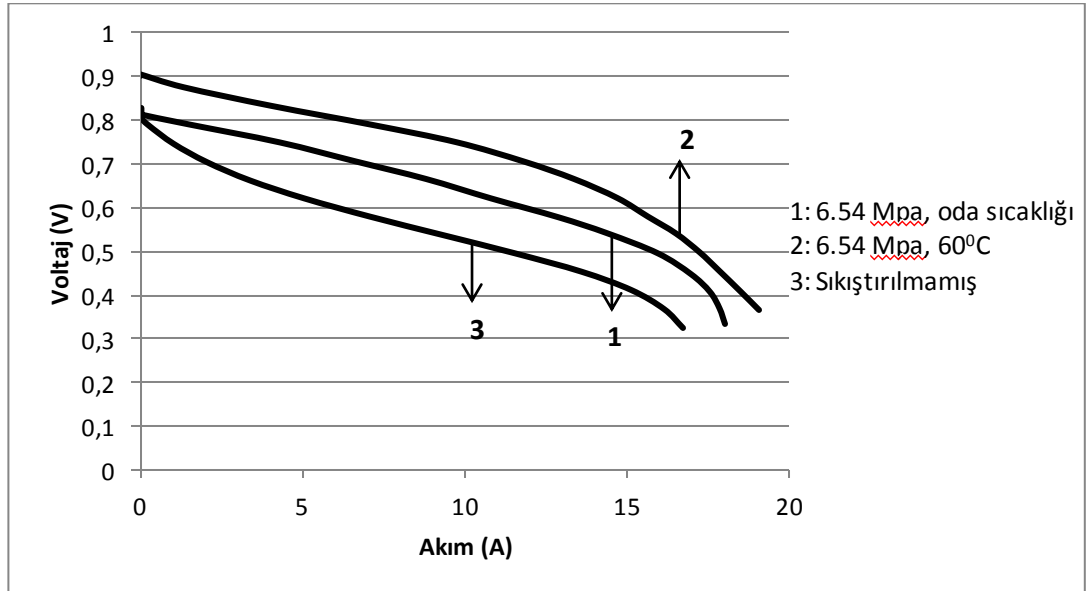
tabakaya sahip zar elektrot montajında üretilen su miktarı daha kalın olanlara göre daha azdır. Bu yüzden zar elektrot montajının daha az nemleneceği öngörülmektedir. Gaz hızları arttırıldığında oluşan nemdeki artış daha kalın olanlara göre daha azdır. Bu yüzden performanstaki artış da daha az olur. 50 ve 75 µm kalınlığında kataliz tabakasına sahip zar elektrot montajlarında üretilen nem miktarındaki artış daha fazla olduğundan performans artışı da daha fazla olur. Fakat durum sadece böyle olsaydı 75 µm kalınlığında kataliz tabakası olan zar elektrot montajı 50 µm kalınlığında kataliz tabakası olandan daha fazla olmalıydı. Durumsa tam tersidir. Bunun nedeni ise kalınlığın katot yüzeyinde oluşan suyun zar elektrot montajının nemlenmesindeki etkisinden kaynaklanabilir. 75 µm kalınlığında kataliz tabakası olan zar elektrot montajında daha çok su üretilir. Fakat kataliz tabaka daha kalın olduğu için zar elektrot montajının oluşan bu suyu emerek nemlenmesi daha zor hale gelir. Kataliz tabakanın katot yüzeyinde oluşan su miktarının büyük çoğunluğu bu yüzden beslenen hava ile birlikte katot çıkış kanalından atılır. 50 µm kataliz tabaka kalınlığı olan zar elektrot montajında üretilen su miktarı daha az olmasına rağmen zar elektrot montajının daha ince olması, katot yüzeyinde oluşan suyun montaj tarafından daha çok emilmesini sağlar ve montaj daha çok nemlenir.

Ayrıca bu gaz miktarlarına çıkıldığında ise farklı kalınlıkta kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajlarının davranışları değişmektedir. 25 ve 75 µm kalınlığında kataliz tabaka ihtiva eden zar elektrot montajları paralel performans eğrilerine sahiptir. Fakat 50 µm kalınlığında kataliz tabakası olan zar elektrot montajı farklı bir performans eğrisi vermektedir.

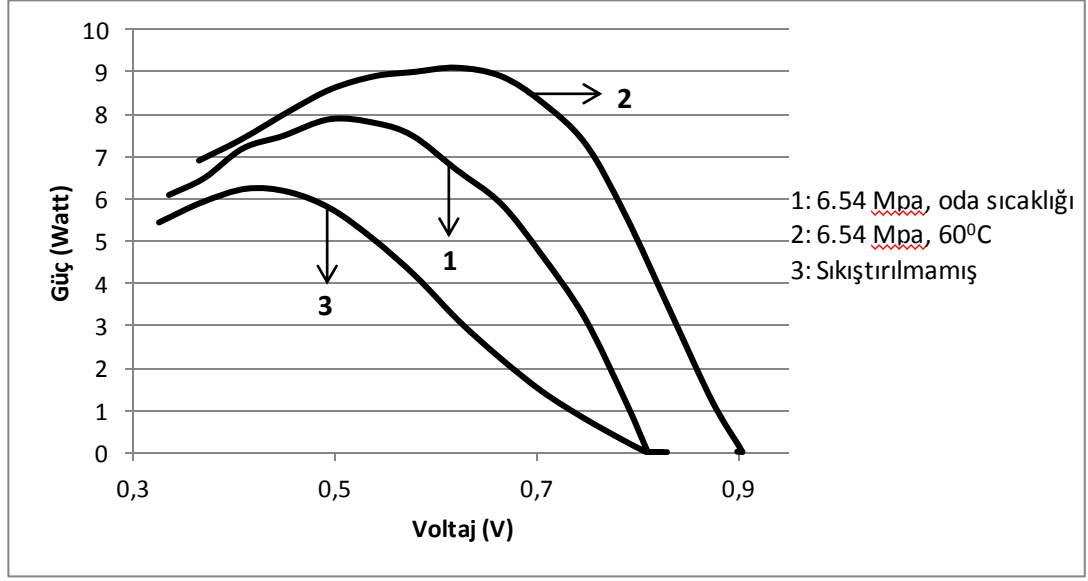
#### **4.2. Zar Elektrot Montajının Ağırlık altında Sıkıştırılmasının ve Sıkıştırılma Esnasındaki Sıcaklığın Performansa Etkisi**

Yakıt pilinde kullanılan zar elektrot montajlarının kullanılmadan önce ağırlık altında sıkıştırılmasının ve bu sıkıştırma işleminin yapıldığı sıcaklığın zar elektrot montajının yakıt pile monte edildikten sonraki performansında bir değişikliğe yol açıp açmadığı incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4.7-4.22'deki grafiklerde görülmektedir.

Zar üzerine kataliz tabaka kaplanmasıyla oluşturulan zar elektrot montajları basınç altında sıkıştırıldığında kataliz tabakanın bu sıkıştırma işlemiyle daha gevşek yapıdan daha kompakt hale gelmesiyle kontak direnci kaybının azaltılması, kataliz tabakanın zara daha fazla gömülmesiyle zar elektrot montajının kataliz tabakasının katot kısmında oluşan su moleküllerinin zar tarafından daha çabuk ve daha kolay emilebilmesinin sağlanabileceği düşünülmüştür. Bu şekilde de zar elektrot montajının performansının artırılacağı öngörülmüştür. Bu işlem sırasında ayrıca sıcaklığın etkisinin olup olmadığı da incelenmiştir. Zar elektrot montajının yapımında kullanılan zar yapısı gereği nem tutucu özelliktedir. Bu yüzden havadaki nemi emebilmektedir ve bu da fiziksel yapısında değişimlere, kıvrımlara neden olabilmektedir. Sıkıştırma işleminin sıcak pres tablalarıyla yapılması zarın tuttuğu bu nemi kaybedip daha düzgün bir yapıya gelerek sıkıştırılmasına olanak sağlayabileceği ve bunun da zar elektrot montajı performansı üzerinde olumlu etkisi olabileceği düşünülmektedir.



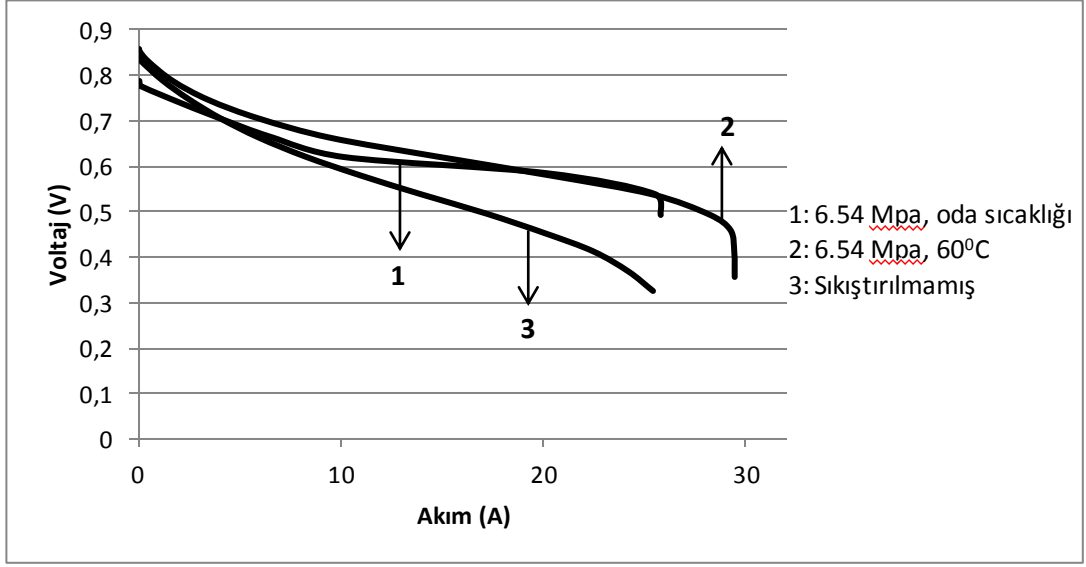
Şekil 4.7. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



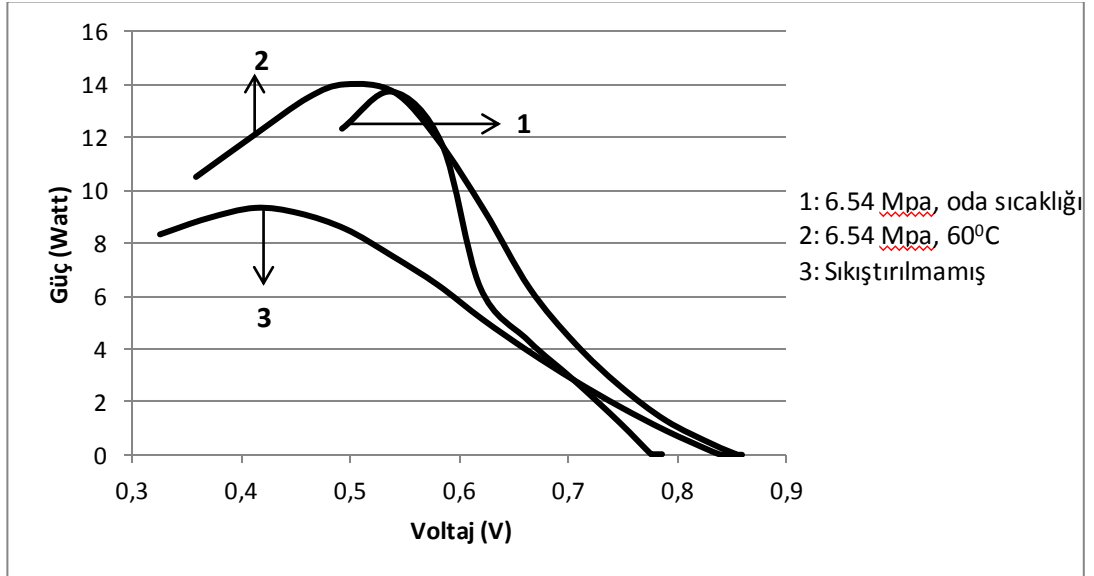
Şekil 4.8. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.7 ve 4.8 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot\ çıkışı}$ : 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Zar elektrot montajları iç yüzeylerinde teflon bulunan iki alüminyum plaka arasında önce 6.54 MPa basınç altında plakalar ısıtılmadan ve sonra yine 6.54 MPa basınç altında plakalar 60°C'ye ısıtıldıktan sonra 10 dakika süresince bekletilmişlerdir. Sıkıştırma işleminden sonra koşullandırma işlemi uygulanan zar elektrot montajlarının performans eğrileri alınmış ve sıkıştırma miktarı ile sıcaklığının zar elektrot montajı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere oda sıcaklığında 20 ton basınç altında sıkıştırmanın zar elektrot montajının performansını artırıcı yönde etkisi olmuştur. Ayrıca aynı basınç altında sıkıştırma işleminin 60°C sıcaklığa ısıtılmış plakalar arasında yapılmasının performans üzerinde etkisinin olup olmadığı da test edilmiş ve oda sıcaklığındaki plakalar arasında yapılan sıkıştırma işlemine göre daha iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 4.9. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

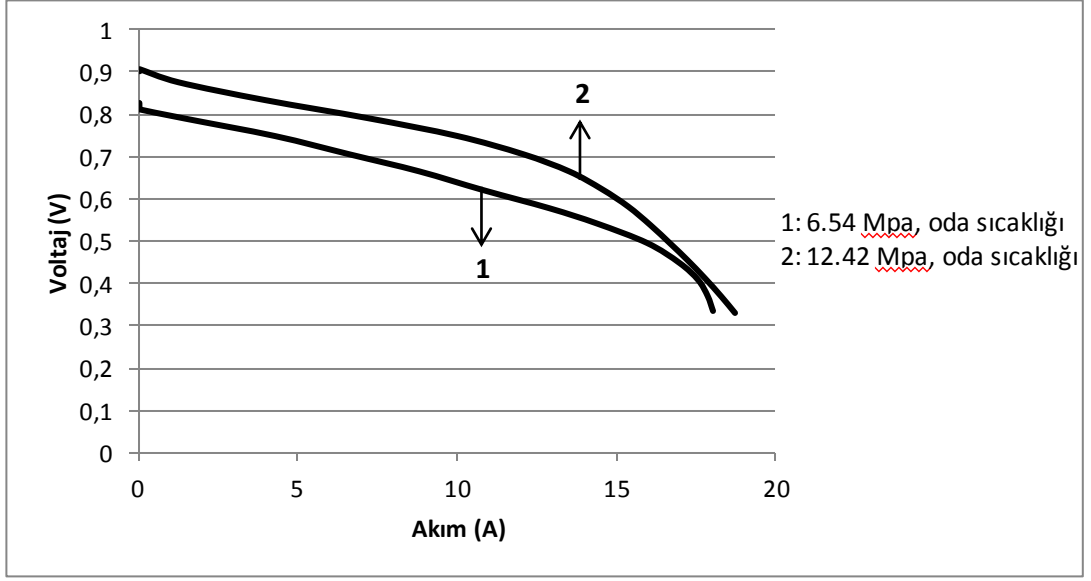


Şekil 4.10. 6.54 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

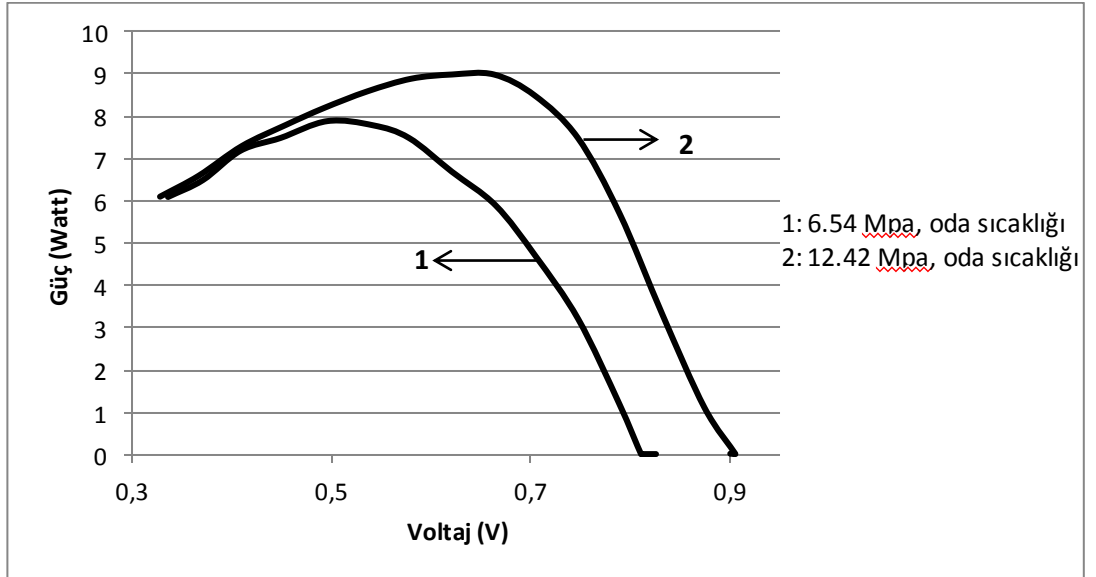
(Şekil 4.9 ve 4.10  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot\ çıkışı}$ : 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Gazlar iki katına çıkarıldığında zar elektrot montajının 6.54 MPa basınç altında oda sıcaklığındaki ve 60°C'deki plakalar arasında sıkıştırılmasının ardından performansında nasıl bir değişim olduğu da gözlenmiştir. Her iki sıkıştırma işleminin zar elektrot montajı performansı üzerinde sıkıştırılma işlemi uygulanmayan zar elektrot montajına göre artırıcı etkisi olduğu görülmüştür. Sıkıştırma işleminin yapıldığı iki ayrı sıcaklık da kendi aralarında incelendiğinde, 60°C'deki plakalar arasında sıkıştırılan zar elektrot montajının, oda sıcaklığındaki plakalar arasında sıkıştırılana oranla az da olsa daha yüksek performans gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca 60°C'de sıkıştırılan zar elektrot montajının performans eğrisine bakıldığında konsantrasyon kayıplarının etkili olduğu 3. bölgeye daha geç vardığı ve bunun daha düşük voltajda gerçekleştiği görülmüştür.

Zar elektrot montajının performansında sıkıştırma işleminin yapıldığı basıncın etkisinin ayrı olarak incelenmesi amacıyla zar elektrot montajı farklı bir basınçta, 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmış ve 6.54 MPa basınç altında sıkıştırılan zar elektrot montajın performansı ile kıyaslanmıştır. Görüldüğü üzere sıkıştırma işleminin yapıldığı basınç arttırıldığında, performansın da arttığı gözlenmiştir. Sıkıştırma basıncının artması, zar elektrot montajının daha da kompakt hale gelmesine ve dolayısıyla kontak direncinden kaynaklanan kaybın azalmasına yol açtığı öngörülmektedir. Bu nedenle de performans daha düşük basınç olan 6.54 MPa yapılan sıkıştırmaya oranla daha yüksekte seyretmiştir.



Şekil 4.11. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

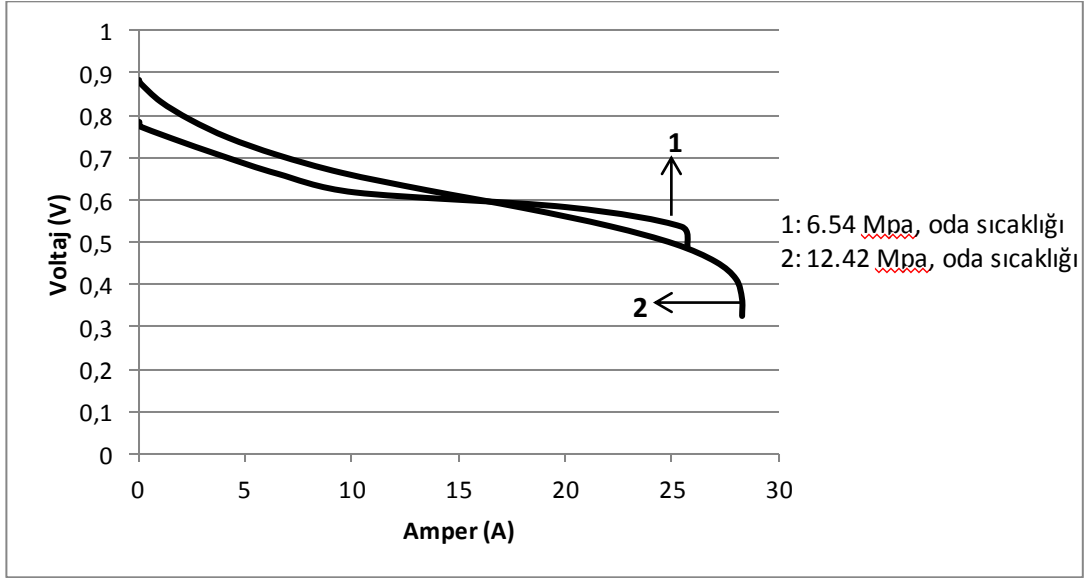


Şekil 4.12. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

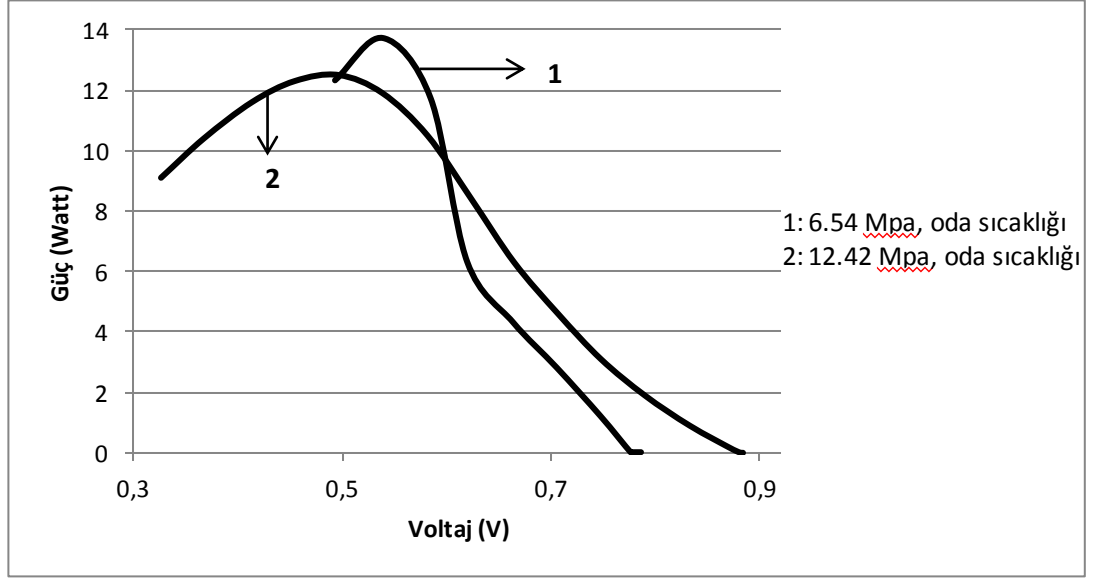


(Şekil 4.11 ve 4.12 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Yakıt pilinin anot ve katot kanallarına beslenen hidrojen ve hava miktarı iki katına çıkarıldığında ise zar elektrot montajlarının performans eğrileri farklı davranış izlemiştir. Daha az gaz yollandığı durumda 6.54 MPa ve 12.42 MPa ton basınç altında sıkıştırılan zar elektrot montajlarının performansları arasındaki fark, gazlar iki katına çıkarıldığında azalmıştır. Fakat 6.54 MPa ile sıkıştırılan zar elektrot montajından elde edilen maksimum güç, 12.42 MPa ile sıkıştırılan zar elektrot montajından elde edilen güçten daha fazla olmuştur. Üstelik ohmik kayıpların etkili olduğu ikinci bölgede 6.54 MPa basınç altında bekletilen zar elektrot montajının performans kaybı 12.42 MPa basınç altında bekletilene oranla daha az olduğu görülmüştür. Fakat konsantrasyon kayıplarının olduğu üçüncü bölgeye daha çabuk ve daha yüksek voltaj değerinde ulaşmıştır.



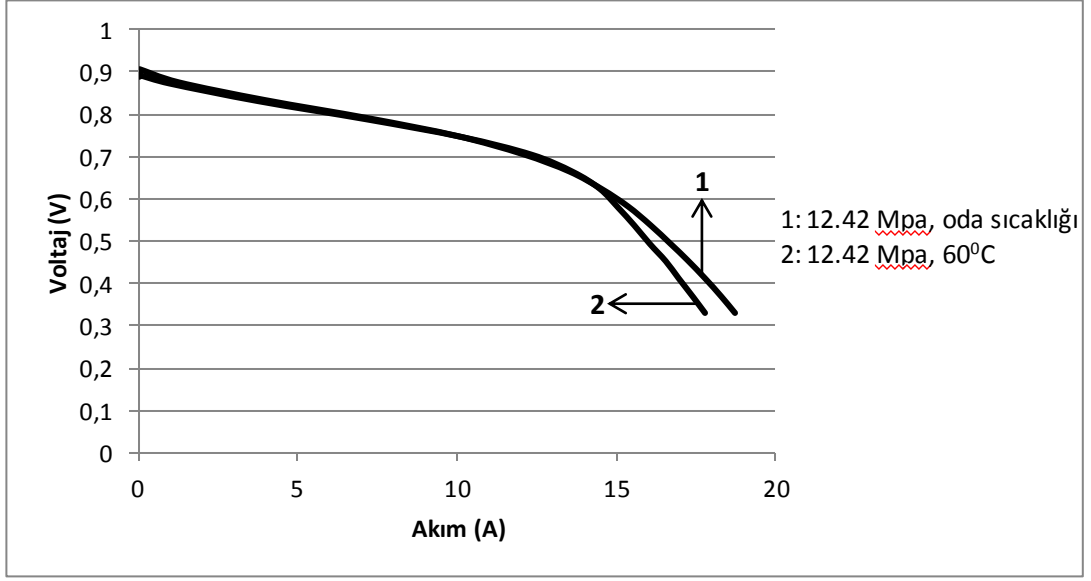
Şekil 4.13. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



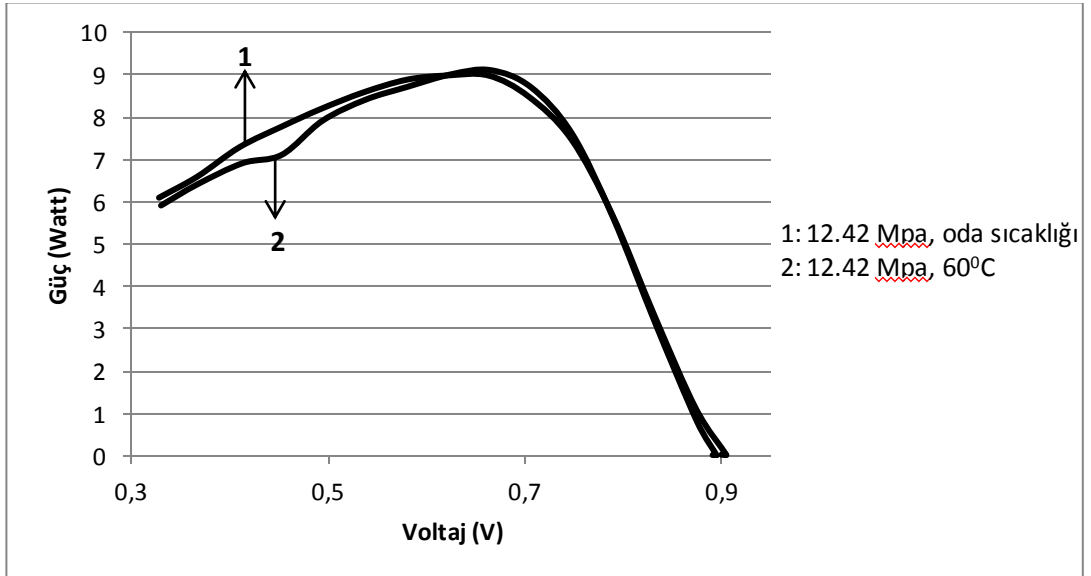
Şekil 4.14. 6.54 MPa ve 12.42 MPa basınç altında sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.13 ve 4.14 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot\ çıkışı}$ : 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

6.54 MPa basınç altında yapılan sıkıştırma deneyindeki sıcaklık etkisinin 12.42 MPa'da da geçerli olup olmadığının incelenmesi için zar elektrot montajları 12.42 MPa basınç altında oda sıcaklığı ve 60°C'ye ısıtılmış plakalar arasında sıkıştırılmış ve ardından performans eğrilerine bakılarak sıcaklığın bu basınçta performans üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Eğriler incelendiğinde sıcaklığın 6.54 MPa'daki etkisinin, 12.42 MPa'da kendini göstermediği görülmüştür. Performans eğrileri birbirlerine benzer ve yakın olarak seyretmişlerdir. Tek fark olarak 60°C'deki plakalar arasında sıkıştırılan zar elektrot montajı, oda sıcaklığındaki plakalar arasında sıkıştırılanla aynı anda konsantrasyon kayıplarının etkili olduğu bölgeye ulaşmış, fakat bu kayıplardan daha çok etkilenerek daha hızlı bir performans kaybı yaşamıştır. Her iki zar elektrot montajından elde edilen güçler benzer olup, oda sıcaklığında sıkıştırılan için 9 Watt (W), 60°C'de sıkıştırılan içinse 9,1 W'tır.



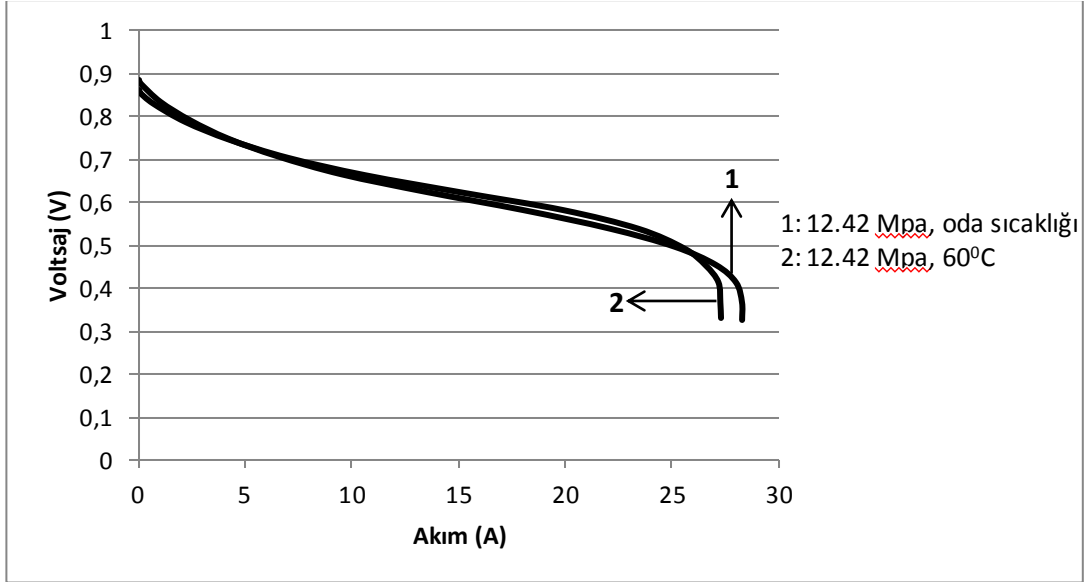
Şekil 4.15. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



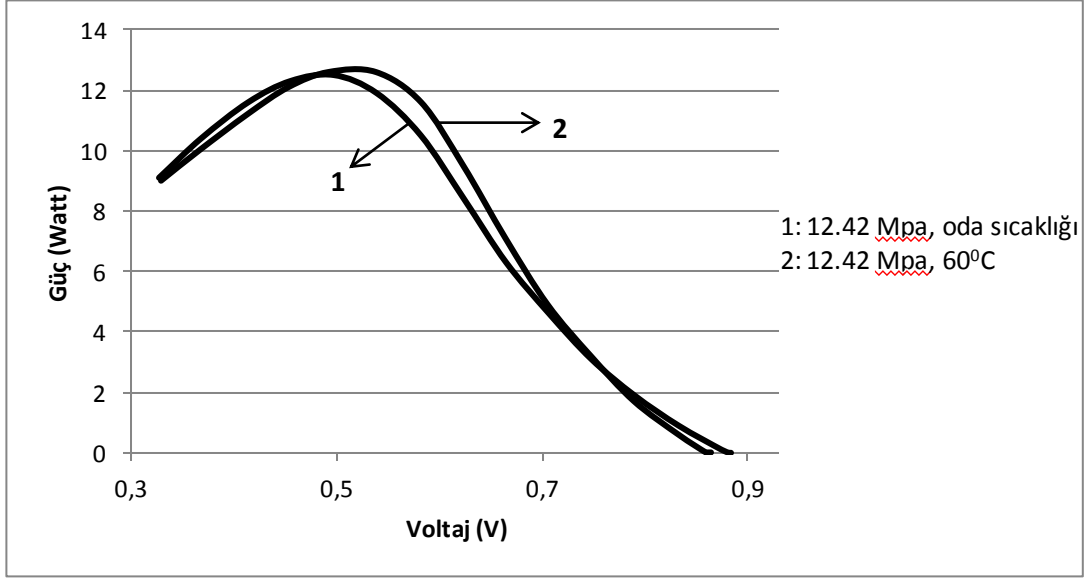
Şekil 4.16. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.15 ve 4.16 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Yakıt piline beslenen gaz miktarları iki katına çıkarıldığında ise durum benzer seyretmektedir. Fakat şekillerden görüldüğü üzere 60°C'deki plakalar arasında sıkıştırılan zar elektrot montajı oda sıcaklığındaki plakalar arasında sıkıştırılan zar elektrot montajına göre ohmik kayıplardan kaynaklanan performans düşüşünden daha az etkilenmiş, ama konsantrasyon kayıplarının etkili olduğu bölgeye ise daha düşük akımlarda ulaşmıştır. Zar elektrot montajlarından elde edilen maksimum güç miktarları ise oda sıcaklığında sıkıştırılan için 12,5 W, 60°C'de sıkıştırılan için ise 12,6 W'tır.

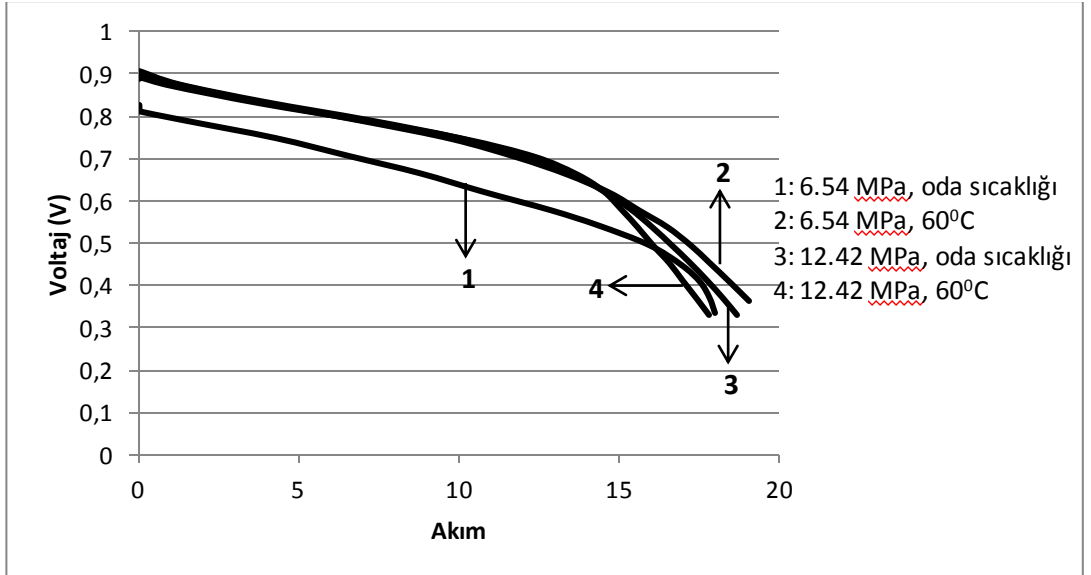


Şekil 4.17. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

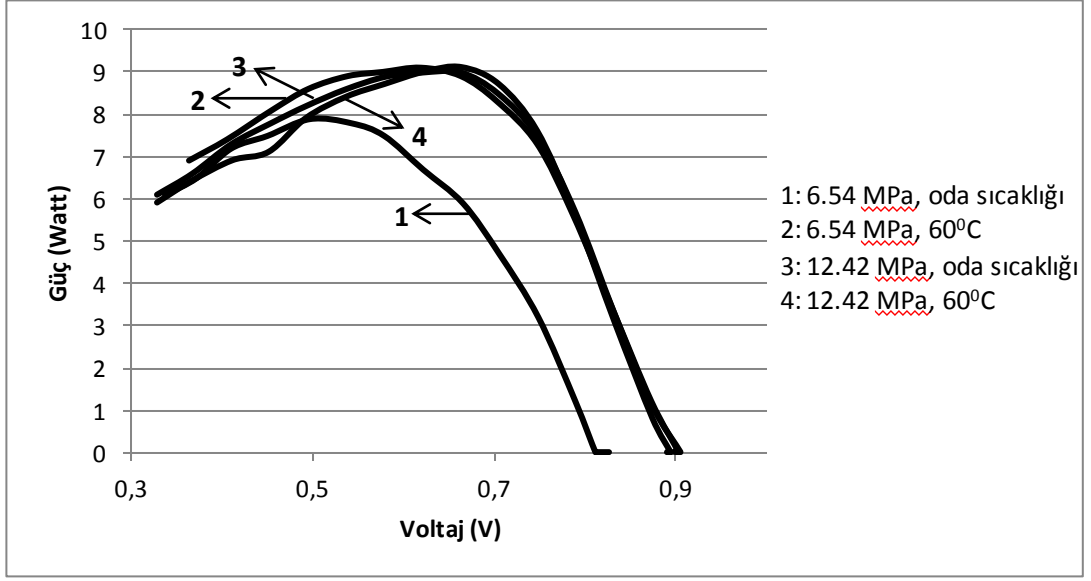


Şekil 4.18. 12.42 MPa basınç altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.17 ve 4.18 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

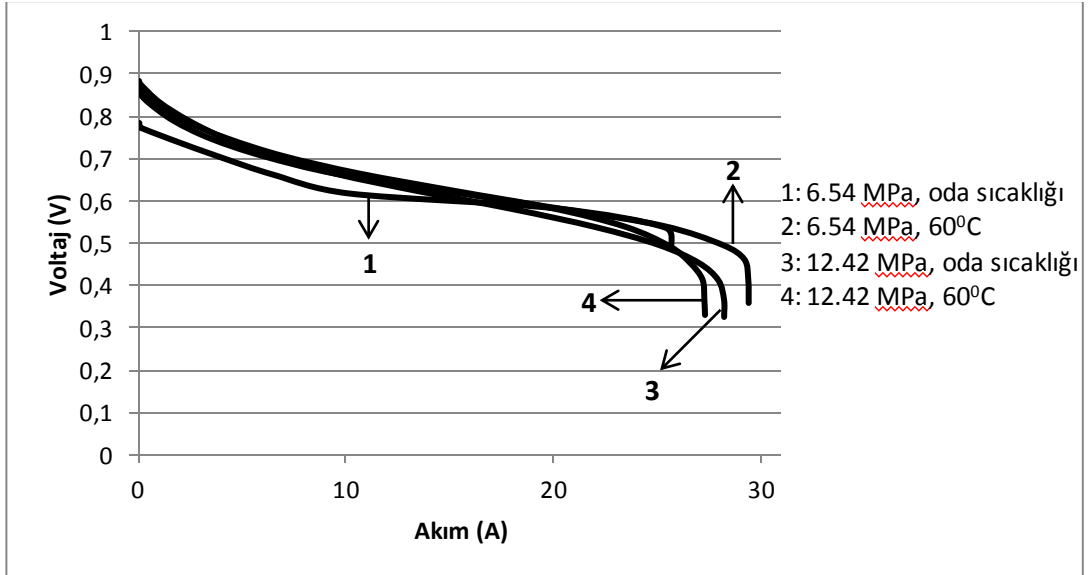


Şekil 4.19. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

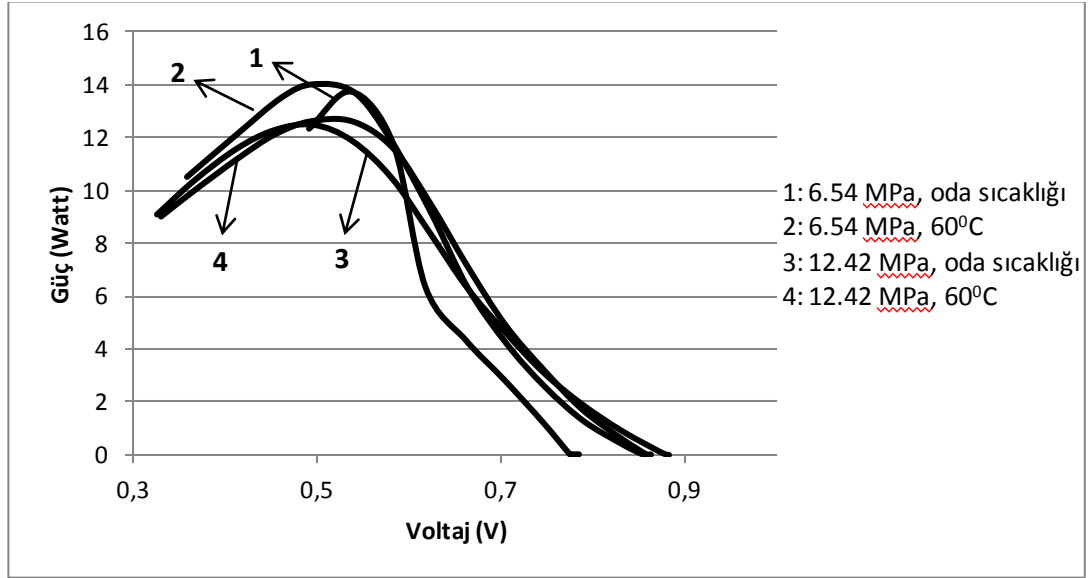


Şekil 4.20. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.19 ve 4.20 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)



Şekil 4.21. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



Şekil 4.22. Farklı basınç altında ve farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

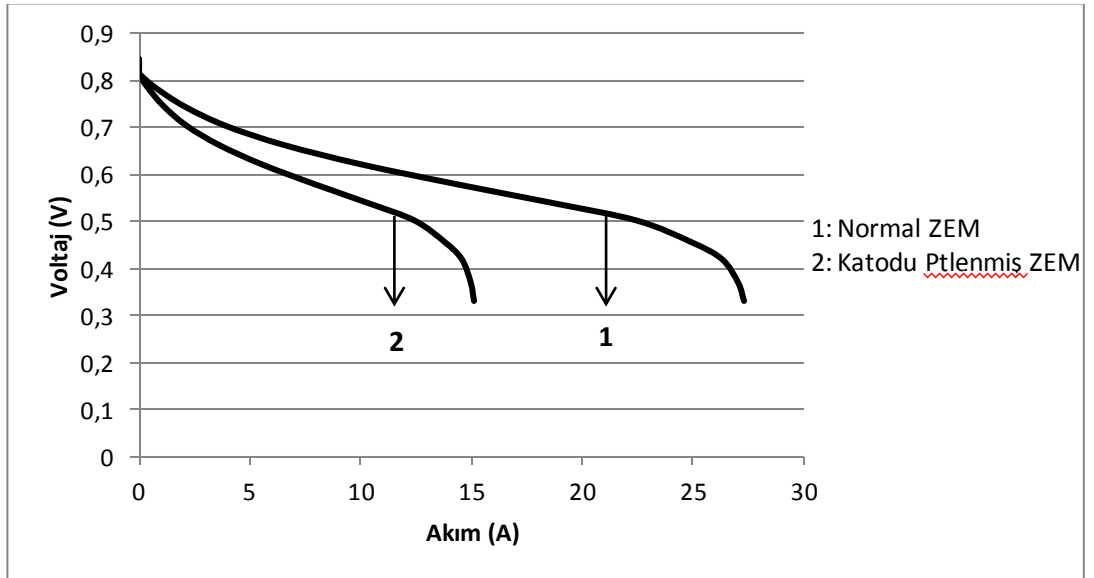
(Şekil 4.21 ve 4.22 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakıt Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Bütün sıkıştırma işlemleri (6.54 MPa altında oda sıcaklığındaki plakalar arasında, 6.54 MPa altında 60°C'deki plakalar arasında, 12.42 MPa oda sıcaklığındaki plakalar arasında ve 12.42 MPa 60°C'deki plakalar arasında) kıyaslandığında ise  $H_2$ :0,12 NL/dk ve Hava:0,30 NL/dk gaz besleme hızlarında 6.54 MPa basınç altında oda sıcaklığındaki plakalar arasında sıkıştırılan zar elektrot montajı dışındaki zar elektrot montajları birbirine benzer performanslar göstermişlerdir. Sadece gözlenen en büyük fark olarak ise konsantrasyon kayıplarından etkilenen zar elektrot montajı sıralamasının en yüksek kayıp yaşayandan en düşük kayıp yaşayana doğru 12.42 MPa basınç altında 60°C'de sıkıştırılan zar elektrot montajı, 12.42 MPa basınç altında oda sıcaklığında sıkıştırılan zar elektrot montajı ve 6.54 MPa basınç altında 60°C'de sıkıştırılan zar elektrot montajı olmasıdır. Gazlar iki katına çıkarıldığında ise zar elektrot montajlarından elde edilen maksimum güçlere bakıldığında ise en yüksek

performansı 6.54 MPa basınç altında 60°C'de sıkıştırılan zar elektrot montajının gösterdiği görülmüştür.

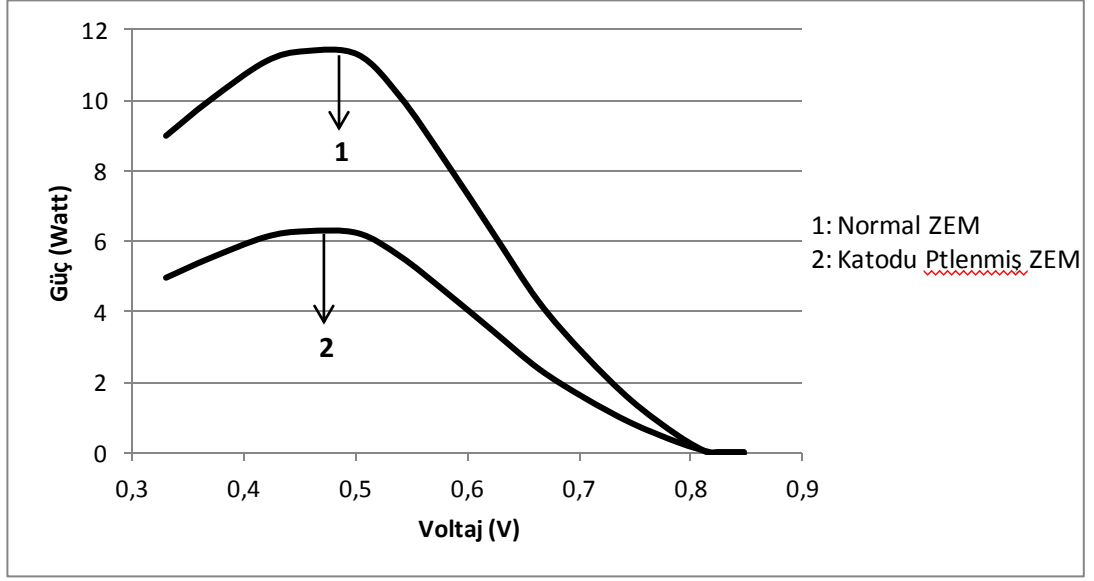
#### 4.3. Zar Elektrot Montajının Katot Tarafının Saçırma (Sputter) Yöntemi Kullanılarak Platin Metali ile Kaplanması Performansa Etkisi

Şekil 4.23-4.26'da normal zar elektrot montajı içeren bir yakıt pili ile aynı zar elektrot montajının katot tarafındaki kataliz yüzeyinin Pt metaliyle saçırma (sputter) yöntemi kullanılarak kaplanmış şekilde montajının yapıldığı bir yakıt pilinin performans eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Katot kataliz tabakasının platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği





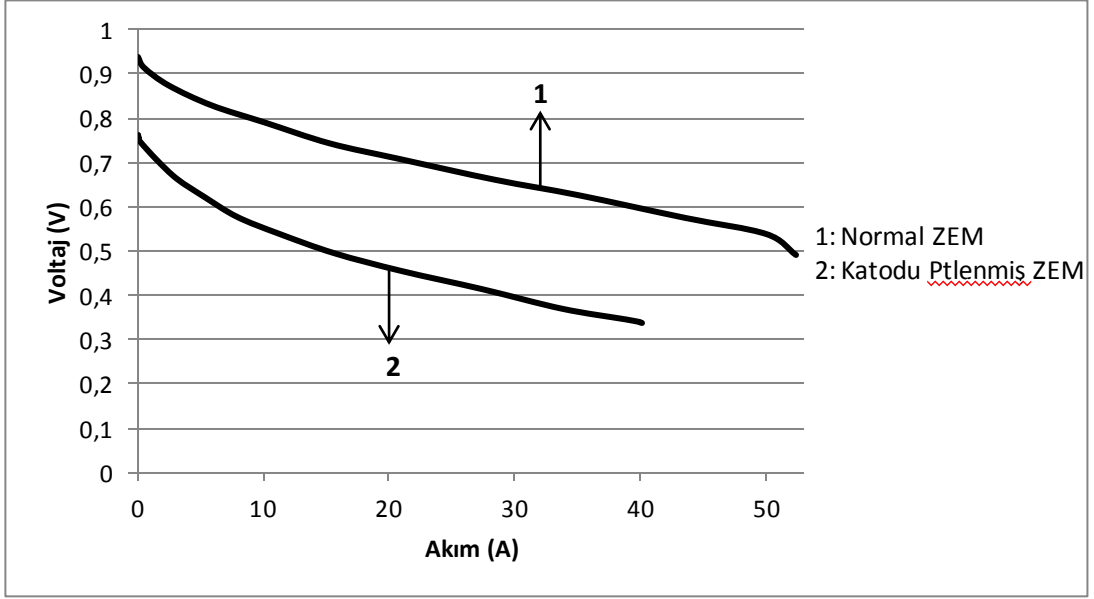
Şekil 4.24. Katot kataliz tabakasının platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.23 ve 4.24 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

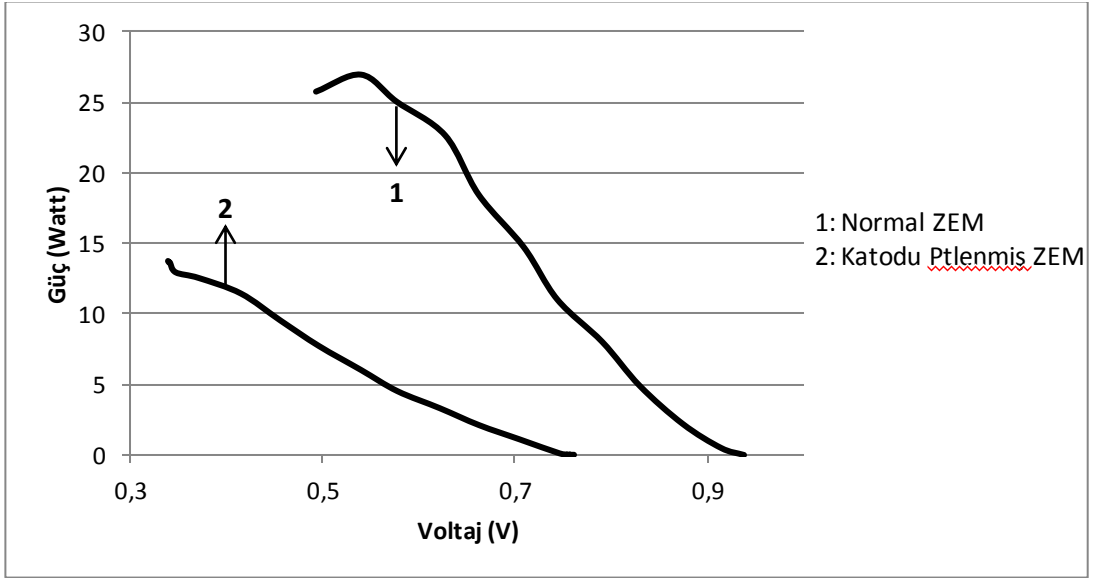
Normal beklenti olarak katot tarafındaki kataliz yüzeyi Pt metaliyle sputter yöntemiyle kaplanmış zar elektrot montajına sahip yakıt pilinin, normal zar elektrot montajı kullanılarak hazırlanan yakıt piline oranla daha yüksek performans vermesidir. Bunun nedeni de normal zar elektrot montajına göre katot tarafı Pt metaliyle kaplanmış zar elektrot montajında çok daha fazla kataliz bulunmasıdır ve böylelikle daha fazla gazın katalizle etkileşmesi sağlanmış olacağından, yakıt pilinin performansında artış beklenmektedir.

Zar elektrot montajının yüzeyi yüksek yüzey alanlı, gözenekli, içinde kataliz barındıran ve nem tutma özelliğine sahip kataliz karışımından oluşmaktadır. Katot tarafındaki kataliz tabakasının yüzeyini saçınım sistemiyle platinle kaplamak bu yüzeydeki platin konsantrasyonunu yüksek miktarda arttırmasının yanında, kataliz tabaka üzerinde film yapma olasılığı yüzünden gözenekleri kapama ve bu tabakanın nem tutma özelliğini yitirmesine neden olabileceği düşünülmektedir.

Zar elektrot montajının katot yüzeyine beslenen havadaki oksijenler, büyük çoğunluk ve öncelikle kataliz tabakanın yüzeyine kaplanmış olan platinle etkileşime gireceklerdir. Anot tarafındaki hidrojenin verdiği elektronu alan bu yüzeydeki oksijenler, anot tarafından katot tarafına kendileriyle birleşip su oluşturmak için geçecek olan protonları bekleyeceklerdir. Fakat zar elektrot montajının katot tarafındaki kataliz tabakanın yüzeyinde film yapmış olduğu düşünülen platin tabakası, zar elektrot montajından geçip katot tarafına ulaşan protonların bu film yüzeyinin diğer tarafında bulunan oksijen gazına ulaşmalarına engel olacaktır. Bu nedenle devreden geçen akım düşecek ve yakıt pilinden elde edilen güç miktarı azalacaktır. Bu platin film tabakasını geçebilen protonlar ise oksijen gazıyla birleşip su oluşturacaklardır. Fakat oluşan bu suyun büyük kısmı katot tarafına beslenen hava ile birlikte katot çıkış kanalından dışarı atılacaktır. Platinle sputter yöntemiyle kaplanmış olan zar elektrot montajının katot tarafındaki kataliz tabakası, bu yüzeyde oluşan suyu emebilme özelliğini platin film yüzünden önemli ölçüde kaybedeceği düşünülmektedir. Bu kayıp nedeniyle zar elektrot montajının katot kataliz tabakası normalden çok daha az nemlenecektir. Sahip olduğu bu çok az nem de zar elektrot montajını hem yeteri kadar nemlendiremeyecek hem de zar elektrot montajının nemlenme hızı bu az nem nedeniyle uzun sürecektir. Bu nedenle zar elektrot montajının anot tarafından katot tarafına geçmeye çalışan protonlar daha fazla dirençle karşılaşacaktır. Birim zamanda katot tarafına geçen proton sayısında bu nedenlerle meydana gelecek olan azalma da yakıt pilinin performansına olumsuz yönde etki edecek ve yakıt pilinin performansı düşecektir.



Şekil 4.25. Katot kataliz tabakasının platine kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



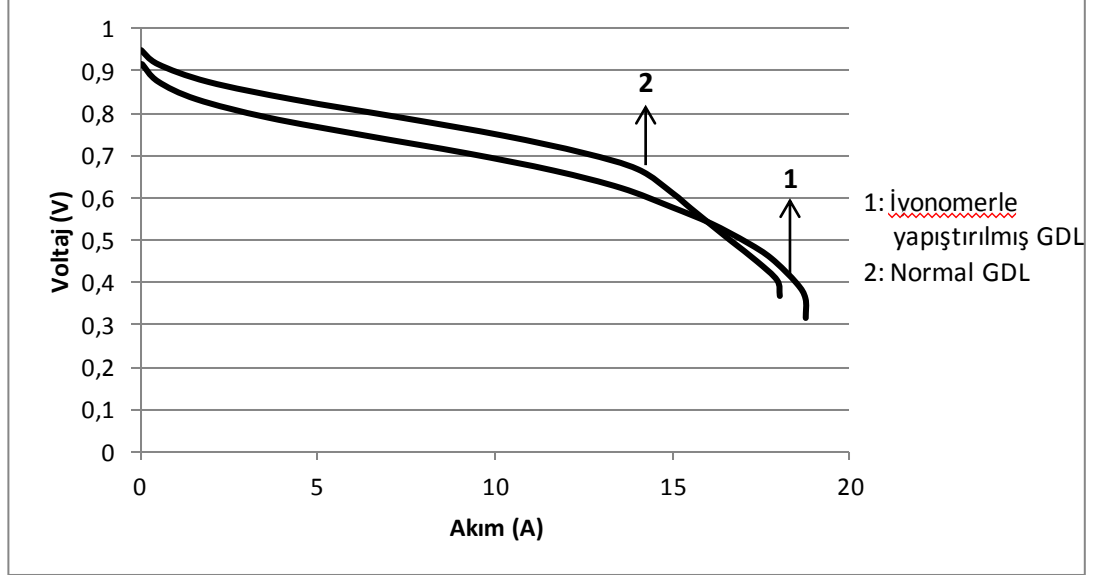
Şekil 4.26. Katot kataliz tabakasının platine kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.25 ve 4.26 için  $H_2$ : 0,24 NL/dk, : 8 NL/dk  $T_{Yakit Pili}$ : 70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

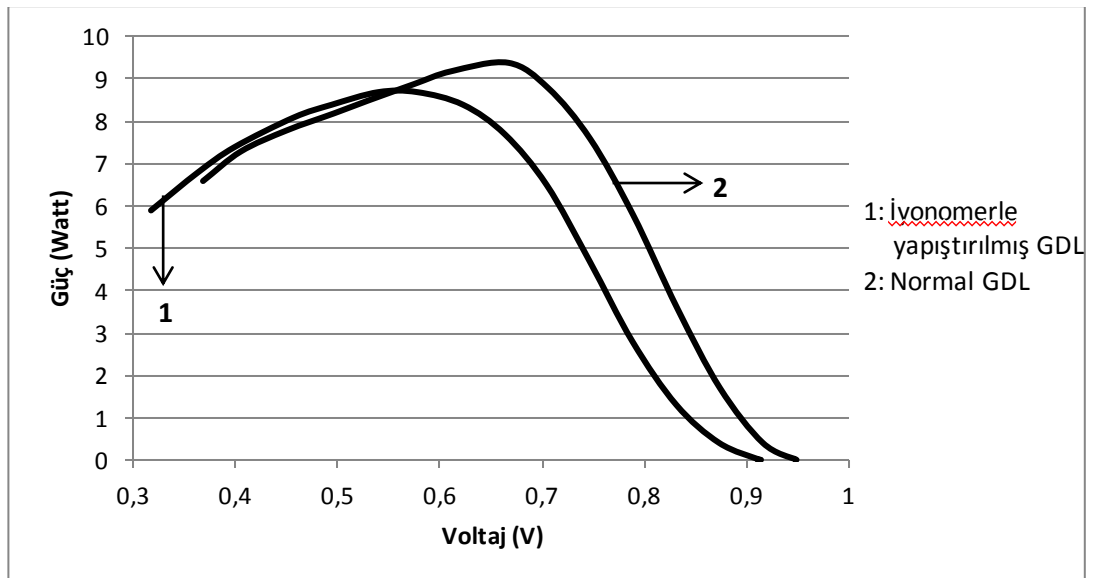
Yakıt pilinin zar elektrot montajının platinle kaplanan katot kataliz tabakasının yüzeyinde, platinin film oluşturmuş olma ihtimali nedeniyle yeterince oksijenin zar elektrot montajı yüzeyine ulaşamayıp protonla reaksiyona bu bölgede giremediğinden su oluşumunun zar elektrot montajı yüzeyinden daha çok, platin film yüzeyinde kalacak olması ve oluşan suyun da yalnızca çok az kısmının zar elektrot montajına ulaşabilecek olmasının gerçekleşeceği düşünülmüştür. Bu nedenle yakıt pilinin katot gaz kanallarına beslenen hava miktarı aşırı derecede artırılarak yakıt pilinin performansı incelenmiştir. Beslenen hava miktarı 0,6 NL/dk'dan 8 NL/dk'ya çıkarılarak katot yüzeyi platinle kaplanan zar elektrot montajına sahip yakıt pilinin performans eğrileri alınmıştır. Görüldüğü üzere normal zar elektrot montajı kullanılarak yapılan yakıt pilinin performans eğrisiyle kıyaslandığında, normal zar elektrot montajlı yakıt pili konsantrasyon kayıplarının bu oksijen artışı nedeniyle çok daha az olduğu, katodu platinle kaplı zar elektrot montajlı yakıt pilinin performans eğrisi normal zar elektrot montajına sahip yakıt pilinin performans eğrisinin altında kalmaya devam etmiş ve fark büyümüştür.

Bu da film oluşumunun etkisinin yüksek gaz beslemesiyle aşılma düşüncesinin pratikte uygulanmasının bir kazanç getirmeyeceğini ve platinleme işleminin performansta artıştan ziyade düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Yakıt pilinin maksimum güç verdiği optimum çalışma aralığı olan 0,5-0,6 V aralığında performans artışı olmamasına ek olarak, performansın normal zar elektrot montajlı yakıt piline göre daha düşük seyretmesi, fazladan harcanan bu gazın karşılığının alınmadığını göstermekte ve bu yöntemle kayıpların karşılanamayacağını göstermektedir. Oksijen miktarındaki bu artışla normal zar elektrot montajına sahip yakıt pili performansındaki yüksek artış reaksiyonu limitleyen kısmın katottan kaynaklandığını göstermiştir. Ayrıca yakıt pilinin katot tarafına yapılan bu aşırı gaz beslemesi, anot tarafından protonları daha güçlü şekilde çağıracağından yakıt pilinin konsantrasyon kayıplarının yaşandığı bölgeye ulaşmasını geciktirmiştir. Sonuçlara göre göre zar elektrot montajının katot yüzeyindeki kataliz tabakasının sputter yöntemi kullanılarak platin metaliyle kaplanması, zar elektrot montajının performansında düşüşe yol açtığından, bu yöntemin kullanımı uygun görülmemiştir.

#### 4.4. Gaz Difüzyon Tabakasının İyonomerle Zar Elektrot Montajına Yapıştırılmasının Performansa Etkisi



Şekil 4.27. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



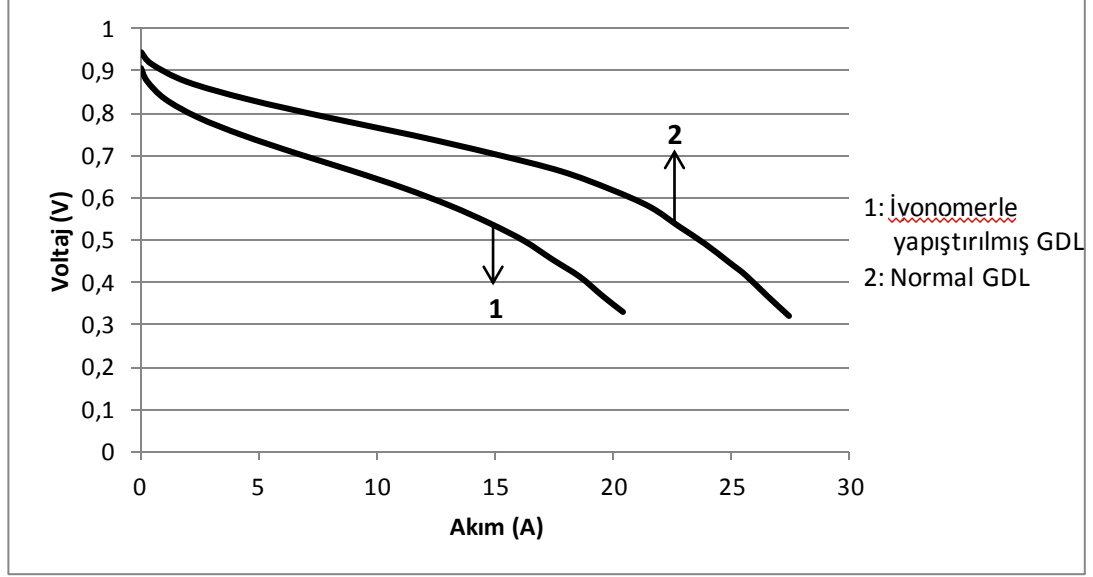
Şekil 4.28. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.27 ve 4.28 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Gaz difüzyon tabakalarını zar elektrot montajlarına yapıştırmak, yapıştırmada kullanılan iyonomer malzemesinin de su tutucu özelliği olması sebebiyle zar elektrot montajlarının bu yüzden daha çok nem tutmasının sağlanacağı düşünülmüştü. Fakat Şekil 4.27-4.30'da görüldüğü üzere performansta bir artış görülmemekle beraber düşme yaşandığı gözlemlenmiştir.

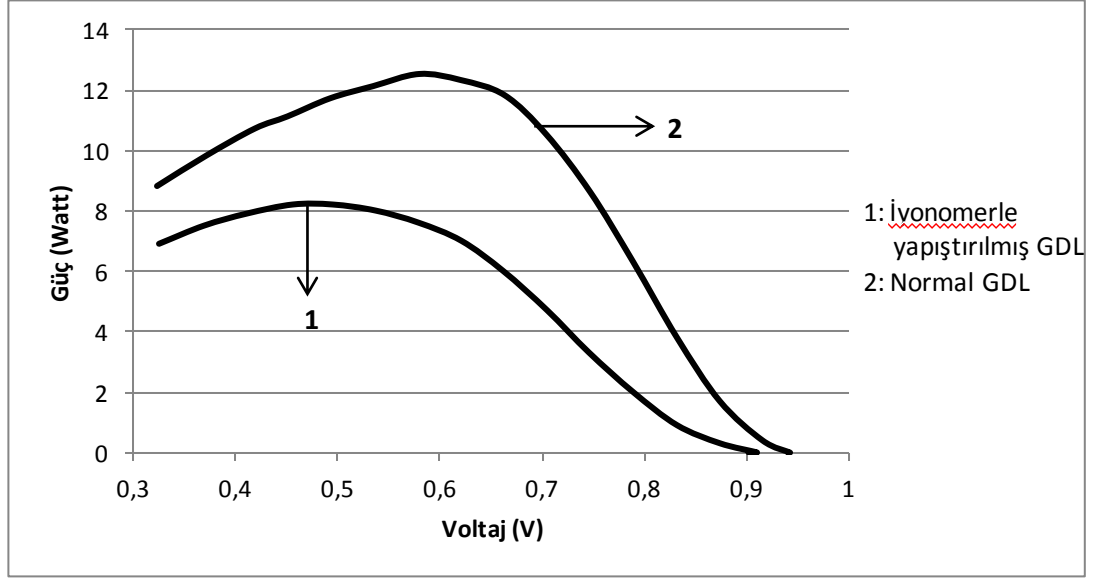
Gaz difüzyon tabakalarıyla zar elektrot montajını birbirlerine yapıştırmada kullanılan malzeme nem tutma özelliğinde olmasına rağmen hem gaz geçişi hem de proton hareketi için ekstra bir kalınlık yarattığı için performansı olumsuz yönde etkilediği öngörülmüştür. Anot tarafından yollanan hidrojen gazı ve katot tarafından yollanan oksijen gazı, zar elektrot montajındaki kataliz tabakaya ulaşmak için gaz difüzyon tabakasını geçmek zorundadır. Gaz geçirgenliği çok yüksek olan gaz difüzyon tabakalarını geçmekte zorlanmayan gazlar, gaz difüzyon tabakalarını zar elektrot montajlarına yapıştırmada kullanılan malzemenin her ne kadar gaz geçirgen özellikte olmasına rağmen aynı zamanda da film yapabilme özelliği yüzünden, bu ekstra yüzeyi geçerken daha çok engelle karşılaştığı için nüfuz hızlarının azalacağı öngörülmüştür. Bu nedenle birim zamanda kataliz tabakaya ulaşan ve reaksiyona giren gaz miktarı azalmaktadır. Bu da üretilen elektron sayısında ve dolayısıyla akım miktarında düşüşe neden olmaktadır. Ayrıca zar elektrot montajının katot tarafında oluşan suyun bir miktarı da gaz difüzyon tabakası ve zar elektrot montajını bir arada tutan malzeme tarafından emileceği ihtimali yüzünden, zar elektrot montajının emeyeceği su miktarı düşeceği ve bu yüzden anot tarafından katot tarafına proton geçişinin zorlaşacağı düşünülmüştür. Ayrıca kullanılan yapıştırma malzemesi zar elektrot montajları yüzeyindeki kataliz tabaka tarafından emilebileceğinden bu tabakalara ulaşan gazların daha az katalizle etkileşmesine neden olabileceği öngörülmüştür. Üstelik protonlar kataliz tabaka tarafından emilen yapıştırma malzemesi nedeniyle anot tarafından katot tarafına geçişlerinde daha çok dirençle karşılaşacaktır ve gazlarla kataliz tabakanın yüzeyindeki platin metallerinin daha efektif etkileşmesi ve katot tarafına geçen protonların daha azının katot yüzeyine

ulaşması sebebiyle performansta düşüş yaşanacaktır. Ayrıca toplamda yaratılan ekstra kalınlık yüzünden fazladan bir kontak direnci oluşmaktadır. Bu da performans kayıplarında artış manasına gelmektedir.



Şekil 4.29. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

Yakıt piline beslenen hidrojen ve hava miktarı iki katına çıkarıldığında gaz difüzyon tabakası zar elektrot montajına yapıştırılmadan birleştirilen yakıt pilinin performansında beklenildiği üzere artış gözlemlenmiştir. Zar elektrot montajıyla etkileşen ve reaksiyona giren gaz miktarındaki artış, devreden geçen elektron ve zar elektrot montajının anot tarafından katot tarafına geçen proton miktarında artışa yol açmıştır ve bu da yakıt pilinin performansına olumlu yönde etkiyerek elde edilen güç miktarını artırmıştır. Bunun sonucunda katot tarafında oluşan su miktarının da artmış olması zar elektrot montajının daha çok nemlenmesine ve dolayısıyla katot tarafından anot tarafına geçen protonların hareketinin kolaylaşmasında rol oynamıştır. Bu etki de yakıt pili performansında artış manasına gelmektedir.



Şekil 4.30. Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

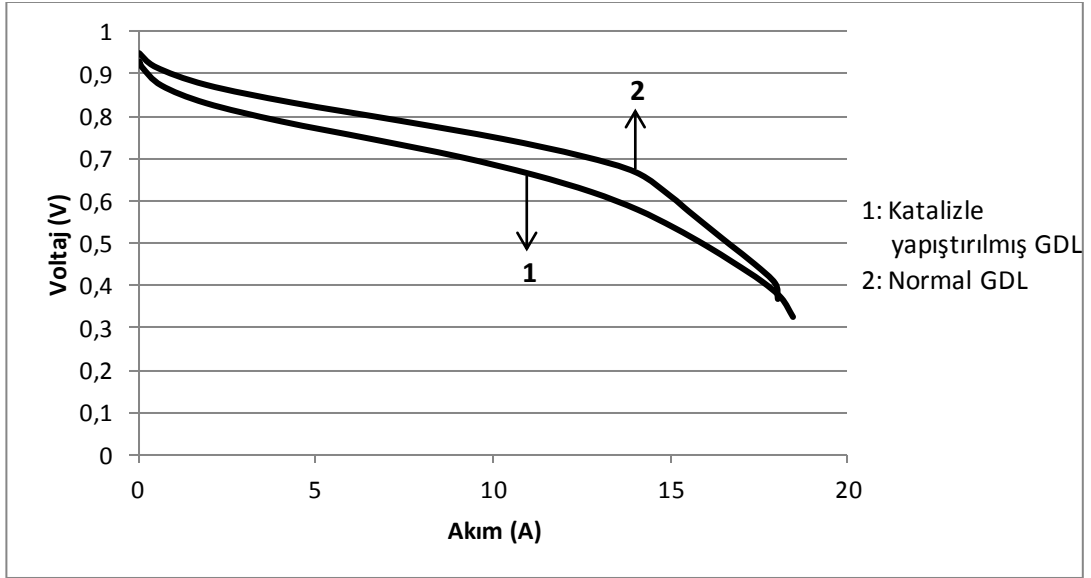
(Şekil 4.29 ve 4.30  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot\ çıkışı}$ : 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Fakat gaz difüzyon tabakası zar elektrot montajına yapıştırılmış olan yakıt pilinin performansında ise küçük de olsa bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeninin ise ilk polarizasyon eğrisi alınırken oluşan suyun bir kısmının yapıştırma malzemesi tarafından emilmesi nedeniyle özellikle katot tarafından beslenen havanın gaz difüzyon tabakasını geçip zar elektrot montajına ulaşmasının daha fazla engellenmesi nedeniyle performansın olumsuz yönde etkilenmiş olması düşünülmektedir.

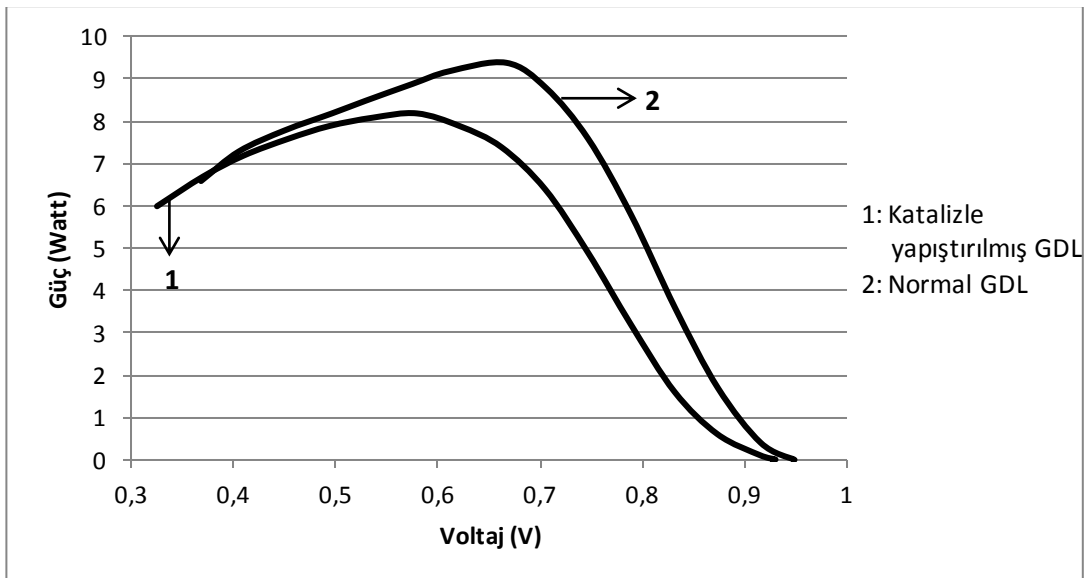
Kaplanan iyonomer ekstra bir kalınlık yaratmıştır ve bu de ekstra bir kontak direnci demektir. Üstelik oluşan suyun bir kısmı (özellikle katot tarafında olan) iyonomer tarafından emildiği düşünülmektedir. Bu da zar elektrot montajındaki nemin normalden daha az olmasına, hidrojen taşınımının zorlaşmasına ve performansın da düşmesine neden olmuştur. Ekstra iyonomer tabakası hidrojen için ekstra yol oluşturduğu için taşınım hızını, dolayısıyla da performansı düşürdüğü öngörülmektedir.



#### 4.5. Gaz Difüzyon Tabakasının Kataliz Karışımıyla Zar Elektrot Montajına Yapıştırılmasının Performansa Etkisi



Şekil 4.31. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



Şekil 4.32. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

( Şekil 4.31 ve 4.32 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

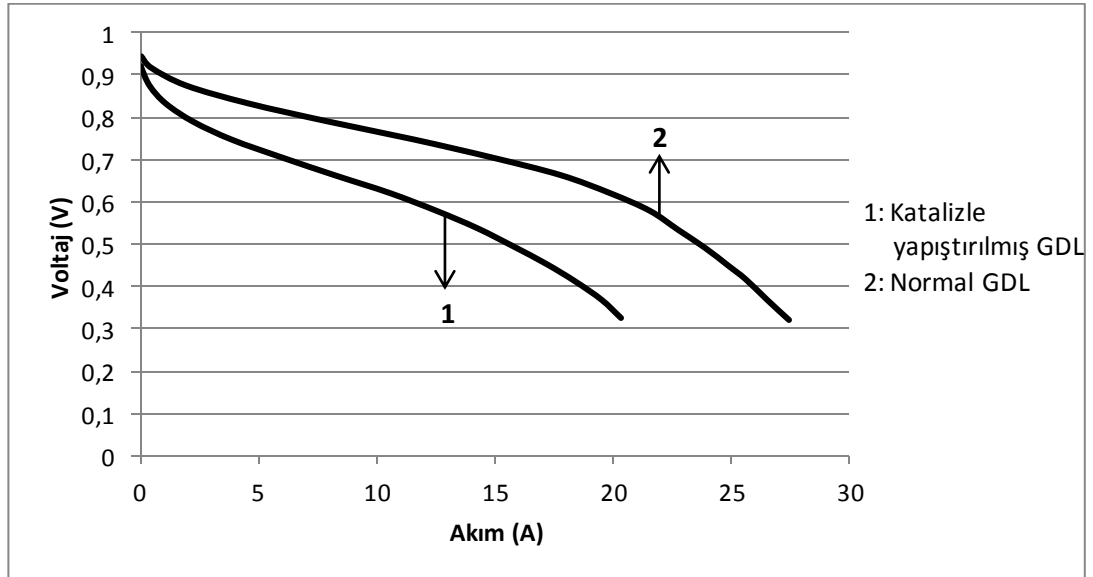
Gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajındaki kataliz tabakalarında kullanılan kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırıldığında ilk beklenti performansta artış gözlenmesidir. Çünkü bu şekilde yakıt pilinde daha fazla kataliz bulunması sağlanmış olmaktadır. Fakat gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajlarına kataliz karışımıyla yapıştırıldığında, Şekil 4.31-4.34'te görüldüğü üzere yakıt pilinin performansında düşüş gözlenmiştir.

Bunun nedenlerinden bazıları bu yapıştırma işleminin yapıştırma malzemesi olarak iyonomerin kullanıldığı durumda geçerli olan ve performans düşüşüne neden olan etkenlerle aynı olduğu düşünülmektedir.

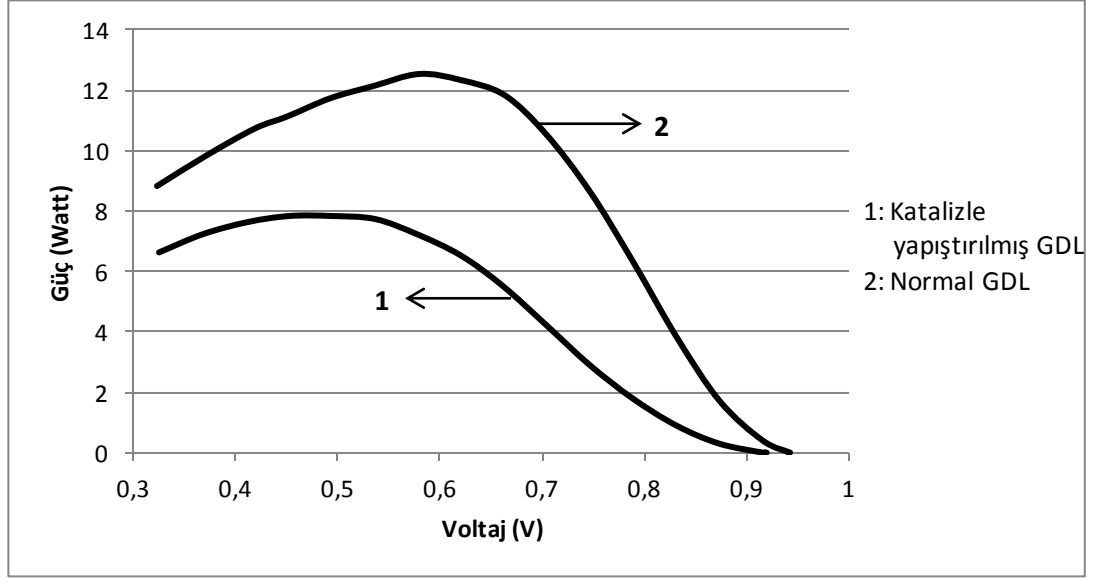
O bölümde anlatılanlara ek olarak ise yapıştırma işleminde kullanılan katalizin büyük kısmının gaz difüzyon tabakaları tarafından emilmiş olmasıdır. Anot ve katot tarafına beslenen gazlar ilk olarak bu gaz difüzyon tabakalarındaki katalizlerle etkileşeceği ve zar elektrot montajı yüzeyindeki kataliz tabakaya ulaşan gaz yoğunluğunda düşme gözleneceği öngörülmektedir. Zar elektrot montajının anot tarafındaki gaz difüzyon tabakası üzerindeki katalizle etkileşen hidrojen gazı, proton haline geldikten sonra zar elektrot montajının katot tarafına geçmek için elektrot montajına ek olarak bir de difüzyon tabakasını aşmak durumunda kalacaktır. Bu ekstra yol yüzünden birim zamanda katoda geçen proton sayısı, dolayısıyla da yakıt pilinin performansı azalacaktır.

Katot tarafında da durum aynıdır. Oksijen gazı ilk olarak zar elektrot montajının katot tarafındaki gaz difüzyon tabakası üzerindeki katalizle etkileşeceği düşünülmektedir. Zar elektrot montajı yüzeyine geçen ve etkileşen oksijen gazı miktarı az olacağından, anot tarafından katot tarafına geçen protonların gaz difüzyon tabakası kısmında kalan oksijen gazına ulaşması gerekir. Anot tarafındaki ekstra gaz difüzyon tabaka kalınlığına ek olarak bu sefer bir de katot kısmında benzer bir kalınlığı aşmaları gerekecektir. Su tutucu özelliği zar elektrot montajına göre

nispeten daha az olan kataliz karışımının yüzeyinde daha çok gerçekleşen, oksijen gazının iyon haline geldikten sonra anot tarafından katot tarafına geçen protonlarla birleşmesi sonucu oluşan su moleküllerinin büyük çoğunluğu beslenen hava ile birlikte katot çıkışından uzaklaştırılacağı düşünülmektedir. Gaz difüzyon tabakası ve zar elektrot montajını birbirine yapıştırmada kullanılan kataliz karışımı, oluşan suyun küçük bir kısmını emeyeceği ve bu emdiği kısmın da sadece birazının zar elektrot montajına ulaşacağı öngörülmektedir. Bu nedenle zar elektrot montajı normalden daha az bir nem ihtiva edecek ve bu da protonları anot tarafından katot tarafına geçişini zorlaştıracaktır. Üstelik anot tarafında oluşan protonların büyük kısmı gaz difüzyon tabakasında oluşacağından ve bu tabakanın da normalden daha az nemlenen zar elektrot montajının sahip olduğu nemin de sadece küçük bir kısmını emebileceğinden, anot tarafındaki protonların çok az nemlenen gaz difüzyon tabakasını aşırıp nemi daha da azalmış olan zar elektrot montajını da geçerek katot tarafındaki oksijen gazıyla buluşması daha da zorlaşmıştır. Ayrıca toplamda yaratılan ekstra kalınlık yüzünden fazladan bir kontak direnci oluşmaktadır. Bu da performans kayıplarında artış manasına gelmektedir.



Şekil 4.33. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



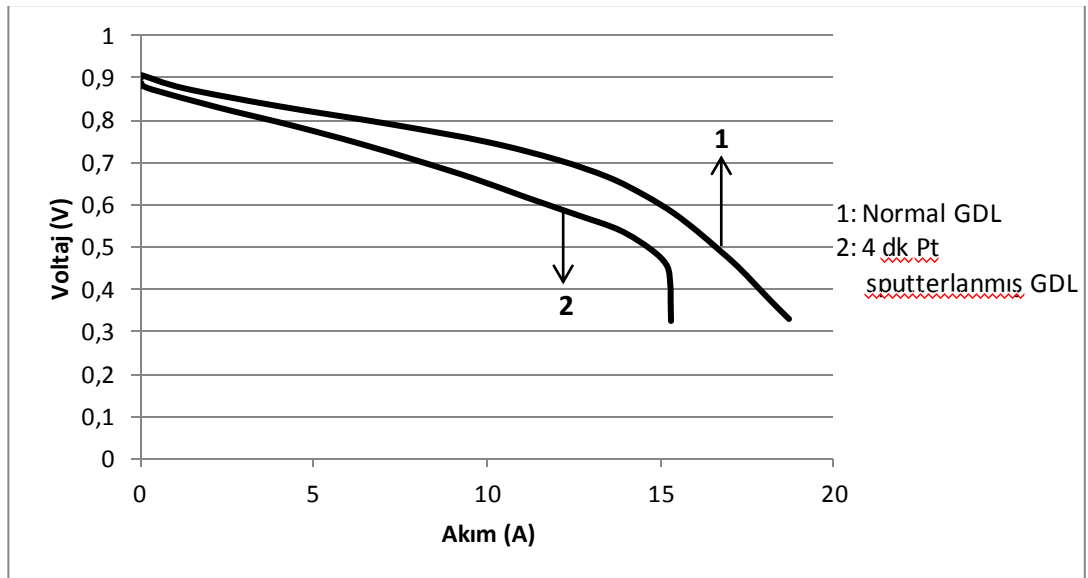
Şekil 4.34. Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının performansa etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.33 ve 4.34 için  $H:0,24$  NL/dk,  $Hava:0,60$  NL/dk,  $T_{Yakit\ Pili}:70^{\circ}C$ ,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}:53^{\circ}C$ )

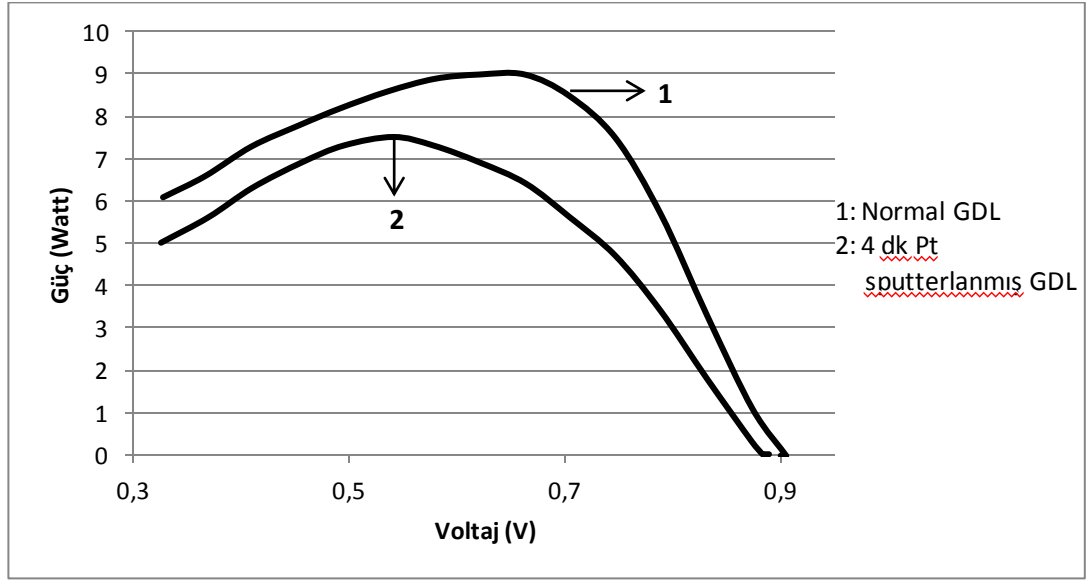
Yakıt pilinin anot ve katot kanallarına beslenen hidrojen ve hava miktarları iki katına çıkarıldığında elde edilen performans eğrileri yukarıda görülmektedir. Gaz miktarları arttırıldığında her iki durumda da yakıt pilinin performansında artış beklenilmesine rağmen sadece normal gaz difüzyon tabakası kullanılan zar elektrot montajına sahip yakıt pilinin performansında artış olmuştur. Zar elektrot montajıyla etkileşen ve reaksiyona giren gaz miktarındaki artış, devreden geçen elektron ve zar elektrot montajının anot tarafından katot tarafına geçen proton miktarında artışa yol açmıştır ve bu da yakıt pilinin performansına olumlu yönde etkiyerek elde edilen güç miktarını artırmıştır. Bunun sonucunda katot tarafında oluşan su miktarının da artmış olması zar elektrot montajının daha çok nemlenmesine ve dolayısıyla katot tarafından anot tarafına geçen protonların hareketinin kolaylaşmasında rol oynamıştır. Bu etki de yakıt pili performansında artış manasına gelmektedir. Gaz difüzyon tabakası zar elektrot montajına kataliz karışımıyla yapıştırılan yakıt pilinin performansında ise düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeninin ise ilk polarizasyon eğrisi

alınırken oluşan suyun bir kısmının gaz difüzyon tabakasını zar elektrot montajına yapıştırmada kullanılan kataliz karışımı tarafından emilmesi nedeniyle özellikle katot tarafından beslenen havanın gaz difüzyon tabakasını geçip zar elektrot montajına ulaşmasının daha fazla engellenmesi ve performansın olumsuz yönde etkilenmiş olması düşünülmektedir.

#### 4.6. Gaz Difüzyon Tabakalarının Sputter Yöntemi Kullanılarak Platin Metali ile Kaplanması Zar Elektrot Montajının Performansına Etkisi



Şekil 4.35. Gaz difüzyon tabakalarının saçırma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

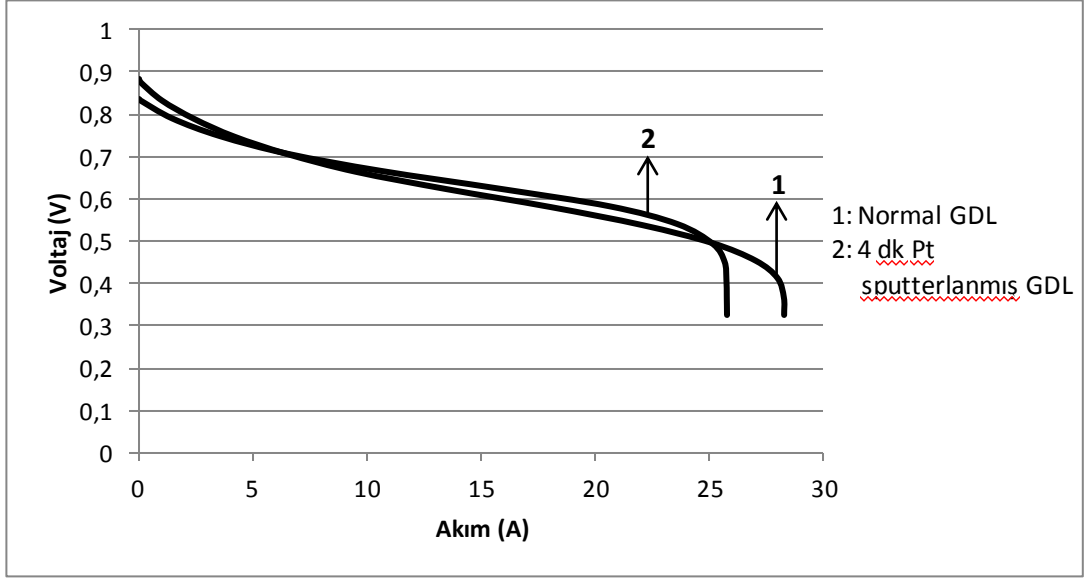


Şekil 4.36. Gaz difüzyon tabakalarının saçtırma sistemiyle 4dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

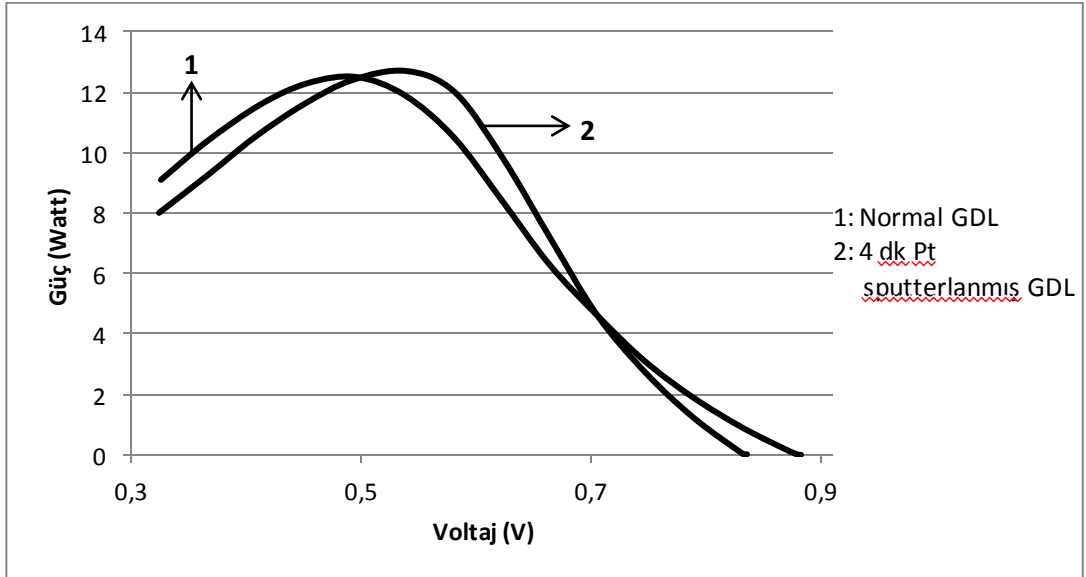
(Şekil 4.35 ve 4.36 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakit Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Şekil 4.35-4.38'de görüldüğü üzere gaz difüzyon tabakaları platin metaliyle sputter cihazında kaplandıktan sonra yakıt pilinin performansında, gaz difüzyon tabakaları kaplanmadan montajı yapılan yakıt piline kıyasla düşüş gözlenmiştir. Bunun nedenlerinden birinin, gaz difüzyon tabakaları sputter cihazında platin metaliyle kaplandıktan sonra gaz geçirgenliklerinde meydana gelmiş olabilecek olan düşüş olduğu düşünülmektedir. Gözeneklerinin platin metaliyle kısmen dolması ya da destek dokunun çevresine kaplanan platin metallerinin gazların geçtiği deliklerin çaplarını daraltması sonucu gaz difüzyon tabakalarının gaz geçirgenliğini azaltması nedeniyle daha az gaz reaksiyona girmiş olacaktır. Reaksiyona giren gazların büyük kısmı da gaz difüzyon tabakası yüzeylerinin gaz besleme kanallarına yakın olan kısımlarında platin metaliyle etkileşmekte ve gaz geçirgenliğindeki azalma nedeniyle zar elektrot montajına nüfuz eden gaz miktarı çok az ölçülerde kalmaktadır. Reaksiyona giren gaz miktarında meydana gelen bu azalma da performansta kendini düşüş olarak gösterecektir.

Katot tarafında meydana gelen su oluşumunun bu nedenlerle büyük çoğunlukla gaz difüzyon tabakasında meydana gelmesi beklenebilir. Gaz difüzyon tabakasının zar elektrot montajına oranla su tutuculuğunun daha az olması, bu su tutuculuk özelliğinin platinle kaplandıktan sonra daha da düşmesi sebebiyle, oluşan suyun büyük kısmı katot tarafına beslenen hava ile birlikte katot çıkışından dışarı verileceği öngörülmektedir. Gaz difüzyon tabakasında kalan az miktardaki suyun da sadece küçük bir kısmı zar elektrot montajı tarafından emilecektir. Bu nedenle gaz difüzyon tabakaları platin metaliyle saçınım sistemiyle kaplanan zar elektrot montajı, normal gaz difüzyon tabakası kullanılan zar elektrot montajına oranla daha kuru olacağı düşünülmektedir. Bu da anot tarafından katot tarafına geçmeye çalışan protonların daha fazla dirençle karşılaşması manasına gelecektir ve birim zamanda anottan katoda hareket eden proton miktarında düşüşe yol açacaktır. Bunun sonucu olarak da yakıt pilinin performansı düşecektir. Ayrıca anot tarafında hidrojen gazının büyük kısmı gaz difüzyon tabakasının kaplanmasında kullanılan platin metaliyle tepkimeye gireceği ve proton oluşumunun da daha çok bu gaz difüzyon tabakasında meydana geleceği öngörülmektedir. Anot tarafındaki gaz difüzyon tabakası ayrıca, normal gaz difüzyon tabakası kullanılan yakıt pilindeki zar elektrot montajına göre çok daha az nemlenen zar elektrot montajından çok sınırlı miktarda nem emebilecektir. Bu nedenle anot gaz difüzyon tabakasındaki protonların zar elektrot montajlarına hareketleri de bu nem miktarındaki azlık yüzünden çok daha zor olacaktır. Üstelik oksijenin ana olarak gaz difüzyon tabakası üzerinde iyonlaşması sebebiyle protonların katot tarafına geçtikten sonra da katot tarafındaki gaz difüzyon tabakasını da kat ederek bu tabakanın gaz besleme kanallarına yakın olan kısmına ulaşması da gerekecektir. Protonun hareketinde meydana gelen tüm bu zorluklar performans üzerinde olumsuz yönde fark edilir derecede etki edecektir.



Şekil 4.37. Gaz difüzyon tabakalarının saçtırma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



Şekil 4.38. Gaz difüzyon tabakalarının saçtırma sistemiyle 4 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

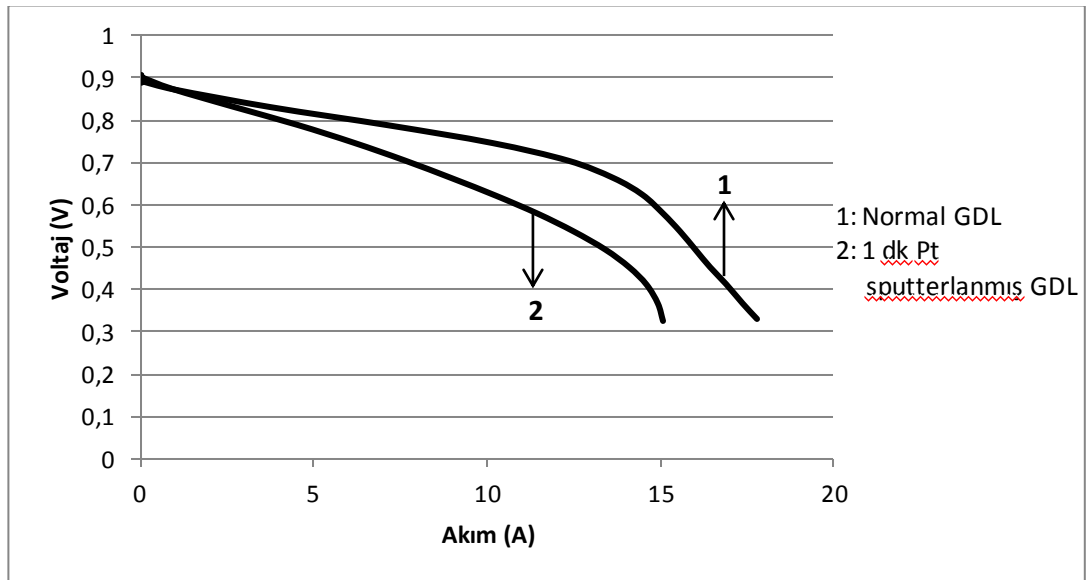


(Şekil 4.37 ve 4.38 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

Fakat yakıt pilinin anot ve katot kanallarına beslenen gaz miktarları iki katına çıkarıldığında normal gaz difüzyon tabakası kullanılan yakıt pili ve gaz difüzyon tabakaları platin metaliyle saçınım sistemiyle kaplanan yakıt pilinin performans eğrileri birbirlerine yakın seyretmektedir. Bunun nedeninin platin metaliyle kaplandıktan sonra gaz geçirgenliği azalan gaz difüzyon tabakalarının, gaz miktarları iki katına çıkarıldığında gaz geçirgenliğindeki düşüşü bu gaz artışındaki etkenin dengelemesi olduğu düşünülmektedir. Daha yüksek hızla beslenen gazlar, gaz difüzyon tabakasının platin kaplanması sonucu daralan deliklerinden ve tabaka üzerinde oluşan su moleküllerinden daha fazla geçip zar elektrot montajına nüfuz edebilmekte ve oluşan su moleküllerini zar elektrot montajına doğru yönlendirerek daha çok nemlenmesini sağlayarak performans artışına yardımcı olmaktadır. Fakat bu nemlenme olayı normal gaz difüzyon tabakaları kullanılan zar elektrot montajlarında daha hızlı meydana gelmektedir. Bu nedenle düşük voltajlarda artan akımla beraber ısınan yakıt pilinde platin metaliyle kaplanmış gaz difüzyon tabakaları kullanılan zar elektrot montajının su emiş hızı nem kayıp hızını karşılayamadığı için konsantrasyon kaybının etkin olduğu bölgeye normal gaz difüzyon tabakaları kullanılan yakıt pilinden daha önce varır.

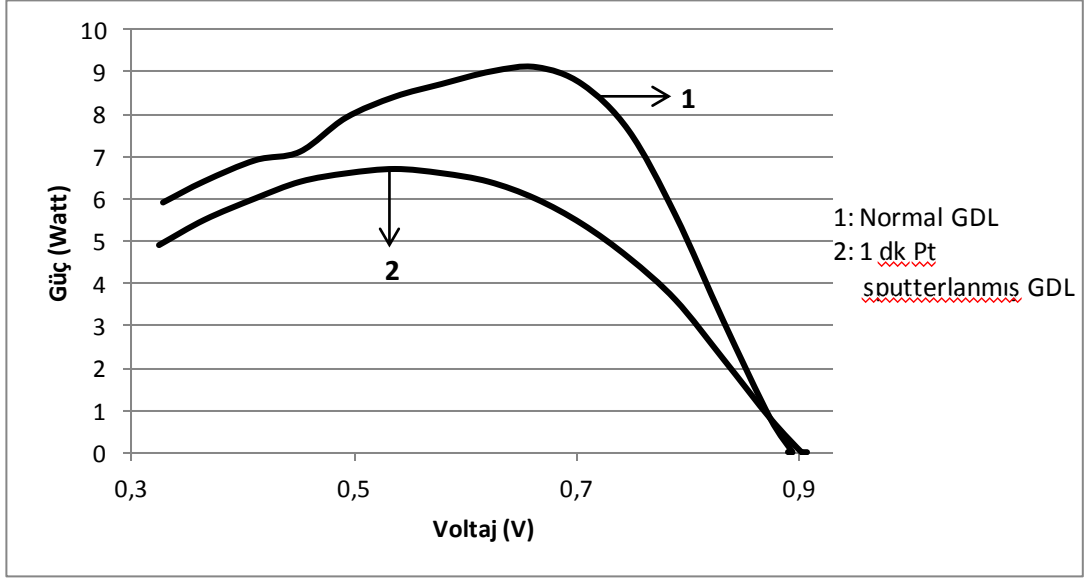
Saçınım sistemiyle kaplanma süresi azaltılırsa platinin film yapma olasılığının ve zar elektrot montajı performansı üzerindeki olumsuz etkisinin azalıp azalmayacağını araştırılması için, gaz difüzyon tabakaları bu sefer bir dakika boyunca platin metaliyle kaplanmıştır. Fakat Şekil 4.39-4.42'deki performans eğrileri incelendiğinde anot ve katot gaz difüzyon tabakaları birer dakika saçınım sistemiyle platin metaliyle kaplanmış zar elektrot montajlarının performansı, gaz difüzyon tabakaları dörder dakika kaplanan zar elektrot montajlarına oranla daha fazla düşüş yaşadığı görülmüştür. Performans kayıplarının nedeninin saçınım yöntemiyle 4'er dakika platin metaliyle kaplanan gaz difüzyon tabakalarına sahip zar elektrot montajının performansının düşmesine neden olan durumlarla aynı olduğu düşünülmektedir. Kaplama süresinin daha az olması kaplanan platin metali miktarının az olmasını ve

film kalınlığının incelmesini sağlamıştır. Fakat görüldüğü zere incelen film kalınlığı yine de zar elektrot montajının performansını önemli ölçüde düşürecek kadar etkin olmaya devam etmiş ve buna ek olarak kaplanan platin miktarındaki düşüş de zar elektrot montajı üzerindeki kataliz miktarını düşürdüğü için performans üzerindeki olumsuz etki artmıştır. Bunu yakıt pilinin anot ve katot gaz kanallarına beslenen hidrojen ve hava miktarlarının iki katına çıkarıldığı durumdaki performans eğrilerinden anlaşılmaktadır. Görüldüğü zere gaz miktarlarındaki artış gazın zar elektrot montajına nüfuz etme oranını arttırarak performansında artışa neden olmuş, fakat kaplanan platin miktarındaki azlık nedeniyle gaz difüzyon tabakaları platin metaliyle kaplanmayan zar elektrot montajının performansına yaklaşamamıştır.

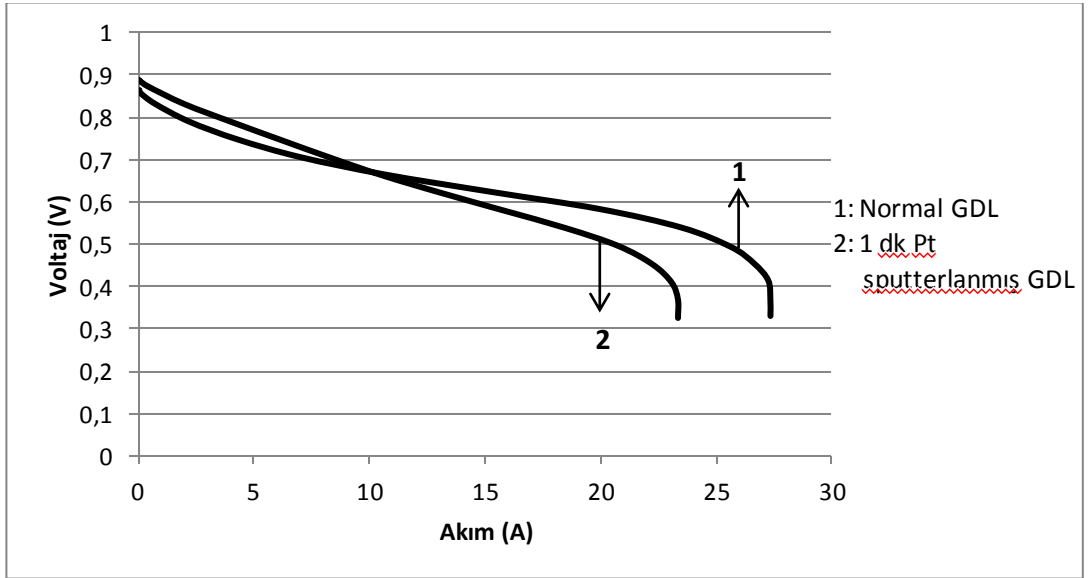


şekil 4.39. Gaz difüzyon tabakalarının saçtırma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği

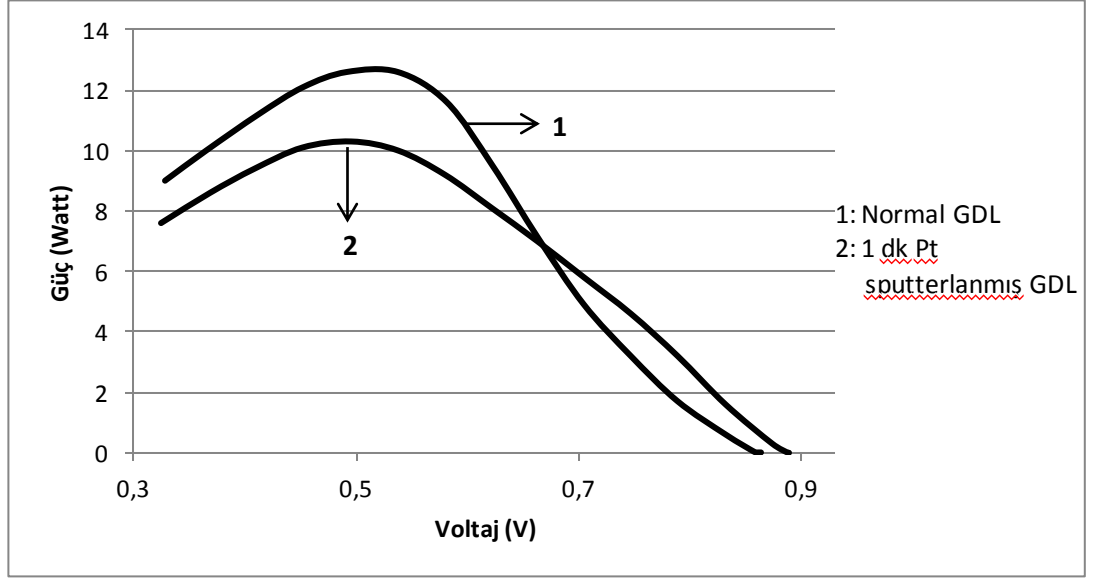
(şekil 4.39 ve 4.40 için  $H_2$ :0,12 NL/dk, Hava:0,30 NL/dk,  $T_{Yakıt Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)



Şekil 4.40. Gaz difüzyon tabakalarının saçtırma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği



Şekil 4.41. Gaz difüzyon tabakalarının saçtırma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



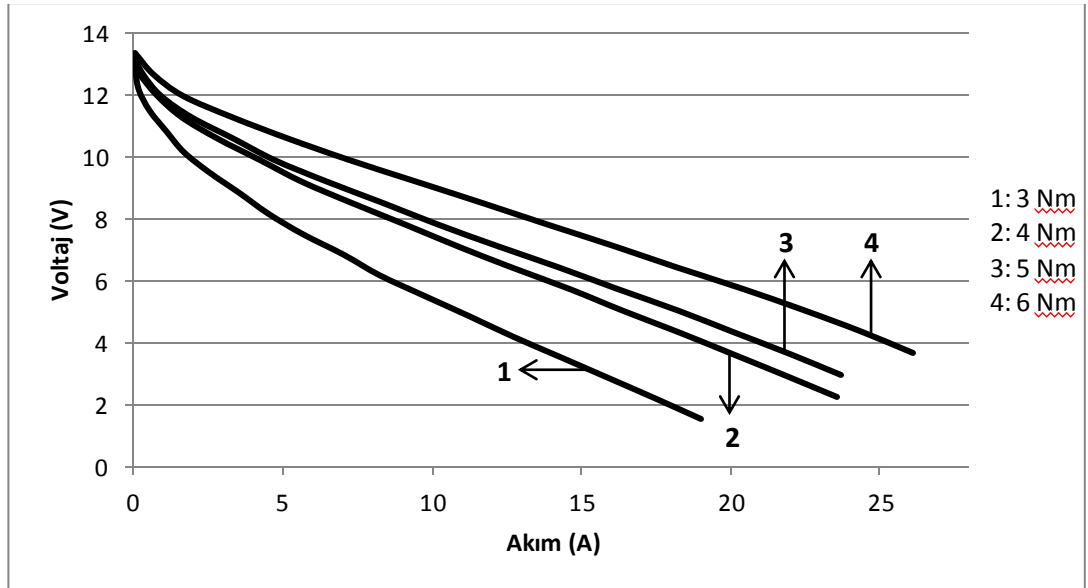
Şekil 4.42. Gaz difüzyon tabakalarının saçırtma sistemiyle 1 dakika platinle kaplanmasının zar elektrot montajı performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.41 ve 4.42 için  $H_2$ :0,24 NL/dk, Hava:0,60 NL/dk,  $T_{Yakit Pili}$ :70°C,  $P_{anot, katot}$  çıkışı: 2 bara ayarlandı, hava nemlenerek gönderildi,  $T_{hava}$ : 53°C)

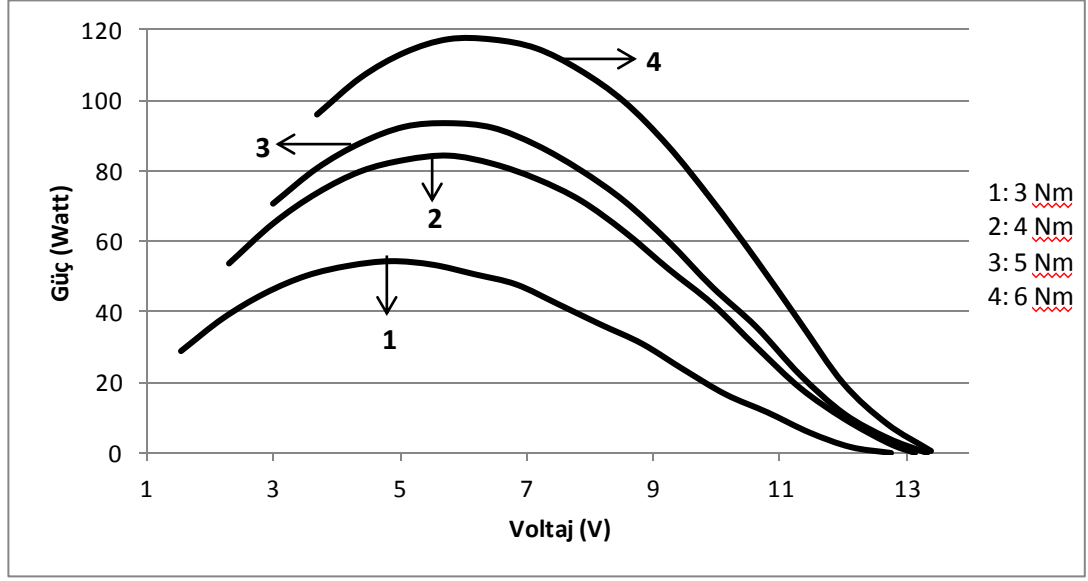
#### 4.7. Yakıt Pili Montajı Esnasında Sıkıştırma Miktarının Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili Performansı Üzerindeki Etkisi

Şekil 4.43-4.45'te görüldüğü üzere yakıt pilinin sıkıştırılma oranının performans üzerinde önemli ölçüde etkisi vardır. 3 Nm'den 6 Nm'ye kadar sıkıştırıldığında, her 1 Nm sıkıştırmada performansta artış gözlenmiştir. Artış belli bir oranı izlememektedir. Daha iyi montaj açık hücre voltajında kendini gösterir. Polarizasyon eğrisi daha yüksek bir voltaj değerinden başlar. Sıkıştırma oranı arttıkça da kontak direnci ve bu direnç yüzünden kaybedilen güç azalır. 3 Nm ile sıkıştırılan yakıt pilinde, 2. bölgede yani direnç kayıplarının etkin olduğu bölgede performanstaki düşüş eğiminin daha fazla sıkıştırılanlara oranla daha fazla olduğu bunu açıkça göstermektedir. Ayrıca zar elektrot montajları ve gaz difüzyon tabakaları sert ve esnemez malzemeler olmadığı için sıkıştırılma esnasında gaz kanallarının arasına doğru biraz girinti yaparlar. Bu girinti durumunda yüzeyleri kanallara doğru hafif

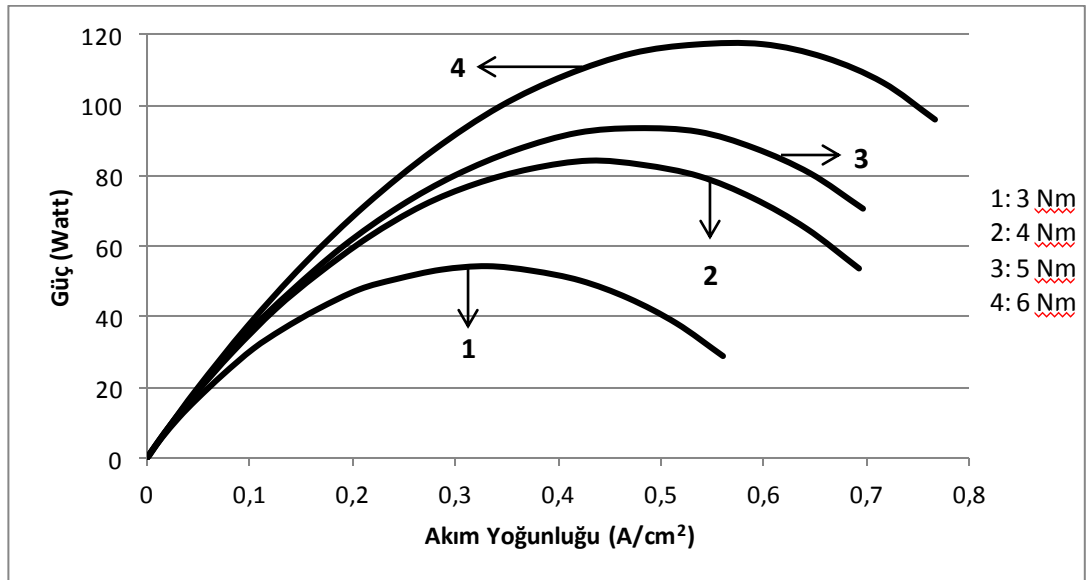
bombe yaparlar ve bu şekilde yüzey alanları gaz kanallarının alanlarından biraz daha fazla hale gelir. Ayrıca gaz kanallarının içerisine doğru biraz girdiklerinden bu kanalların hacminin biraz düşmesine neden olurlar. Aynı gaz miktarı daha az hacimli gaz kanallarına beslendiğinde kanal duvarlarına ve dolayısıyla zar elektrot montajı yüzeyine daha basınçlı şekilde temas eder. Daha yüksek basınçlarda zar elektrot montajına daha fazla gazın nüfuz edebilmesi, nüfuz eden gazların kataliz tabakasının daha derinlerine ilerleyebilmesi sebebiyle daha çok gazın katalizle etkileşip reaksiyona girmesi ve daha çok elektronun ve protonun hareketi sonucu yakıt pilinden elde edilen akımın ve gücün artması manasına gelmektedir. Ayrıca zar elektrot montajının katot tarafında oluşan suyun sıkıştırılma miktarıyla birlikte zar elektrot montajı tarafından daha çok emilmesi sağlanmakta ve daha az sıkıştırılan yakıt pilinde beslenen havayla birlikte dışarı atılan suya oranla daha az kayıp olmaktadır.



Şekil 4.43. Yakıt pili montajı esnasındaki sıkıştırma miktarının hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pili performansına etkisini gösteren voltaj-akım grafiği



Şekil 4.44. Yakıt pili montajı esnasındaki sıkıştırma miktarının hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pili performansına etkisini gösteren güç-voltaj grafiği



Şekil 4.45. Yakıt pili montajı esnasındaki sıkıştırma miktarının hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pili performansına etkisini gösteren güç-akım yoğunluğu grafiği

(Şekil 4.43, 4.44 ve 4.45 için H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0,6 amperlik fan, Basınçlandırma valfi açık kalma süresi: 0,5 sn, Kapalı kalma süresi: 4,0 sn)

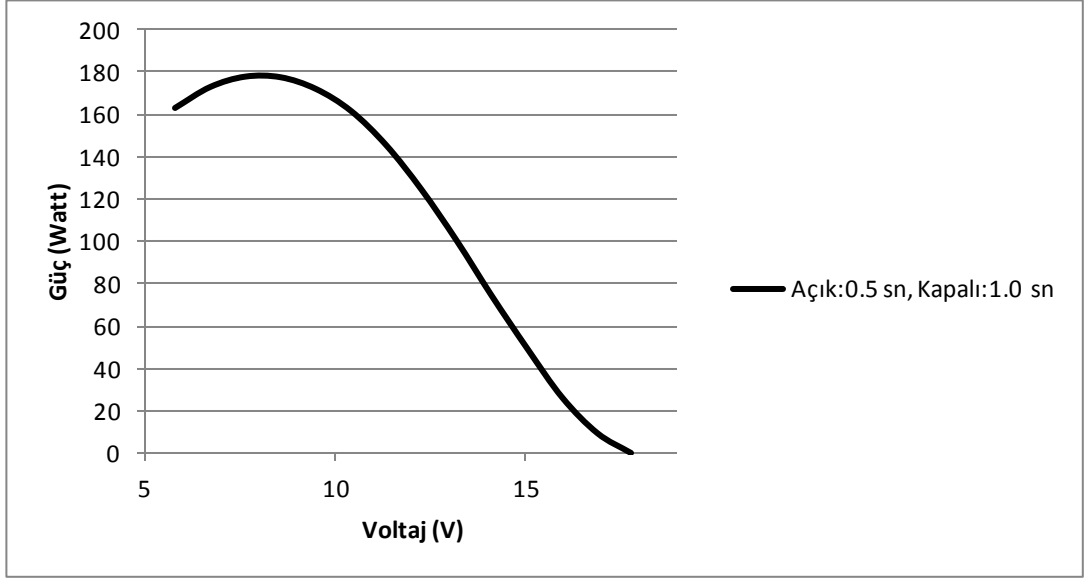
Hazırlanan hidrojen yakıt pili 3 Nm ile sıkıştırıldığında yakıt pilinden eşde edilen güç maksimum 4.84 V'da 54,5 W olmaktadır. 4, 5 ve 6 Nm ile sıkıştırıldığında ise aynı yakıt pilinden elde edilen güç miktarları sırasıyla 5,76 V'da 84,2 W, 5,76 V'da 93,5 ve 5,76 V'da 117,4 W'tır. Fark edildiği üzere maksimum gücün elde edildiği voltaj değeri 3 Nm ile sıkıştırma yapılan durum dışındaki sıkıştırmalarda aynı değeri göstermektedir. 15 hücreden oluşan hava soluyan tipi yakıt pilinde hücre başına düşen voltaj değeri 0,384 V'tur. Kapalı sistem, hidrojen ve oksijen gazının tanklardan ayrı ayrı borularla beslendiği durum, yakıt pillerinde maksimum güç değeri 0,5-0,6 V arasında gözlemlenmesine rağmen bu değer hava soluyan tipi yakıt pillerinde daha düşük bir değerde gerçekleşir.

#### **4.8. Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Hidrojen Yakıt Pilinde Basınçlandırma Valfinin Kullanılmasının Performansa Etkisi**

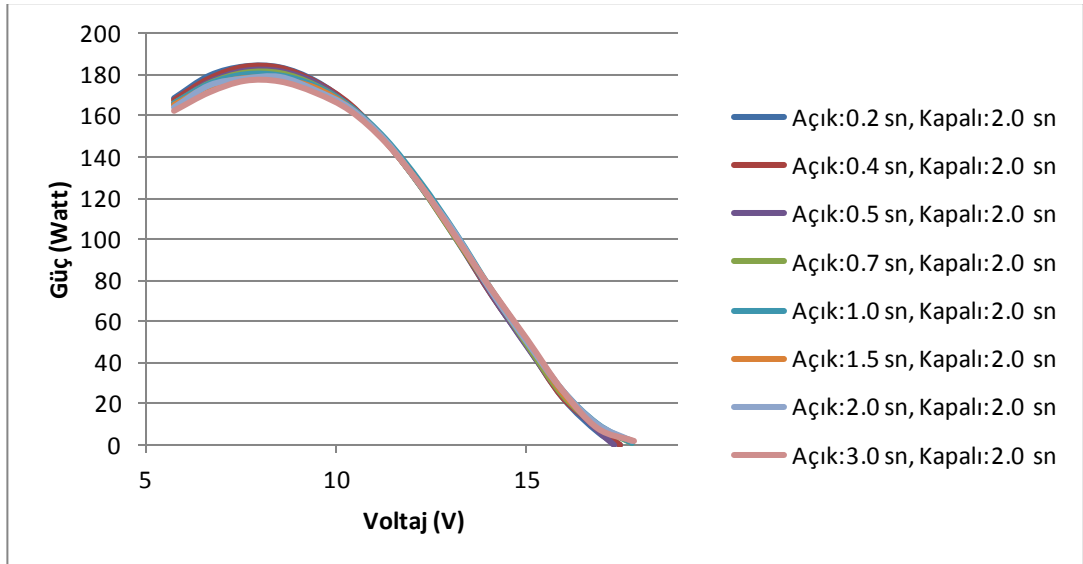
Hava soluyan tipi yakıt pillerinde basınçlandırma valfi kullanımının yakıt pilinin performansı üzerinde olumlu etkisi olduğu bilinen bir durumdur. Yakıt pilinin anot kanallarına beslenen hidrojeni basınçlandırmak amacıyla anot gaz çıkışına bir basınçlandırma valfi takılmasıyla oluşturulur. Valfa bağlanabilecek bir kontrol ünitesiyle valf istenen zaman aralıklarında açık kalıp, belirlenen süre boyunca da kapalı kalarak hidrojen gazının çıkışını engeller ve yakıt pilinin katot kanallarına hidrojen beslemesi sürdüğü için de basınçlandırma valfi kapalı olduğu durumlarda hidrojenin bu kanallarda basınçlanması sağlanır. Yakıt pili içerisinde basıncı artıran hidrojen gazı zar elektrot montajının kataliz tabakasına daha fazla nüfuz eder ve böylelikle daha fazla hidrojen gazının katalizle etkileşime girmesi sağlanır. Daha fazla gazın etkileşime girmesi de daha fazla reaksiyona yol açacağından devreden daha çok elektronun geçmesi sağlanarak oluşan akımın artmasına, böylelikle de yakıt pilinden elde edilen güç miktarında artışın gözlenmesine sebep olur. Fakat bu basınçlandırma işlemi için kullanılan basınçlandırma valfinin kapalı kalma süresi ile yakıt pilinin performansındaki artış arasında doğrusal bir ilişki yoktur. Hava soluyan

tipi yakıt pilinden en yüksek gücü elde edebilmek için basınçlandırma valfinin açık ve kapalı kalacağı sürelerin belirlenmesi gerekir. Çok uzun süre açık kalan valf hidrojen gazının yeterince basınçlanmasını engelleyeceğinden zar elektrot montajına nüfuz eden miktarının düşük seviyede kalmasına yol açıp elde edilecek performansın maksimum seviyenin altına düşmesine neden olacaktır. Ayrıca valfin kapalı kalma süresi de çok az tutulduğunda aynı etki gözlenecektir. Eğer valf çok kısa süre için açık bırakılır ve aynı zamanda uzun bir süre boyunca da kapalı tutulursa, başlangıçta kısa bir süre için maksimum elde edilebilecek güç seviyesine yaklaşılsa da bir süre sonra zar elektrot montajına yüksek basınçla yollanan hidrojen gazları katalizle yeterince etkili bir şekilde etkileşemeyecek, yüksek basınç nedeniyle hidrojen gazları zar elektrot montajına çok fazla kuvvet uygulayacağından zarın dayanımında meydana gelecek kayıp hızı artacak, hatta basınç aşırı yüksek bir noktaya ulaşırsa zar zorlanmaya ve delinmeye yol açabilme riski ortaya çıkacak, zar elektrot montajının sahip olduğu nem hidrojen gazının bu basıncı yüzünden montajın anot tarafından katot tarafına yönlenebilir ve bu yüzden zar elektrot montajının anot tarafındaki nemin azalması da anot tarafından katot tarafına proton taşınmasını olumsuz yönde etkileyecektir. Ayrıca yüksek basınç nedeniyle hidrojen gazının bir kısmı bu nem içerisinde çözünüp katot tarafına geçebilme durumu da söz konusu olabilmektedir. Basıncın fazla olması gaz sızdırmazlığın sağlanabilmesi için çekilen silikon contalara hidrojen gazının uyguladığı kuvvetin artmasına ve bu artış çok yüksek değerlere ulaştığında da contalarda açılma meydana gelmesine neden olabilmekte, bu nedenle de yakıt piline beslenen hidrojen gazı bu açıklıklardan sızarak performansta önemli kayıplara neden olabilmektedir. Bu nedenlerle basınçlandırma valfinin açık ve kapalı kalacağı en uygun sürelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Aşağıdaki grafiklerde kapalı kalma süreleri sabit tutularak açık kalma süreleri değiştirilen basınçlandırma valfinin hava soluyan tipi yakıt pili performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve yakıt pilinden en yüksek gücün elde edildiği durumda kapalı ve açık kalma süresi belirlenmiştir. Yapılan testlere göre ve Şekil 4.46-56'da da görülebildiği üzere hava soluyan tipi yakıt pilinden en yüksek gücün elde edildiği durumda basınçlandırma valfinin açık kalma süresi 0,5 sn ve kapalı kalma süresi 4,0 sn olarak bulunmuştur.

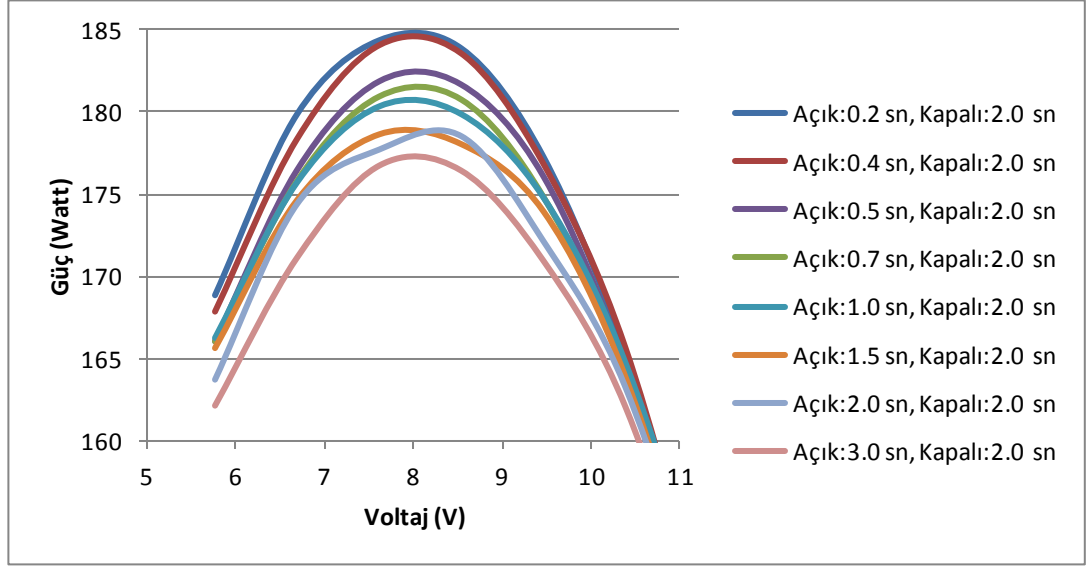




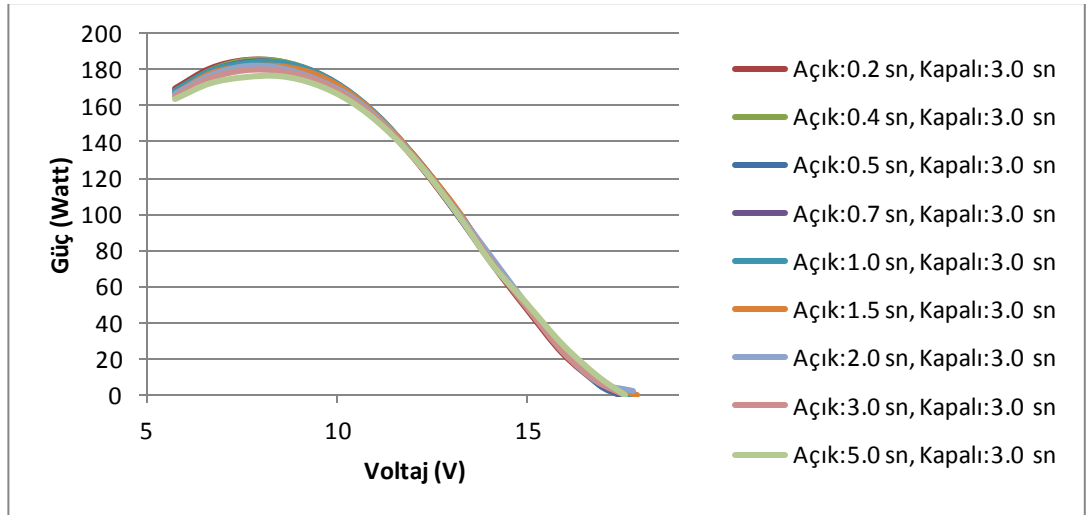
Şekil 4.46. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.5 sn, kapalı kalma süresi 1.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



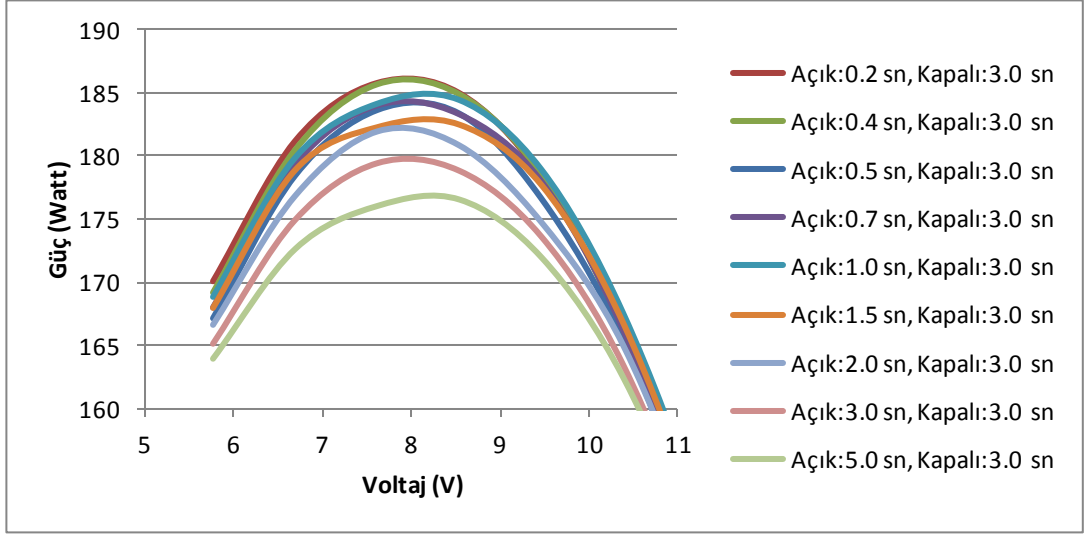
Şekil 4.47. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-3.0 sn, kapalı kalma süresi 2.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



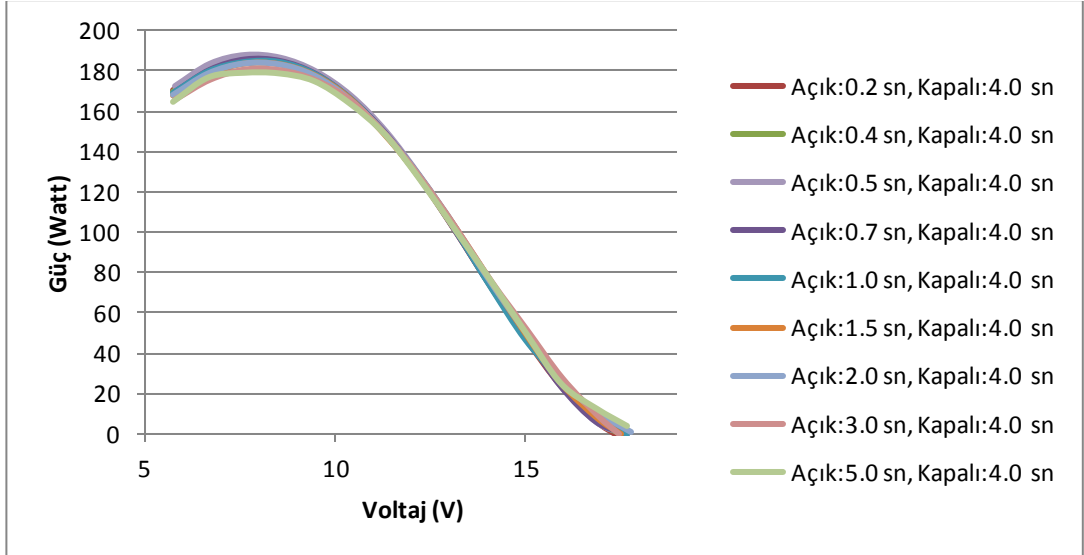
Şekil 4.48. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-3.0 sn, kapalı kalma süresi 2.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan) (büyütülmüş grafik)



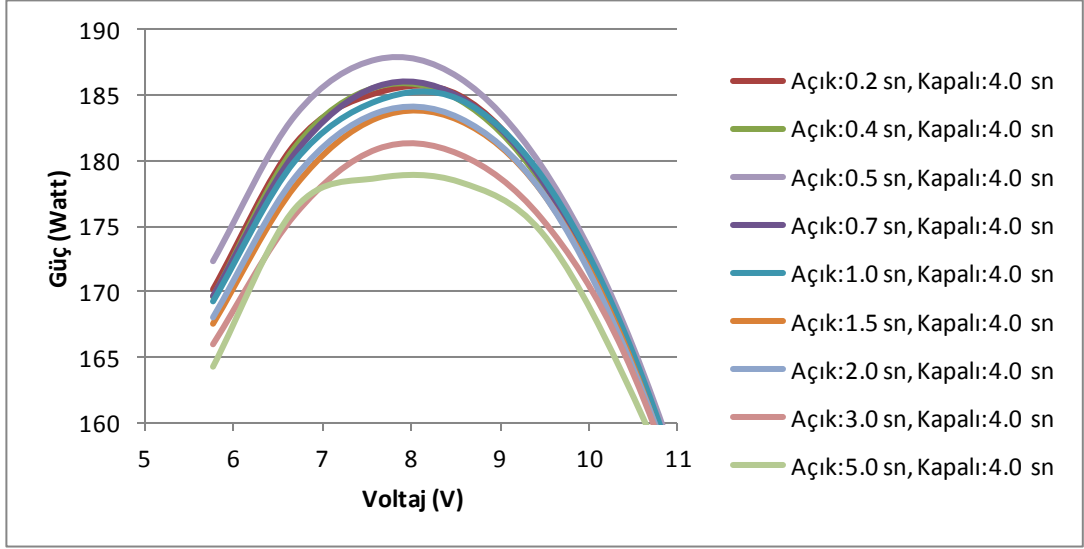
Şekil 4.49. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 3.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



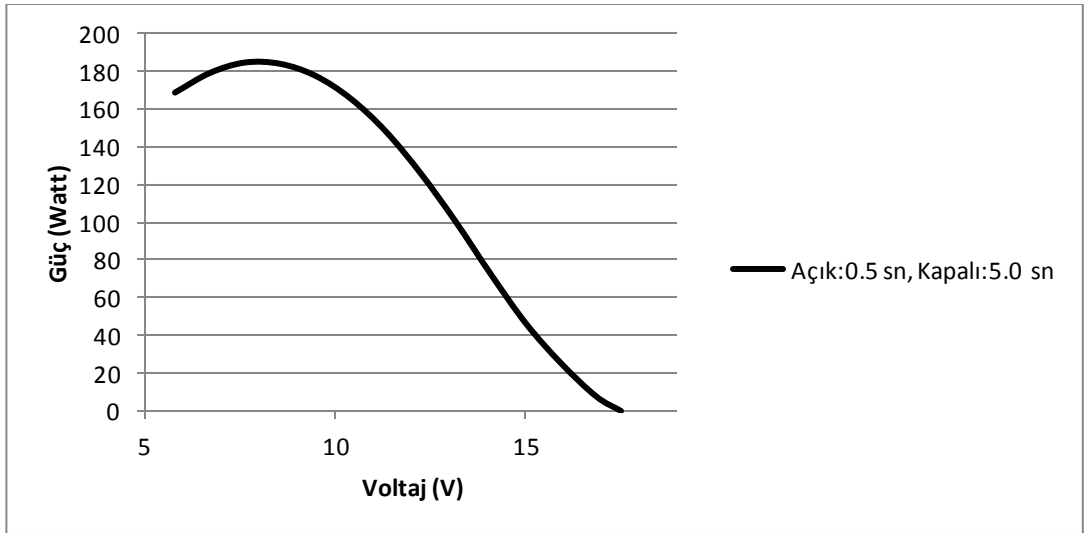
Şekil 4.50. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 3.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)  
(büyütülmüş grafik)



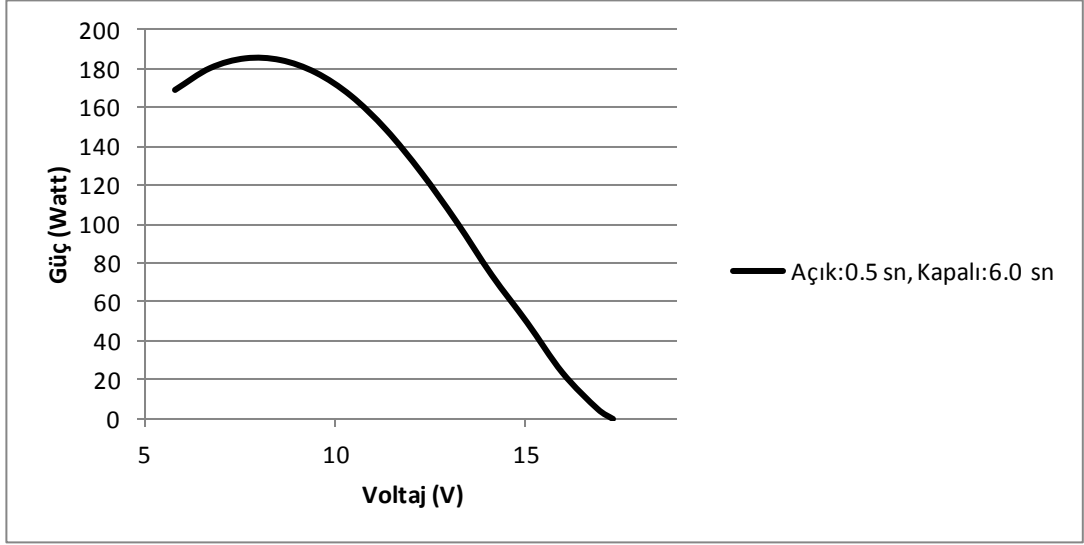
Şekil 4.51. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 4.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



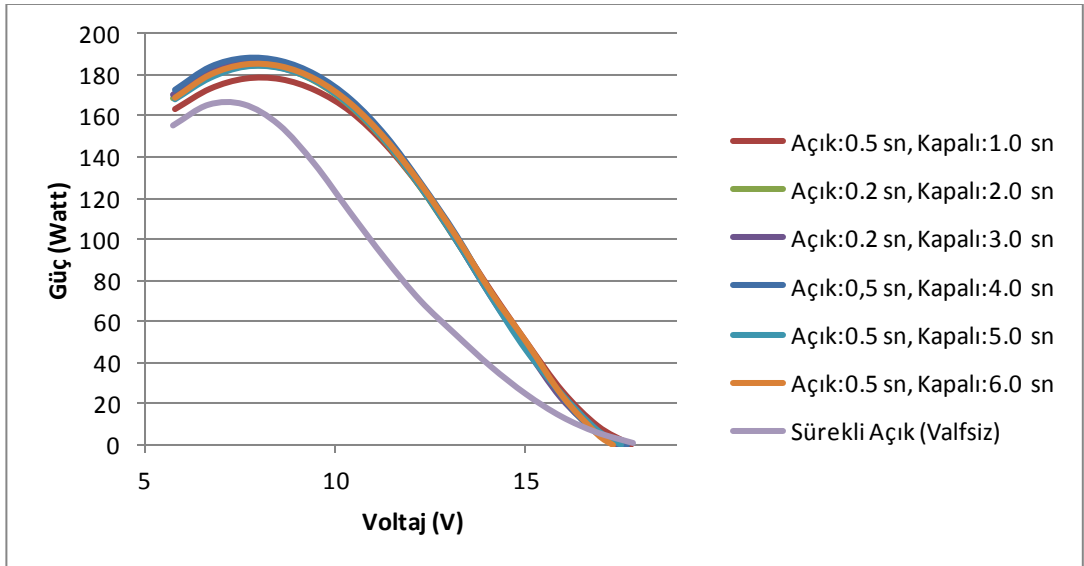
Şekil 4.52. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performans etkisi (valfin açık kalma süresi 0.2-5.0 sn, kapalı kalma süresi 4.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan) (büyütülmüş grafik)



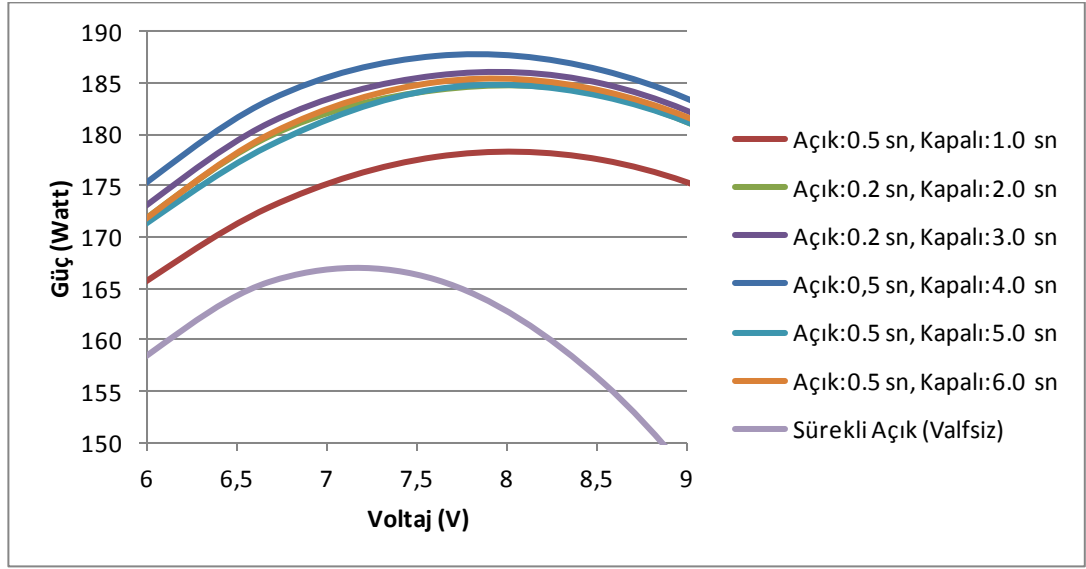
Şekil 4.53. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performans etkisi (valfin açık kalma süresi 0.5 sn, kapalı kalma süresi 5.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



Şekil 4.54. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 0.5 sn, kapalı kalma süresi 6.0 sn, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



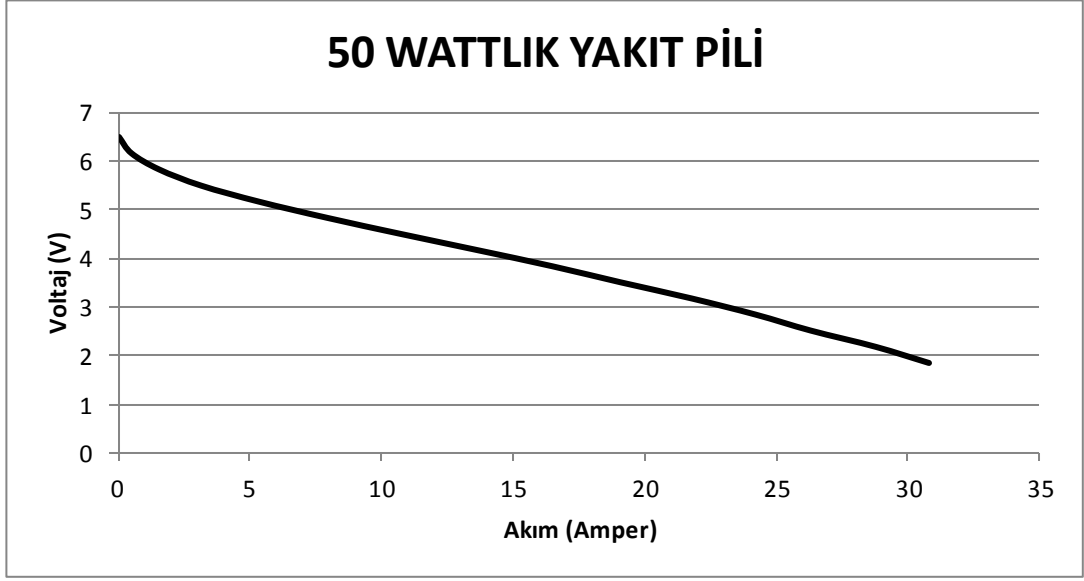
Şekil 4.55. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 1.0-6.0 sn aralığında değişen durumlarda elde edilen en yüksek performanslar, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan)



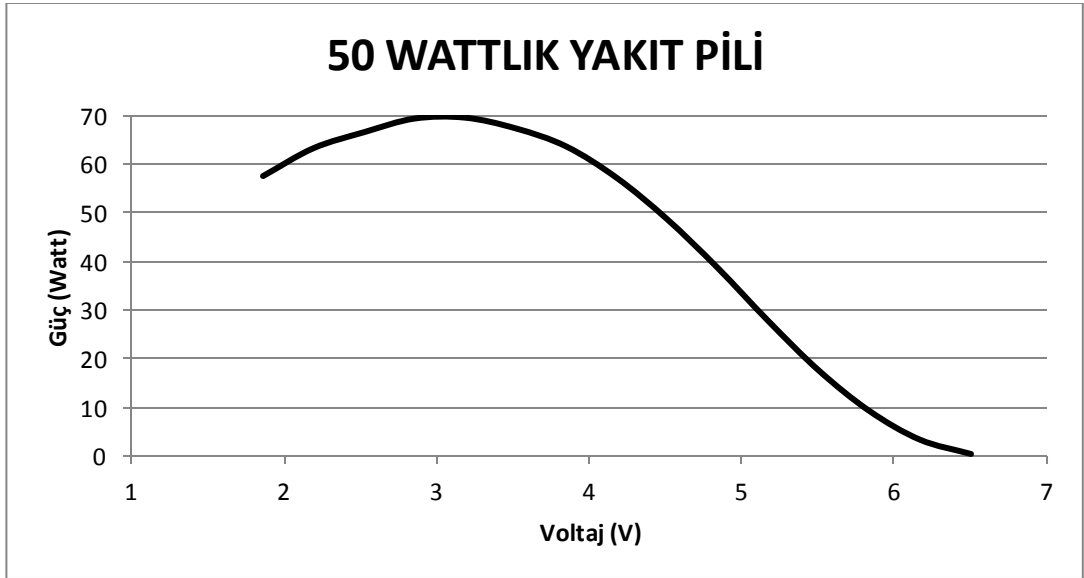
Şekil 4.56. Hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pilinde basınçlandırma valfinin kullanılmasının performansa etkisi (valfin açık kalma süresi 1.0-6.0 sn aralığında değişen durumlarda elde edilen en yüksek performanslar, H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0.6 Amperlik Fan) (büyütülmüş grafik)

#### 4.9. 50, 110 ve 150 W'lık Olarak Dizayn Edilen Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Hidrojen Yakıt Pili Performans Eğrileri

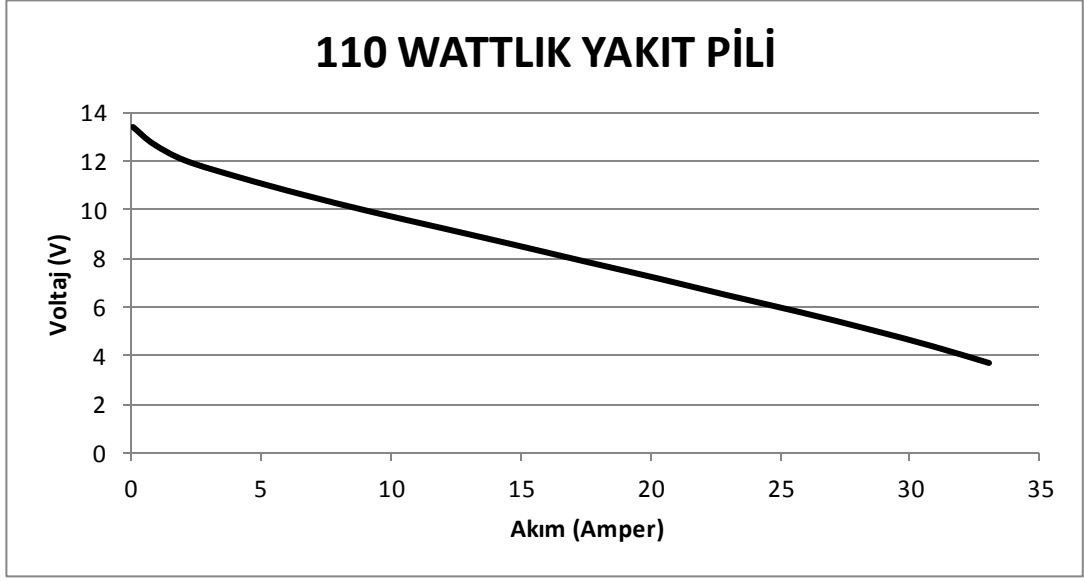
Ek bölümünde anlatılan patent başvurusundaki bilgi birikimi kullanılarak yapılan 50, 110 ve 150 W'lık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pillerinin, yakıt pillerinden maksimum güç elde edildiği andaki performans eğrileri 4.57-4.62'de görüldüğü gibidir. Yakıt pilleri sırasıyla 7, 15 ve 20'lik yığınlardan oluşmaktadır. Yığınlardaki her bir plakanın aktif alanı ise 34 cm<sup>2</sup>'dir. Yığın sayısı arttığında yığın başına düşen güç miktarında ciddi bir değişim görülmemektedir. 150 W olarak dizayn edilen yakıt pilinden elde edilen maksimum güç 200 W, maksimum güç yoğunluğu ise 294 mW/cm<sup>2</sup>'dir. Bu güç miktarına 7,6 Volt civarında ulaşan yakıt pilinden geçen akım miktarı yığın başına 26,3 amper ve her bir yığının sahip olduğu akım yoğunluğu da 0,77 A/cm<sup>2</sup>'dir.



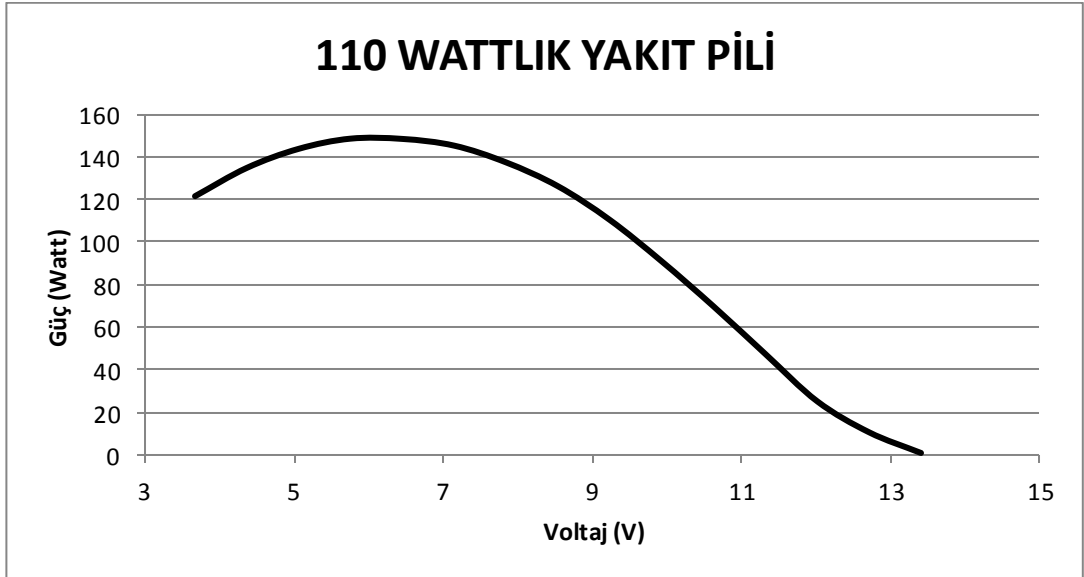
Şekil 4.57. 7 yığından oluşan 50 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren voltaj-akım grafiği



Şekil 4.58. 7 yığından oluşan 50 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren güç-voltaj grafiği

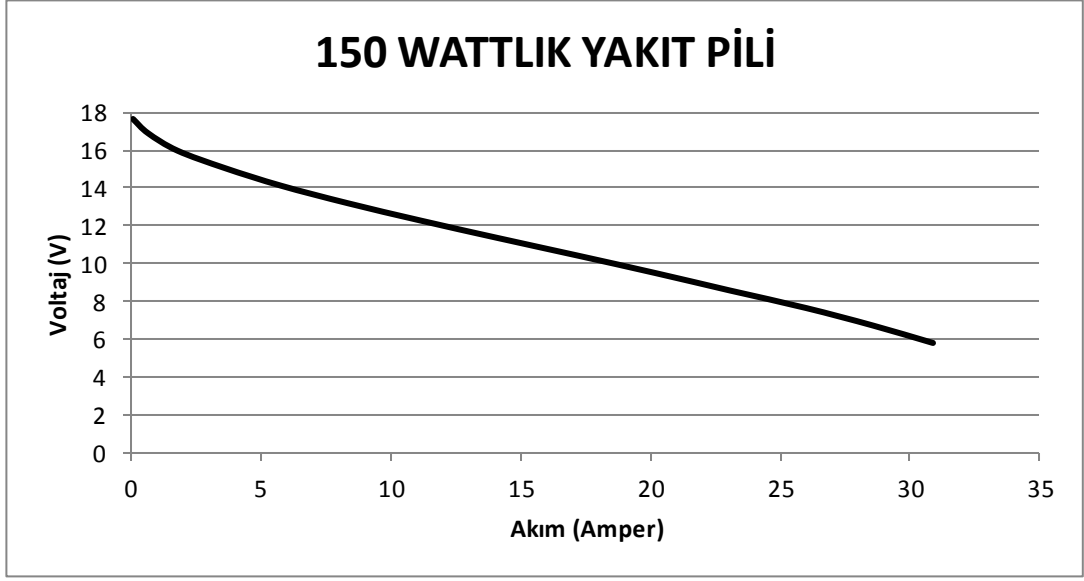


Şekil 4.59. 15 yığından oluşan 110 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren voltaj-akım grafiği

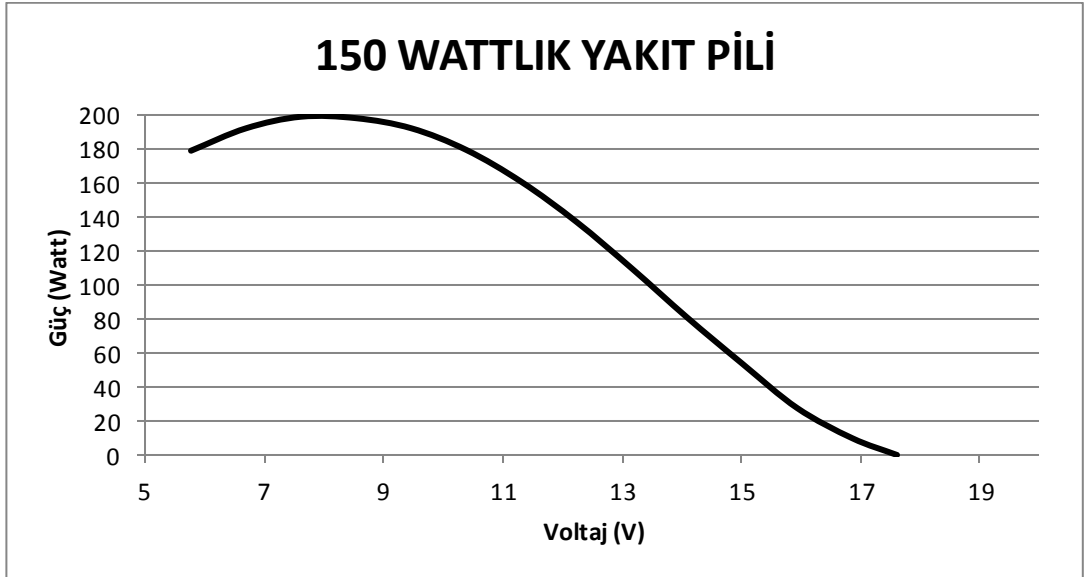


Şekil 4.60. 15 yığından oluşan 110 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren güç-voltaj grafiği





Şekil 4.61. 20 yığından oluşan 150 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren voltaj-akım grafiği



Şekil 4.62. 20 yığından oluşan 150 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansını gösteren güç-voltaj grafiği

(Şekil 4.57-4.62 için H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0,6 amperlik fan, Basınçlandırma valfi açık kalma süresi: 0,5 sn, Kapalı kalma süresi: 4,0 sn)

#### **4.10. NT Nanoteknoloji Firmasından Sağlanan Zar Elektrot Montajlarının ve Üretilen Hava Soluyan Tipi Proton Geçirgen Zarlı Hidrojen Yakıt Pili Performanslarının Zamana Karşı Değişimi**

NT-Nanoteknoloji firması tarafından sağlanan zar elektrot montajının koşullandırma yapıldıktan bir gün sonra hiçbir etki olmadan 0,5 V verilerek zamanla performansındaki değişim incelenmiş ve Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Aktif alanı 25 cm<sup>2</sup> olan zar elektrot montajının kullanıldığı yakıt pili çalıştırıldıktan bir buçuk saat sonra en yüksek akım değeri olan 18 ampere ulaşmış ve bu noktadan beş buçuk saat sonra da 16 ampere düşen bir eğim göstermiştir. Yakıt pilinin sağladığı güç miktarı da aynı noktalarda 9 W ve 8 W olarak ölçülmüştür. Yakıt piline herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamasına rağmen akımdaki artış nedeniyle kendiliğinden ısınmaya başlamış ve sıcaklığı arttıkça performansı artmıştır. Bu süreç içinde en yüksek 52°C’ye ulaşmış ve en son 49°C’ye düşmüştür. Yakıt pili en yüksek performansına ulaştığı noktada sonra sıcaklık yalnızca 49 ile 52°C arasında değişmiştir.

NT-Nanoteknoloji firması tarafından sağlanan zar elektrot montajlarına gaz difüzyon tabakaları iyonomerle yapıştırıldıktan sonra performanslarında zamana bağlı değişim incelenmiştir. İlk olarak gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajlarının kataliz tabakalarına yapıştırılan yakıt piline 0,4 V sabit voltaj verilmiş ve performansındaki değişim gözlenmiştir. Çalıştırılmasının hemen sonrasında 13,5 amper akım vermeye başlayan ve verdiği akım artmaya devam eden yakıt pili, yaklaşık 2 saat sonra 17 ampere ulaşmış ve sonraki 7 saat boyunca akım sabit olarak 17,3 amper civarında seyretmiştir. Yakıt pilinin sağladığı güç miktarı da çalıştırıldıktan 2 saat sonra 6,8 W’a ulaşmış ve sonraki 7 saat boyunca 6,9 W civarında güç sağlamaya devam etmiştir. Yakıt pilinin sıcaklığı da bu süreç boyunca 42 ile 43°C aralığında seyretmiştir.

Gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajlarına yapıştırılan yakıt piline bu sefer başlangıçtan itibaren sabit 0,6 V voltaj uygulanmış ve performans değişiminin zamanla nasıl olduğu incelenmiştir. Yakıt pilinin akımı başlangıçta 6,1 amperle başlamış ve 6 saat içerisinde bu değer 8,7 ampere kadar ilk iki saatlik süreç içerisinde hızlı, sonrasında ise çok daha yavaş olarak artmaya devam etmiştir. Bu zaman diliminde yakıt pilinin sağladığı güç miktarı akımdaki artışa paralel olarak seyretmiş ve 3,6 W'tan 5,2 W'a kadar çıkmıştır. Yakıt pilinin sıcaklığı ise akım ve güç miktarındaki değişimle bağlantılı olmayan şekilde 19,5°C ile 22,1 °C arasında değişmiştir.

Gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajlarına yapıştırılan yakıt piline başlangıçtan itibaren 0,5 V voltaj uygulandığında ise akım değeri 12 amperle başlayarak iki saat sonra 15,3 ampere ulaşmış ve sonraki 8 saat boyunca sabit kalmıştır. Bu süreç boyunca yakıt pilinin sağladığı güç miktarı da iki saat içinde 6 W'tan 7,7 W'a ulaşmış ve sonraki 8 saat boyunca da bu değeri korumuştur. Yakıt pilinin sıcaklığı da başlangıçta 35°C'ye çıkmış ve 2 saat sonra 43°C'ye ulaştıktan sonra 43 ile 44,5 °C arasında seyretmiştir.

Gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajlarına yapıştırılan yakıt pili ertesini gün daha da uzun süreli olarak çalıştırılmış ve bu süreç içinde performansında meydana gelebilecek değişimler gözlenmiştir. Yakıt pili 0,5 V voltajda 35,5 saat boyunca çalıştırılmıştır. Başlangıçtan bir buçuk saat sonra yakıt pilinin sağladığı akım değeri 15,4 ampere ulaşmış ve bu değer 35,5 saat sonunda 14,7 amper olarak okunmuştur. Bu zaman diliminde yakıt pilinden elde edilen güç miktarı ise 7,7 W'tan 7,3 W civarına düşmüştür. Sıcaklık ise bir buçuk saatte 23°C'den 43 °C'ye çıkmış ve sonraki 34 saat boyunca 43 ile 47,5 °C arasında seyretmiştir. 35,5 saat sonunda gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajına yapıştırılan yakıt pilinin performansındaki düşüş %4,55'tir. Performanstaki düşüşün bu kadar küçük olmasını sağlayan neden, gaz difüzyon tabakaları zar elektrot montajlarına yapıştırılan yakıt pillerinin performanslarının normal gaz difüzyon tabakalarının kullanıldığı zar elektrot montajları monte edilen yakıt pillerinin performanslarından daha düşük olmasına yol

Çizelge 4.1. Normal zar elektrot montajı ve gaz difüzyon tabakaları iyonomerle yapıştırılmış zar elektrot montajı performanslarının zamana bağlı değişimi

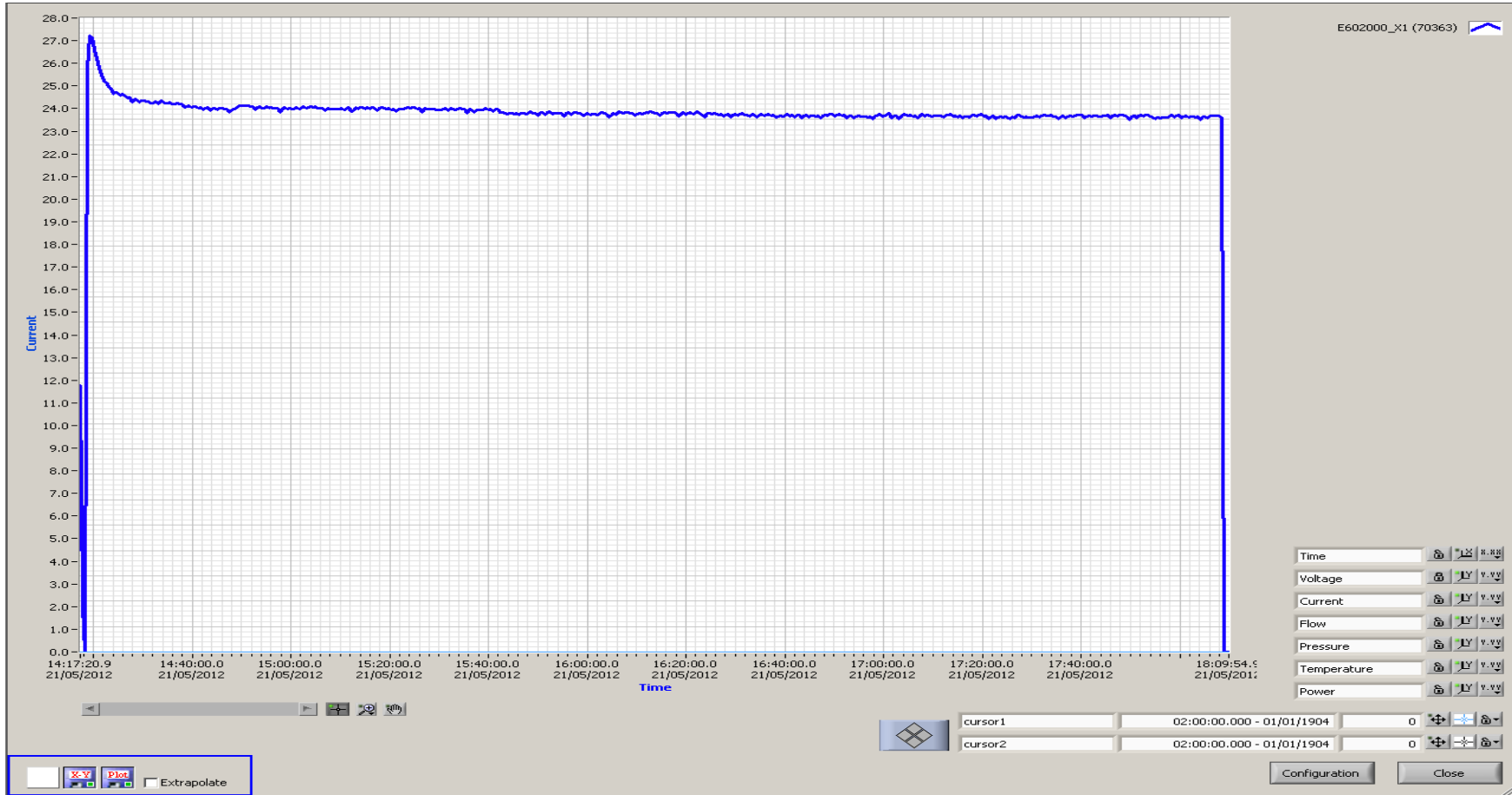
Zar Elektrot Montajı	Uygulanan Voltaj (V)	Maksimum Akım (A)	Maksimum Akıma Ulaşma süresi (saat)	Son Akım (A)	Çalışma Süresi (saat)	Hücre Sıcaklığı (°C)	Aktif Alan (cm <sup>2</sup> )	Kullanılan Hidrojen (NL/dk)	Kullanılan Hava (NL/dk)
Normal Zar Elektrot Montajı	0.5	18	1.5	16	7	49-52	25	0.12	0.30
Gaz Difüzyon Tabakası İyonomerle Yapıştırılmış Zar Elektrot Montajı	0.4	17	2	17	9	42-43	25	0.12	0.30
	0.5	15.3	2	15.3	10	43-44.5	25	0.12	0.30
	0.6	8.7	6 (İlk 2 saat içinde hızlı, sonraki 4 saat süresince yavaş artma olmuştur.)	8.7	6	19.5-22.1	25	0.12	0.30
	0.5	15.4	1.5	14.7	37	43-47.5	25	0.12	0.30

açan nedenle aynı şeydir. Yapıştırımda kullanılan iyonmer, daha önce 4. bölümde anlatıldığı nedenlerden dolayı performansta düşüğe neden olur fakat su tutuculuğu sayesinde ise zar elektrot montajının performansını uzun süre korumasını sağlar.

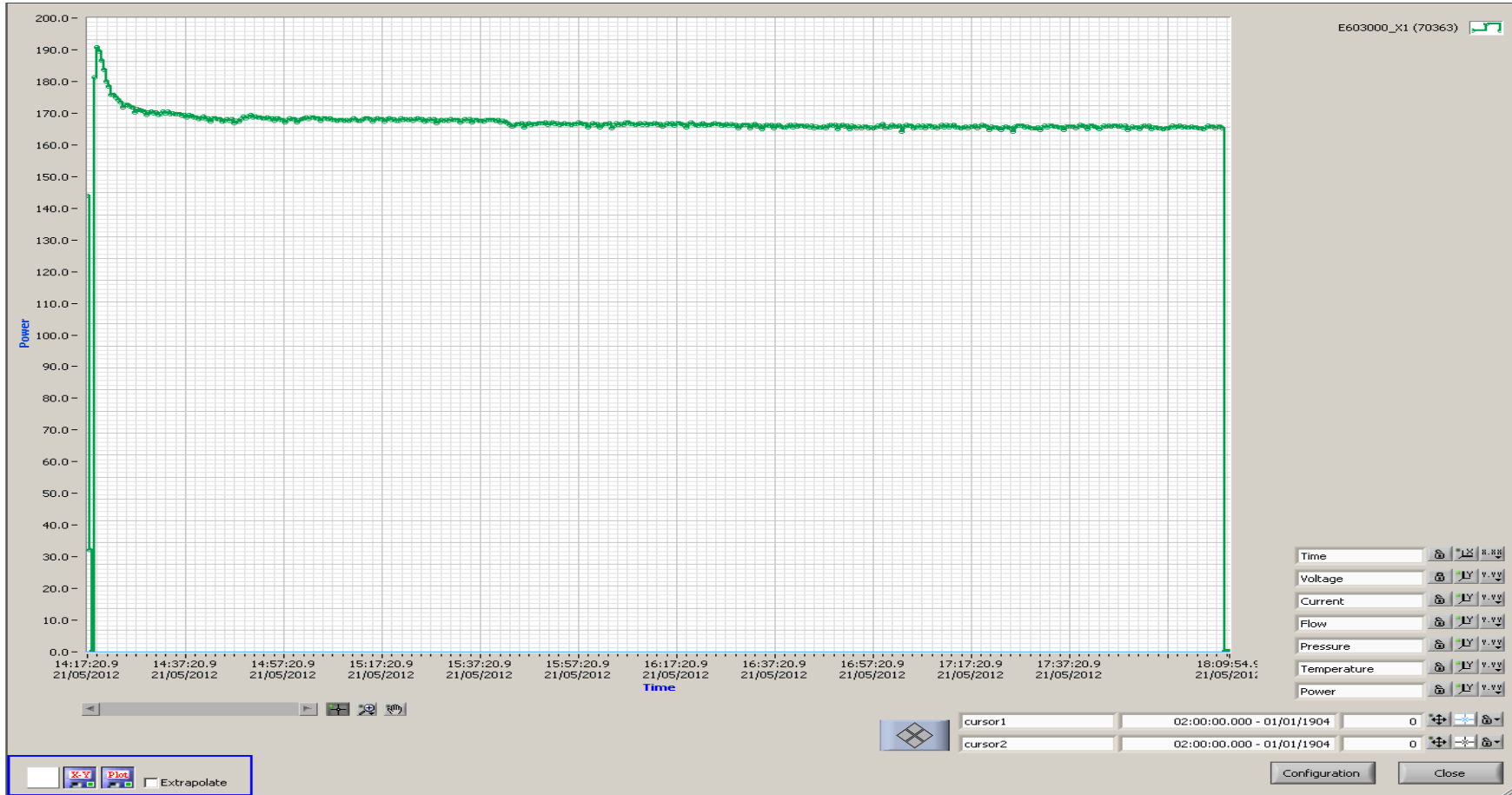
Ek bölümünde patent başvurusu anlatılan hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pilinin 150 W olarak dizayn edilen ve yığın başına 34 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip 20li yığından oluşan hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pilinin performansının zamanla değişimi incelenmiştir ve Şekil 4.63 ve 4.64'te gösterilmiştir. Hiçbir etki olmadan sadece 7 V voltaj uygulanan 150 W'lık 20li yığın, başlangıçtan hemen sonra 27 amperlik akım değerine ulaşmış ve yarım saat içinde de 24 ampere düşmüştür. Bunun ardından yaklaşık 3 buçuk saat sonunda da sadece 0,5 amper azalarak 23,5 amper seviyesine inmiştir. Bu süreçte yakıt pilinden elde edilen güç miktarı ise başlangıçta 190 W iken yarım saat sonra 168 W'a düşmüş ve 3,5 saat süresince de bu güç miktarını büyük ölçüde korumuş ve 3,5 saat sonunda sadece 3,5 W azalarak 164,5 W seviyesinde güç üretir durumda çalışmaya devam etmiştir.

(Şekil 4.63 ve 4.64 için H<sub>2</sub>:5 NL/dk, Hava:12 Volt, 0,6 amperlik fan, basınçlandırma valfi açık kalma süresi: 0,5 sn, kapalı kalma süresi: 4,0 sn)

(Dikey eksenler Current: Akım (Amper), Power: Güç (Watt), yatay eksen de zamanı gösterir.)



Şekil 4.63. 20 yıgından oluşan 150 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansının zamana bağılı değışimini gösteren akım-zaman grafiğı



Şekil 4.64. 20 yığından oluşan 150 Wattlık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansının zamana bağlı değişimini gösteren güç-zaman grafiği

## BÖLÜM 5

### 5. DEĞERLENDİRME

Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen proje kapsamında yapılan çalışmalarda elde edilen bilgilerle insansız hava araçlarında kullanılmak üzere 50, 110, 150 ve 200 W'lık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili yapılmış ve yakıt pilinin performansı ana olarak zar elektrot montajı performansına bağlı olduğundan, NT Nanoteknoloji firması tarafından sağlanan zar elektrot montajlarının performanslarının arttırılması çalışmaları yapılmıştır.

Farklı kalınlıklarda kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajları test edilmiş ve 25, 50 ve 75 µm kalınlığındaki kataliz tabakaları arasında en yüksek performansı 75 µm kalınlığında kataliz tabakaya sahip zar elektrot montajı vermiştir. Bu aralık içinde yakıt pili performansı kataliz tabaka kalınlığıyla birlikte artmaktadır.

Ağırlık altında farklı sıcaklıklarda sıkıştırılmanın zar elektrot montajını daha kompakt hale getireceğinden performansında değişme gözlenmesi beklenmiştir. 6.54 ve 12.42 MPa basınç altında, oda ve 60<sup>0</sup>C sıcaklıkta sıkıştırılan zar elektrot montajlarının performansları incelenmiş ve H<sub>2</sub>: 0.12 NL/dk, hava: 0.30 NL/dk koşullarında oda sıcaklığında 6.54 MPa ağırlık altında sıkıştırılan zar elektrot montajı en düşük performansı göstermiş, diğer üç durumda sıkıştırılanlar birbirine çok yakın sonuçlar göstermiştir. Fakat gazlar iki katına çıkarıldığında ise en yüksek performansı 60<sup>0</sup>C'de 6.54 MPa basınçla sıkıştırılan zar elektrot montajı göstermiştir.

Katot kataliz tabakasının saçınım sistemi kullanılarak platinle kaplanmasının, tabaka üzerindeki katalizör miktarında artış sağlayacağından performansta iyileşme beklenmekteydi. Fakat tabaka üzerinde film kaplama etkisi yapması nedeniyle zar elektrot montajı performansında düşüşe neden olmuştur.



Gaz difüzyon tabakalarının iyonomerle zar elektrot montajına yapıştırılmasının, zar elektrot montajının su tutuculuğunun artması sebebiyle performans artışına neden olması beklenirken, gaz difüzyon tabakasının gaz geçirgenliğini azaltması ve hidrofobik yapısını düşürerek oluşan suyun zar elektrot montajının anot tarafına yönlendirmesine engel olduğundan, performansta düşüş gözlenmiştir.

Gaz difüzyon tabakalarının kataliz karışımıyla zar elektrot montajına yapıştırılmasının, kataliz miktarındaki artış nedeniyle performansı arttırması beklenirken, yapıştırma işleminin iyonomerle yapıldığı durumdaki benzer nedenlerle zar elektrot montajının performansı düşmüştür. Ayrıca katottaki reaksiyonun zar elektrot montajı kataliz tabakasından daha yukarda, gaz difüzyon tabakasinda gerçekleşmeye başlaması ve bu nedenle anotta oluşan protonların katotta bu reaksiyona katılabilmeleri için daha fazla mesafe kat etmeleri gerekliliği performanstaki düşüğe katkı sağlamıştır.

Gaz difüzyon tabakalarının saçınım sistemi kullanılarak platinle kaplanmasının zar elektrot montajlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve performansta düşüğe neden olduğu görülmüştür. Tabakaların gaz geçirgenliğini azaltması ve katottaki reaksiyonun ilk olarak katot gaz difüzyon tabakasinda başlaması nedeniyle anottaki protonun bu reaksiyona katılması için aşması gereken yol uzamış, bu da performans kayıplarını arttırmıştır.

Ayrıca zar elektrot montajı çalışmalarına ek olarak, üretilen hava solumalı proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansı üzerinde yakıt pilinin montajı sırasındaki sıkıştırma miktarının, yakıt pilinin çalışması esnasında basınçlandırma valfinin kullanılmasının ve bu basınçlandırma valfinin açık ve kapalı kalma sürelerinin hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı hidrojen yakıt pili performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve üretilen yakıt pilinin performansının zamana karşı değişimi gözlenmiştir.

3-6 Nm aralığında yakıt pilinin performansı sıkıştırma miktarıyla birlikte artmaktadır. Basınçlandırma valfi kullanılmasının da performans üzerinde arttırıcı

etkisi olduğu gözlemlenmiş ve en uygun valf açık-kapalı kalma süreleri 0.5-4.0 saniye olarak bulunmuştur.

Üretilen yakıt pillerinden 150 W'lık dizayn edilen yakıt pilinin performansının zamana göre değişimi incelenmiş ve başlangıçta 190 W güç üreten bu yakıt pili yarım saat sonra 168 W'a düşmüş ve bu noktadan sonraki 3.5 saatlik çalışma süresinin sonunda sadece 3.5 Wazalarak 164.5 W güç üretmeye devam etmiştir.

Yapılan bu çalışmalar sonucu üretilen 200 W'lık hava soluyan tipi proton geçirgen zarlı yakıt pilinin özellikleri, sektöründe lider firmaların ürettikleri yakıt pillerinin ağırlık-hacim-performans kıyaslamalarıyla yarışabilecek seviyede olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.1. Sektöründe lider firmaların ürettikleri yakıt pilleri ve kendi ürettiğimiz yakıt pili arasındaki ağırlık-hacim-performans kıyaslamaları [88,89]

Özellikler	Horizon Aeropak	Energyor Epod	TOBB ETÜ
Güç –Akım- Voltaj	200 W -10 A -20-32 V	310-370W - 32-45 V	200 W /10 A -20-35 V
Yakıt Pili ağırlığı -Hacmi	470 g-1.2 L	3950 g (hidrojen depolama +su)	500-600 g-1.1L
Bor Hidrür kartuş sistemi Ağırlığı- Hacmi	1150 g kuru , 3030g (sulu) - 2.2 L Kuru , 3.7L (sulu)		1000 g kuru , 2900g (sulu) - 2.0 L Kuru , 3.5L (sulu)

## BÖLÜM 6

### 6. GELECEK ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak, yakıt pili performansının artırılması ve insansız hava araçlarında kullanılması konusunda gelecekte aşağıdaki çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

-Zar elektrot montajları performansını arttırmaya yönelik yeni çalışmalar

-Zar elektrot montajlarında kullanmaya yönelik yüksek performanslı zar yapımı

-İnsansız hava uçağı için hava soluyan tipi yakıt pilinin performansının artırılması amacıyla kanal geometrisi ve plaka boyutları üzerinde optimizasyonlar yapılması

-Üretilen yakıt pillerinin insansız hava araçlarına uyarlanması ve montajının yapıpı test edilmesi

-İnsansız hava aracına monte edilen yakıt pilinin dayanımının ve ağırlık-hacim-performans özelliklerinin optimize edilmesi

-İnsansız hava araçlarında kullanılacak olan yakıt pilleri için yeni bor hidrür kartuş sistemlerinin yapılması planlanmıştır.

Özellikle bor hidrür bileşiklerinin, Çizelge 6.1'deki hidrojen kaynaklarının avantaj ve dezavantaj kıyaslarında yüksek volumetrik ve kütleli hidrojen yoğunluğu konusunda diğer hidrojen kaynaklarına olan üstünlüğü nedeniyle bor hidrür kartuş yapımı konusuna ağırlık verilerek yeni kataliz morfolojilerinin dizayn edilmesi ve üretilmesi, üretilen kataliz sistemlerinin kullanıldığı sodyum (ve kalsiyum) bor hidrür ve amonyum boran kartuş dizayn edilmesi ve üretimlerinin yapılması, başlangıç malzemesi olarak bor içeren farklı bileşiklerin kullanılması ve kataliz sistemlerinin optimize edilmesi, sodyum (ve kalsiyum) bor hidrür ve amonyum boran kartuşlarını

elektrikli araçlarda ve özellikle sivil ve askeri amaçlı kullanım potansiyeli yüksek insansız hava araçları için elektrik ihtiyacını karşılamada kullanılan hidrojen yakıt pillerine hidrojen besleyici sistem olarak kullanılmak üzere optimize edilmesi ve sodyum (ve kalsiyum) bor hidrürün veya amonyum boranın depoladığı hidrojenin bağlı olduğu güç sistemine beslemesi sonrasında, kartuşta geriye kalan sodyum (ve kalsiyum) boratı hidrojen depolayıcı olarak tekrar kullanılabilir hale getirmek ve bu şekilde sodyum (ve kalsiyum) bor hidrür ve amonyum boran kartuşların tekrar tekrar kullanılabilir özellikte olmasının sağlanması üzerine çalışmaların sürdürülmesi planlanmaktadır.

Çizelge 6.1. Hidrojen kaynaklarının avantaj ve dezavantajları

<b>Tip</b>	<b>Avantaj</b>	<b>Dezavantaj</b>
Sıvılaştırılmış veya sıkıştırılmış hidrojen	<u>Doğrudan</u> Kullanım	<u>Düşük</u> Kütleli Hidrojen Yoğunluğu, <u>Düşük</u> Volumetrik Hidrojen Yoğunluğu, <u>Düşük</u> hidrojen kinetiği
Metal Hidrür	<u>Yüksek</u> Volumetrik Hidrojen Yoğunluğu	<u>Düşük</u> Kütleli Hidrojen Yoğunluğu, <u>Düşük</u> hidrojen kinetiği
Organik Bileşikler	<u>Yüksek</u> Volumetrik Hidrojen Yoğunluğu	<u>Fosil yakıtı bağımlılık devam ediyor.</u>
(Kompleks) Kimyasal hidritler	<u>Yüksek</u> Volumetrik Hidrojen Yoğunluğu, <u>Yüksek</u> Kütleli Hidrojen Yoğunluğu	<u>Yapı-Özellik-Performans ilişkilerinin yeterince iyi bilinmemesi</u>

## KAYNAKLAR

- [1] Bradley, T. H., 2008, Modeling, Design and Energy Management of Fuel Cell Systems for Aircraft, Doktor Tezi, Georgia Institute of Technology, Makine Mühendisliği, Georgia
- [2] Royal Commission on Environmental Pollution, The environmental effects of civil aircraft in flight, 2002
- [3] Penner, J.E., Lister, D., Griggs, D.J., Dokken, D.J., and McFarland M., Aviation and Global Atmosphere, Cambridge University Press, 1999
- [4] Cadou, C., Moulton, N., and Menon, S., "Performance measurement and scaling in small internal combustion engines," AIAA Paper 2003-671, Jan. 2003
- [5] Hendrickson, S.P., "A miniature powerplant for very small, very long range autonomous aircraft," Insitu Group, Bingen, Washington, 1999
- [6] HATZ Motorenfabrik GmbH, "1B20 Engine Specification Sheet," <http://www.hatz-diesel.de/index.php?id=72&L=1>, erişim tarihi 5 Ağustos 2012
- [7] Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Fuller, T., Parekh, D.E., and Mavris, D. "Hardware in the loop performance simulation for a fuel cell unmanned aerial vehicle," submitted to AIAA Journal of Propulsion and Power, 2008
- [8] Bradley, T.H., Moffit, B., Mavris, D., and Parekh, D.E., "Development and Experimental Characterization of a Fuel Cell Powered Aircraft," Journal of Power Sources, Vol. 171, 2007, 793-801
- [9] Mitlitsky, F., Myers, R. And Weisberg, A.H. "Lightweight pressure vessels and unutilized regenerative fuel cells," Proceedings of the 1996 Fuel Cell Seminar, Kissimmee, Florida, Haziran 1996
- [10] Aceves, S.M., Berry, G.D., and Rambach, G.D., "Insulated pressure vessels for hydrogen storage on vehicles," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 1, 1998, 583-591
- [11] Peschka, W., Liquid Hydrogen, Fuel of the Future. Springer-Verlag. Vienna, Austria, 1998

- [12] Sullivan, R. M., Palco, J.L., Tornabane, R. T., Bednarczyk, B.A., Powers, L.M., Mital, S.K., Smith, L.M., Wang, X.-Y.J., ve Hunter, J.E., “Engineering analysis studies for preliminary design of lightweight cryogenic hydrogen tanks in UAV applications,” NASA/TP-2006-214094, 2006
- [13] US Department of Energy, “Hydrogen, fuel cells and infrastructure Technologies plan: Multi-year research development and demonstration plan”, 2007
- [14] Moore, R.M., Gottesfeld, S., and Zelenay, P., “A fuel control strategy that optimizes the efficiency of a direct-methanol fuel cell in automotive application,” Society of Automotive Engineers Paper 1999-01-2913, Haziran 1999
- [15] Crumm, A., “Solid Oxide Fuel Cell Systems,” Proceedings of the Fuel Cell Seminar, Honolulu, HI, Kasım 2006
- [16] Schaffer, S., “Development update on Delphi’s SOFC system,” SECA Program Review, Boston, MA, 2004
- [17] Dillon, R., Srinivasan, S., Arico, A. S., ve Antonucci, V., “International activities in DMFC R&D: Status of Technologies and potential applications,” in Fuel Cells Compendium (Brandon, N. P., ve Thompsett, D., Ed.), Elsevier Science, 2005
- [18] Venturi, M., Kallio, E., Smith, S., Baker, J., ve Dhand, P., “Recent results on liquid fuelled APU for truck application,” SAE Transactions, Vol. 112, No. 2, 2003, 11-17
- [19] Sanyo Electric Company Ltd., “Lithium polymer rechargeable batteries,” Product Literature, Ekim 10, 2002
- [20] Himansu, A., Freeh, J.E., Steffen, C. J., Tornabene, R. T., ve Wang, X.-Y. J., “Hybrid solid oxide fuel cell/gas turbine system design for high altitude long endurance aerospace missions,” NASA/TM-2996-214328, 2006
- [21] Barbir, F., PEM Fuel Cells: Theory and Practice, *Elsevier Academic Press*, 2005
- [22] Mench, M. M., Fuel Cell Engines, *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey, 2008

- [23] Larminie, J., ve Dicks, A., Fuel Cell Systems Explained Second Edition, *John Wiley & Sons Ltd*, West Sussex, 2003
- [24] F. S. Sterrett, Alternative Fuels and Environment (CRC Press, Boca Raton, FL, 1994)
- [25] R. L. Bechtold, Alternative Fuels Guidebook (Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1997)
- [26] J. M. Bowden and J. M. Norbeck, Hydrogen Fuel for Surface Transportation (Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1996)
- [27] International Energy Agency, Hydrogen & Fuel Cells: Review of National R&D Program (Organisation for Economic Co-operation and Development, France, 2004)
- [28] The Hydrogen Fuel Alternative”, G. W. Crabtree and M. S. Dresselhaus, *MRS Bulletin* 33 (Nisan), 421-428 (2008)
- [29] D. J. Ludlow, C. M. Calebrese, S. H. Yu, C. S. Dannehy, D. L. Jacobson, D. S. Hussey, M. Arif, M. K. Jensen, and G. A. Eisman, *J. Power Sources*, 162, 271 (2006)
- [30] “Hydrogen program overview”, S. Satyapal, 2009 DOE Hydrogen Program and Vehicle Technologies Program, 2009 Annual Merit Review Proceedings (2009), [http://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review09\\_proceedings.html](http://www.hydrogen.energy.gov/annual_review09_proceedings.html), erişim tarihi: 5 Ağustos 2012
- [31] Report of the DOE Basic Energy Sciences Workshop on the Hydrogen Production, Storage, and Use (May 2003), <http://www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf>, erişim tarihi: 5 Ağustos 2012
- [32] Khudhayer, W. J., 2011, Nanostructured Catalyst Materials for Next Generation Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cells, *Doktora Tezi*, The George W. Donaghey College of Engineering and Information Technology, Sistem Mühendisliği, Arkansas
- [33] Wade, N. R., 2009, Gas Distribution in PEM Fuel Cell Stacks Using Individual Reactant Feed for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Applications, Yüksek Lisans Tezi, Howard University, Makine Mühendisliği, Washington

- [34] Scholta, J., Escher, G., Zhang, W., Kuppers, L., Jorissen, L., and Lehnert, W., Investigation on the Influence of Channel Geometries on PEMFC Performance, *Journal of Power Sources*, Vol. 155, 2006, 66–71
- [35] Z. Qi and A. Kaufman, Improvement of Water Management by a Microporous Sublayer for PEM Fuel Cells, *J. Power Sources*, 109 (1), 38, 2002
- [36] Gottesfeld, S., and Zawodzinski T., *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, Vol. 5, p. 244-249, Weinheim, Wiley-VCH (1997)
- [37] Kordesch, K., ve Simader, G., *Fuel Cells and Their Applications*, Weinheim, VCH (1996)
- [38] Gottesfeld, S., and Zawodzinski T., *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, Vol. 5., p. 198-203, Weinheim, Wiley-VCH (1997)
- [39] Raistick, I. D., “Proceeding of Symposium on Diagrams, Separators, and Ion Exchanged Membrane,” Zee, J. W. V., White, R. E., Kinoshita, K., and Burney, H. S. (Eds.), *The Electrochemical Society, Inc.*, Pennington, New York (1986)
- [40] Wang, X., 2010, Experimental and Modeling Studies of Two-Phase Flow in Porous Media and Its Effects on the Performance of a PEM Fuel Cell, *Doktora Tezi*, University of Kansas, Chemical & Petroleum Engineering and the Graduate Faculty of the University of Kansas School of Engineering, Kansas
- [41] Friedman, R., 2008, Optimization of the Cathode Catalyst Layer Composition of a PEM Fuel Cell Using a Novel 2-Step Preparation Method, *Yüksek Lisans Tezi*, University of Kansas, Chemical & Petroleum Engineering and the Graduate Faculty of the University of Kansas School of Engineering, Kansas
- [42] Hoogers, G., *Fuel Cell Technology Handbook*, p. 6-2, Boca Raton, CRC Press LLC (2003)
- [43] Kocha, S.S., Principles of MEA preparation, *Handbook of Fuel Cells, Technology and Applications*, Vol. 3, Chapter 43, p. 544-550, John Wiley & Sons (2003)



- [44] Larminie, James, Dicks, Andrew, Fuel Cells Explained, Second Edition, John Wiley & Son, 2003
- [45] Springer, T. E., Zawodzinski T. A. ve Gottesfeld, S. Polymer Electrolyte Fuel-Cell Model, J. Electrochem Soc., 138 (8), 2334, 1991
- [46] NASA, "Past Project ERAST- Pathfinder/Pathfinder Plus," <http://www.nasa.gov/centers/dryden/history/pastprojects/Erast/pathfinder.htm>  
\_erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [47] Youngblood, J. W. ve Talay, T. A., "Solar-Powered Airplane Design for Long-Endurance, High-Altitude Flight," in 2nd International Very Large Vehicles Conference, Washington, D. C., AIAA-1982-811, Mayıs 17-18, 1982
- [48] Colozza, A. J., "Effect of Power System Technology ve Mission Requirements on High Altitude Long Endurance Aircraft," NASA Contractor Report 194455, Şubat, 1994
- [49] Noll, T. E., Brown, J. M., Perez-Davis, M. E., Ishmael, S. D., Tiffany, G. C., ve Gaier, M., "Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap, Volume I: Mishap Report," NASA, Hampton, VA, Ocak, 2004.
- [50] Moffitt, B. A., A Methodology for The Validated Design Space Exploration of Fuel Cell Powered Unmanned Aerial Vehicles, *Doktora Tezi*, Georgia Institute of Technology, School of Aerospace Engineering, Arkansas
- [51] DORNHEIM, M. A., "Fuel Cells Debut," Aviation Week and Space Technology, vol. 158, no. 22, p 52, Haziran 2, 2003
- [52] "UAS Advanced Development: Hornet," AeroVironment, <http://www.avinc.com/uas/adc/hornet/>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [53] "AeroVironment Flies World's First Hydrogen Powered Plane," Fuel Cells Bulletin, vol. 2005, no. 9, 2-3, 2005.
- [54] "Betriebsanleitung für das brennstoffzellenbetriebene Modellflugzeug," FHWiesbaden, 2005.
- [55] Kellogg, J. C., Monforton, L., White, D., ve Vick, M., "Fuel Cells for Micro Air Vehicles," in Joint Service Power Expo, Tampa, FL, Mayıs 5, 2005

- [56] LEBRECHE, T., "Solid Oxide Fuel Cell Power Systems for Small UAVs," in Joint Service Power Expo, Nisan 24-26, 2007.
- [57] Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Parekh, D. E., ve Mavris, D., "Test Results for a Fuel Cell-Powered Demonstration Aircraft," in Society of Automotive Engineers Power Systems Conference, New Orleans, LA, Kasım 7-9, 2006.
- [58] Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Parekh, D. E., ve Mavris, D., "Flight Test Results for a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle," in 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA 2007-32, 2007.
- [59] "Fuel Cell Powered UAV Environmentally Friendly," CSLA MFDCLab, <http://www.calstatela.edu/centers/mfdclab/research/fcuav.htm>, erişim tarihi 4 Ağustos 2012
- [60] "World's First Zero Emission, Hydrogen Fuel Cell Jet," Horizon Fuel Cell Technologies, 2007, <http://www.horizonfuelcell.com/hyfish.htm>, erişim tarihi 4 Ağustos 2012
- [61] KAZ, T., "HyFish," SmartFish GmbH, 2006, <http://www.smartfish.ch/index.cfm/fuseaction/show/path/1-129.htm>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [62] Mcconnell, V. P., "Military UAVs Claiming the Skies with Fuel Cell Power," Fuel Cells Bulletin, vol. 2007, no. 12, 12-15, 2007.
- [63] "Small Unmanned Aerial Vehicle Again Surpasses Record Flight Time Using Protonex Fuel Cell System Technology," Protonex, 2008, [http://www.protonex.com/downloads/press-releases/3-11-08\\_UAV-Flt-Milestone\\_FINAL.pdf](http://www.protonex.com/downloads/press-releases/3-11-08_UAV-Flt-Milestone_FINAL.pdf), erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [64] Chiang, C., Herwerth, C., Mirmiranl, M., KO, A., Matsuyama, S., Choi, S. B., ve Nomnawee, N., "Systems Integration of a Hybrid PEM Fuel Cell/Battery Powered Endurance UAV," in 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA 2008-151, Ocak 7-10, 2008.
- [65] Herwerth, C., Chiang, C., Ko, A., Matsuyama, S., Choi, S. B., Mirmirani, M., Gamble, D., Arena, A., Koschany, A., Gu, G., ve Wankewycz, T., "Development of a Small Long Endurance Hybrid PEM

- Fuel Cell Powered UAV," in AeroTech Congress&Exhibition, Los Angeles, CA, SAE 2007-01-3930, 2007.
- [66] "Korean Scientists Build Fuel Cell-Powered UAV," Chosun.com, <http://english.chosun.com/w21data/html/news/200710/200710100024.html>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [67] Mecham, M., "Boeing Fuel Cell Flights Point to UAVs," AviationWeek.com, 2008, [http://www.aviationweek.com/aw/generic/story\\_channel.jsp?channel=comm&id=news/CELL04038.xml](http://www.aviationweek.com/aw/generic/story_channel.jsp?channel=comm&id=news/CELL04038.xml), erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [68] "Fuel Cell Plane in Aviation First," Intelligent Energy, 2008, [http://www.intelligentenergy.com/index\\_article.asp?SecID=8&secondlevel=25&artid=4001](http://www.intelligentenergy.com/index_article.asp?SecID=8&secondlevel=25&artid=4001), erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [69] Friend, M. G. ve Daggett, D. L., "Fuel Cell Demonstrator Airplane," in AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years, Dayton, Ohio, AIAA 2003-2868, Temmuz 14-17, 2003.
- [70] "Adaptive Materials and AeroVironment Achieve 7-Hour UAV Test Flight," Adaptive Materials, 2008, <http://www.adaptivematerials.com/internal.php?sid=5&nid=45>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [71] "UTRC Demonstrates First-ever Fuel Cell-Powered Vertical Flight," United Technologies Research Center, East Hartford, CT, 2008, [http://www.utrc.utc.com/pages/NewsArticles/20081114\\_helicopter.html](http://www.utrc.utc.com/pages/NewsArticles/20081114_helicopter.html), erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [72] Rooney, N. ve Klesh, A., "Solar Bubbles and Adaptive Materials Set World Record with Fuel Cell Powered Aircraft," Space Times, American Astronautical Society, 4-6, Ocak/Şubat, 2009.
- [73] "Antares DLR-H2 Fuel Cell Aircraft Presented at Stuttgart Airport," German Aerospace Center, 2008, [http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1/86\\_read-13650/](http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-13650/), erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [74] "DLR Motor Glider Antares Takes Off in Hamburg - Powered by a Fuel Cell," German Aerospace Center, 2009,

- [http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1/86\\_read-18278/](http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-18278/), erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [75] "Above the Clouds with the Fuel Cell," BASF, 2009, <http://www.basf.com/group/corporate/en/news-and-media-relations/sciencearound-us/fuel-cell/story>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [76] "Boomerang: Long Endurance, Fuel-Cell Powered Mini UAV," Bluebird Aero Systems, 2009, <http://www.bluebird-uav.com/PDF/Boomerang.pdf>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [77] EGOZI, A., "Paris Air Show: Israeli Bluebird Fuel Cell UAV Completes Development," Flightglobal, 2009, <http://www.flightglobal.com/articles/2009/06/14/327952/paris-air-show-israelibuebird-fuell-cell-uav-completes.html>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [78] EGOZI, A., "Bluebird Aims for 10h Endurance Fuel Cell For Thunderbird," Flight International, 2008, <http://www.flightglobal.com/articles/2008/11/28/319528/bluebird-aims-for-10hendurance-fuel-cell-for-thunderbird.html>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [79] "NRL's XFC UAS Achieves Flight Endurance Milestone," Naval Research Laboratory, 2009, <http://www.nrl.navy.mil/pressRelease.php?Y=2009&R=85-09r>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [80] "Surveillance Vehicles Take Flight Using Alternative Energy," Naval Research Laboratory, 2009, <http://www.nrl.navy.mil/pressRelease.php?Y=2009&R=31-09r>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [81] Sankır, M., MNT 518-Yakıt Pilleri Dersi, Ders Notları
- [82] J. K. Norskov, J. Rossmeisl, A. Logadottir, L. Lindqvist, J. R. Kitchin, T. Bligaard ve H. Jonsson, J. Phys. Chem. B, 108, 17886 (2004)
- [83] T. Zawodzinski, S. Minteer ve G. Brisard, The Electrochemical Society Interface, 15, 62 (2006).
- [84] N. M. Markovic, T. J. Schmidt, B. N. Grgur, H. A. Gasteiger, R. J. Behm ve P. N. Ross, J. Phys. Chem. B, 103, 8568 (1999)
- [85] S. K. Desai ve M. Neurock, Phys Rev B, 68 (2003)

- [86] T. P. Hoar, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 142, 628 (1933)
- [87] Gasteiger, H.A., Gu, W., Makharia, R., Mathias, M.F., Tutorial: catalyst utilization and mass transfer limitations in the polymer electrolyte fuel cell, Electrochemical Society Meeting, 2003.
- [88] <http://www.horizonfuelcell.com/>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012
- [89] <http://www.energyor.com/energyor/?lang=en>, erişim tarihi: 4 Ağustos 2012



























































## ÖZGEÇMİŞ

### LEVENT SEMİZ

Eymir Mah. Toki Konutları 5. Etap C2-56 D:4 Gölbaşı/ANKARA

Cep: 0544 580 81 12

[lsemiz@etu.edu.tr](mailto:lsemiz@etu.edu.tr)

#### **Kişisel Bilgiler:**

Doğum Yeri : Zonguldak  
Doğum Tarihi : 06.01.1985  
Medeni Durum : Bekar  
Ehliyet : B sınıfı  
Askerlik Durumu : Terhis-01.12.2009

#### **Eğitim:**

- TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Mikro ve Nanoteknoloji Yüksek Lisans Programı (2010-Devam ediyor)
  - PEM tipi yakıt pilleri için yüksek performanslı endüstriyel membrane elektrot montajı üretimi ve test edilmesi
  - Polimerler, polimerleşme teknikleri
  - Membranlar
  - Desalinasyon
  - Filtrasyon
- Orta Doğu Teknik Üniversitesi B.Sc. Kimya (2003-2008)

#### **Seçilmiş Dersler:**

- Polimer Kimyası
- Endüstriyel Kimya
- Organik Kimyada Spektroskopik Metodlar



- İleri Analitik Kimya
- Nanoteknolojiye Giriş
- Polimerlerin Fiziksel Kimyası
- Yakıt Pilleri
- Mühendisler İçin Matematik

**Tecrübe:**

- 2010-2012 TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'nde Genel Kimya Laboratuvarı'nda Öğretim Asistanlığı
- 2010-2012 TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
  - Membran Bilimleri ve Nanoteknoloji Laboratuvarı ve Enerji Araştırmaları Laboratuvarı'nda Yüksek Lisans Araştırma Asistanı
  - Yeni filtrasyon membranlarının endüstriyel atık su işleminde kullanılması için polimer bilimi araç ve ilkelerinin uygulanması
  - Lisans öğrencilerine ve araştırmacılara danışmanlık yapmak ve günlük görevlerinde yol göstermek
  - Müşterek araştırma ve ticarileştirme çalışmalarında dış şirketlerle iletişim kurma ve aracı olma
  - Serbest radikal, arayüzey polimerleşme stratejileri ve termal analizlerle ilgili laboratuvar çalışmalarında bulunmak ve denetlenmesinden sorumlu olmak
  - Yeni akrilonitril kopolimerlerinin uygulanması konusunda araştırmalarda bulunmak.
  - Yeni membran adaylarının kontrol edilmesi ve test edilip elenmesi için karakterizasyon metodları tasarlamak
  - Polimerik madde mühendisliğinde temel araştırmalar yürütmek
  - Akrilonitril kopolimerlerinin termal karakterizasyonu
  - Akrilonitril kopolimerlerindeki kopolimerin kimyasal yapısının ve yüzde komonomer kompozisyonunun bulunmasında spektroskopik karakterizasyon metodlarını uygulamak

- 02.2010-11.2010 Porex Ambalaj Sanayi, Ostim/ANKARA  
Ar-Ge Sorumlusu,
- 01.2009-11.2009 İstanbul Jandarma İkmal Merkez Komutanlığı, İstanbul Kalite Yönetim Amirliği, Soğanlık-Kartal/İSTANBUL  
Laboratuvar Şube Müdürlüğü-Kimya Analiz Subayı
- 06.2009-08.2009 İstanbul Kalite Yönetim Amirliği, Soğanlık-Kartal/İSTANBUL  
Laboratuvar Şube Müdürlüğü-Laboratuvar Şube Müdürü
- 06.2007-08.2007 Ferrodöküm Sanayi ve Dış Ticaret A.Ş.-Gebze/KOCAELİ  
Kimya Laboratuvarı-Stajyer Kimyager

**Akademik Yayınlar:**

1. Mehmet Sankır, Selçuk Bozkır, Levent Semiz, Nurdan Sankır “High Performance Chromium (VI) Removal from Water by Polyacrylonitrile-co-poly (2-ethyl hexylacrylate) and Polyaniline (PANI) Nanocomposite Membranes” (Poliakrilonitril-ko-poli (2-etil hegzilakrilat) ve Polianilin Nanokompozit Membranlar ile Sudan Yüksek Performanslı Krom (VI) Süzülmesi), SPE: Polymer Engineering & Science, Kabul edildi, Online mevcut, DOI#23104
2. 1st International Conference on Desalination and Environment: A Water Summit (ICODE 2011), 29 October - 1 November, 2011, in Beach Rotana, Abu Dhabi-Chlorine Tolerant Coatings for Reverse Osmosis Membranes has accepted for oral presentation.  
(Desalinasyon ve Çevre Üzerine 1. Uluslararası Konferans: Su Zirvesi (ICODE 2011), 29 Ekim-1 Kasım, 2011, Beach Rotana, Abu Dhabi-Ters Osmoz Membranlar İçin Klor Toleranslı Kaplamalar-Oral Sunum)

3. 8th European Congress of Chemical Engineering, 1st European Congress of Applied Biotechnology, 25-29 September 2011, Berlin-Fouling resistant novel membranes for ultrafiltration and reverse osmosis has accepted for poster presentation.  
(8. Avrupa Kimya Mühendisliği Kongresi, 1. Avrupa Uygulamalı Biyoteknoloji Kongresi, 25-29 Eylül 2011, Berlin-Ultrafiltrasyon ve Ters Osmoz İçin Kirlenmeye Dayanıklı Yeni Membranlar-Poster Sunumu)
4. Mehmet Sankır, İbrahim Türkmen, Talha Camcı, Levent Semiz, Nurdan Demirci Sankır, "**Design and Characterization of Obstacked Bipolar Plates**" VIII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources", Minsk, Belarus (Kabul Edildi)
5. Mehmet Sankır, Levent Semiz, Nurdan Demirci Sankır, İbrahim Türkmen, Talha Camcı, Derek Baker, "Proton Geçirgen Zarlı Hava Soluyan Tipi Yakıt Pili" Patent Başvurusu, Mayıs 2012

**Yabancı Dil:**

İngilizce

Okuma : Çok İyi

Yazma : Çok İyi

Konuşma : İyi

**Bilgisayar Bilgisi:**

MS Office (Word, Excel, Power Point)

Mathematica

Chem Office

### **Referanslar:**

Doç. Dr. Mehmet SANKIR, Mikro ve Nanoteknoloji Yüksek Lisans Programı, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü Caddesi No:43 Söğütözü Ankara, 0312 292 43 31, Cep telefonu: 0533 2569101, email: [msankir@etu.edu.tr](mailto:msankir@etu.edu.tr), <http://www2.etu.edu.tr/cv.php?cv=msankir>

Yrd. Doç. Dr. Nurdan SANKIR, Mikro ve Nanoteknoloji Yüksek Lisans Programı, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Söğütözü Caddesi No:43 Söğütözü Ankara, 0312 292 43 32, Cep telefonu: 0533 331 72 74, email: [nsankir@etu.edu.tr](mailto:nsankir@etu.edu.tr), <http://nsankir.etu.edu.tr/>