



**T.C. AMASYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**TÜRKİYE'DE YAKIT PİLLERİNİN GELİŞİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muhammet TÜRKYILMAZ**

**KASIM**

**MUHAMMET TÜRKYILMAZ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KASIM 2021**

# **TÜRKİYE'DE YAKIT PİLLERİNİN GELİŞİMİ**

**Muhammet TÜRKYILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2021**

Muhammet TÜRKYILMAZ tarafından hazırlanan “TÜRKİYE’DE YAKIT PİLLERİNİN GELİŞİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:**

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum .....

**Başkan :**

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum .....

**Üye :**

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum .....

Tez Savunma Tarihi:

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

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

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

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

İmza

Muhammet TÜRKYILMAZ

18.11.2021

# TÜRKİYE’DE YAKIT PİLLERİNİN GELİŞİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammet TÜRKYILMAZ

AMASYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2021

## ÖZET

Son zamanlarda küresel ısınma ve iklim değişikliği dünyanın önemli bir sorunu haline gelmiş ve insanlık atmosferi kirletip sera gazı etkisi oluşturan fosil yakıtlara alternatif oluşturacak enerji kaynağı arayışı içine girmiştir. Bu kapsamda dünya çapında yapılan çalışmalar evrendeki en fazla bulunan element olan hidrojenin oksijen ile elektrokimyasal reaksiyona girmesi sonucunda çevre dostu elektrik enerjisi üreten cihazlar olan yakıt pilleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Yakıt pillerinin üretimi ve geliştirilmesi, ülkemizin ileri enerji teknolojiler alanında söz sahibi olabilmesi, enerji kaynaklarının çevreye olumsuz etkilerinin azaltılarak yaşam kalitesinin artırılması ve artan enerji talebinin yerel enerji kaynakları ile karşılanarak dışa bağımlılığın azaltılması açılarından önemlidir. Bu çalışmada, YÖK Ulusal Tez Merkezi veri tabanı taranarak 2000-2021 yılları arasında elde edilen yakıt pilleriyle ilgili 265 adet onaylanmış tez analiz edilmiştir. Dünyadaki genel eğilime paralel olarak, incelenen tezlerin çoğu polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMYP) ile ilgilidir ve ikinci sırada katı oksit yakıt pili (KOYP) ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmaları sırasıyla doğrudan alkol yakıt pili ve ülkemizde yakıtı olan borun hammaddesinin bol miktarda bulunduğu doğrudan borhidrür yakıt pili ile ilgili tez çalışmaları takip etmektedir. PEMYP ilgili çalışmalarda membran, gaz difüzyon ve katalizör tabakaları ve su yönetiminin iyileştirilmesi için farklı malzemeler kullanılmıştır. Diğer yandan, KOYP ilgili çalışmalarda interkonnektör, anot, katot ve elektrolit bileşenleri için çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerin PEMYP ve KOYP performansına etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Araştırma Merkezi ve Tübitak MAM Enerji Enstitüsü’nde üniversite-sanayi iş birliğiyle yapılan projeler Türkiye’de yakıt pili teknolojilerinin gelişmesi için önemli bir alt yapı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye’de yakıt pili sistemlerinin üretimiyle ilgi benzer kurumların, akademik çalışmaların ve üniversite-sanayi işbirliği projelerinin sayısının artması gerekmektedir.

Sayfa Adeti : 90  
Anahtar Kelimeler : Hidrojen, Yenilenebilir Enerji, Yakıt Pilleri  
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN

# DEVELOPMENT OF FUEL CELLS IN TURKEY

(M. Sc. Thessis)

Muhammet TÜRKYILMAZ

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2021

## ABSTRACT

Especially in recent years, global warming and climate change have been significant challenges for the world and humanity has sought alternative energy resources instead of fossil fuels which cause air pollution and produce greenhouse gases. In this sense, many researchers throughout the world have focused on fuel cells, which are devices producing environmentally friendly electrical energy thanks to the electrochemical reaction between hydrogen, the most abundant element in the universe, and oxygen. The production and development of fuel cells are important for our country because of having a significant voice in the field of advanced energy technologies, increasing the quality of life by reducing the negative effects of energy resources on the environment, and reducing our dependence on foreign energy sources by meeting the increasing energy demand with local energy resources. In this thesis, 265 approved theses related to fuel cells obtained by scanning the database of the YÖK National Thesis Center between 2000-2021 years were analyzed. In parallel with the general trend of the world, most of the examined theses were associated with polimer electrolyte membran fuel cell (PEMFC) and solid oxide fuel cell (SOFC) taken second place. They are followed by the direct alcohol fuel cell and the direct borohydride fuel cell using fuel boron of which raw material is abundantly available in Turkey, respectively. In the studies related to PEMFC, different materials were used to the improvement of membrane, gas diffusion layer, catalyst layer and water management. On the other hand, in the studies including SOFC, various materials were employed for the enhancement of interconnector, anode, cathode and electrolyte components. The effect of these materials on the performance of PEMFC and SOFC was analysed in detail. The university-industry cooperation projects at Niğde Ömer Halisdemir University Research Center and TÜBİTAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) MAM Energy Institute constitute an important infrastructure for the development of fuel cell technologies in Turkey. In this context, it is necessary to increase the number of similar institutions, academic studies and university-industry collaboration projects related to production of fuel cell systems in Turkey.

Page Number : 90  
Keywords : Hydrogen, Hydrogen Energy, Fuel Cells  
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Mahmut KAPLAN

## ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince hiçbir şekilde benden desteklerini esirgemeyen, çalışmalarına yön veren çalışma azmi ile örnek bir kişilik temsil eden değerli tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KAPLAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu günlere gelmemde çok büyük emeği olan başta anneme babama ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.





# İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ .....	4
2.1. Hidrojen Elementi .....	4
2.2. Hidrojen Elde Etme Yöntemleri .....	6
2.2.1. Fosil kaynaklardan hidrojen üretme yöntemleri .....	6
2.2.2. Sudan hidrojen üretme yöntemleri .....	10
2.3. Hidrojen Taşınması Dağıtımı ve Depolanması.....	12
3. YAKIT PİLLERİ .....	16
3.1. Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....	16
3.2. Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi ve Sınıflandırılması .....	17
3.3. PEMYP .....	18
3.3.1. Membran .....	20
3.3.2. Katalizör tabakası.....	20
3.3.3. Gaz difüzyon tabakası.....	20

	<b>Sayfa</b>
3.4. KOYP.....	21
<b>4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>23</b>
4.1. PEMYP Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar .....	23
4.2. KOYP Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar .....	26
4.3. Yakıt Pilleriyle İlgili Ülkemizde Yapılan Çalışmalar .....	27
4.3.1. PEMYP ile ilgili çalışmalar .....	37
4.3.2. KOYP ile ilgili çalışmalar.....	39
<b>5. ÜNİVERSİTE SANAYİ İŞBİRLİĞİ PROJELERİ.....</b>	<b>40</b>
<b>6. BULGULAR .....</b>	<b>48</b>
6.1. PEMYP Çalışmalarının Performans Açısından Karşılaştırılması.....	53
6.1.1. Su yönetimi .....	53
6.1.2. Membran geliştirilmesi .....	56
6.1.3. Katalizör geliştirilmesi.....	58
6.1.4. Gaz difüzyon tabakasının geliştirilmesi.....	63
6.2. KOYP Çalışmalarının Performans Açısından Karşılaştırılması.....	65
6.2.1. İnterkonnektör geliştirilmesi .....	65
6.2.2. Anot geliştirilmesi.....	66
6.2.3. Katot geliştirilmesi.....	70
6.2.4. Elektrolit geliştirilmesi.....	72
<b>7.SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>81</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>90</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Hidrojen düzeylerine elementinin özellikleri .....	5
Çizelge 2.2. Hidrojen gazının yoğunluğu ve depolanma şekli .....	15
Çizelge 2.3. Hidrojen gazının depolama aracı, kapasitesi ve enerji yoğunluğu .....	15
Çizelge 4.1. Tezlerin göre dağılımı.....	27
Çizelge 4.2. Tez çalışmalarının yıllara göre dağılımı .....	28
Çizelge 4.3. Yüksek lisans tezlerinin üniversitelere göre dağılımı.....	30
Çizelge 4.4. Doktora tezlerinin üniversitelere göre dağılımı .....	32
Çizelge 4.5. Tez çalışmalarının türlere göre dağılımı.....	33
Çizelge 4.6. Yüksek lisans tezlerinin anabilim dallarına göre dağılımı .....	34
Çizelge 4.7. Doktora tezlerinin anabilim dallarına göre dağılımı.....	35
Çizelge 4.8. Yüksek lisans tezlerinin yakıt pili türlerine göre dağılımı.....	36
Çizelge 4.9. Doktora tezlerinin yakıt pili türlerine göre dağılımı.....	36
Çizelge 6.1. PEMYP ile ilgili deneysel yüksek lisans tez çalışmaları.....	48
Çizelge 6.2. PEMYP ile ilgili deneysel doktora tezi çalışmaları.....	49
Çizelge 6.3. KOYP ile ilgili deneysel yüksek lisans tez çalışmaları .....	51
Çizelge 6.4. KOYP ile ilgili deneysel doktora tezi çalışmaları .....	52

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Hidrojen enerjisi sisteminin şematik gösterimi .....	4
Şekil 2.2. Hidrojen elde etme yöntemleri .....	6
Şekil 2.3. Doğal gaz buharlaştırma yöntemi ile hidrojen üretimi yapılması .....	7
Şekil 2.4. Kısmi olarak oksijen verme yönteminin şematik gösterimi .....	8
Şekil 2.5. Kömür gazlaştırılması yönteminin şematik gösterimi .....	9
Şekil 3.1. PEMYP bileşenleri ve çalışma prensibi .....	19
Şekil 3.2. KOYP'nin bileşenleri ve çalışma prensibi .....	21
Şekil 3.3. Silindirik ve düz borusal KOYP stak tasarımı.....	22
Şekil 4.1. Tezlerin seviyesine ve yazım diline göre yüzdeler dağılımı .....	27
Şekil 4.2. Tezlerin yıllara göre yüzdeler oranları .....	29
Şekil 4.3. Tezlerin çalışma türlerine göre yüzdeler dağılımı .....	33
Şekil 6.1 Farklı PDMS yüklemeleri için test sonuçları .....	54
Şekil 6.2. APTES'siz ve APTES'li GDL 34 BC yüzey performansları .....	55
Şekil 6.3. PDMS'siz ve PDM'li GDL 34 BC yüzey performansları .....	55
Şekil 6.4. PBI bazlı TPA ve DBpX içeren membranların performansları.....	56
Şekil 6.5. PBI bazlı BADGE çapraz bağlı membranların performansları .....	57
Şekil 6.6. 2MS-G nanokompozit membranın performans testi sonuçları.....	57
Şekil 6.7. SPEEK/PES/FBA membranın proton iletkenlik değerleri .....	58
Şekil 6.8. Farklı destek malzemeli katalizörlerin pil performans kıyaslaması .....	59
Şekil 6.9. Farklı destek malzemeli CoPc katalizörlerinin performans sonuçları.....	60
Şekil 6.10. GNPs ve CB destek malzemeli katalizörlerin performansları.....	60
Şekil 6.11. rGO1 ve CB destek malzemeli katalizörlerin performansları .....	61
Şekil 6.12. Elektrospreyleme yöntemi ile oluşturulan katalizörün performansı.....	62

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.13. iGO ve KS içeren destek malzemelerinin test sonuçları .....	62
Şekil 6.14. Gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenlik değerleri.....	63
Şekil 6.15. Nanofiberlerin mekanik dayanım analizi sonuçları.....	63
Şekil 6.16. 0,6 V için GDL3 gaz difüzyon tabakasının performans sonuçları .....	64
Şekil 6.17. 0,35 V için farklı gözeneklilik değerleri için performans sonuçları.....	64
Şekil 6.18. İnterkonnektörlerin farklı sıcaklıklardaki güç değerleri .....	65
Şekil 6.19. Çoklu stak pil performansları .....	66
Şekil 6.20. Mn'li ve Mn'siz yapıların H <sub>2</sub> ve CH <sub>4</sub> altında direnç değerleri .....	67
Şekil 6.21. V içeren ve V'siz yapıların H <sub>2</sub> altında anot direnç değerleri .....	67
Şekil 6.22. Saf hidrojen verilmesi durumunda KOYP performans sonuçları.....	68
Şekil 6.23. LSM/GDC Li için KOYP performans sonuçları .....	69
Şekil 6.24. LSMScSZ ve 18-3 LSMScSZ için KOYP test sonuçları .....	69
Şekil 6.25. Kombinatoriyal yaklaşım ile katotların performans değerleri.....	70
Şekil 6.26. Katot ve sipesifik alan direnç (ASR) değerleri.....	71
Şekil 6.27. Katot tarafı için geliştirilen iletken pasta performans değerleri .....	71
Şekil 6.28. Mn ve V emdirme işleminden sonra performans değerleri .....	72
Şekil 6.29. Molibden vanadyum oksitin performans değerleri.....	73
Şekil 6.30. Bazı alkali tuzların iletkenlik performans değerleri .....	73
Şekil 6.31. GÜRBÜZ ve YALAZ bileşiklerinin performans değerleri.....	74

## RESİMLER DİZİNİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. PEM elektrolizör sistemi .....	11
Resim 2.2. G-S hibrit hidrojen depolama sistemi .....	14
Resim 5.1. Niğde Üniversitesinde geliştirilen KOYP ürünleri .....	42
Resim 5.2. PEMYP ürünleri .....	43
Resim 5.3. Yerli İHA prototipi .....	44
Resim 5.4. Menzil artırma projesinde kullanılan araç prototipi .....	44
Resim 5.5. Yakıt pili güç kaynağı sistemi .....	45
Resim 5.6. Mamborgen-e projesi ile üretilen elektrikli otomobil .....	46
Resim 5.7. Mikrokojenerasyon saha uygulaması sistemi .....	47

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Tez çalışmasında kullanmış olduğumuz simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

### Simgeler

### Açıklama

CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
Co	Kobalt
Gd	Gadolinyum
H <sub>2</sub>	Hidrojen
O <sub>2</sub>	Oksijen
Ni	Nikel
Ru	Rutenyum

### Kısaltmalar

### Açıklama

GDC	Gadolinyum Katkılı Seryum Oksit
İHA	İnsansız Hava Aracı
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
LSM	Stronsiyum Lantan Manganit
PEMYP	Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili
YSZ	İtriyum Oksit ile Stabilize Zirkonyum Oksit

## 1.GİRİŞ

Günümüz dünyasında enerji ihtiyacı çok yüksek bir oranda kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıt olarak adlandırılan enerji kaynaklarının işlenmesi yoluyla karşılanmaktadır. Her ne kadar gelişmiş ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelse de dünya nüfusunun büyük bir bölümünün kullandığı fosil kaynaklar enerji dönüşümleri sonunda havayı, suyu kısaca doğayı kirletmekte karbon salınımını artırmakla birlikte küresel ısınmaya da katkıda bulunmaktadır. Diğer taraftan yerküremizde sınırlı olduğu bilenen fosil kaynakların tükenmekte olduğunun bilinmesi de insanlığı yeni enerji kaynakları arayışına yönlendirmektedir. Son zamanlarda fosil kaynaklara seçenek oluşturacak ve çevreyi kirletmeyecek rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik ve nükleer enerji gibi doğal kaynaklardan enerji ihtiyacını gidermeye yönelik çalışmalar yapılmış ve başarı sağlanmıştır. Ancak bu sistemler uygulanabilirliği ve kullanım alanları açısından değerlendirildiğinde ihtiyaçları tam olarak karşılayamadığı için yeni bir enerji kaynağı arayışını da beraberinde getirmiştir.

Bilim çevrelerince geleceğin enerjisi olarak tanımlanan hidrojen enerjisi işte bu yeni enerji kaynağı arayışının bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Teknolojik çalışmaların hızla ilerlemesi buna bağlı olarak maliyetlerin düşmesi ve temiz enerji kaynağı kullanımının gerekliliği, ters elektroliz olarak isimlendirebileceğimiz bir dizi kimyasal işlemleri gerçekleyen sistemi yani yakıt pillerine yönelik yapılan çalışmaların önemini artırmıştır.

İklim değişikliklerin günümüzdeki olumsuz etkileri göz önünde tutulduğunda, yakıt pilleri geleceğin dünyasında gereksinim duyulan enerji ihtiyacını, temiz ve güvenli yollardan karşılayabilecek önemli enerji dönüşüm araçları olarak değerlendirilmektedir. Yakıt pilleri hidrojen ile oksijen elementlerinin termokimyasal tepkimelerinin sonucu olarak elektrik enerjisi elde edilen araçlardır. Burada yakıt olarak kullanılan hidrojenin fosil kaynaklar gibi tabiattan direkt elde edilebilen bir yakıt değil de farklı yöntemlerle enerji kaynaklarından elde edilen ve enerji taşıyıcısı olarak sisteme giren bir yenilenebilir yakıt olduğunu belirtmek gerekmektedir. Evrenin kütlesinin büyük bir bölümünü oluşturan hidrojenin elde edilebilmesinde jeotermal enerji, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra fosil kaynaklarda kullanılmaktadır [1]. Ancak, fosil kaynaklardan hidrojen elde edilme yöntemlerinde çevreye zarar veren kirletici gazlar da



açığa çıkmaktadır. Bu nedenle temiz enerji kaynaklarından hidrojen elde etme yöntemleriyle ilgili yeni teknolojiler geliştirmelidir [2].

Yakıt pilleri temel olarak anot ve katot tarafında bulunan elektrotlar arasında bir elektrolitin sandviç şeklinde yerleştirmesiyle oluşmaktadır. Yakıt pillerinde kullanılan elektrolitin türüne göre polimer elektrolit membranlı (PEM), katı oksit, erimiş karbonatlı, alkali ve fosforik asit yakıt pili olarak sınıflandırılmaktadır. Diğer yandan, yakıt pilleri çalışma sıcaklıklarına göre düşük (25-100 °C), orta (100–500 °C) ve yüksek (500–1000 °C) sıcaklıklarda çalışan yakıt pilleri olarak sınıflandırılırlar.

Yakıt pillerinde elektrik enerjisi üretiminde doğrudan hidrojen kullanılabilirdiği gibi hidrojenin depolanması ve taşınmasındaki problemler nedeniyle fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğalgaz), metanol ve etanol gibi alkoller, amonyak ve borhidrür gibi hidrokarbon içermeyen bileşikler ve atıklardan elde edilen biyokütle gibi alternatif yakıtlar da kullanılmaktadır. Türkiye bor kaynaklarında dünyanın en büyük rezerv ülkesidir. Dünyadaki bor kaynaklarının yaklaşık %72'si Türkiye'de bulunmaktadır. Yakıt pili teknolojisinde sodyum borhidrür kullanılmaktadır. Doğrudan borhidrür yakıt pilinde sodyum borhidrürün sıvı çözeltisi olarak doğrudan kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, yakıt pilinin dışında istenildiği zaman üretilen hidrojen yakıt olarak kullanılabilir. Bu nedenle ülkemizde bol miktarda bulunan bor madeninin yakıt pili teknolojisinde kullanılmasıyla ilgili çalışmaların artırılması gerekmektedir.

Yakıt pillerinde yenilenebilir elektrokimyasal enerji üretildiği için geleneksel enerji üretim yöntemlerine göre daha verimli olmasına rağmen kullanılan malzemeler nedeniyle üretim maliyetinin yüksek olması, uzun süreli kullanımda dayanıklılık ve performansla ilgili problemler ticarileşmesini engellemektedir. Bu nedenle, özellikle PEM yakıt pili (PEMYP) ve katı oksit yakıt pili (KOYP) ile ilgili çalışmalar dünya çapında hızla artmaktadır. Aynı şekilde, ülkemizde de yakıt piliyle ilgili önemli çalışmalar yapılmaktadır.

PEMYP sadece hidrojen yakıtıyla, düşük çalışma sıcaklığında çalışırken KOYP farklı yakıt türleriyle ve yüksek çalışma sıcaklığında çalışmaktadır. Yakıtlarda safsızlığa duyarlı olan PEMYP'de ve karbonmonoksit (CO) zehirlenmesi gibi sorunlar ortaya çıkarken KOYP'de CO yakıt olarak tüketilmektedir. Ancak KOYP'nin bileşenlerinin yüksek çalışma sıcaklığına maruz kalması malzemelerde yapısal bozukluğa ve bileşenlerin

ayrılmasına neden olmaktadır. KOYP’de katı elektrolit kullanılırken PEMYP’de kullanılan polimer membranın proton iletkenliği için nemli olması gerekmektedir. Bu nedenle PEMYP’lerde su yönetimi önem kazanmaktadır.

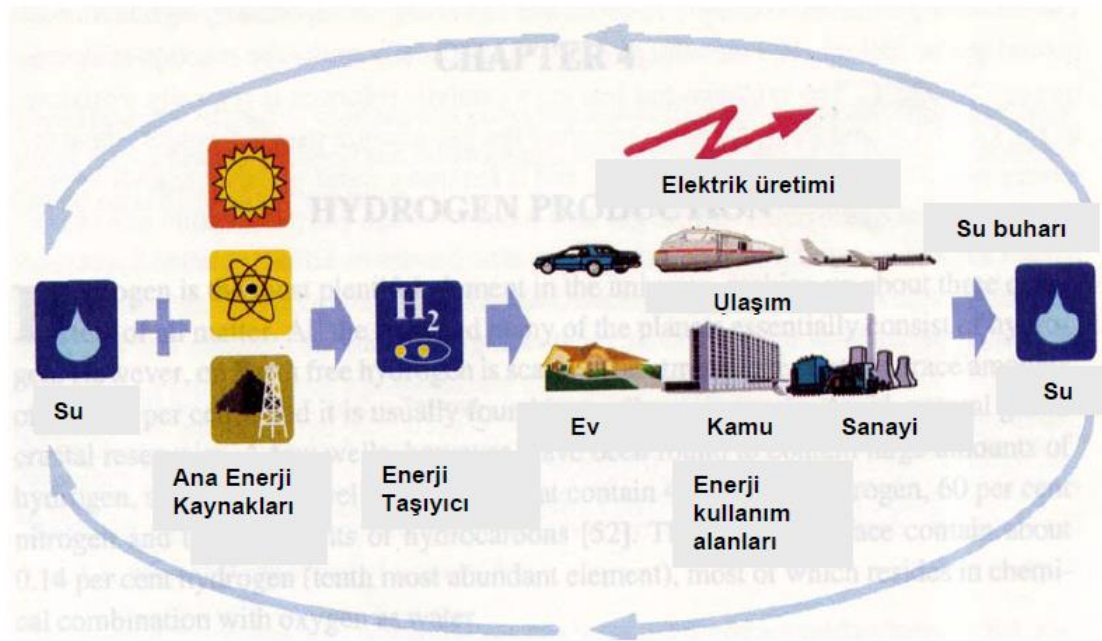
Bu çalışmada yakıt pili ve yakıt pilleri anahtar kelimeleriyle Yüksek Öğretim Kurulu (YÖK) Tez Merkezi veri tabanı taranarak, yakıt pilleri konusunda 2000-2021 yılları arasında 265 adet onaylanmış yüksek lisans ve doktora tezine ulaşılmıştır. İncelenen tezler, düzeylerine, yıllara, üniversitelere, çalışma türlerine (deneysel, sayısal, deneysel-sayısal ve araştırma), Anabilim dallarına ve yakıt pili türlerine göre değerlendirilmiştir. İncelemeler sonucunda yapılan literatür araştırmasına paralel olarak PEMYP ve KOYP ile ilgili çalışmaların diğer yakıt pili türlerine göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle yüksek lisans ve doktora düzeyindeki çalışmalarda PEMYP ve KOYP bileşenlerinde kullanılan malzemelerin yakıt pili performansını etkisi detaylı olarak analiz edilmiştir.

Bunun yanında ülkemizde üniversite sanayi işbirliği kapsamında yakıt pilleri ile ilgili üretime dönük yapılan projelere dair bilgi verilmiştir. Bu çalışmada Türkiye’de yakıt pilleri teknolojisinin son durumu hakkında bilgi verilmesi ve elde edilen bulguların ileride yakıt piliyle ilgili yapılacak olan çalışmalara ışık tutması amaçlanmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümünde tezin amacı ve kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde hidrojen enerji sistemi tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, yakıt pilinin tarihsel gelişiminden, yakıt pillerinin çalışma prensibinden ve türlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde PEMYP ve KOYP uygulamalarında karşılaşılan sorunlar ve bu yakıt pili türleriyle ilgili Türkiye’de yapılan çalışmalarla ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Beşinci bölümde ülkemizde üniversite-sanayi işbirliği çerçevesinde yakıt pilleriyle ilgili projeler tanıtılmıştır. Altıncı bölümde bu çalışmada elde edilen bulgulara ve yedinci bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. HİDROJEN ENERJİ SİSTEMİ

Fosil yakıtlar, hidrolik, biyokütle, güneş ve rüzgâr gibi birincil enerji kaynaklar kullanılarak hidrojenin üretilmesi, gereksinim duyulan yerlere iletilmesi ve çeşitli yöntemlerle enerjiye çevrilmesi gibi kısımlardan oluşan sisteme hidrojen enerji sistemi denir. Bu bölümde yakıt pillerinin temel enerji kaynağı olan hidrojen elementi, hidrojenin elde etme yöntemleri, taşınması ve depolanması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Şekil 2.1’de hidrojen enerjisi sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Hidrojen enerjisi sisteminin şematik gösterimi

### 2.1. Hidrojen Elementi

Hidrojen elementinin doğada bilinen 3 türlü izotopu bulunmaktadır. Bu izotoplar trityum, döteryum ve protium olarak adlandırılmaktadır. Burada bir elektron bir de protondan oluşan ve doğadaki en basit element olarak tanımlanan protonyum standart hidrojen elementi olarak bilinmektedir. Hidrojen elementi doğada orto ve para olmak üzere iki ayrı şekilde bulunmaktadır. Her iki yapı da tamamen eşit kimyasal özellikler sergilerler ancak yörünge değişikliklerinden dolayı bazı farklı fiziksel davranışlarda bulunurlar. Normal şartlar altında bulunan hidrojen %25 para-hidrojen ve %75 oranında orto-hidrojendir. Düşük sıcaklıklarda para hidrojen durgun bir yapı sergilerken sıcaklık daha da düşürülürse

hidrojenin yoğunluğu artar, sıvı olarak depolanan hidrojen bu şekildedir. Hidrojen elementi yerküremizde en çok bulunan elementtir, ancak doğada bağımsız olarak az miktarda bulunmaktadır. Bundan dolayı hidrojeni yakıt pillerinde kullanılabilir şekilde elde edebilmek için bazı işlemler yapılması gerekmektedir [3]. Çizelge 2.1’de hidrojen elementinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Hidrojen elementinin özellikleri

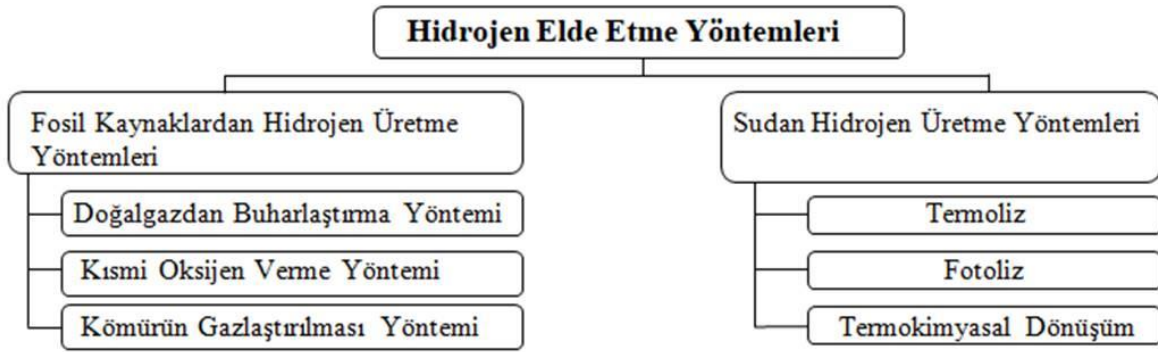
Molekül ağırlığı	mol/g	2,016
Yoğunluğu	kg/m <sup>3</sup>	0,0838
Üst enerji değeri	MJ/kg	141,9
	MJ/m <sup>3</sup>	11,89
Alt enerji değeri	MJ/kg	119,9
	MJ/m <sup>3</sup>	10,05
Kaynama sıcaklığı	K	20,3
Sıvı hal yoğunluğu	kg/m <sup>3</sup>	70,8
Kritik değerler		
Basınç	bar	12,84
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	31,4
Sıcaklık	K	32,94
Kendi kendine yanma sıcaklığı	K	858
Havadaki yanma limiti	% (hacim)	4 & 75
Havadaki stokiometrik karışımı	% (hacim)	29,53
Havadaki yanma sıcaklığı	K	2,318
Difüzyon katsayısı	cm <sup>2</sup> /sn	0,61
Özgül ısı (C <sub>p</sub> )	kJ/(kg-K)	14,89

Hem kokusuz hem de renksiz bir gaz olan hidrojen elementinin molekül ağırlığı 2,016 mol/g’dir. Bu özelliğiyle doğadaki en hafif element olarak bilinmektedir. Yoğunluğu ise normal şartlar altında 0,08376 kg/m<sup>3</sup> olduğundan dolayı havadan on dört kat daha azdır.

Hidrojen elementi 20,3 K ve 1 atm basınç altında sıvılaşabilmektedir. Hidrojen molekülü birçok yakıttan daha yüksek enerji kapasitesine sahiptir. Hidrojenin enerji ölçüsü 141,9 Mj/kg olduğundan dolayı yaklaşık olarak benzinin enerjisini üç kat artırmaktadır [4].

## 2.2. Hidrojen Elde Etme Yöntemleri

Hidrojen gazı doğada serbest halde bulunmamaktadır. Fakat fosil kaynaklarda hidrojen elementi bol miktarda bulunabilmektedir. Bundan dolayı hidrojenin yakıt pillerindeki kullanılması için bazı kimyasal yöntemlerden kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de Hidrojen elde etme yöntemleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Hidrojen elde etme yöntemleri

### 2.2.1 Fosil kaynaklardan hidrojen üretme yöntemleri

Hidrojen üretimi fosil kaynaklar kullanılarak yapılabilmektedir. Bu kısımda fosil kaynaklardan hidrojen elde edilme yöntemlerine değinilecektir [5].

#### Doğal gazlardan buharlaştırma yöntemi

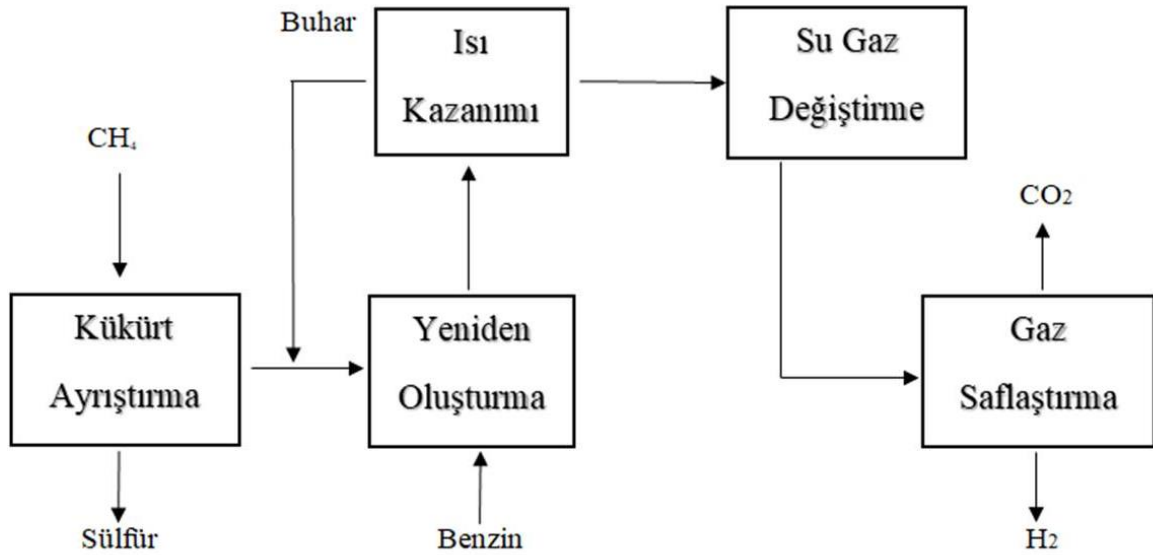
Doğalgaz kokusu ve rengi olmayan havadan daha hafif çok yüksek oranda metan, etan, propan, bütan ve az oranda karbondioksit, helyum ve hidrojen sülfür gibi çeşitli hidrokarbon yapılarından oluşan bir gaz karışımıdır. Doğalgazlardan buharlaştırma yöntemi en verimli, en etkili hidrojen üretme yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntemde hidrojen üretimi yapılırken sırası ile gaz sentezleme yapılması, su gaz değişiminin sağlanması ve son olarak da gaz saflaştırma işlemleri yapılarak hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler esnasında sıcaklık 900 °C’ye kadar yükselebilmektedir.

Kimyasal işlemlerin verimliliği ise %65 - %75 arasındadır. Bu kimyasal tepkimeler 3-25 bar basınçta katalizör kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde harcanan gazın

yaklaşık 1/3'ü reaksiyon sırasında sıcaklığı artırma amacıyla kullanılmaktadır [6]. Bu yöntemdeki kimyasal tepkimeler aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.3'te doğalgazları buharlaştırma yöntemi kullanılarak hidrojen elde edilme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

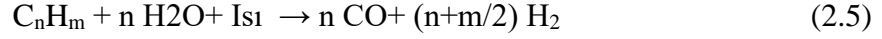
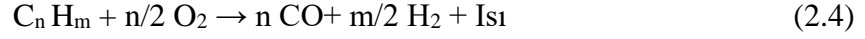


Şekil 2.3. Doğalgaz buharlaştırma yöntemi ile hidrojen üretimi yapılıması [7]

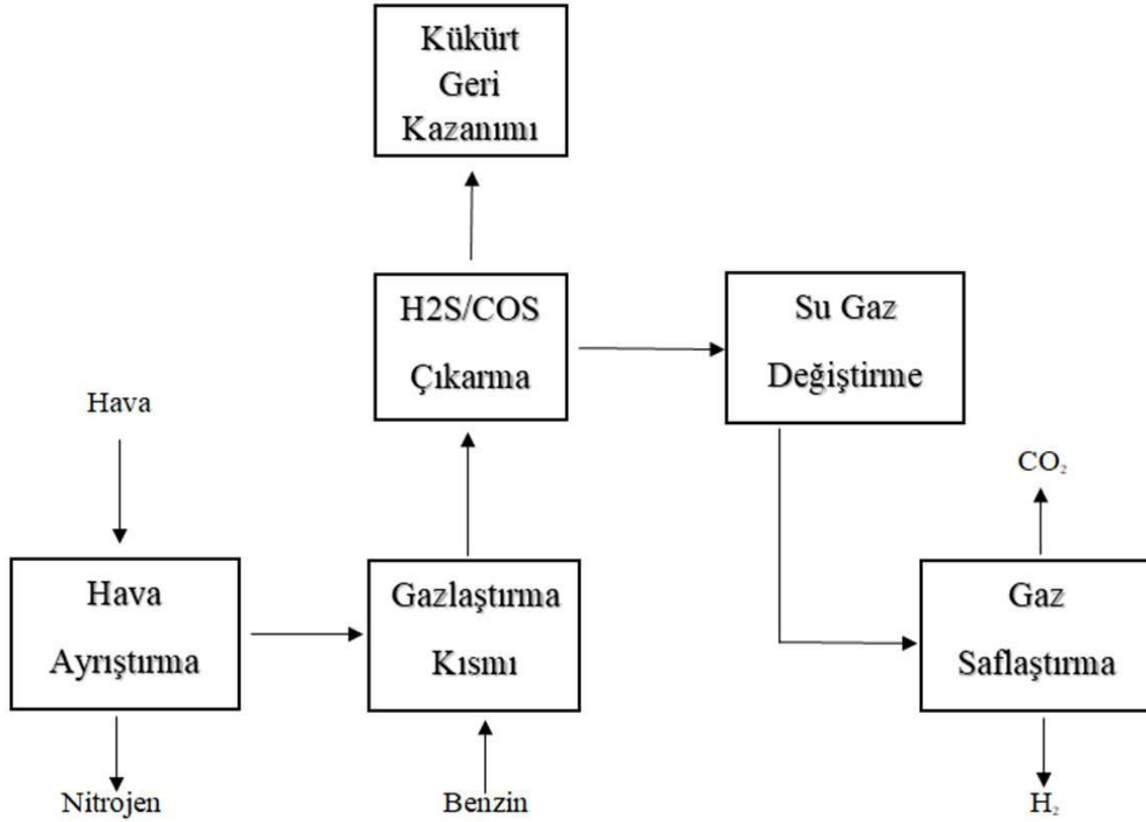
### Kısmi oksijen verme yöntemi

Kısmi olarak oksijen verme yöntemi, doğalgazlardan buharlaştırma yöntemi kullanılarak hidrojen üretiminin yapılamadığı nefityağından daha ağır molekül ağırlığına sahip benzin ve etanol gibi hidrokarbon bileşiklerinden hidrojen üretmede kullanılan bir yöntemdir. Kısmi oksijen verme yöntemi de buharlaştırma yöntemine benzemektedir ve genel olarak üç kademedeki gerçekleşen tepkimelerden oluşmaktadır. Birinci kademe gaz sentezlemesi yapılması, ikinci kademe tepkimede su ve gaz değişiminin gerçekleşmesi ve son olarak

gazların saflaştırma işlemlerinin yapılarak hidrojen üretimi gerçekleşir. Bu yöntemde tepkimeler esnasında sıcaklık 1300 °C'ye kadar ulaşabilmektedir. Tepkime verimliliği ise %50 civarlarındadır [8].



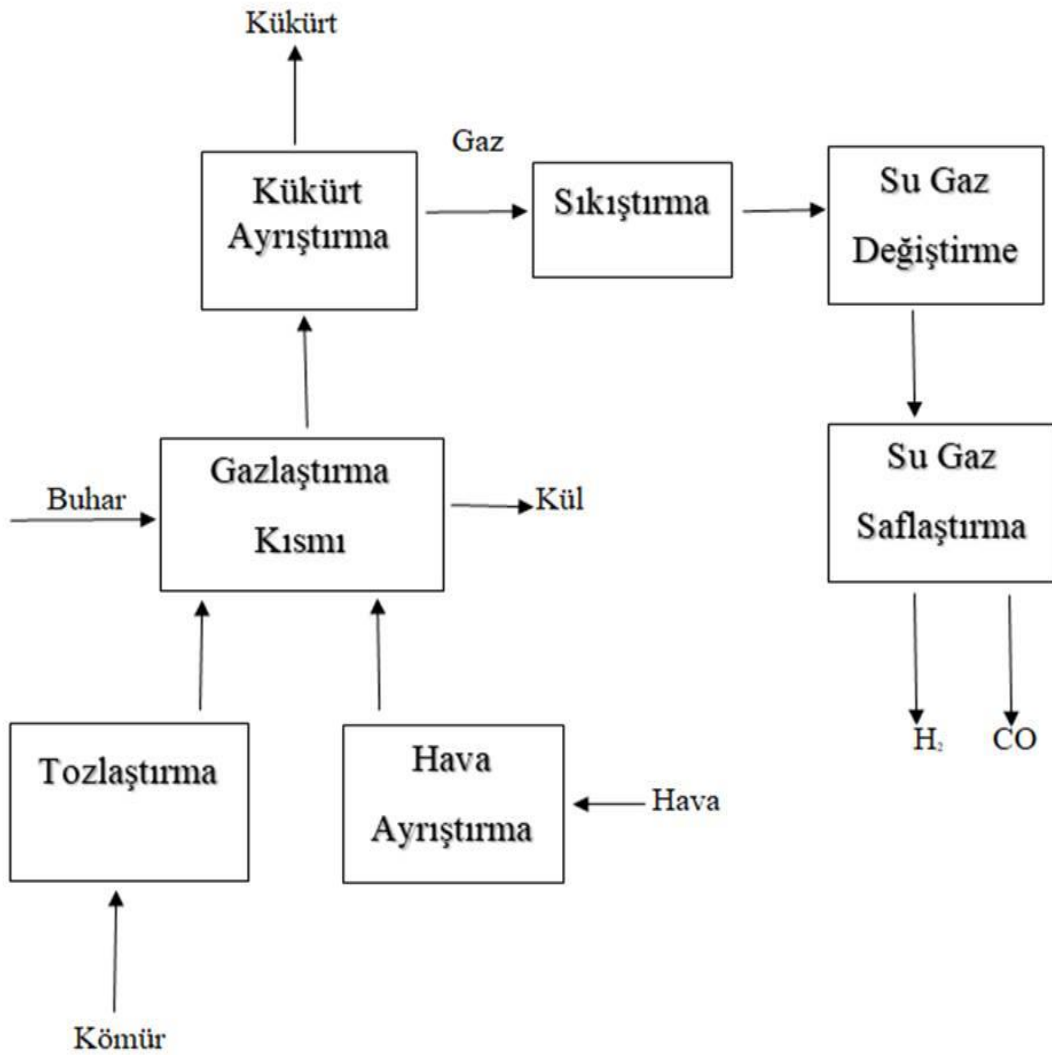
Bu yöntem uygulanırken ayrıştırılacak doğalgazın sıcaklığı 1400 °C'ye kadar çıkartılır ve verilen hava akımı sonlandırılır. Doğalgaz içerisindeki metan bu sıcaklıkta kendiliğinden ayrışır. Sonra sıcaklık 800 °C'ye düşürülerek hidrojenin ayrışması sağlanır. Şekil 2.4'te kısmi oksijen verme işleminin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.4. Kısmi olarak oksijen verme yönteminin şematik gösterimi

### Kömürün gazlaştırılması yöntemi

Bu yöntemde öncelikle kömür çeşitli mekanik işlemler yardımı ile toz haline getirilir ve sonra sıcak buhar verilir. Sisteme verilen sıcak buhar vasıtası ile yanarak kül haline dönüşen kömürden kükürt ayrılması sağlanır. Oluşan bu ürün su ile saflaştırma işlemine tabi tutulur ve işlem sonucunda CO ve H<sub>2</sub>'nin ayrışması sağlanarak hidrojen gazı üretim aşamaları tamamlanmış olur. Bu işlem verimliliği yaklaşık olarak %95 oranındadır [9]. Şekil 2.5'te kömür gazlaştırma yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Kömürün gazlaştırılması yönteminin şematik gösterimi



Kömürün gazlaştırılması yöntemi kullanılarak hidrojen üretilmesiyle ilgili kimyasal reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



### 2.2.2. Sudan hidrojen üretme yöntemleri

#### Elektroliz yöntemi

Yerküremizin yaklaşık %60 kadarının sudan oluştuğu göz önüne alınırsa dünya yüzeyindeki en zengin hidrojen kaynağının su olduğu görülmektedir. Bu nedenle hidrojen üretme yöntemleri arasında sudan hidrojen elde edilmesi oluşturduğu kaynak açısından ayrı bir öneme sahiptir. Sudan hidrojen üretme yöntemleri içerisinde elektroliz yöntemi en çok bilinen ve kullanılan yöntemdir. Ayrıca, fosil kaynaklardan hidrojen elde edilmesi yöntemlerinin geliştirilmesinden yaklaşık 50 yıl daha öncesinde kullanılan teknolojik yöntemdir. Elektroliz işleminde, anot kutbu ile katot kutbu arasında gerçekleşen elektron akımı ile hidrojen elde edilir. Elektrolizin yapıldığı suyun içine sodyum klorür, potasyum hidroksit veya sodyum hidroksit gibi maddeler katılarak oluşturulan çözeltinin elektrik iletimi artırılır. Elektroliz metodu ile hidrojen üretmek için genelde alkali, PEM, katı oksit ve yüksek sıcaklık elektroliz yöntemleri kullanılmaktadır. Elektroliz işlemi basamakları aşağıda belirtilmiştir [10].



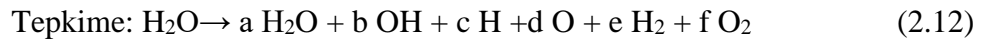
Resim 2.1’de PEM elektrolizör sistemi gösterilmiştir.



Resim 2.1. PEM elektrolizör sistemi [11]

### Doğrudan ısı ayrıştırma yöntemi (Termoliz)

Sıcaklık 2000 K'ye kadar yükseltildiğinde su molekülü kendiliğinden oksijen ve hidrojen atomlarına parçalanır. Bu tepkimelerde sıcaklığın daha da yükselmesiyle verimlilik oranı artmaktadır. Bu oran sıcaklık 2000 K, 2500 K ve 3000 K iken sırasıyla, %1, %8,5 ve %24 olmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda daha verimli tepkimelerin oluşması aslında bu sistemin en büyük dezavantajını oluşturmaktadır. Çünkü gereken sıcaklıklara çıkılması içinde yakıt gerekmektedir.



### Termokimyasal ayrıştırma yöntemi

Doğrudan ısı ayrıştırma yönteminin gerçekleştirilmesi için aşırı yüksek ısı gerektiği ve bu ısıya ulaşabilmenin zorluğu yeni arayışları beraberinde getirmiştir. Direkt ısı ayrıştırmanın düşük ısılarda gerçekleşmesini sağlayabilmek için suyun içeriğine bazı kimyasal maddelerin karıştırılması gerekmektedir. Suyun içine gerekli kimyasallar karıştırılarak hidrojen ve oksijen elde edilmesi yöntemine termokimyasal ayrıştırma yöntemi adı verilmektedir [12].

### Güneş ışığı (Fotoliz) yöntemi

Güneş ışınlarından doğrudan faydalanarak sudan hidrojen üretme yöntemidir. Bu yöntemde suyun içerisine katalizör ve çok değişik mikroorganizmalar karıştırılarak güneş ışınlarıyla birlikte oluşturulan kimyasal tepkimeler sonucunda hidrojen üretilmektedir [13].

## **2.3. Hidrojen Taşınması Dağıtım ve Depolanması**

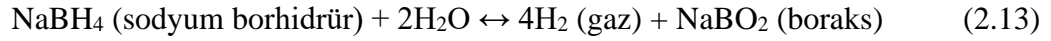
Zaman içerisinde yakıt pillerinin gelişimi ile birlikte kullanım alanlarının yaygınlaşması, hidrojenin depolanması, taşınması ve dağıtım işlemleri gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu işlemler için alternatif bir yöntem, kapalı çevrim düzeneklerinde uygun elektroliz yöntemi ile sudan hidrojen üretilmesi ve özel imal edilmiş tank içerisinde depo edilerek taşınması veya kullanılmasıdır. Fakat bu yöntemle hidrojenin depolanması beraberinde bazı problemlerle getirilmektedir. Bunlar hidrojenin depolanmasında kullanılan tankın

malzemesi, basınç dayanımı ve boyutu gibi faktörlerdir. Bununla birlikte hidrojen, uzay çalışmaları, evler, işyerleri, karayolu ve havayolu taşıtları gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir.

İlk zamanlarda, taşıma ve depolama işlemlerinde hidrojenin gaz halinde olması gerektiği düşünülmüş ancak imal edilecek boruların ve depolamada kullanılacak tankların çok büyük boyutlarda olması gerekliliği ve taşımadaki tehlikeler gibi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu problemlerin çözülmesi için hidrojen gazının basınç altında iletilmesi düşünülmüş fakat taşıma yapılacak tankların yüksek basınç dayanımı ile imal edilmesi gerektiğinden tankların ağırlıkları artmıştır. Bu durumda kapasite azalması oluşmuştur.

Hidrojen gazı yaklaşık 250 atm basınç altında çelikten imal edilmiş tüplerde depolandığında çelik tüplerin kütlesi hidrojen gazından 100 kat daha ağır olmaktadır. Bu nedenle, son zamanlarda kompozit malzemedan imal edilmiş tüpler yapılmıştır. Kompozit tüpler çelik tüplere nazaran çok daha hafif ve oldukça yüksek basınç altında (700 atm) kullanılabilirler. Kompozit tüplerin fiyatlarının yüksek olması en büyük dezavantajlarını oluşturmaktadır. Diğer yandan, hidrojen gazının sıvılaştırılarak depolanma ve taşınması ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır. Hidrojen gazının kaynama noktası  $-252,87^{\circ}\text{C}$  olduğundan sıvılaştırılarak depo edilen hidrojenin  $10\ 000\ 000\ \text{m}^3$  kapasiteli büyük tanklarda yaklaşık olarak günde %0,1'ini, küçük boyutlu depolarda ise günde ortalama %2-3'ü buharlaşarak kaybolmaktadır.

Hidrojenin gaz ve sıvı halde depolanmasına alternatif olarak geliştirilen bir diğer yöntemde metal hidritlerden yararlanmaktadır. Ancak, hidrojen gazının kimyasal tepkimelerle ağır metallerle bağlanarak depolanmasıyla ilgili bu yöntem metal hidritlerin kendi ağırlıklarından dolayı çok rağbet görmemiştir. Hidrojenin ağır metal olan magnezyum ile birleşerek Magnezyum hidrür ( $\text{MgH}_2$ ) olarak depolanmasıyla yoğunluğu  $0,07\ \text{kg H}_2/\text{kg}$  olmaktadır [14]. Günümüzde hidrojenin depolanması ile ilgili farklı yöntemler geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar sürmektedir. Örneğin, dünya çapında rezervlerinin büyük bir kısmının ülkemizde bulunduğu bor minerali kullanılarak metal hidritlere benzer şekilde hidrojenin depolanmasıyla ilgili çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalarda  $\text{NaBO}_2$  (sodyum borat) ve  $\text{LaNi}_5$  (Lantan nikel) kullanılmıştır. Sodyum borat kullanılarak  $\text{H}_2$  depolanması aşağıdaki reaksiyonla gerçekleşmektedir [15].



Yapılan çalışmalarda Lantan Nikel bileşiminin 2,5 atm basınç, 25 °C sıcaklıkta sıvılaştırılmış hidrojenden iki katı ve daha yüksek basınç altında sıkıştırma işlemi yapılmış gaz halindeki hidrojenden 12 katı daha fazla hidrojen depolayabildiği görülmüştür. Enerji yoğunluğu açısından karşılaştırıldığında ise gazdan dokuz kat, sıvıdan 1,1 kat daha fazladır.

Ayrıca hidrojenin sıvı ve gaz fazında depolanmasına imkân veren sistemler vardır. Resim 2.2’de görüldüğü G-S Hibrit hidrojen depolama sisteminde hidrojeni katı ve sıvı halde depolayan iki tank bulunur.



Resim 2.2. G-S hibrit hidrojen depolama sistemi [16]

Çizelge 2.2’de hidrojen gazının yoğunluğu ve depolanma şekli ve Çizelge 2.3’te hidrojen gazının depolama aracı, kapasitesi ve enerji yoğunluğu verilmiştir.

Çizelge 2.2. Hidrojen gazının yoğunluğu ve depolanma şekli

	Depolama Şekli	kg H <sub>2</sub> /kg	kg H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Yüksek Kapasite	Yer altı	-	5-10
	Yer üstü (basınç altında)	0,01-0,014	2-16
	Metal hidritler	0,013-0,015	50-55
	Sıvı hidrojen tankı	~1	65-69
Düşük Kapasite	Basınçlı silindirik	0,012	~15
	Metal hidritler	0,012-0,014	50-53
	Sıvı hidrojen tankı	0,15-0,50	~65
Araç Tankları	Basınçlı silindirik	0,05	15
	Metal hidritler	0,02	55
	Sıvı hidrojen tankı	0,09-0,13	50-60

Çizelge 2.3. Hidrojen gazının depolama aracı, kapasitesi ve enerji yoğunluğu

Depolama Aracı	İçerdiği Hidrojen (kg/kg)	Depolama Kapasitesi (hacim için kg/l)	Enerji Yoğunluğu (kJ/kg)	Enerji Yoğunluğu (Hacim İçin kJ/l)
MgH <sub>2</sub>	0,07	0,101	9,933	14,33
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	0,0316	0,081	4,484	11,494
1VH <sub>2</sub>	0,0207	-	3,831	-
FeTiH <sub>1,95</sub>	0,0175	0,096	2,483	13,62
TiFe <sub>0,7</sub> Mn <sub>0,2</sub> H <sub>1,9</sub>	0,0172	0,09	2,44	12,77
LaNi <sub>5</sub> H <sub>7</sub>	0,0137	0,089	1,944	12,63
Ni <sub>5</sub> H <sub>6,5</sub>	0,0135	0,09	1,915	12,77
Sıvı H <sub>2</sub>	1	0,071	141,9	10,075
Gaz H <sub>2</sub> (100 bar)	1	0,0083	141,9	1,17
Gaz H <sub>2</sub> (100 bar)	1	0,0166	141,9	2,34
Petrol	-	-	47,3	35,5

### 3.YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri kimyasal tepkimelere uygun şekilde oluşturulmuş bileşenleri ile hidrojenden elektrokimyasal bir süreç sonunda direkt olarak elektrik enerjisi üretebilen sistemlerdir. Bu bölümde yakıt pillerinin gelişme süreci, çalışma prensibi, sınıflandırılması ve yaygın olarak kullanılan Polimer elektrolit membranlı (PEM) ve katı oksit yakıt pilleriyle ilgili bilgiler verilmiştir

#### 3.1 Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Sir William Grove 1839 yılında sudan elektroliz yoluyla  $H_2$  ve  $O_2$  elde edilmesiyle ilgili çalışmaları sürdürürken ters elektrokimyasal tepkime ile güç elde ederek tesadüfen ilk yakıt pilini tasarlamıştır. Lawaczek 1920 yılında yakıt olarak hidrojen kullanabilen kara taşıtlarla ilgi çalışmalar yapmıştır. Lawaczek aynı zamanda araçlarda kullanılması için elektroliz yöntemi ile ürettiği hidrojenin boru hatlarıyla taşınmasıyla ilgili çalışmalar yapmıştır.

Haldane ise 1923'te hidrojenin elektroliz yöntemi ile elde edildikten sonra sıvı şeklinde depolanarak yakıt olarak kullanılabileceğini rapor etmiştir. Haldane'nin bu çalışmalarını 1938'de Sikorsky hava arıcına uygulayarak hidrojenin havacılıkta yakıt olarak kullanılabilceği ortaya koymuştur. 1932 yılında Francis Bacon ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalar başarılı şekilde sonuçlanmış ve ilk yakıt pili sistemi olarak ortaya çıkmıştır. 1959'da Bacon'ın Langer ve Mond ile birlikte yaptığı çalışmalarda 5 kW gücünde elektrik tüketimi olan bir kaynak makinesini çalıştırmayı başaracak yakıt pili düzeneği oluşturmuşlardır. Francis Bacon ve ekibinin yaptığı bu başarılı çalışmayı biraz daha geliştiren NASA, uzay programlarında kullanmıştır.

1960'lı yıllarda NASA uzay araştırmalarında kullanılan panellerin elektrik gücü ihtiyacını karşılayabilmek için yakıt pillerinden faydalanmak üzere araştırmalar yapmıştır. NASA'nın bu alana yönelmesinde etken sebebi daha önceleri elektrik ihtiyacının karşılanması için uzay mekiklerinde kullanılan akülerin ağırlıklarının çok fazla olması buna karşın ömürlerinin kısa olması ve taşıma zorluğu gibi nedenlerdir. Böylece yakıt

pilleri Apollo gibi uzay araçlarının elektrik üretimini güvenli bir şekilde sağlamanın yanı sıra su üretimi de yaparak uzay çalışmalarındaki önemini de arttırmıştır.

1962 yılında Bockris, güneş enerjisinden kaynaklı hidrojen ekonomisi fikrini ortaya atmıştır. Bockris in bu fikri Justi'nin 1965 yılında yaptığı çalışmalarla biraz daha geliştirilerek bu fikrin teknik altyapısı oluşturulmuştur. 1970'li yıllarda Bockris ve Triner tarafından güneş enerjisi kaynaklı hidrojen ekonomisi kavramı tanımlanmış ve 1972 yılının sonlarına doğru Appley ve Bockris tarafından şematik olarak gösterilmiştir. Daha sonra Grogory tarafından da ölçümü yapılmıştır.

Nükleer enerjiden hidrojen üretilmesi sistem olarak ilk defa 1972 yılında Marchetti tarafından ortaya konulmuştur. Bu sistemde tam bir izolasyonu sağlamış ada içerisinde nükleer enerjiden üretilen hidrojen sıvılaştırılmış şekilde gemilerle taşınarak kullanımı sağlanmıştır. 1962'de Bockris'in üzerinde çalıştığı bir diğer konu ise Amerika'da bazı şehirlerin güneş enerjisi kaynağı kullanılarak hidrojen ile desteklenmesi olmuştur. Bockris'in bu çalışmasına göre deniz suyu üzerinde yüzen fotovoltaik panellerden elde edilen elektrik gücü ile deniz suyunun elektrolizi yapılarak üretilen hidrojenin gerekli altyapı ile şehirlere taşınması sağlanacak. Bockris'in bu fikirlerine benzer bir kavram da 1979 yılında Japon bilim adamı Ohta tarafından ortaya atılmıştır.

Günümüzde gelişen yakıt pili teknolojisiyle çok büyük ve çok küçük kapasiteli üretilen yakıt pillerinin farklı alanlarda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Doğalgazdan yakıt pili vasıtasıyla üretilen enerji bankaların kesintisiz elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Günümüzde birçok firma yakıt pilli otomobillerin prototiplerini üretmiş ve seri üretime geçme aşamasındadır. Japonya ve Güney Kore'deki bazı otomobil firmaları uzun süredir yakıt pilli araç üretimi yapmaktadır [17]. Günümüzde yakıt pilleri evlere henüz girememiş olsa da çok yakın zamanda konutların da elektrik ihtiyacını karşılayacak düzeneklerin kurulması için çalışmalar devam etmektedir.

### **3.2. Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi ve Sınıflandırılması**

Bir yakıt pili elektrolit, katot ve anot kısmındaki elektrotlar olmak üzere 3 temel yapıdan oluşmaktadır [18]. Yakıt pillerinde fosil yakıtlar, güneş, jeotermal, rüzgâr ve biokütle gibi enerji kaynaklarından elde edilen hidrojeni kullanarak elektrik üretilmektedir. Yakıt pilinde



gerçekleşen tepkimeler sonucunda atık olarak sadece saf su olduğundan temiz enerji üreten sistemler olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak bütün yakıt pili çeşitlerinin çalışma prensibi aynı şekildedir. Hidrojen gazı anot tarafından oksijen gazı katot tarafından yakıt piline girer. Anot elektrotunda yükseltgenme, katot elektrotunda ise indirgenme reaksiyonları gerçekleşir. Hidrojen, oksijen ile tepkimeye girerek elektrik üretimi gerçekleşir. Bu reaksiyonlar sonucunda su ve ısı açığa çıkar [19]. Tepkime sonucunda açığa çıkan ısı çok yüksek seviyelerde olmadığı için oluşan su ile güvenli bir şekilde dışarıya atılmaktadır. Diğer yandan çok yüksek kapasitelerde ve yüksek sıcaklıklarda çalışan yakıt pillerinde ayrıca soğutma ihtiyacı oluşabilmektedir [20]. Yakıt pilleri, çalışma sıcaklıklarına ve elektrolitlerinin cinsine göre sınıflandırılmaktadır.

#### Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılması

25–100 °C arasında çalışan yakıt pilleri düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri, 100–500 °C arasında çalışan yakıt pilleri orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri ve 500–1000 °C arasında çalışan yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri şeklinde sınıflandırılmaktadır.

#### Elektrolit tipine göre yakıt pillerinin sınıflandırılması

- PEM yakıt pili (PEMYP)
- Erimiş karbonatlı yakıt pili
- Katı oksitli yakıt pili (KOYP)
- Alkali yakıt pili
- Fosforik asit yakıt pili

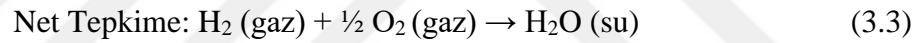
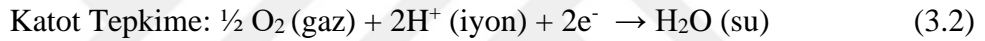
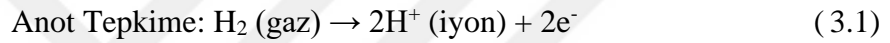
### **3.3. PEMYP**

PEM yakıt pillerinde elektrolit olarak bünyesinde flor bulunduran iyon değiştirici özelliği olan sülfonik asit membran kullanılmaktadır [21]. Membranın kalınlığı ne kadar az olursa çalışma verimliliği o kadar yüksek olmaktadır. Katalizör tabakasında paladyum ve platin

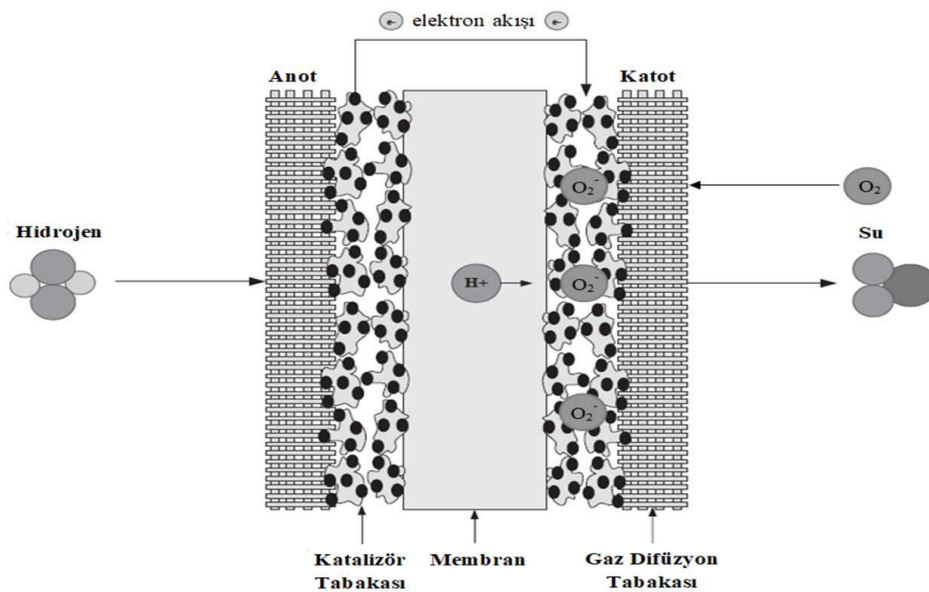
(Pt) gibi metaller kullanılmaktadır. PEMYP'nin çalışma sıcaklıkları genellikle 55-75 °C olmasına rağmen 100 °C sıcaklıklara kadar verimli bir şekilde çalışabilmektedirler.

### PEMYP'nin çalışma prensibi

Anot kısmından yakıt piline giren hidrojen, gaz difüzyon tabakasından geçtikten sonra katalizör tabakasında elektronunu vererek hidrojen protonu veya iyonu ( $H^+$ ) şeklinde PEM üzerinden katot kutbuna ulaşmaktadır. Daha sonra, anot kutbundan dış devre üzerinden katoda gelen elektronun, hidrojen protonun ve katot kısmındaki gaz difüzyon tabakasından katalizör tabakasına geçen oksijenin birleşmesiyle su, atık ısı ve elektrik enerjisi oluşmaktadır [22]. PEMYP'nin anot ve katot tarafında gerçekleşen tepkimeler ve net tepkime aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1'de PEMYP'nin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.1. PEMYP bileşenleri ve çalışma prensibi [23]

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi PEMYP, membran, anot ve katot tarafında gaz difüzyon ve katalizör tabakaları olmak üzere 3 temel bileşenden oluşmaktadır.

### 3.3.1 Membran

Membranın başlıca görevleri, iyonik etkileşimi sağlamak ve hidrojenle oksijeni birbirinden ayırmaktır. PEMYP’de yaygın olarak 1970’li yıllarda DuPont firması tarafından geliştirilen Nafion adı verilen perfluoro sülfonik asit membran kullanılmaktadır. Nafion membranların, yüksek mekanik dayanım, kimyasal kararlılık ve iletkenlik özellikleri nedeniyle yüksek enerji yoğunluğuna sahip yakıt pilleri üretilmektedir. Ancak Nafion’un yüksek maliyeti ve yüksek sıcaklıklarda kullanılamaması gibi olumsuz yönlerinin olması nedeniyle alternatif membran malzemesiyle ilgili çalışmalar sürmektedir [24].

### 3.3.2 Katalizör tabakası

Pt ve karbonun her ikisi de elektronları iyi iletmektedir. Bu nedenle katalizör tabakasında karbon destek üzerinde Pt nanoparçacıkları kullanılmaktadır. Böylece elektronlar, elektrot boyunca serbestçe hareket edebilmektedir. Elektrokimyasal reaksiyonlarda katalizör görevi yapan Pt parçacıkların yaklaşık olarak 2 nm çapında olması ve geniş alana yayılması, reaksiyona giren gaz moleküllerinin sayısını artırmaktadır. Bu sebeple katalizörler, hafif ağırlıklı, dayanıklı, gaz geçirmez ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerden yapılmaktadır [22]. PEM yakıt pillerinde oldukça saf hidrojen kullanılması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde, belli bir yüzde oranında saf olmayan hidrojene müsaade edilmektedir. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde ise CO miktarı oldukça küçük olmalıdır. Çünkü CO miktarındaki çok küçük bir artış bile katalizörün etkisini azaltmaktadır. PEM yakıt pillerinin CO’ya karşı duyarlılığının sebebi, CO’nun Pt üzerinde bloke olmasından, reaksiyon hızını ve bununla birlikte yakıt pilinin gerilimini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle yakıt pilinin verim düşmektedir. Deneysel çalışmalarda katalizör olarak bakır malzeme de kullanılmıştır [25].

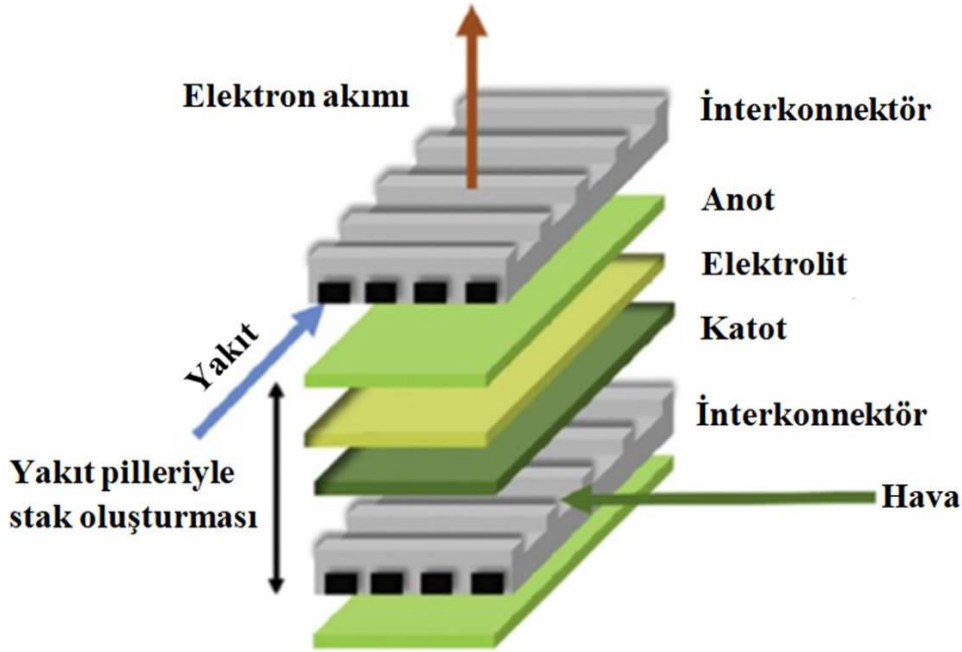
### 3.3.3. Gaz difüzyon tabakası

Gaz difüzyon tabakası bipolar plaka ile elektrotlar arasında yer alır. Gaz difüzyon tabakasının gözenekli yapıya sahip olması hem elektrotlara gaz akışını hem de katalizör

tabakasında oluşan suyun gaz akış kanallarına ileterek yakıt pilinden uzaklaşmasını sağlamaktadır [26]. Gaz difüzyon tabakası aynı zamanda bipolar plaka ile katalizör tabakası arasındaki elektriksel iletkenliği sağlamaktadır. Ayrıca bazı yakıt pillerinde, gaz difüzyon tabakası ile katalizör tabakası arasında bulunan mikro gözenekli tabaka adı verilen ara tabaka vardır. Mikro gözenekli tabakanın görevi, yakıt pilinde su yönetimini ve performansı iyileştirmektir.

### 3.4. KOYP

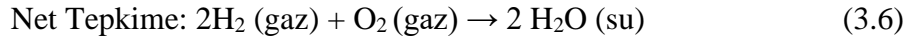
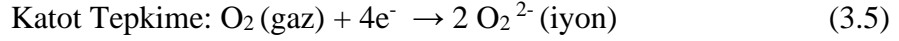
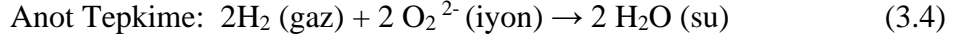
KOYP, Şekil 3.2’de görüldüğü bir katı elektrolit ile birlikte anot ve katotta bulunan iki adet gözenekli elektrot ve interkonnektörün (gaz taşıyıcının) sandviç şeklinde birleştirilmesiyle oluşmuştur [27].



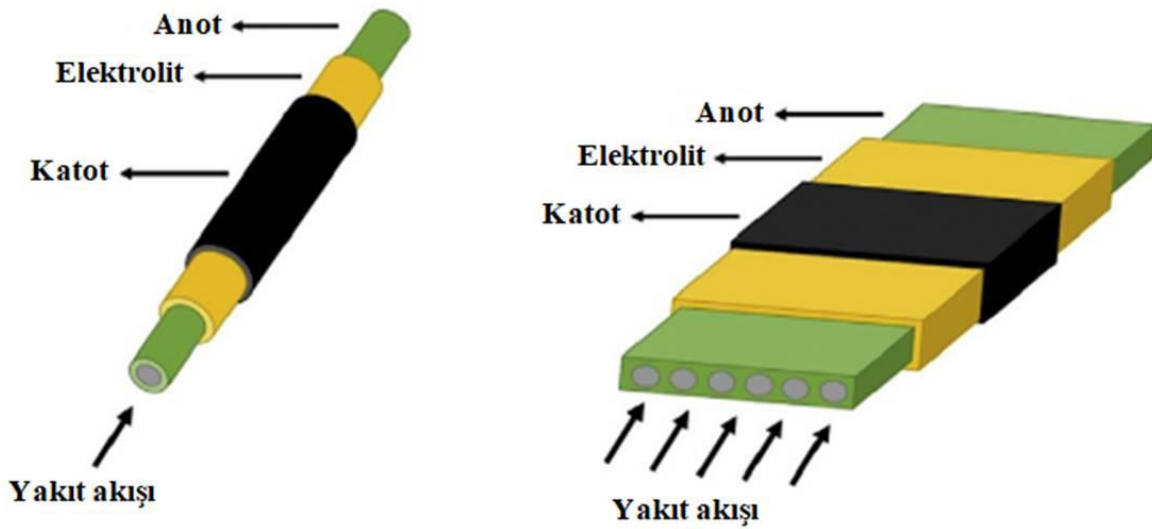
Şekil 3.2. KOYP'nin bileşenleri ve çalışma prensibi [27]

Yakıt pilinin gücünü artırmak gerektiğinde KOYP'ler bir araya getirilerek stak adı verilen seri veya paralel yakıt pili grupları oluşturulur [28]. Anot tarafında yakıt ( $H_2$ ), katot tarafında ise oksijen (hava) KOYP'ye girer. Katot elektrotunda oksijen indirgeme reaksiyonuyla oksijen iyonu oluşur. Sonra oksijen iyonu katı elektrolitten anot elektrotuna

geçerek yakıt oksidasyonu su buharı ve elektron meydana gelir. Daha sonra, elektronlar dış devre üzerinden katot tarafına geçerek elektrokimyasal enerji üretilir.



PEMYP’de iyon hareketi anottan katoda doğru olurken KOYP’de iyon hareketi katottan anoda doğru olmaktadır. Anot elektrotunda genellikle Ni-YSZ (itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit), katot elektrotunda ise perovskit kristal yapıları stronsiyum lantan manganit (LSM) malzemeleri kullanılır. Diğer yandan, yüksek çalışma sıcaklıklarında katı elektrolit malzemesi olarak yüksek iyonik iletkenliğe sahip seramik temelli YSZ kullanılırken düşük çalışma sıcaklıklarında ise gadolinyum katkıları seryum oksit (GDC) kullanılmaktadır [29]. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, temel olarak, düzlemsel ve borusal olmak üzere KOYP’DE iki adet stak tasarımı vardır.



Şekil 3.3. Silindirik ve düz borusal KOYP stak tasarımı [30]

Geleneksel düzlemsel stak tasarımına göre borusal stak tasarımı, KOYP’nin hacimsel güç yoğunluğuna arttırmada daha etkili bir stak konfigürasyonudur [31].

## 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda hidrojenle çalışan yakıt pilleriyle sürdürülebilir ve çevre dostu enerji üretilmesi ile ilgili çalışmalar artış göstermesine rağmen yakıt pili teknolojisi hala gelişme sürecindedir. Yakıt pillerinde yüksek maliyet, performans ve dayanıklılıkla ilgili sorunlar yakıt pillerinin ticarileşmesi önünde en büyük engellerdir. Diğer yakıt pili türlerine göre PEMYP ve KOYP ile ilgili çalışmalar Türkiye’de daha fazladır. Bu bölümde PEMYP ve KOYP’nin gelişiminde zorluklarla ilgili bilgiler verilmiş ve Türkiye’de bu yakıt pili türlerinde yapılan çalışmalar yıllara göre incelenmiştir.

### 4.1. PEMYP Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar

PEMYP’nin maliyetinin azaltılması, performansın iyileştirilmesi ve ömrünün artırılması, PEMYP’de çözülmesi gereken önemli problemlerdendir [32, 33]. PEMYP bileşenlerinin pahalı malzemelerden üretilmesi bu bileşenlerin daha ekonomik malzemelerle üretilmesiyle ilgili çalışmaların artmasına neden olmuştur. Diğer yandan, PEM yakıt pillerinde uygun su ve ısıl yönetiminin yapılmaması, farklı ortam sıcaklarında çalışma ve yakıt pili bileşenlerinde kirlenme, PEM yakıt pillerinde performansı ve dayanıklılığı azaltmaktadır [34, 35].

PEM yakıt pillerinden kararlı bir çalışma ve yüksek verimlilik sağlanması için PEM yakıt pillerinde su yönetimi, hayati önem taşımaktadır [36]. PEM yakıt pillerinde uygun su yönetiminin sağlanması için bipolar plaka, katalizör ve gaz difüzyon tabakalarındaki su taşmalarının önlenmesine ve yeterli membran hidrasyonuna ihtiyaç vardır [37].

PEMYP’nin çalışmasında membranın iletkenliğini artırmak için membranı nemli tutmak gerekir. Membran dehidrasyonunun nedenlerinden biri yüksek akım yoğunluğu nedeniyle elektroozmotik kuvvetin artmasıyla oluşan katottan anoda doğru geri su difüzyonunun membrana yeteri kadar su sağlamamasıdır [38, 39]. Diğer yandan, Wu ve arkadaşları yüksek çalışma sıcaklığında suyun buharlaşmasının nafion membranda dehidrasyona neden olduğunu göstermişlerdir [40]. Diğer yandan PEMYP’de çok fazla su birikmesi özellikle katot kısmında su taşmasına neden olmaktadır. PEM yakıt pillerinde su taşması reaksiyon gazlarıyla birlikte yakıt piline su girmesi, katot kısmında

elektrokimyasal reaksiyon sonucu su üretilmesiyle ve protonun anottan katoda hareketi sonucu elektroosmotik akıyla suyun taşınmasıyla olmaktadır. Su taşması nedeniyle gaz difüzyon tabakasındaki gözeneklerin boyutunun küçülmesi ve tıkanması katalizör tabakasına reaktant geçişini azaltmaktadır [41]. Bundan dolayı katot reaksiyonu stokiyometrik koşulların altında gerçekleşmekte ve yakıt pilinin potansiyeli düşmektedir. Ayrıca, yakıt pilinin uzun süre suya maruz kalması yakıt pili bileşenlerinin bozulmasına ve kirlenmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı su yönetimi PEMYP teknolojisinde kritik önem taşımaktadır ve en çok çalışılan konulardan birisidir.

PEM yakıt pilleri çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması, kısa vadede yakıt pilinin performansını uzun vadede ise dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. [42]. Bu nedenle yakıt pilinde sıcaklık değişiminin fazla olduğu çalışma koşullarında ısı yönetim önem kazanmaktadır. Eğer yakıt pili çalışmadan uzun süre 0 °C altında sıcaklığa maruz kalırsa yakıt pilinin içindeki kalan su donacaktır. Bu da PEMYP bileşenlerinin üzerinde termal ve mekanik gerilmelere ve yakıt pili bileşenlerinin hasar görmesine hatta kırılmasına neden olabilmektedir. Düşük yakıt pili çalışma sıcaklıklarıyla birlikte akımın düşmesi, yakıt pilindeki bağıl nemi artırarak membranın şişmesine neden olmaktadır. Diğer yandan, yüksek akım koşullarında yakıt pili normalden daha sıcak ve daha kuru olduğundan membranın boyutu küçülmektedir. Bu boyut değişiklikleri, membranda mekanik gerilmelere sebep olmaktadır [43].

PEMYP'nin donma sıcaklığının altında çalışması aynı zamanda yakıt pili bileşenlerinin birbirinden ayrılmasına neden olabilmektedir. Bu da bileşenlerin arasında termal ve elektriksel temasın azalmasına yol açmaktadır [44]. Ayrıca, donma sıcaklığında gaz difüzyon tabakasındaki gözeneklerin içinde suyun donması gaz difüzyon tabakasını bozulmasına neden olmaktadır. Diğer yandan, PEMYP'de çalışma sıcaklığının 80 üzerine çıkması membran ve katalizörde bozulmalara neden olmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklığı aynı zamanda radikallerin oluşmasını ve elektrokimyasal yüzey alanının azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle PEM yakıt pillerinde sıvı, hava ve evaporatif soğutma gibi farklı teknikler geliştirilmiştir. Fly ve arkadaşları evaporatif soğutma yönteminin yakıt pilin çalıştığı süredeki sıcaklık değişimine etkisini sayısal olarak incelemişler ve  $\pm 2$  °C den az sıcaklık değişimiyle sıvı soğutma yöntemiyle benzer sonuçlar elde edildiğini görmüşlerdir [45]. Son yıllarda PEM yakıt pillerinde ısı yönetimle ilgili birçok çalışma yapılmasına

rağmen çok düşük ve çok yüksek çalışma sıcaklıklarının, yakıt pilinin performansına ve dayanaklılığına etkisinin anlaşılması için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

PEM yakıt pillerinde performans azalmasının nedenlerinden biri de yakıt pili bileşenlerinin zamanla bozulmasıdır. Hem anot hem de katot tarafındaki katalizör tabakasındaki karbon destek üzerinde elektron iletkenliği sağlayan Pt veya Pt alaşımlı nanoparçacıklar kullanılmaktadır. Borup ve arkadaşları başlangıçta küçük ve düzgün dağılım gösteren Pt parçacıklarının zamanla birbirleri arasındaki boşluğun artmasıyla ve parçacıkların büyümesiyle katalizörün elektrokimyasal aktif yüzey alanının azalmasına neden olduğunu rapor etmişlerdir [46]. Aktif yüzey alanındaki azalmaya karbon kâğıdında yapısal kayıplar katkıda bulunmaktadır. Çevrim sayısı, yakıt pilinin sıcaklığı ve nemlendirme düzeyi elektrotlarda bozulmanın önemli nedenlerindedir. Elektrotlarda bozulma daha düşük çıkış voltajına neden olmaktadır.

Diğer yandan gaz difüzyon tabakasındaki hidrofobik yapının zamanla bozulmasıyla tabakadan uzaklaştırılmayan su gözenekleri tıkamaktadır. Bunun sonucunda katalizör tabakasına taşınan reaktant gazları azalmasıyla yakıt pilinin performansı düşmektedir [47, 48]. Sürekli su ile temas halinde olan bipolar plakaların yüzey malzemesi zamanla çözülerek suyla membrana taşınmakta ve membrana zarar vermektedir [49]. Ayrıca, zamanla bipolar plaka yüzey direncinin artması ohmik direncin artmasına neden olarak pil verimliliğini etkiler. Diğer yandan yakıt pilleri birbirlerine bağlanırken iletkenliği artırmak amacıyla yüksek sıkıştırma basıncıyla oluşan mekanik stres polar plakaların kırılmasına ve deformasyonuna neden olabilir [50].

PEMYP'de kirlenmeye neden olan yabancı maddeler ya yakıt pili bileşenlerini oluşturan malzemelerden üretilmekte ya da reaksiyona giren maddelerle birlikte yakıt piline taşınmaktadır. Bu nedenle PEMYP'de metal, alkali metal ve amonyum iyonları, silikon ve katalizör parçacıklarının yanı sıra CO, NO ve SO<sub>2</sub> bulunabilir [51]. Yakıt pilindeki yabancı maddeler yakıt pili bileşenlerine nüfuz ederek yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonları yavaşlatmakta ve bu da performansın önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. PEMYP'nin performansı etkileyen faktörlerden birisi de yakıt veya oksidanın yeterli olmamasından dolayı yakıt pilinin stokiyometrik koşullarda çalışmamasıdır. Yakıt veya oksijenin yetersiz olması, yakıt pili voltajını düşürmektedir. Ayrıca, oksijen veya



hidrojenin az olması, katotta hidrojen veya anotta oksijen üretimine neden olabilmektedir [52].

Sonuç olarak, kötü su ve ısı yönetimi, bileşenlerin kirlenmesi, kimyasal ve mekanik olarak bozulması gibi faktörler PEMYP'nin performansını düşürmekte, dayanıklılığını ve ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenle, PEMYP'de bu tür bozulma mekanizmalarıyla ilgili daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

#### **4.2. KOYP Uygulamalarında Karşılaşılan Zorluklar**

KOYP, diğer yakıt pili türleriyle karşılaştırıldığında, hidrojen, hidrokarbonlar, karbonmonoksit vb. gibi çeşitli yakıtlar kullanmasına rağmen yüksek çalışma sıcaklığında çalışması, yüksek maliyete sahip olması, KOYP'ye girmeden önce yakıtın sülfürden arındırılmasının gerekmesi ve yakıt piline giren havadan kaynaklanan CO<sub>2</sub> zehirlenmesi KOYP'nin olumsuz yönlerindedir [30].

KOYP'nin çalışması sırasında yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulması ticarileşmesini de engellemektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında elektrot/elektrolit malzemelerinde ve bileşenlerin ara yüzeyinde termal gerilmeler, kimyasal değişiklikler ve özellikle nano ölçekli malzemelerde topaklanmalar oluşmaktadır. Bunun sonucunda KOYP'nin ömrü azalmaktadır. Diğer yandan, KOYP'nin çalışma sıcaklığı 700-900 °C'den 400-600 °C'ye düşürüldüğünde yakıt pilinin performansının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, KOYP için düşük sıcaklıkta iletkenlik özelliğini koruyabilen, geleneksel yüksek sıcaklıkta çalışan malzemelerden daha yüksek verime sahip yeni ve ucuz elektrot ve elektrolit malzemeleriyle ilgili araştırmalar sürmektedir [53]. Ancak malzeme seçerken KOYP'nin diğer bileşenleri ile uyumu dikkate alınmalıdır.

KOYP'nin katot tarafında yakıttan kaynaklı sert ortam koşulları olmamasına rağmen havanın içinde bulunan CO<sub>2</sub> katot malzemelerini olumsuz yönde etkilemektedir. CO<sub>2</sub> zehirlenmesi olarak adlandırılan bu olay oksijen indirgeme reaksiyonlarını sınırlamakta ve bazı durumlarda katot elektrotunda korozyona ve yüzeyde ayrışmaya neden olmaktadır [54].

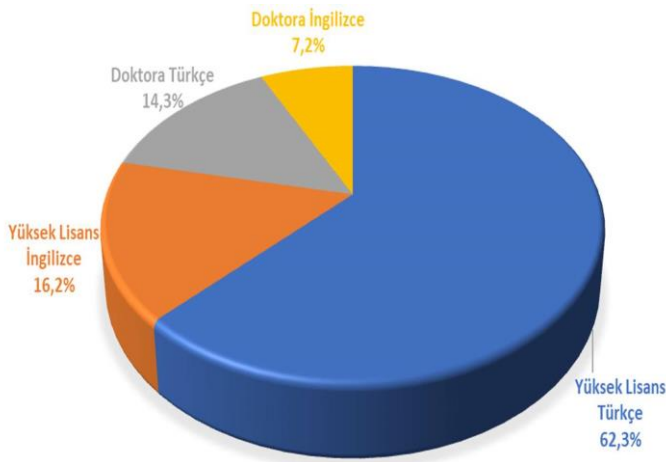
### 4.3. Yakıt Pilleriyle İlgili Ülkemizde Yapılan Çalışmalar

Bu araştırma kapsamında incelenen tezlere Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından ulaşılmıştır. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi arama motorunda aranacak kelimelere onaylanmış tezler, yakıt pili ve yakıt pilleri yazılarak 2000-2021 yılları için tarama yapılmıştır. Tarama sonucunda 265 adet tez elde edilmiştir. Bu tezler analiz edilirken hangi dilde yazıldığı, hangi yıllarda daha fazla yayın yapıldığı, hangi üniversitede üretildikleri, hangi anabilim dalında yapıldığı, hangi yakıt pili türünde ve ne konuda çalıştığı gibi soruların cevapları aranmıştır. Çalışmada elde edilen bulgular grafikler ve tablolar haline getirilerek gösterilmiştir.

Yakıt pilleriyle ilgili incelenen tezlerin düzeylerine ve yazım diline göre dağılımı ve yüzdelik dilim grafiği sırasıyla Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Tezlerin düzeylerine göre dağılımı

Tez Türü	Tez Sayısı		Toplam
	Türkçe	İngilizce	
Yüksek Lisans	165	43	208
Doktora	38	19	57
<b>Genel Toplam</b>			265



Şekil 4.1. Tezlerin seviyesine ve yazım diline göre yüzdelik dağılımı

Çizelge 4.1 incelendiğinde ülkemizde yakıt pilleriyle ilgili yüksek lisans tezlerinin doktora tezlerine göre yaklaşık dört kat daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca, Türkçe doktora tezler, İngilizce tezlerin yaklaşık üç katı iken Türkçe yüksek lisans tezleri, İngilizce tezlerin beş katından fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.1 incelendiğinde görüldüğü gibi Türkçe yüksek lisans tezlerinin oranının %62,3 ile en fazla olduğu, bunu %16,2 ve %14,3 sırasıyla İngilizce yüksek lisans ve Türkçe doktora tezlerinin izlediği ve İngilizce doktora tezlerinin %7,2 oranı ile en az olduğu görülmektedir. Ülkemizde yakıt pillerinin gelişimine yardımcı olması için yüksek lisans çalışmalarına göre daha kapsamlı ve derin araştırma gerektiren ve bilime yenilikler getirmeye amaçlayan doktora çalışmalarının artırılması gerekmektedir. Çizelge 4.2’de incelenen tez çalışmalarının yıllara göre dağılımı görülmektedir.

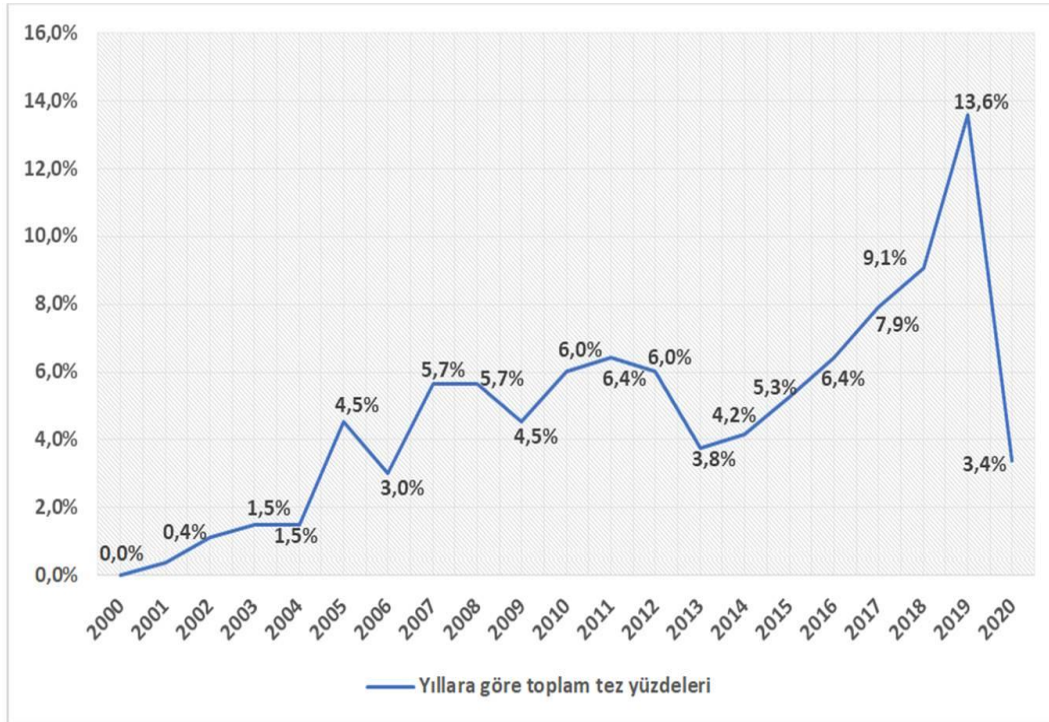
Çizelge 4.2. Tez çalışmalarının yıllara göre dağılımı

Yıllar	Yüksek Lisans		Doktora		Toplam
	Türkçe	İngilizce	Türkçe	İngilizce	
2000	0	0	0	0	0
2001	0	0	1	0	1
2002	3	0	0	0	3
2003	3	1	0	0	4
2004	4	0	0	0	4
2005	10	2	0	0	12
2006	7	0	1	0	8
2007	8	7	0	0	15
2008	11	1	1	2	15
2009	11	0	1	0	12
2010	12	0	3	1	16
2011	6	3	5	3	17
2012	8	2	3	3	16
2013	4	1	3	2	10
2014	6	3	2	0	11
2015	9	2	3	0	14
2016	10	4	2	1	17

Çizelge 4.2. Tez çalışmalarının yıllara göre dağılımı (devam)

Yıllar	Yüksek Lisans		Doktora		Toplam
	Türkçe	İngilizce	Türkçe	İngilizce	
2017	11	8	0	2	21
2018	9	6	5	4	24
2019	28	3	5	0	36
2020	5	0	3	1	9
<b>Toplam</b>	165	43	38	19	265

Çizelge 4.2'deki veriler incelendiğinde tez sayısının 36 ile en fazla 2019 yılında olduğu bunu 24 ve 21 tez sayısı ile 2018 ve 2017 yıllarının takip ettiği görülmektedir. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi 2000-2002 yıllarında yakıt pilleri ile ilgili toplam tez sayısı 4 iken ilerleyen yıllarda genel olarak arttığı görülmektedir. Şekil 4.2'de tez çalışmalarının yıllara göre yüzdelik oranları görülmektedir.



Şekil 4.2. Tezlerin yıllara göre yüzdelik oranları

Şekil 4.2'deki sonuçlara göre Türkiye'de yakıt pilleriyle ilgili akademik çalışmalar son yıllarda artış göstererek 2019 yılında %13,6 ile en yüksek orana ulaşırken 2020 yılında

%3,4'e gerilemiştir. Grafikten de açık bir şekilde gözlemlenebildiği gibi 2000'li yıllardan günümüze kadar yapılan akademik çalışmalar artış ve azalışlar gösterse de genel olarak grafiğin yönünün yukarı doğru olduğu görülmektedir. Grafikte dikkat çeken bir diğer nokta ise yayın çalışmalarının 2013 yılından sonra yakaladığı artış ivmesini 2020 yılında devam etmemesidir.

Çizelge 4.3'de yakıt pilleriyle ilgili üretilen yüksek lisans ve doktora tezlerinin Türkiye'deki üniversitelere dağılımı görülmektedir.

Çizelge 4.3. Yüksek lisans tezlerinin üniversitelere göre dağılımı

	Üniversite Adı	Tez Sayısı		Toplam
		Türkçe	İngilizce	
1	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi	26	1	27
2	İstanbul Teknik Üniversitesi	13	2	15
3	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	0	13	13
4	Yıldız Teknik Üniversitesi	13	0	13
5	Gazi Üniversitesi	12	0	12
6	Gebze Teknik Üniversitesi	11	0	11
7	Kocaeli Üniversitesi	11	0	11
8	Dokuz Eylül Üniversitesi	2	6	8
9	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	8	0	8
10	Boğaziçi Üniversitesi	0	7	7
11	Atatürk Üniversitesi	6	0	6
12	Sabancı Üniversitesi	0	6	6
13	İstanbul Üniversitesi	5	0	5
14	Sakarya Üniversitesi	5	0	5
15	Süleyman Demirel Üniversitesi	5	0	5
16	Bursa Uludağ Üniversitesi	3	1	4
17	Ege Üniversitesi	4	0	4
18	Erciyes Üniversitesi	3	1	4
19	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi	4	0	4
20	Fırat Üniversitesi	3	0	3
21	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	3	0	3

Çizelge 4.3. Yüksek lisans tezlerinin üniversitelere göre dağılımı (devam)

	Üniversite Adı	Tez Sayısı		Toplam
		Türkçe	İngilizce	
22	Afyon Kocatepe Üniversitesi	2	0	2
23	Bingöl Üniversitesi	2	0	2
24	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	2	0	2
25	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü	0	2	2
26	Marmara Üniversitesi	1	1	2
27	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	2	0	2
28	Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi	2	0	2
29	Selçuk Üniversitesi	2	0	2
30	Bahçeşehir Üniversitesi	0	1	1
31	Başkent Üniversitesi	1	0	1
32	Dicle Üniversitesi	1	0	1
33	Fatih Üniversitesi	1	0	1
34	İnönü Üniversitesi	1	0	1
35	İstanbul Ticaret Üniversitesi	1	0	1
36	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	1	0	1
37	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi	1	0	1
38	Karabük Üniversitesi	1	0	1
39	Karadeniz Teknik Üniversitesi	1	0	1
40	Kırıkkale Üniversitesi	1	0	1
41	Koç Üniversitesi	0	1	1
42	Melikşah Üniversitesi	0	1	1
43	Mersin Üniversitesi	1	0	1
44	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	1	0	1
45	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	1	0	1
46	Sinop Üniversitesi	1	0	1
47	Trakya Üniversitesi	1	0	1
	<b>Toplam</b>	165	43	<b>208</b>

Çizelge 4.3'te görüldüğü sayısal veriler, yakıt pilleriyle ilgili tez sayısı en fazla olan üniversiteden en az olan üniversiteye doğru sıralanmıştır. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi 27 ile tez sayısı en fazla olan üniversitedir. İkinci sırada 15 tez sayısı ile İstanbul Teknik Üniversitesi bulunmaktadır. Ayrıca, yakıt pilleriyle ilgili 2000-2020 yılları

arasında, toplamda 47 üniversitede yüksek lisans tez çalışması yapılmasına rağmen 18 üniversitede sadece 1 adet tez çalışması yapıldığı gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.4’de yakıt pilleriyle ilgili üretilen yüksek lisans ve doktora tezlerinin Türkiye’deki üniversitelere dağılımı görülmektedir.

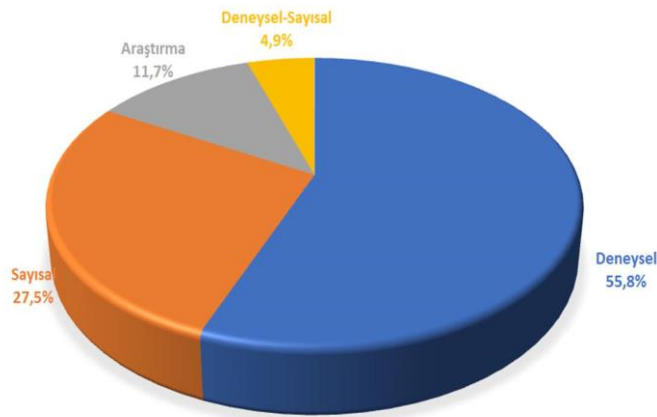
Çizelge 4.4. Doktora tezlerinin üniversitelere göre dağılımı

	Üniversite Adı	Tez Sayısı		Toplam
		Türkçe	İngilizce	
1	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	0	8	8
2	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi	5	1	6
3	Ege Üniversitesi	4	1	5
4	Atatürk Üniversitesi	4	0	4
5	İstanbul Teknik Üniversitesi	2	2	4
6	Gazi Üniversitesi	3	0	3
7	Kocaeli Üniversitesi	3	0	3
8	Sabancı Üniversitesi	0	3	3
9	Yıldız Teknik Üniversitesi	2	1	3
10	Hacettepe Üniversitesi	2	0	2
11	Mersin Üniversitesi	2	0	2
12	Ondokuz Mayıs Üniversitesi	1	1	2
13	Sakarya Üniversitesi	2	0	2
14	Bingöl Üniversitesi	1	0	1
15	Dokuz Eylül Üniversitesi	1	0	1
16	Erciyes Üniversitesi	1	0	1
17	Erzurum Teknik Üniversitesi	1	0	1
18	Fırat Üniversitesi	1	0	1
19	Marmara Üniversitesi	1	0	1
20	Selçuk Üniversitesi	0	1	1
21	Süleyman Demirel Üniversitesi	1	0	1
22	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	1	0	1
23	Yeditepe Üniversitesi	0	1	1
	<b>Toplam</b>	38	19	<b>57</b>

Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi yakıt pilleriyle ilgili 23 üniversite doktora düzeyinde tez üretmesine rağmen bu üniversitelerin 10 tanesinde yalnızca 1 adet tez üretilmiştir. Ayrıca, Ortadoğu Teknik Üniversitesi 8 tez sayısı ile birinci sırada, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi ise 6 tez sayısı ile ikinci sırada olduğu görülmektedir. Diğer üniversitelerle karşılaştırıldığında, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesinde üretilen toplam tez sayısının fazla olmasında son teknoloji ile donatılan yakıt pili laboratuvarlara yapılan yatırımların, yakıt pilleri ile ilgili bu üniversitede yapılan bilimsel çalışmaların ve üniversite-sanayi iş birliği çerçevesinde yürütülen Ar-Ge çalışmalarının katkısı büyüktür. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.3'de incelenen tezlerin yakıt pili türlerine göre dağılımı sırasıyla görülmektedir.

Çizelge 4.5. Tez çalışmalarının türlere göre dağılımı

	Çalışma Türleri	Tez Sayıları				Toplam
		Yüksek Lisans		Doktora		
		Türkçe	İngilizce	Türkçe	İngilizce	
1	Deneysel	92	25	16	15	148
2	Sayısal	49	12	10	2	73
3	Deneysel-Sayısal	12	5	12	2	31
4	Araştırma	12	1	0	0	13
		<b>Toplam</b>				265



Şekil 4.3. Tezlerin çalışma türlerine göre yüzdeleri dağılımı



Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi incelenen tezlerin 148'i deneysel, 73'ü sayısal, 31'i deneysel-sayısal ve 13'ü araştırma çalışmalarından oluşmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.3'te görüldüğü gibi yakıt pilleriyle ilgili deneysel çalışmalar %55,8 olarak en fazla iken araştırma çalışmaları %4,9 olarak en azdır. Sayısal çalışmalar %27,5 ile deneysel çalışmaların yaklaşık yarısı kadardır. Sayısal çalışmalar deneysel çalışmalara göre hem daha düşük maliyetlidir hem de sayısal çalışmalardan modelin geometrisi ve farklı parametreleri değiştirilerek daha kapsamlı bilgiler elde edilebilmektedir. Bu nedenle ülkemizde yakıt pilleri ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar sayısal çalışmalar ile desteklenmesi gerekmektedir. Çizelge 4.6 ve 4.7'de sırasıyla yüksek lisans ve doktora tezlerinin anabilim dallarına göre dağılımı ve yüzde oranları görülmektedir.

Çizelge 4.6. Yüksek lisans tezlerinin anabilim dallarına göre dağılımı

	Anabilim dalının Adı	Tez sayısı		Toplam	Yüzde
		Türkçe	İngilizce		
1	Enerji	48	16	64	30,8
2	Makine Mühendisliği	46	4	50	24
3	Kimya Mühendisliği	18	9	27	13
4	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	20	1	21	10,1
5	Kimya	9	4	13	6,3
6	Metalurji Mühendisliği	6	2	8	3,8
7	Fizik ve Fizik Mühendisliği	5	1	6	2,9
8	Mühendislik Bilimleri	2	2	4	1,9
9	Bilim ve Teknoloji	2	1	3	1,4
10	Biyokimya	2	1	3	1,4
11	Denizcilik	1	1	2	1
12	Deniz Bilimleri	1	0	1	0,5
13	Endüstri ve Endüstri Mühendisliği	1	0	1	0,5
14	Gemi Mühendisliği	1	0	1	0,5
15	Havacılık Mühendisliği	1	0	1	0,5
16	Tekstil ve Tekstil Mühendisliği	1	0	1	0,5
17	Savunma ve Savunma Teknolojileri	1	0	1	0,5
18	Polimer Bilim ve Teknolojisi	0	1	1	0,5
	<b>Toplam</b>	165	43	208	100

Çizelge 4.7. Doktora tezlerinin anabilim dallarına göre dağılımı

	Anabilim dalının Adı	Tez sayısı		Toplam	Yüzde
		Türkçe	İngilizce		
1	Enerji	20	5	25	43,9
2	Kimya Mühendisliği	3	8	11	19,3
3	Makine Mühendisliği	6	1	7	12,3
4	Kimya	2	3	5	8,8
5	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	4	0	4	7
6	Bilim ve Teknoloji	2	0	2	3,5
7	Biyoteknoloji	0	1	1	1,8
8	Mühendislik Bilimleri	0	1	1	1,8
9	Polimer Bilim ve Teknolojisi	1	0	1	1,8
	<b>Toplam</b>	38	19	57	100

Bu çalışmada, tarama sonucunda birden fazla anabilim dalında yapılan tezlerde tarama sonucunda, birinci sırada yazılan anabilim dalı esas alınmıştır. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 incelendiğinde yakıt pilleriyle ilgili yüksek lisans ve doktora tezlerinin sırasıyla %30,8 ve %43,9 ile en fazla Enerji anabilim dalında yapıldığı gözlemlenmiştir. Bunu, yüksek lisan tezlerinde % 24,0 ile Makine Mühendisliği ve doktora tezlerinde % 19,3 ile Kimya Mühendisliği anabilim dalları takip etmektedir. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi Biyokimya, Biyoteknoloji, Deniz Bilimleri, Denizcilik, Gemi, Havacılık ve Metalurji Mühendisliği, Polimer Bilim ve Teknolojisi, Savunma ve Savunma Teknolojileri Tekstil ve Tekstil Mühendisliği gibi çok farklı anabilim dallarında çok az da olsa tezlerin üretilmesi, çevre dostu hidrojen yakıtıyla çalışan yakıt pillerinin geleceğin vazgeçilmez teknolojisi olduğunu göstermektedir. Küçük ve büyük ölçekte geniş bir yelpazede uygulama alana sahip yakıt pilleri teknolojisinin Türkiye’de gelişmesinin farklı anabilim dallarında bu konuda özellikle üretime ve uygulamaya yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir.

Çizelge 4.8 ve 4.9’da yüksek lisans ve doktora tezlerinin yakıt pili türlerine göre dağılımının sayısal verileri ve yüzde oranları yer almaktadır.

Çizelge 4.8. Yüksek lisans tezlerinin yakıt pili türlerine göre dağılımı

	Yakıt Pili Türü	Tez Sayısı			
		Türkçe	İngilizce	Toplam	Yüzde
1	PEMYP	74	24	98	47,1
2	KOYP	36	9	45	21,6
3	Doğrudan alkol yakıt pili	17	8	25	12,0
4	Yakıt pili	17	1	18	8,7
5	Doğrudan borhidrür yakıt pili	9	0	9	4,3
6	Alkali yakıt pili	2	0	2	1,0
7	Ergimiş karbonatlı yakıt pili	2	0	2	1,0
8	Formik asit yakıt pili	2	0	2	1,0
9	PEM ve Doğrudan alkol yakıt pili	2	0	2	1,0
10	Biyoyakıt pili	0	1	1	0,5
11	Doğrudan karbon yakıt pili	1	0	1	0,5
12	Düşük sıcaklıkta çalışan (katı asit) yakıt pili	1	0	1	0,5
13	Gözenekli silisyum tabanlı yakıt pili membranı	1	0	1	0,5
14	Mikrobiyal yakıt pili	1	0	1	0,5
	<b>Toplam</b>	165	43	208	100

Çizelge 4.9. Doktora tezlerinin yakıt pili türlerine göre dağılımı

	Yakıt Pili Türü	Tez Sayısı			
		Türkçe	İngilizce	Toplam	Yüzde
1	PEMYP	15	10	25	43,9
2	KOYP	11	3	14	24,6
3	Doğrudan alkol yakıt pili	4	2	6	10,5
4	Yakıt pili (genel)	3	2	5	8,8
5	Doğrudan borhidrürli yakıt pili	4	0	4	7,0
6	Alkali doğrudan etanol yakıt pili	0	1	1	1,8
7	Gözenekli silisyum tabanlı yakıt pili	1	0	1	1,8
8	Mikrobiyal yakıt pili	0	1	1	1,8
	<b>Toplam</b>	38	19	57	100

Çizelge 4.8 ve 4.9 incelendiğinde hem yüksek lisans hem de doktora seviyesinde PEMYP ve KOYP türleriyle ilgili üretilen tezlerin tüm tezlerin yarısından fazla olduğu görülmektedir. Çizelge 4.8 ve 4.9’da PEMYP ile ilgili yüksek lisans ve doktora tezlerinin sırasıyla %47,1 ve %43,9 olarak birinci sırada olduğu görülmektedir. PEMYP’nin çok farklı kapasitelerde üretilmesi, düşük sıcaklıklarda çalışmasından dolayı evsel uygulamaya ve taşıtlarda kullanılmaya uygun olması gibi avantajları nedeniyle PEMYP ile ilgili çalışmaların artmasına neden olmuştur.

KOYP ile ilgili yüksek lisans ve doktora tez çalışmaları ise %21,6 ve %24,6 olarak ikinci sırada yer almaktadır. KOYP yüksek sıcaklıklarda çalışması ve verimliliğinin yüksek olması nedeniyle daha çok ticari alanlarda tercih edilmektedir. Bu nedenle Türkiye’de KOYP bileşenleri için malzeme geliştirmeyle ilgili çalışmalar artmıştır. Ayrıca, ülkemizde yakıtının hammaddesi olan bor minarelinin bol miktarda bulunduğu doğrudan borhidrür yakıt pili ve doğrudan alkol yakıt piliyle ilgili çalışmalarında toplam tez sayısına göre önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Bunun dışında, biyomedikal, tıp, atık su temizleme ve biyosensör gibi farklı uygulama alanlarına sahip mikrobiyal yakıt pilleriyle ilgili ülkemizde yüksek lisans ve doktora seviyesinde üretilen birer tane tez olması umut vericidir.

Bu kısımda Türkiye’de en fazla çalışılan PEM yakıt pilleri ve KOYP ile ilgili ülkemizdeki araştırmacılar tarafından yapılan makaleler incelenmiştir.

#### **4.3.1 PEMYP ile ilgili çalışmalar**

Diğer yakıt pili türleriyle karşılaştırıldığında, Türkiye’de en fazla PEMYP ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan literatür taramasında Türkiye’de PEMYP bileşenleri için malzeme geliştirme ilgili çalışmaların daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bayrakçeken ve arkadaşları, mikro dalga yöntemiyle hazırlanan Vulcan XC72 destekli 2-6 nm parçacık boyutuna sahip Pt ve Pt-Ru katalizörlerinin yakıt pili performansına ve CO<sub>2</sub> toleransına etkisini araştırmıştır. Onlar en iyi performansın 60 saniye mikrodalga süresiyle elde edildiğini ve Pt-Ru alaşımlı katalizörün daha iyi CO<sub>2</sub> toleransı gösterdiğini rapor etmişlerdir [55].

Bunun yanında, Bayrakçeken ve arkadaşları membran kalınlığının, gaz difüzyon tabakasındaki teflon/karbon oranının ve sıcak presleme yönteminin PEMYP performansına etkisine araştırmışlardır [56]. Araştırmada membran kalınlığının 125  $\mu\text{m}$ 'den 50  $\mu\text{m}$ 'ye düşürülmesiyle yakıt pilinin performansının arttığını buna karşın sıcak presleme yönteminin performansı düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, gaz difüzyon tabakasında teflon/karbon oranının belirli bir değere kadar artırılması, yakıt pili performansı iyileştirdiğini ancak teflon/karbon oranının daha fazla artırılması performansı kötüleştirdiğini görmüşlerdir.

Devrim ve arkadaşları sPS (sülfolanmış polisülfon) polimere  $\text{TiO}_2$  ekleyerek nanokompozit membran üretmişler ve maksimum pil performansına 0,24  $\text{W}/\text{cm}^2$  olarak 85  $^\circ\text{C}$  çalışma sıcaklığında elde etmişlerdir [57]. Diğer yandan, Fıçıcılar ve arkadaşları katalizör karbon destek yapısını geliştirmek için içi boşluklu mezo gözenekli kabuk yapısı olan karbon destek malzemesi üreterek bu malzemeyi karbon siyahı destek malzemesiyle karşılaştırmışlardır. Mezo gözenekli kabuk yapısı olan karbon destek malzemesinin katot elektrot kinetiğini ve dolayısıyla yakıt pilinin performansını geliştirmede ümit verici sonuçlar elde ettiklerini rapor etmişlerdir. [58].

Turan ve arkadaşları damgalama ve hidro şekillendirme yöntemiyle ürettikleri bipolar plakanın üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle CrN, TiN ve ZrN kaplayarak bipolar plakanın ara yüz temas direncinin yakıt pili performansına etkisini araştırmışlardır [59]. Araştırma sonucunda, TiN kaplı bipolar plakanın diğer örneklerle göre daha düşük temas direnci göstererek yakıt pili performansını artırdığını gözlemlemişlerdir.

Kahveci ve arkadaşları yanıt yüzey yöntemini kullanarak, PEMYP'de farklı hidrojen ve oksijen akış hızlarının, yakıt pili sıcaklığının ve nemlendirme sıcaklığının, su ve ısı yönetimine etkisini araştırmışlardır [60]. Yapılan çalışmada yakıt pili ve nemlendirme sıcaklığının, yakıt pilinin güç yoğunluğunu etkileyen temel etkenler olduğunu gözlemlemişlerdir. 40-55  $^\circ\text{C}$  yakıt sıcaklığında, 40-65  $^\circ\text{C}$  nemlendirme sıcaklığında ve sırasıyla 4.91 l/dak ve 3.45 l/dak hidrojen ve oksijen akış hızlarında en iyi yakıt pili performansı elde ettiklerini gözlemlemişlerdir.

Avcıoğlu ve arkadaşları florlu etilen propilen (FEP) nano parçacığı eklenmiş katalizör tabakasının PEMYP'deki su yönetimine ve performansa etkisini incelemişler [61].

Katalizör tabakasına FEP eklemenin hidrofobik özelliği artırdığı ve membran ara yüzünde su miktarı azaldığından membran dehidrasyonuna neden olduğu ve bununla yakıt pili performansını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Avcıoğlu ve arkadaşları katalizör tabakasında Pt yüzdesinin ve farklı Pt yüklemelerinin PEMYP performansına etkisini de araştırmışlardır [62]. Araştırmaları sonucunda katalizör tabakasının Pt miktarının % 20'den % 70'e çıkarılmasının katalizör tabakasının kalınlığını azaltarak iyonik ve elektronik özelliklerin iyileştirmesiyle performansı yaklaşık % 2,5 kat artırdığı, ancak katalizör tabakasında Pt yüklemesi 0,4 mg/cm<sup>2</sup>'den 1,2 mg/cm<sup>2</sup>'ye çıkarıldığında katalizör tabakasının kalınlığının artmasının yük transfer direncini artırarak performansı düşürdüğü görülmüştür.

Eren ve arkadaşları ticari Pt/C katalizörü yerine Co-N/MWCNT katalizörünü sentezlemişlerdir [63]. Sentez yaptıkları testler sonucunda Co nanoparçacıklarının çok duvarlı karbon-nanotüpler üzerinde düzenli biçimde dağıldığını ve ticari muadilleriyle benzer elektrokimyasal özellik gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca yüksek sıcaklık PEMYP testinde 150 ve 160 °C çalışma sıcaklıklarında ticari muadillerine göre maksimum güç ve akım yoğunluğunun iyileştiğini ancak 170 °C üzerinde performansın belirgin bir şekilde düştüğünü görmüşlerdir.

#### 4.3.2 KOYP ile ilgili çalışmalar

Canavar ve arkadaşları katı oksit yakıt pillerinde kanallı ve kanalsız interkonnektörler üzerindeki örgülü nikel elek kullanmasının yakıt pili performansına etkisini araştırmışlar ve kanalsız interkonnektörler üzerinde örgülü nikel elek kullanmasının katı oksit yakıt pilinin maliyeti ve üretim süresini azaltarak performansa olumlu etkide bulunduğu sonucuna varmışlardır [64].

Timurkutluk ve arkadaşları KOYP için takviye malzemesi olarak cam seramiğine cam elyaf eklenmesiyle yeni contalar geliştirilmişlerdir. Yaptıkları çekme ve kısa yığın testleri sonucunda yüksek sıcaklıklarda incelenen tüm basınçlarda gaz sızdırmazlığı elde edilirken oda sıcaklığında incelenen tüm durumlarda ise sızıntı meydana geldiğini ve sızdırmazlık performansının contaların mekanik mukavemetine bağlı olduğunu rapor etmişlerdir [65].

Timurkutluk ve arkadaşları NiO-YSZ anot fonksiyonel tabakasına gözenekli GDC (gadolinium katkılı serya) ara katmanlarının eklenmesinin anot destekli KOYP performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelemişlerdir [66]. Sonuçlar NiO-YSZ anot fonksiyonel tabakasına yerleştirilen üretim hızı yüksek ve düşük maliyetli GDC ara katmanlarının sayısının ve gözenekli yapısının katı oksit yakıt pilinin performansını iyileştirmede etkili olduğunu göstermiştir.

Önbilgin ve arkadaşları düzlemsel anot destekli KOYP elektrolitlerinin üretiminde kullanılan daldırılarak kaplama, ipek baskı ve şerit döküm yöntemlerini karşılaştırmışlardır [67]. Karşılaştırma sonucunda 0,924 W/cm<sup>2</sup>lik en iyi pik performansı, elektrolit yoğunluğuna artıran ve anot fonksiyonel tabakası ile elektrolit tabakası arasındaki ara yüz direncini azaltan ipek baskı yöntemiyle üretilen elektrolitle elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

## 5. ÜNİVERSİTE SANAYİ-İŞ BİRLİĞİ PROJELERİ

Son zamanlarda ülkemizde ileri teknoloji ürünlerinin üretilmesi ve katma değeri yüksek teknolojik ürünlerin ticarileştirilmesi konusunda devlet tarafından çeşitli destek programları oluşturulmakta ve üniversite-sanayi iş birliği projeleri teşvik edilmektedir. Bu bölümde, Tübitak MAM Enerji Enstitüsü ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde çeşitli kurumlar ve sanayi işbirliğiyle yapılan projelerden bahsedilmiştir.

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve ülkemizin sanayi kuruluşlarından VESTEL A.Ş., on yılı aşkın bir süre birlikte çalışarak önemli bir bilgi deneyimi kazanmış ve ortak bir altyapı oluşturmuşlardır. Bununla ilgili çalışmaların dünya standartlarında bir araştırma ve uygulama zeminine dönüştürülmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda, resmi olarak 2014 yılında kurulan Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi yenilenebilir enerji konusunda çalışmalarına on yılı aşkın bir süredir devam etmektedir.

Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde üniversite-sanayi işbirliğiyle KOYP VE PEMYP sistemleriyle ilgili uluslararası yayına ve patente

dönüşen projeler ve katma değeri yüksek teknolojik ürünler kazandırmak için çalışmalar sürmektedir [77].

Araştırma Merkezi bünyesinde Hidrojen Üretim ve Depolama Laboratuvarı, Yakıt Hücresi Test Laboratuvarı ve Yakıt Hücresi Üretim Laboratuvarı bulunmaktadır. Ayrıca, Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi tarafından yakıt pilleri ile ilgili yapılan akademik çalışmalarda günümüze kadar 70 adet bildiri ve 51 adet yayın [64, 65, 68-76] yapılmıştır ve halen 24 adet proje üzerinde çalışılmaktadır.

Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde güncel projeler:

- İHA'larda kullanılmak üzere reformat gaz dayanımı olan anot destekli mikro katı oksit yakıt pili sistemi geliştirme
- İHA'lar için PEMYP sisteminin geliştirme
- Zırhlı araçlara yakıt hücrelerinden yardımcı güç kaynağı üretme
- Pres yöntemiyle ara plaka üretimi ve KOYP'ye uygulama
- Hastanelere güneş enerjisine dayanan PEMYP'den elektrik üretim tesislerinin inşa edilmesi ve yüksek basınçlı elektrolizör üretme
- Doğrudan metanol yakıt pillerinin deneysel ve teorik olarak araştırma
- KOYP için seramik temelli interkonnektor geliştirme
- 1 kW'lık doğrudan alkol düşük sıcaklık KOYP geliştirme
- KOYP için anot destekli membran elektrot gurubu üretilmesiyle ilgili çalışmalar yapma
- Evsel çoklu üretim için sıcaklığı düşük ortamlarda çalışan ileri KOYP geliştirilmesi
- PEMYP'nin parametrik performans analizinin yapılması
- Beş hücreli Anot destekli KOYP stak geliştirme





Resim 5.1. Niğde Üniversitesinde geliştirilen KOYP ürünleri [77]

Araştırma Merkezi'nde, projeler kapsamında yapılan mikro-modelleme çalışmalarıyla elektrolizörler ve yakıt pilleri makro boyutun yanında mikro boyutta da incelenerek uzun zamanlar alan ve çok fazla malzeme tüketimi gerektiren deneysel çalışmalar yerine, yakıt pili ve stack optimizasyonu ve membran elektrot gruplarının üretimi gibi çalışmalar yürütülmektedir.

Ülkemizde Tübitak MAM Enerji Enstitüsü yapısı içerisinde Yakıt pili teknolojileri bölümünde 2000 yılından beri yakıt pilleri üzerinde sanayi ve diğer kurumlar ile iletişim halinde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde yakıt pillerinin katalizör, membran, bipolar plaka gibi modül bileşenlerinin tasarım ve üretim çalışmalarının yanı sıra daha farklı güç ölçeklerinin sistem tasarımları, yakıt pillerinin performans testlerinin yapılması ayrıca hidrojen üretme yöntemleri gibi konularda çalışmalar yapılmaktadır. Bunların yanı sıra taşınabilir yakıt hücreleri sistemleri, mikrokojenerasyon sistemleri ve yakıt hücrelerinin elektrikli araçlara entegrasyonu gibi alanlarda hem uygulamalı hem de tasarımsal çalışmalar yürütülmektedir.

Tübitak MAM Enerji enstitüsünde yakıt pillerinde verileri izleme ve otomatik kontrol sistemleri, yakıt hava besleme, ısı ve su yönetimi, güç ölçeklendirme gibi yakıt pili modüllerinin tasarımları ve geliştirilmesi ve üretiminin yapılması, tüketim ihtiyacına göre ölçeklendirilebilen tam kontrollü sodyum borhidrürden hidrojen üretme sistemi, evlerde kullanılacak mikrokojenerasyon sistemleri, yakıt hücrelerinin elektrikli platform diye adlandırılan elektrikli otomobillere, insansız hava araçlarına uygulanması ve menzillerinin uzatılması çalışmaları yapılmaktadır. Ayrıca Tübitak MAM Yakıt Hücresi

Laboratuvarlarında yakıt hücresi testleri içerisinde dört nokta prob yöntemi kullanılarak iletkenliklerinin ölçümü, yakıt hücrelerinin ömür süreleri ve performanslarının testleri, gaz geçirgenliği deneme testleri, bipolar plakalarının malzemelerinin üretimi gibi konularda test ve deneme çalışmaları yapılmaktadır.

Tübitak Mam Enerji Enstitüsü'nün güncel ve tamamlanmış projeleri:

*PEM yakıt hücresi bileşenlerinin geliştirilmesi ve üretimi:* 2004-2006 yılları arasında yapılması amaçlanan proje KOÇ holding tarafından desteklenmiştir. Yerli imkanlar ile yakıt hücresi bileşenlerinin prototip imalatlarının yapılması ve geliştirilmesi amaçlanmış olup proje çalışmaları sonucunda membran, bipolar plaka, elektrot üniteleri, elektrokatalizör üretimi gerçekleştirilmiştir. Resim 5.2'de üretilen ürünler görülmektedir.

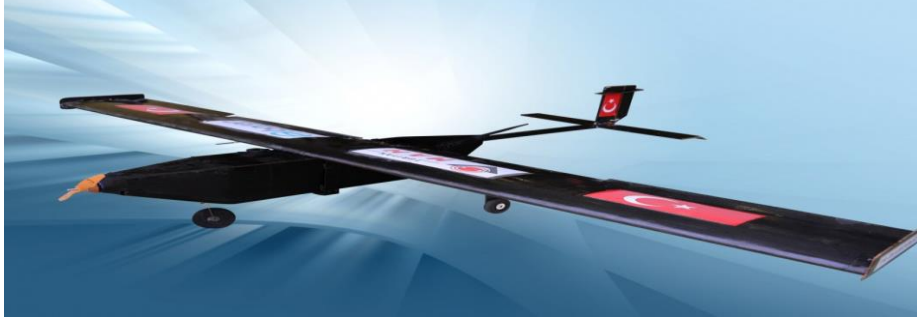


Resim 5.2. PEMYP ürünleri [78]

Seçilen yakıt pili üretimi yöntemine göre teknik ve ekonomik açılarından değerlendirilmeler yapılmıştır. Ayrıca mevcut proje çalışması esnasında hidrojen üretimi, hidrojenin depolanması ve dağıtımının yapılması konularında teknik raporlar hazırlanmıştır.

*Yakıt pili insansız hava aracı projesi:* 2013-2015 yılları arasında yapılmıştır. İnsansız hava aracı (İHA) üzerinde sodyum borhidrürün kaynak olarak kullanılması ile elde edilen 2,4 l/dk kapasiteli hidrojen gazının kullanımına uygun yakıt hücresi tasarlanarak 200 W çıkış gücünde elektrik elde edilmesi amaçlanmış ve sistem tasarımları yapılarak 2,5 metre kanat açıklığına sahip mini İHA üzerine entegrasyonu sağlanmıştır. Proje kapsamında hazırlanan

sistem yerli üretim İHA ya yerleştirilerek ve uçuş mesafesi testleri yapılmıştır. Resim 5.3'de İHA prototipi görülmektedir.



Resim 5.3. Yerli İHA prototipi [78]

Gerçekleştirilen bu testler sonucunda İHA yalnızca batarya ile 25 dakika havada kalabilirken yakıt pili sistemi entegrasyonu sonucunda havada kalma süresini iki katına çıkararak 50 dakika uçuş deneyimi gerçekleştirmiştir.

*Elektrikli araçlar için bor esaslı yakıt pili menzil artırma projesi:* 2014-2016 yılları arasında ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda sodyum borhidrür'den elde edilen hidrojenin PEM yakıt pili, Derindere motorlu araçlar bünyesinde bulunan ticari bir SUV elektrikli araç platformu içerisine entegrasyonu sağlanarak araba menzilinun uzatılması sağlanmıştır. Test aracının menzil uzatımını ölçmek için gerçekleştirilen şasi dinamometre testleri UN ECE R101 standardı çerçevesinde yapılmış ve yalnızca batarya ile yapılan testte aracın seyir süresi 208 km olarak elde edilirken yakıt pili ve hidrojen üretim sisteminin bir arada olduğu araç prototipi ile 444 km menzil uzunluğuna ulaşılmıştır. Resim 5.4'de projede kullanılan araç görülmektedir.



Resim 5.4. Menzil artırma projesinde kullanılan araç prototipi [78]

*MAM yakıt hücresi güç kaynağı projesi:* 2018-2020 yılları arasında 0 W çıkış gücü değerinde hava soğutmalı ve hava soğumalı PEM yakıt pilinin taşınabilir güç sistemi olarak tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Prototip hem askeri hem sivil kullanım amacı ile çeşitli telsiz, telefon gibi cihazların şarj edilmesinde kullanımı doğrultusunda geliştirilmiş kullanıcılarına uygun hale getirilmiştir. Çalışmanın amacı tam olarak hareket halindeki birimlerin kritik ve operasyonel yüklerinin şebekeden bağımsız hale getirilmesi amacı güdülmüş yapılmıştır. Resim 5.5'te yakıt pili güç kaynağı görülmektedir.



Resim 5.5. Yakıt pili güç kaynağı sistemi [78]

*Mamborgen-e (Mobil bor esaslı hidrojen üretme sistemi ve yakıt hücresine entegre edilmesi) projesi:* 2019-2021 yılları arasında Tübitak MAM Enerji Enstitüsü'nün güncel projelerindedir. GEN otomobil firması ile eşgüdümlü olarak Ulusal Bor Enstitüsü destekleri ile yürütülen yerli üretim elektrikli aracın menzil uzunluğunun artırılmasına yönelik olarak yapılan çalışmalarda otomobil platformuna 10 kW kapasitesinde yakıt hücresi entegre edilerek otomobil performans testlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Otomobilde kullanılan yakıt hücresinin ihtiyacı olan hidrojen 70-100



l/dk kapasiteli sodyum borhidrür kaynaklı otomatik kontrolü sağlanmış bir süreç aracılığı ile üretimi yapılarak basınçlı tankta depolanmaktadır. Bu proje kapsamında üretilen otomobil Resim 5.6'da görülmektedir.



Resim 5.6. Mamborgen-e projesi ile üretilen elektrikli otomobil [78]

*Mikrokojenerasyon sistemi saha uygulaması projesi:* Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca destek verdiği proje 2016-2022 yılları arasında gerçekleşmesi hedeflenmektedir. Yakıt pilleri kullanılarak konutlarda doğalgazdan hidrojen üretimi gerçekleştirilmesi, 2 kW elektriksel ve 8 kW ısı çıkış gücünde PEMYP teknolojisi ile bir mikrokojenerasyon sistemi prototipinin geliştirilmesi ve Bakanlık tarafından uygun görülen sahada performans testlerinin yapılması planlanmaktadır. Ayrıca bu proje Tübitak MAM Enerji Enstitüsü tarafından organizasyonu yapılan “KAMAG-1007 Mikrokojen”

(2006-2010) projesinin devamı olarak kabul edilmektedir. Resim 5.7'de mikrokojenerasyon sistemi görülmektedir.



Resim 5.7. Mikrokojenerasyon saha uygulaması sistemi [78]

## 6. BULGULAR

İncelenen yüksek lisans ve doktora tezlerinde PEMYP ve KOYP nin yapısal elemanları için malzeme geliştirme ile ilgili deneysel çalışmaların fazlalığı dikkat çekmektedir. PEMYP ve KOYP bileşenlerinde kullanılan malzemelerin pahalılığı ve uzun vadede bu yakıt pillerinde dayanıklılık ve performansla ilgili sorunlar, araştırmacıları farklı malzeme arayışına yöneltmiştir. Çizelge 6.1 ve 6.2’de sırasıyla yüksek lisans ve doktora seviyesinde PEMYP bileşenlerinde kullanılan farklı malzemelerle ilgili deneysel tez çalışmaları yıllara göre verilmiştir.

Çizelge 6.1. PEMYP ile ilgili deneysel yüksek lisans tez çalışmaları

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2006	Yılmaz, B. [79]	Anot elektrot	Rodyum oksit, kobalt oksit	Polarizasyon farkının en fazla elektrokimyasal biriktirme yöntemiyle üretilen rodyum oksit anotta elde edilmesi
2007	Bulut, Ş. [80]	Gaz difüzyon tabakası	Politetrafloroetilen (PTFE)	Püskürtme ve ezme yöntemleriyle üretilen gaz difüzyon tabakasında geçirgenliğin iyileşmesi
2010	Kahraman, H. [81]	Bipolar plaka	PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemiyle CrN (krom nitrür) ve TiN (titanyum nitrür) kaplama	CrN kaplamanın TiN kaplamaya göre korozyon dayanımını daha da iyileştirmesi
2014	Daş, E. [82]	Katot katalizör tabakası	Polipirol (PPy) ve poli (3,4-etilendioksifen) (PEDOT)	PPy ve PEDOT ile sırasıyla %35 ve %12 karbon içeren destek malzemeleriyle en iyi performans elde edilmesi
2016	Öztürk, A. [83]	Mikro gözenekli tabaka	PTFE, florlanmış etilen propilen (FEP), polidimetilsiloksan (PDMS)	Diğer polimerlere göre PDMS ile daha iyi performans elde edilmesi

Çizelge 6.1. PEMYP ile ilgili deneysel yüksek lisans tez çalışmaları (devam)

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2017	Çelik, M. K. [84]	Katot katalizör tabakası	TiO <sub>2</sub> ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> destek malzemesi	Vulcan (karbon siyahı) destek malzemesine karıştırılan TiO <sub>2</sub> 'nin Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 'e göre daha iyi performans göstermesi
2018	Nuriyev, F. [85]	Membran	Fosfolanmış ve sülfolanmış TiO <sub>2</sub> katkılı polipropilen	TiO <sub>2</sub> katkısı arttıkça membran performansının iyileşmesi
2018	Özdemir, Y. [86]	Membran	Bisfenol A diglisid eter (BADGE), etilen glikol diglisid eter (EGDE), $\alpha$ - $\alpha'$ -dibromo-p-ksilen (DBpX) ve tereftal aldehit (TPA) ile hazırlanan kovalent çapraz bağlanmış polibenzimidazol (PBI) bazlı membranlar	Yüksek sıcaklık Pem yakıt pilinde BADGE ile hazırlanan PBI bazlı membranla en iyi performansın elde edilmesi
2019	Dursun S. [87]	Katot katalizör tabakası	Kobalt ftalosiyanınin (CoPc)	Vulcan, grafen ve CNT ile birlikte Copc kullanılmasıyla yakıt pili performansında iyileşme

Çizelge 6.2. PEMYP ile ilgili deneysel doktora tezi çalışmaları

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2008	Bayrakçeken, A. [88]	Katalizör tabakası	Pt, Pt-Ru ve karbon destek malzemesi (Vulcan VXR, MWCNT, Black Pearl 2000)	Diğer katalizörlere göre Pt-VXR katalizöründe elektrokimyasal yüzey alanı ve PEMYP performansının artması ve Pt-Ru bazlı katalizörle yakıt içindeki CO <sub>2</sub> kaynaklı güç kayıplarının azalması
2011	Okan, B. S. [89]	Katalizör tabakası	Grafit oksit ve grafen nanotabaka	Kolay ve ucuz yöntemle grafit oksit ve grafen tabakaları kullanılarak destek malzemesi üretimi ve bunun sonucunda Pt dağılımının ve yakıt pili performansının artması



Çizelge 6.2. PEMYP ile ilgili deneysel doktora tezi çalışmaları

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2016	Avcıoğlu, S. E. [90]	Katalizör tabakası	PTFE, florlanmış etilen propilen (FEP) ve tetrafloroetilen perfloropropil vinil eter kopolimeri (PFA)	Hidrofobik nanoparçacık (PTFE, FEP ve PFA) içeren düşük Pt yüklü katalizör tabakaların kullanılmasıyla performansın ve su yönetiminin iyileşmesi
2017	Kaplan, B. Y. [91]	Gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası	Karbon ve selüloz lif esaslı kompozit malzeme, indirgenmiş grafen oksit (iGO) ve karbon siyahı (KS)	Elektriksel iletken kompozit gaz difüzyon tabakasının üretilmesi, elektrospreyleme yöntemiyle iGO ve KS kullanılarak katalizör tabakalarının üretilmesi ve elektrospreyleme ile üretilen katalizör tabakasında yakıt pili gücünün iyileşmesi
2018	Daş, E. [92]	Katalizör tabakası	Grafen nanoplaka (GNPs), sentezlenmiş indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve Vulcan XC-72 (karbon siyahı)	GNPs ve rGO kullanarak ve bunlara Vulcan XC-72 eklenerek (hibrit) destek malzemelerinin hazırlanması, süperkritik CO <sub>2</sub> depozisyon tekniği ile Pt katalizörü sentezlenmesi ve hibrit destek malzemeli katalizörlerle daha iyi sonuç elde edilmesi
2018	Radha, M. A. R. [93]	Membran	Polivinil Alkol (PVA), saf ve modifiye sepiyolit (MS)	PVA ve MS üretilen membranın özellikleri nasyon membranla karşılaştırıldığında umut verici sonuçlar elde edilmesi
2019	Ungan, H. [94]	Gaz difüzyon tabakası	Polidimetilsiloksan (PDMS) ve 3-(Aminopropil) trietoksilan (APTES)	Gaz difüzyon tabakasında PDMS ve APTES hidrofobik polimerleri kullanarak su yönetiminin iyileştirilmesi

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi Türkiye’de PEMYP ile yapılan deneysel tez çalışmalarında bipolar plaka, gaz difüzyon tabakası, mikro gözenekli tabaka ve katalizör tabakaları ve membran için farklı malzemeler önerilmiştir. Malzemelerin fiziksel karakterizasyonunda Brunauer, Emmett ve Teller (BET), Fourier transform infrared spektroskopisi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD), Termogravimetrik analiz (TGA), taramalı elektron mikroskopu (SEM), temas açısı ve yüzey pürüzlülük ölçümü gibi yöntemler kullanılmıştır. Malzemenin elektrokimyasal karakterizasyonunda ise çevrimsel voltametri (CV), oksijen redüksiyon reaksiyonu (ORR) analizi, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), yaşlandırma (aging) ve yakıt pili performans analizi gibi teknikler kullanılmıştır. PEMYP yakıt bileşenlerinde istenilen yapısal özelliğin sağlanması için bu bileşenlerine uygulanan hazırlama yöntemleri önemlidir. Örneğin, Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi elektrospreyleme ve süperkritik CO<sub>2</sub> depozisyon tekniği ile katalizör tabakasının özellikleri iyileştirilmiştir. Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de Türkiye’de PEMYP ile yapılan deneysel tez çalışmalarında malzeme maliyetini azaltma, bileşenlerin dayanıklılığını ve yakıt pilinin performansını artırma ve su yönetimini iyileştirme gibi konuların ağırlık kazandığı görülmektedir.

Çizelge 6.3 ve 6.4’de sırasıyla yüksek lisans ve doktora seviyesinde KOYP bileşenlerinde kullanılan farklı malzemelerle ilgili deneysel tez çalışmalar yıllara göre verilmiştir.

Çizelge 6.3. KOYP ile ilgili deneysel yüksek lisans tez çalışmaları

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2011	Mat, A. [95]	Anot ve katot	NiO (nikel oksit)-Q ve LSM 20P kontak pastası	Anot ve katotta sırasıyla NiO-Q ve LSM 20P iletken pastalarının kullanılmasıyla ticari pastalardan daha yüksek performans elde edilmesi
2013	Canavar, M. [96]	İnterkonnektör	Ni elek	İnterkonnektörlerde farklı örgülü nikel eleklerin performansa etkisinin incelenmesi
2014	Yaraşan, Ö. [97]	Anot, elektrolit	V (vanadyum) ve Mn (mangan)	Anot ve elektrolite V ve Mn eklenmesiyle performansın iyileşmesi

Çizelge 6.3. KOYP ile ilgili deneysel yüksek lisans tez çalışmaları (devam)

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2017	Topcu, A. [98]	İnterkonnektör	Crofer 22 (Bileşiminde Ni, Mn ve Al gibi elementler içeren ferritli paslanmaz çelik)	Mikro-tüp tipi KOYP üretimi ve %35 parafin ile en düzgün anot destek yapısının elde edilmesi
2018	Fazlıoğlu, B. [99]	Anot	Mn ve V emdirilmiş anot sistemi	Anoda Mn ve V ile emdirme işlemi uygulanması anot performansının artması
2018	Uğur, A. [100]	Anot, katot ve elektrolit	Ni:YSZ ve parafin (anot), LSM-YSZ (katot) elektrolit (YSZ)	Mikro-tüp tipi KOYP üretimi ve %35 parafin ile en düzgün anot destek yapısının elde edilmesi
2019	Evcimen, S. [101]	Anot ve katot	GDC (Gadolinium Katkılı Serya) ScSZ (Skandiyum Oksit Dop Edilmiş Zirkonyum Oksit)	Orta sıcaklıkta çalışan ScSZ elektrolitli KOYP'ler için anot ve katoda GDC eklenerek hücre performansının artırılması

Çizelge 6.4. KOYP ile ilgili deneysel doktora tezi çalışmaları

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2012	Beyribey, D. B. [102]	Anot ve elektrolit	$V_{0.13}Mo_{0.87}O_{2.935}$ (Molibden vanadyum oksit), üç farklı katı asit (rubidyum fosfat tellurat, rubidyum selenate ve sezyum dihidrojen fosfat tellurit)	$V_{0.13}Mo_{0.87}O_{2.935}$ ile anot elektrot ve üç farklı katı asitle elektrolit üretilmesi ve anot elektrotu düşük sıcaklıkta, elektrolitin ise düşük ve orta sıcaklıkta KOYP'de uygulanması
2016	Özen, M. K. [103]	Elektrolit	$Bi_2O_3$ (bizmut oksit)- $Ho_2O_3$ (holmiyum oksit)- $Dy_2O_3$ (disprosyum oksit) kompozit malzeme	Kompozit malzemeyle üretilen membranın uzun süreli ısı işleminden sonra yapısal, kimyasal, ısıl ve elektriksel özelliklerinin bozulmaması

Çizelge 6.4. KOYP ile ilgili deneysel doktora tezi çalışmaları(devam)

Yıl	Yazar	Yakıt pili bileşeni	Malzeme	Bulgular
2018	Yalaz, E. [104]	Elektrolit	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Gadolinium oksit) ve (ZrO <sub>2</sub> ) (Zirkonyum oksit) ikili bileşiği	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ikili sistemiyle üretilen elektrolitle 23,973 mW/cm <sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilmesi
2020	Gürbüz, A. [105]	Elektrolit	ZrO <sub>2</sub> (zirkonyum oksit), Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (itriyum oksit) ve Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (iterbiyum oksit) üçlü toz bileşiği	ZrO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ile üretilen elektrolitle 313,9 mW/cm <sup>2</sup> güç yoğunluğunun elde edilmesi

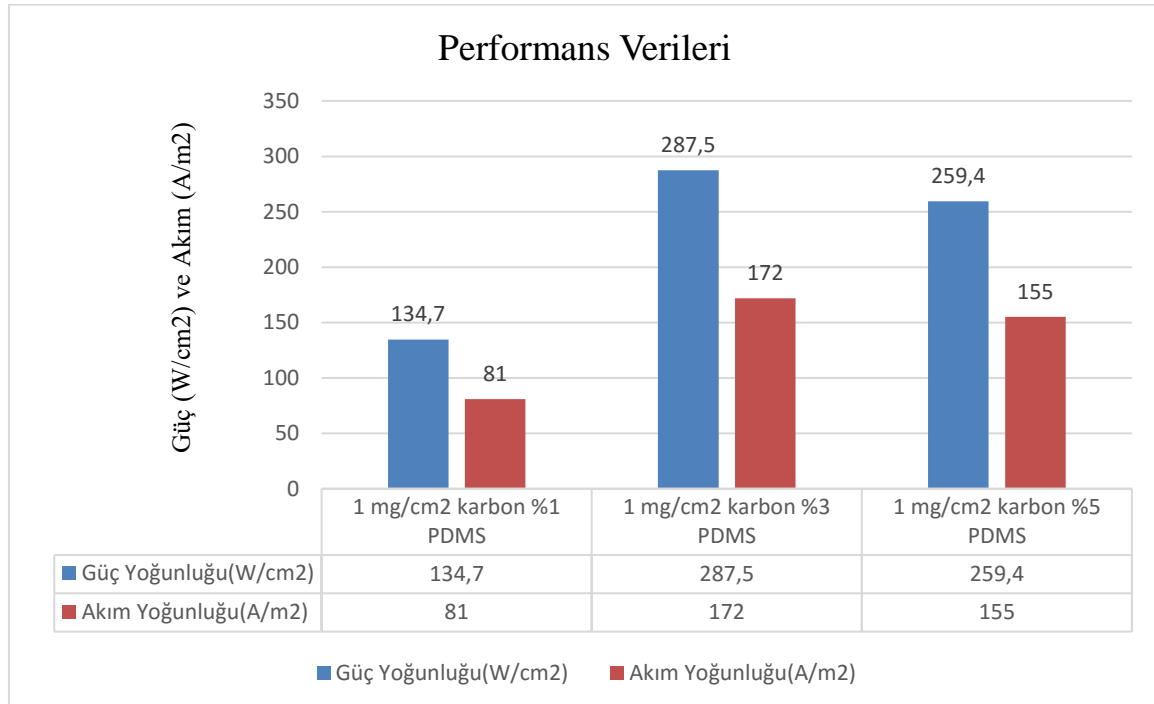
Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de görüldüğü gibi Türkiye’de KOYP ile yapılan deneysel tez çalışmalarında interkonnektör, elektrolit, anot ve katot için metal, oksitler, ikili ve üçlü bileşikler gibi farklı malzemeler kullanılmıştır. KOYP’lerde çalışma sıcaklığının (800-1000 °C) çok yüksek olması bu yakıt pillerinde bileşenler için kullanılan malzemeye oldukça kısıtlamaktadır. Ayrıca, diğer önemli sorun bu malzemeler yüksek maliyetli olmasıdır. Çizelge 6.3 ve 6.4’de görüldüğü gibi Türkiye’de KOYP sistemlerindeki bu dezavantajlara paralel olarak düşük maliyetli bileşen malzemelerinin geliştirilmesi ve düşük ve orta sıcaklıkta KOYP performansına artıracak yeni malzemelerin üretilmesi gibi konularda çalışmaların arttığı görülmektedir. Ayrıca PEMYP ve KOYP ile ilgili incelenen tezlerde aynı danışmanın birçok tezi yönettiği görülmektedir. Bu durum, Türkiye’de bazı üniversitelerde yakıt pilinin gelişimi ile ilgili bir altyapının oluştuğunu göstermektedir.

## 6.1. PEMYP Çalışmalarının Performans Açısından Karşılaştırılması

### 6.1.1 Su yönetimi

PEM yakıt pillerinde iyon geçişi için membranın yeterince nemli olması gerekirken aşırı sudan dolayı gaz geçiş yollarının tıkanmaması gerekir. Bunun için optimum su yönetimi gereklidir. PEM Yakıt pillerinde su yönetimini iyileştirmek için mikro gözenekli katmanda florlanmış etilen propilen (FEP), politetrafloroetilen (PTFE), ve polidimetilsiloksan (PDMS) polimerleri kullanılarak hidrofobik yüzey oluşturulmuştur [83]. Şekil 6.1’de

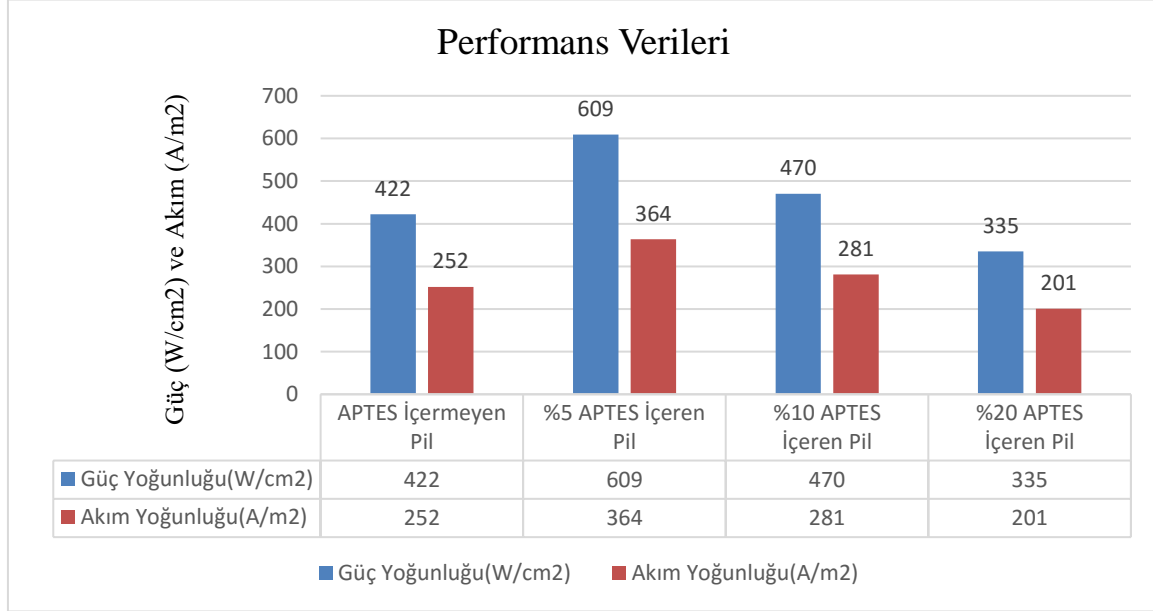
görüldüğü gibi 65 °C nemlendirme sıcaklığıyla kütlece %3 PDMS (236,53 g/mol) yüklemesinin yapıldığı pilde mikro gözenekli tabakanın yüzeyinin hidrofobikliği sayesinde yakıt pili performansında iyileşme gözlemlenmiştir. PTFE ve FEP polimerleriyle karşılaştırıldığında PDMS polimerinin düşük miktarda mikro gözenekli katmanda kullanılması yakıt pili performansını önemli ölçüde artırmıştır. Bu nedenle PDMS polimeri yüksek hidrofobik özelliğinden dolayı yakıt pilinin performansını geliştirmede umut verici bir malzemedir.



Şekil 6.1. Farklı PDMS yüklemeleri için test sonuçları

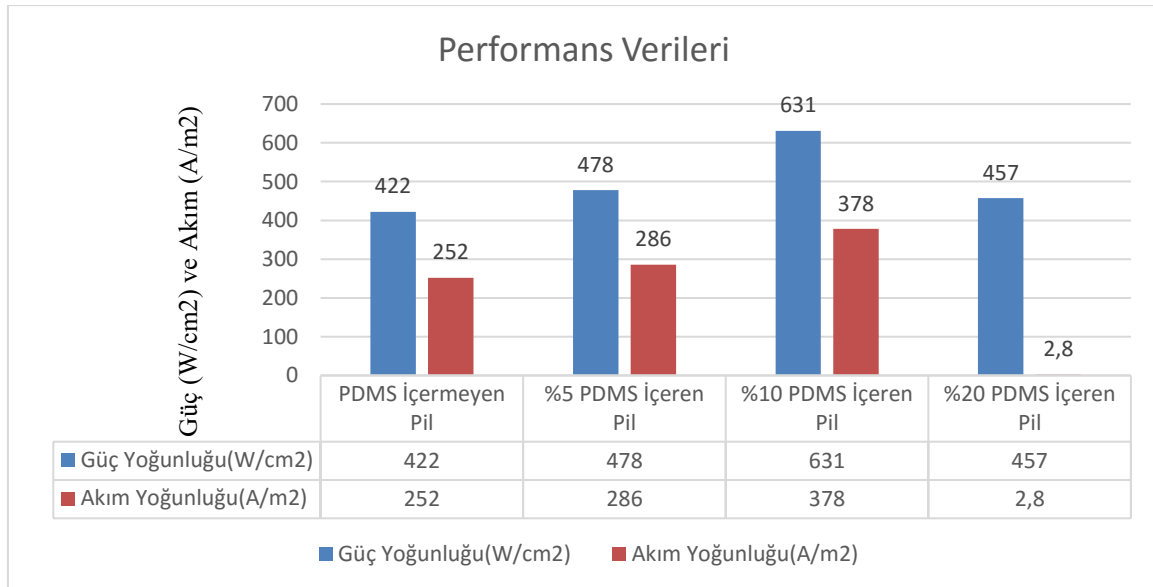
Bunun yanında su taşmalarını önlenmesi ve kesintisiz reaksiyonun gerçekleşmesini için gaz difüzyon tabakasında PDMS ve (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES) polimerleri kullanılarak hidrofobik özellik taşıyan gaz difüzyon tabakaları yüzeyleri elde edilmiştir [94]. İki farklı GDL yüzeyine (GDL 25 BC ve GDL 34 BC) polimerlerin çeşitli miktarlarda (%5, %10, %20) yüklenmesiyle membran elektrot yapıları oluşturulmuştur. GDL 34 BC'nin PEM yakıt pilleri için daha iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Şekil 6.2'de 70 °C nemlendirme sıcaklığında 0,6 V'a karşılık gelen APTES içermeyen ve APTES kullanılarak oluşturulan GDL 34 BC kullanılan yakıt pillerinin akım ve güç karakteristikleri gösterilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi GDL 34 BC yüzeyine APTES

polimeri yüklenmesinde en iyi performans %5 APTES polimeri yüklenmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 6.2. APTES içermeyen ve APTES’li GDL 34 BC yüzeylerinin akım ve güç yoğunlukları

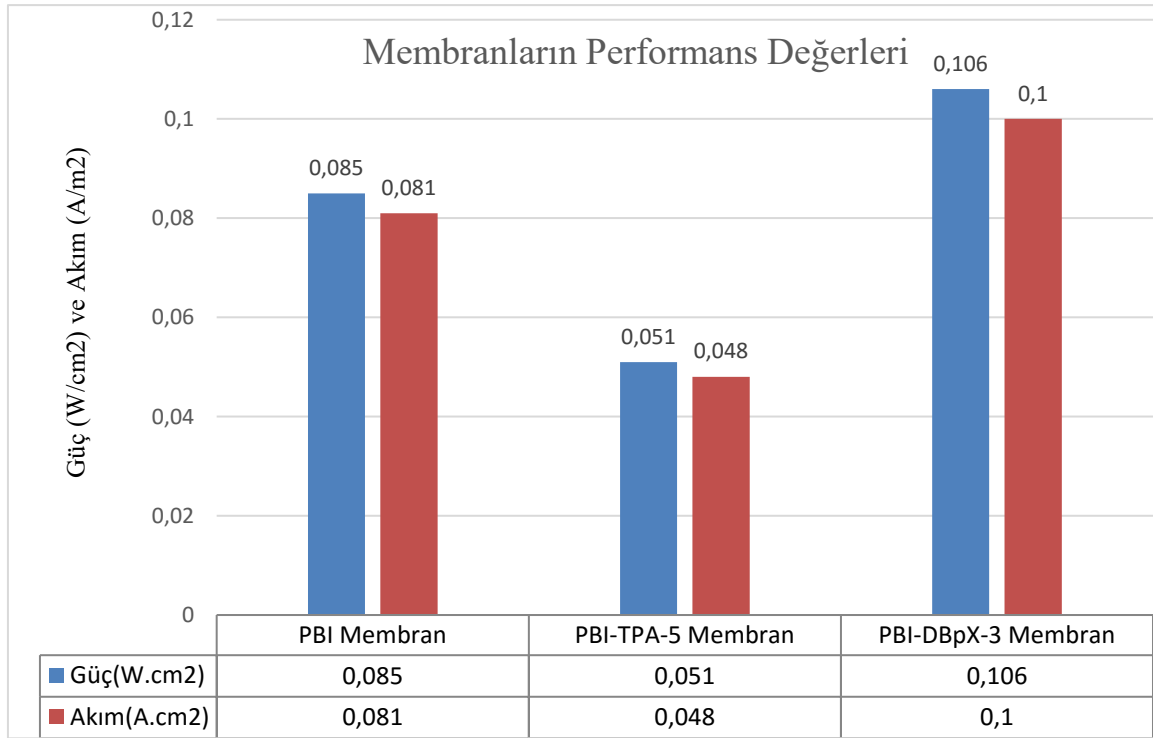
Şekil 6.3’de görüldüğü gibi 70 °C nemlendirme sıcaklığında 0,6 V’a karşılık gelen GDL 34 BC yüzeyine PDMS polimeri yüklenmesinde en iyi performans %10 PDMS polimeri yüklenmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 6.3. PDMS içermeyen ve PDM’li GDL 34 BC yüzeylerinin akım ve güç yoğunlukları

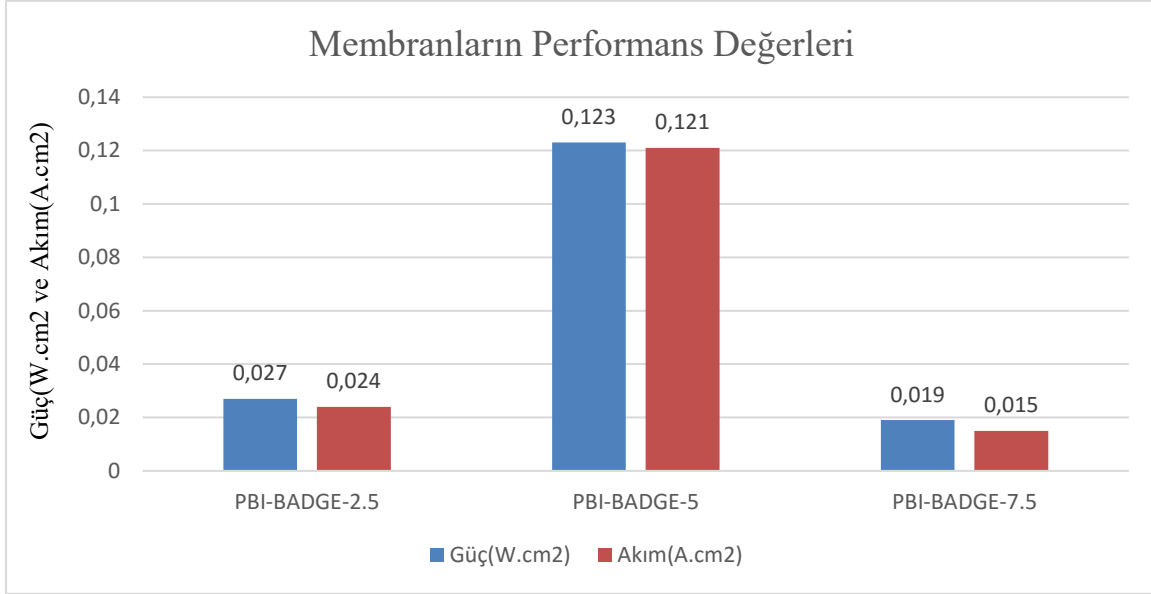
### 6.1.2 Membran geliştirilmesi

Yüksek sıcaklığa maruz kalan membranlarda asit kaybından dolayı performans kayıplarının yaşandığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri için BADGE, TPA ve DBpX kullanılarak düşük asit kayıp oranlarına sahip kovalent çapraz bağlı polibenzimidazol membranlar geliştirilmiştir [86]. Şekil 6.4'te PBI, PBI-TPA-5 (ağırlıkça % 5 TPA) ve PBI-DBpX-3 (ağırlıkça %3 DBpX) membranlarının 0.6 V gerilimde akım ve güç karakteristikleri görülmektedir. Şekil 6.4'te görüldüğü gibi PBI-DBpX-3 membranı ile en yüksek güç ve akım yoğunluğu elde edilmiştir.



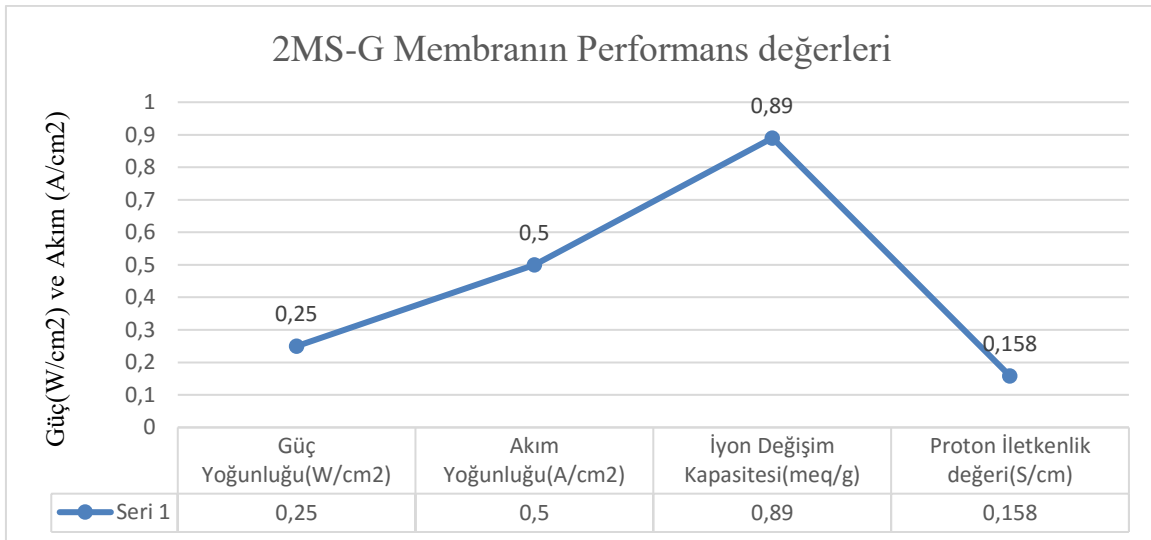
Şekil 6.4. PBI bazlı TPA ve DBpX içeren membranların akım ve güç karakteristikleri

Çapraz bağlayıcıların etkisinin incelenmesi amacı ile ağırlıkça %2,5, %5 ve %7,5 BADGE çapraz bağlayıcısı kullanılarak yakıt pili performansları ölçülmüştür. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi 0,6 V gerilimde PBI-BADGE-5 membranı ile sırasıyla en yüksek akım ve güç yoğunluğu 0.121 A/cm<sup>2</sup> ve 0.123 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. PEM yakıt pillerinde yüksek çalışma sıcaklığı su ve ısı yönetimini kolaylaştırıldığı için önemlidir. PBI-BADGE-5 membranı yüksek sıcaklık yakıt pili uygulamalarında en iyi performansı göstermiştir.



Şekil 6.5. PBI bazlı BADGE çapraz bağlı membranların akım ve güç karakteristikleri

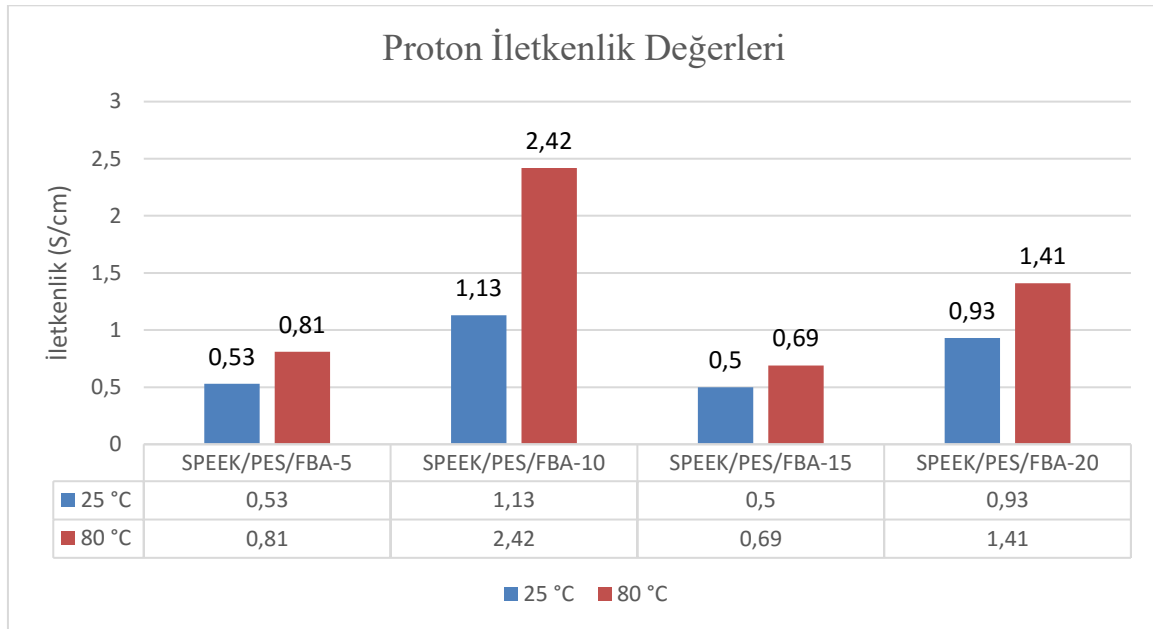
Yaygın kullanılan ticari membran olan nafion pahalı malzemedir. Bu nedenle farklı fosforik asit katkısı oranlarıyla (%10, %20, %30, %40 ve %50) polivinil alkol kullanılarak alternatif membranlar sentezlenmiştir [93]. Farklı fosforik asit yüzdeleriyle hazırlanan solüsyonlar içerisinde en iyi değeri %30 fosforik asit ile oluşturulmuş polivinil alkol membranı sağlanmıştır. Bundan dolayı bu membrana farklı oranlarda (%2, %5, %10, %15 ve %20) saf sepiolit (SP) ve modifiye sepiolit (MS) katkı maddeleri eklenmiştir. Şekil 6.6'da görüldüğü gibi en iyi yakıt pili performansı 0,6 V'a %2 modifiye sepiolit içeren 2MS-G nano-kompozit membran ile elde edilmiştir.



Şekil 6.6. 2MS-G nanokompozit membranın performans testi sonuçları



PEM yakıt pillerinde yaygın şekilde kullanılan nafion membrana alternatif olarak sülfolanmış poli (eter-eter-ke-ton) (SPEEK) / poli (etersülfon) (PES) / floroborik asit (FBA) karışım membranı sentezlenmiştir [107]. Şekil 6.7’de SPEEK/PES membranına %5, %10, %15 ve %20 oranlarında FBA yüklemesi sonucunda sentezlenen membranların. 25 °C ve 80 °C sıcaklıklarda proton iletkenlik değerleri görülmektedir. Şekil 6.7’de görüldüğü gibi 25 °C ve 80 °C sıcaklıklarda % 10 FBA yüklemesiyle sentezlenen SPEEK/PES/FBA-10 membranın diğer karışım membranlarına göre proton iletkenliği açısından daha iyi performans sağlanmıştır. Bunun yanında, SPEEK/PES/FBA-10 membranı ile mekanik özellikleri açısından tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

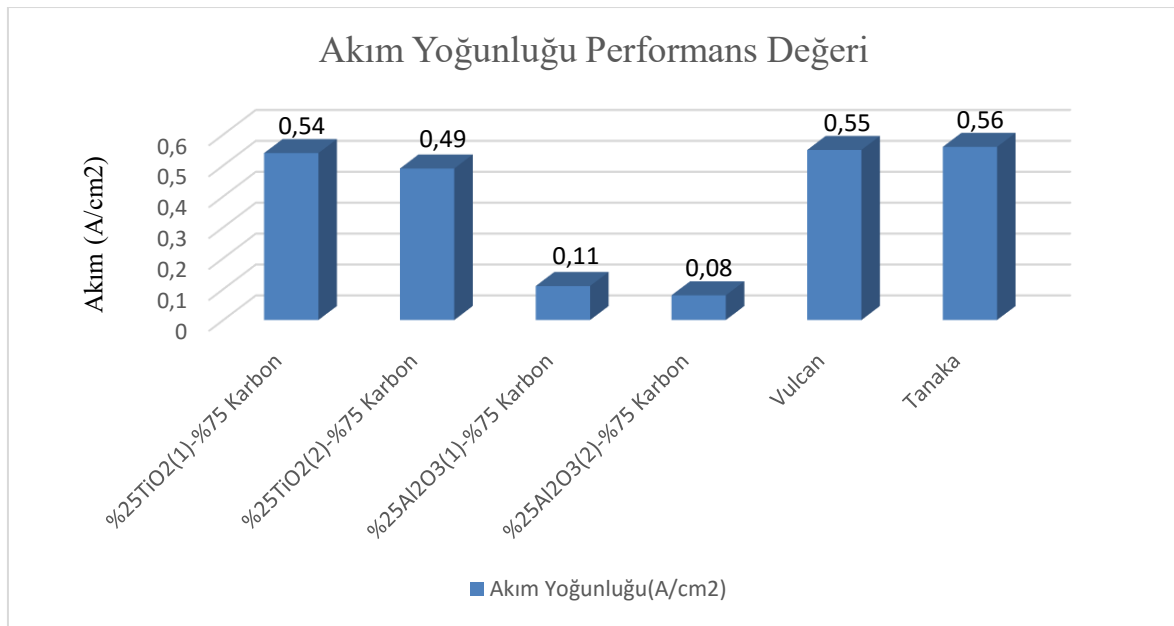


Şekil 6.7. SPEEK/PES/FBA membranının proton iletkenlik değerleri

### 6.1.3 Katalizör geliştirilmesi

Katalizör tabakasındaki destek malzemesinin karbon korozyonuna uğraması PEM yakıt pillerinin ticarileşmesi önünde büyük bir engeldir. bulunan karbon miktarı uygun elektriksel iletkenlik açısından önemlidir. Bunun yanında katalizör tabakasındaki karbon miktarı düşük olduğunda pil performansının azaldığı gözlemlenmiştir. Katalizör tabakasındaki karbon destek malzemesine ek olarak kimyasal olarak dayanıklı, yakıt pilinde oluşacak oksidasyonlara ve katalizörlerin bozunmalarına dirençli olan farklı yüzey alanlarına sahip  $TiO_2$  ve  $Al_2O_3$  destek malzemeleri sentezlenmiştir [84].  $TiO_2(1)$  ve

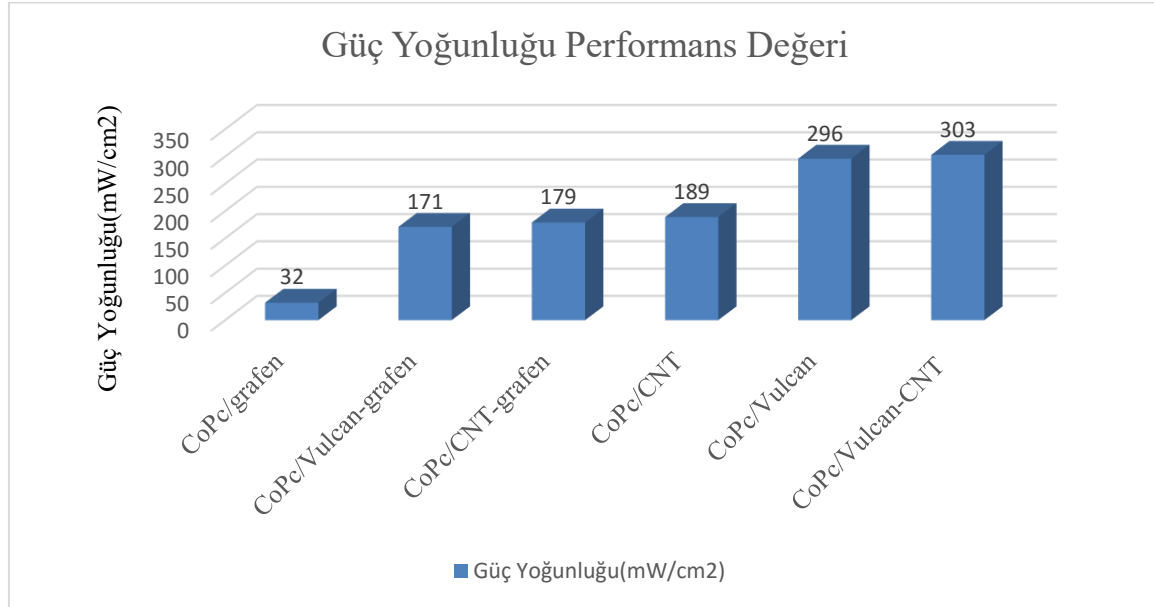
TiO<sub>2</sub>(2) destek malzemelerinde yüzey alanı sırasıyla 250 m<sup>2</sup>/g ve 45 m<sup>2</sup>/g iken Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2) destek malzemelerinde yüzey alanı sırasıyla 220 m<sup>2</sup>/g ve 30 m<sup>2</sup>/g'dir. Şekil 6.8'de %75 karbon içeren TiO<sub>2</sub>(1), TiO<sub>2</sub>(2), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2) malzemeleri ile oluşturulmuş katalizörlerin pil performanslarının tanaka ve vulcan katalizörlerinin pil performansları ile karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekil 6.8'de görüldüğü gibi ağırlıkça %75 karbon içeren TiO<sub>2</sub> destek malzemeleriyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> destek malzemelerine göre oldukça yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca TiO<sub>2</sub> içeren destek malzemeleriyle vulcan ve tanaka destek malzemelerine göre çok yakın akım yoğunluğu elde edilmiştir.



Şekil 6.8. Farklı destek malzemeli katalizörlerin pil performanslarının karşılaştırılması

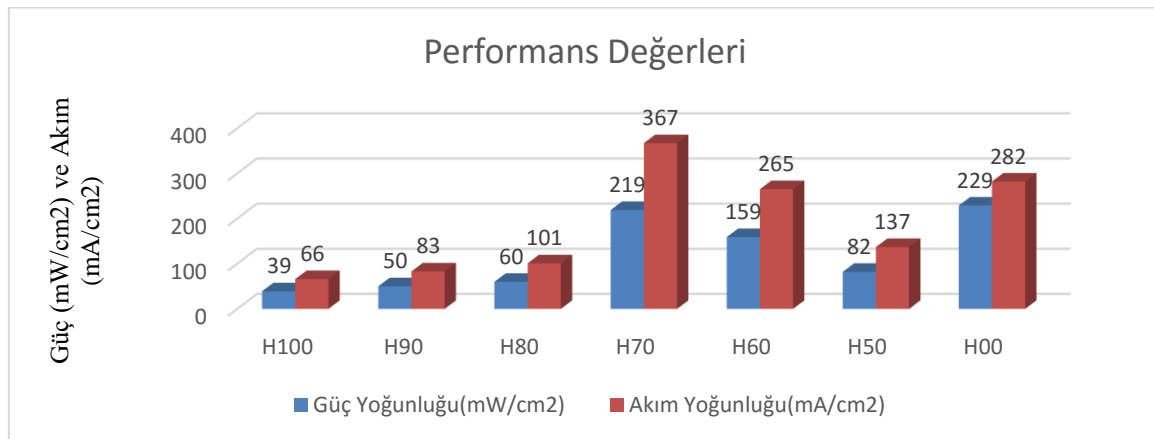
Katalizörlerde kullanılan Pt nanopartikülleri Pt çözünmesi, kirletici maddelere karşı duyarlılık ve yüksek maliyet gibi olumsuz yönleri vardır. Alternatif olarak kobalt Grafen, vulcan XC72, CNT ve hibrit malzemelerle oluşturulan destek malzemeleri ile birlikte oksijen indirgenme katalizörü olarak kobalt ftalosiyaninin (CoPc) kullanılmıştır [87]. Çalışmada en iyi sonuçlara %100 nemli ortamda 60 °C sıcaklıkta ve 5 psi geri basıncında elde edilmiştir. Şekil 6.9'da %100 nem, 5 psi geri basınç ve 60 °C çalışma sıcaklığında, CoPc/grafen, CoPc/Vulcan-grafen, CoPc/CNT-grafen, CoPc/CNT, CoPc/Vulcan, CoPc/Vulcan-CNT katalizörlerinin yalıt pili performansları görülmektedir. Şekil 6.9'da görüldüğü gibi en iyi güç yoğunluğu Vulcan-CNT hibrit destekli CoPc katalizörleriyle elde

edilmiştir. Vulcan-CNT karışımı karbon siyahına alternatif bir destek malzemesi olma özelliğindedir.



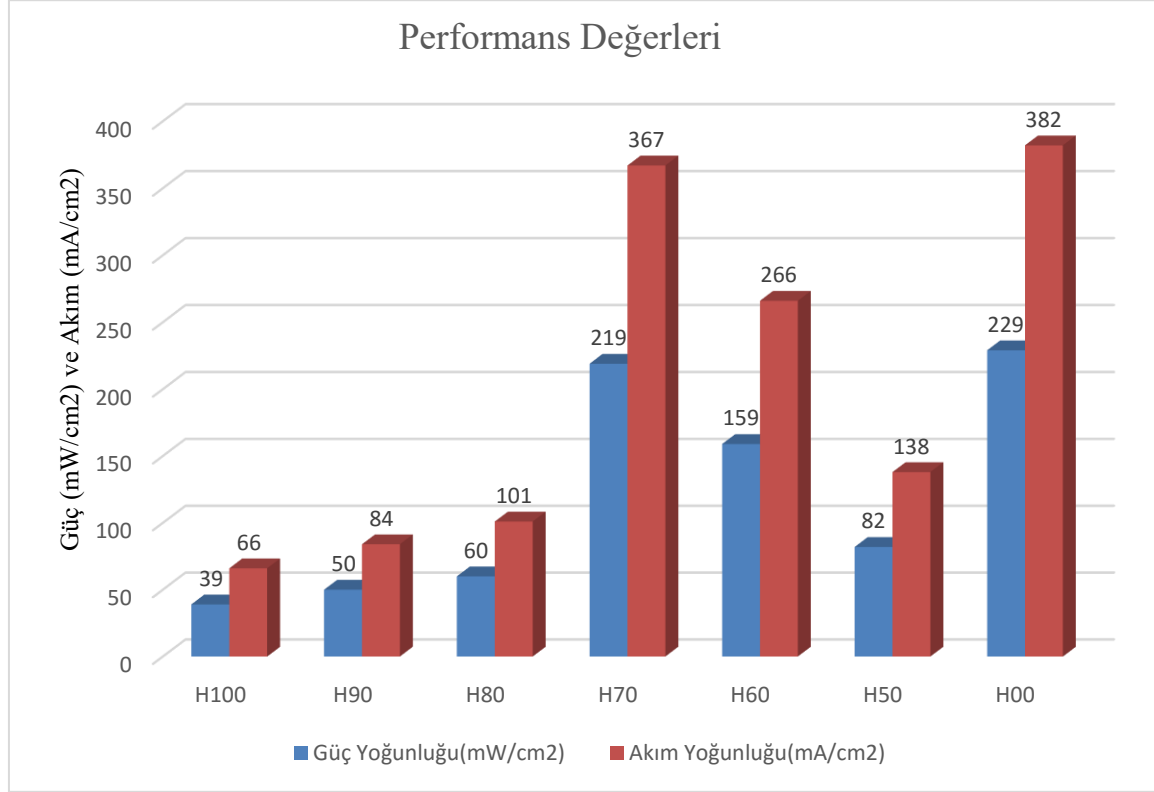
Şekil 6.9. Farklı destek malzemeli CoPc katalizörlerinin performans sonuçları

Grafen nanoplakanın (GNPs), Grafen oksit (rGO) ve Vulcan XC-72 (CB) destek malzemeleri üzerine süperkritik karbondioksit (scCO<sub>2</sub>) deposizyon tekniği ile Pt katalizörü sentezlenmiştir [92]. Şekil 6.10'da 0,6 V'a H00 (ağırlıkça % 100 CB), H50 (ağırlıkça % 50 GNPs), H60, H70, H80, H90 ve H100 (ağırlıkça % 100 GNPs) destekli Pt katalizörlerinin performans sonuçları görülmektedir. En iyi sonuç ağırlıkça % 70 GNPs içeren (H70) destek malzemesiyle elde edilmiştir.



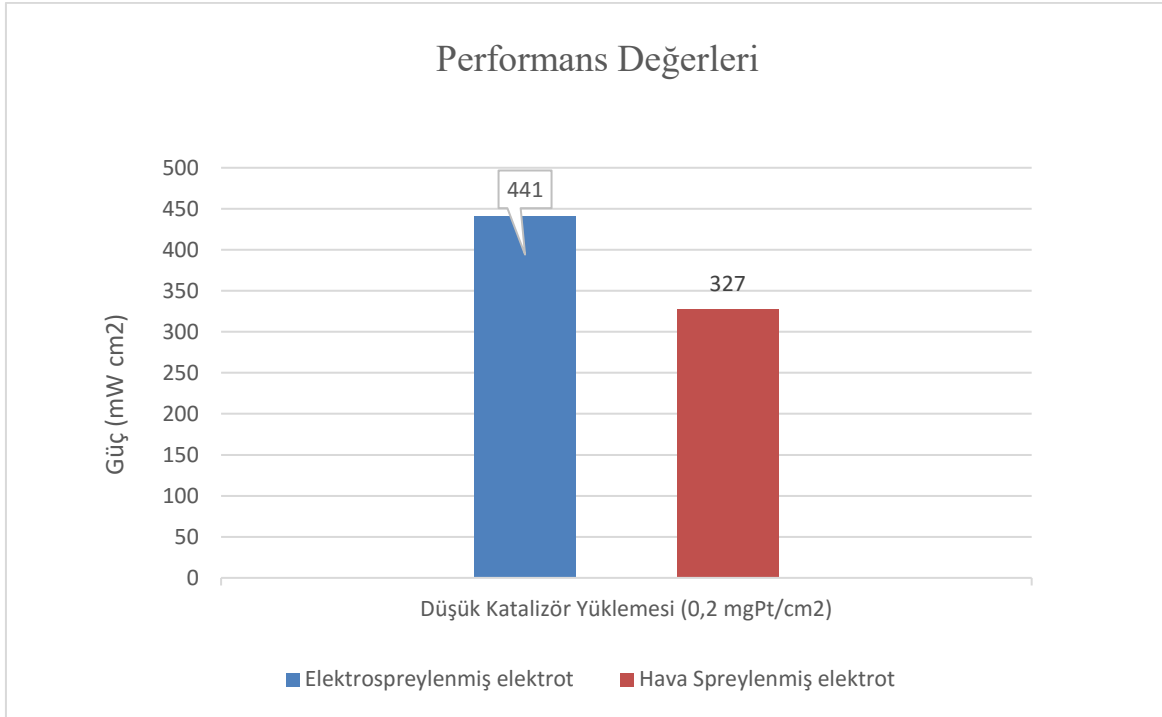
Şekil 6.10. GNPs ve CB destek malzemeli katalizörlerin 0,6 V için performans sonuçları

Şekil 6.11’de 0,6 V’da H00 (ağırlıkça % 100 CB), H50 (ağırlıkça % 50 rGO1), H60, H70, H80, H90 ve H100 (ağırlıkça % 100 rGO1) destekli Pt katalizörlerinin performans sonuçları görülmektedir. Şekil 6.11’de görüldüğü gibi farklı rGO1:CB oranlarında en iyi performans H70 katalizörüyle sağlanmıştır. Bu çalışmada scCO<sub>2</sub> depozisyon yönteminin oldukça umut vadeden bir katalizör hazırlama yöntemi olduğu saptanmıştır.

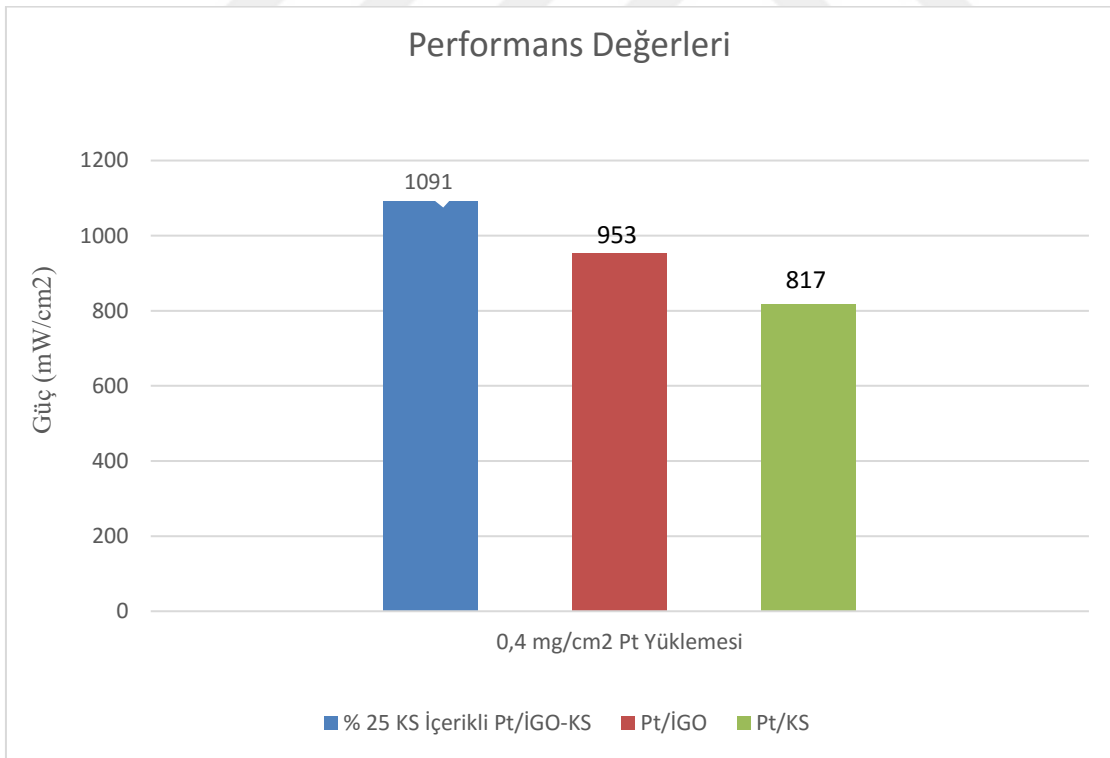


Şekil 6.11. rGO1 ve CB destek malzemeli katalizörlerin 0,6 V için performans sonuçları

PEM yakıt pillerinde yaygın olarak kullanılan spreyleneş katalizör tabakası yerine elektrospreyleneş katalizör tabakası üretilmiştir [91]. Destek malzemesi olarak indirgenmiş grafen oksit (iGO) ve karbon siyahından (KS) oluşan hibrit malzeme kullanılmıştır. Şekil 6.12’de görüldüğü gibi düşük (0,2 mg/cm<sup>2</sup>) Pt yüklemesinde elektrospreyleneş katalizör için maksimum güç yoğunluğu, 441 mW/cm<sup>2</sup> iken hava-spreyleneş katalizör için 327 mW/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Şekil 6.13’de ise 0,4 mg/cm<sup>2</sup> Pt yüklemesinde KS, iGO ve kütlece % 25 KS içeren iGO-KS destek malzemelerinin performans sonuçları görülmektedir. Şekil 6.13’de görüldüğü gibi % 25 KS içeren iGO-KS hibrit destek malzemesi diğer destek malzemelerine göre daha iyi sonuç vermiştir.



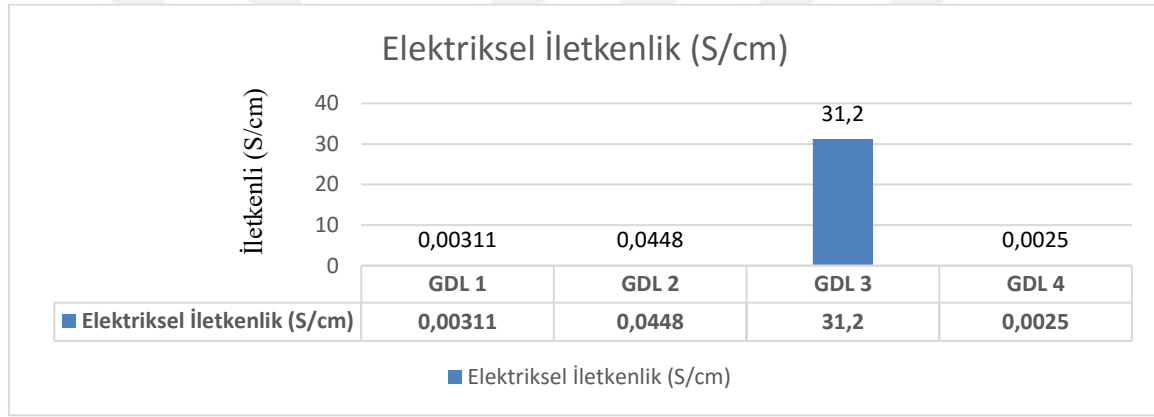
Şekil 6.12. Elektrospreylenme yöntemi ile oluşturulan katalizörün test sonuçları



Şekil 6.13. iGO ve KS içeren destek malzemelerinin test sonuçları

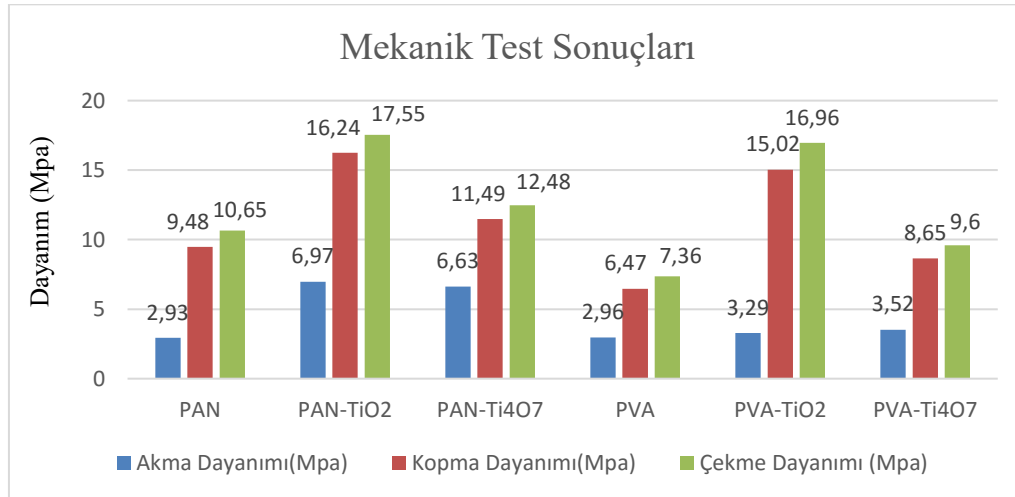
### 6.1.4 Gaz difüzyon tabakasının geliştirilmesi

Gaz difüzyon tabakasının görevlerinden bazıları yakıt pillerinde gerçekleşen reaksiyon sonucu katotta oluşan suyun uzaklaştırılması ve katalizör için yeterli aktif alan oluşumunun sağlanması ve oluşan ısının dış ortama iletilmesidir. Bu amaçla yapılan çalışmada nanofiber (PAN ve PVA), nanopartikül ( $TiO_2$  ve  $Ti_4O_7$ ) ve karbon kağıt olarak Toray 30 ve Toray 120'den oluşan üç farklı parametrenin kombinasyonlarıyla gaz difüzyon tabakası üretilmiştir [108]. Şekil 6.14'de GDL1 (Toray 30, PVA,  $TiO_2$ ), GDL2 (Toray 30, PAN,  $Ti_4O_7$ ), GDL3 (Toray 120, PVA,  $Ti_4O_7$ ) ve GDL4 (Toray 30, PAN,  $TiO_2$ ) gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenlik değerleri görülmektedir.



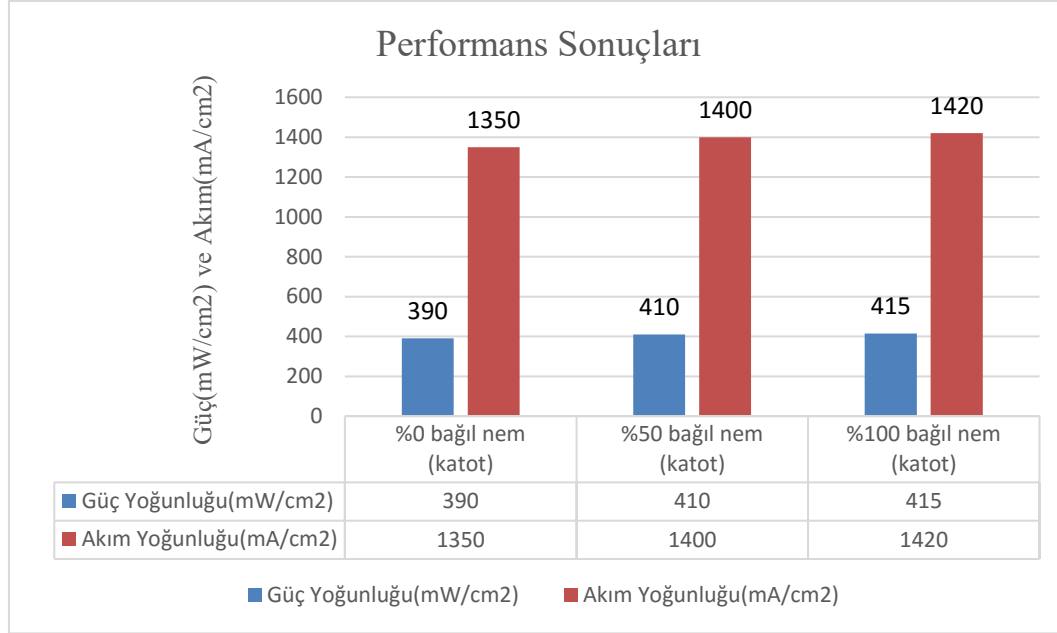
Şekil 6.14. Gaz difüzyon tabakalarının elektriksel iletkenlik değerleri

Şekil 6.15'de nanofiberlerin mekanik dayanım testi sonuçları görülmektedir.



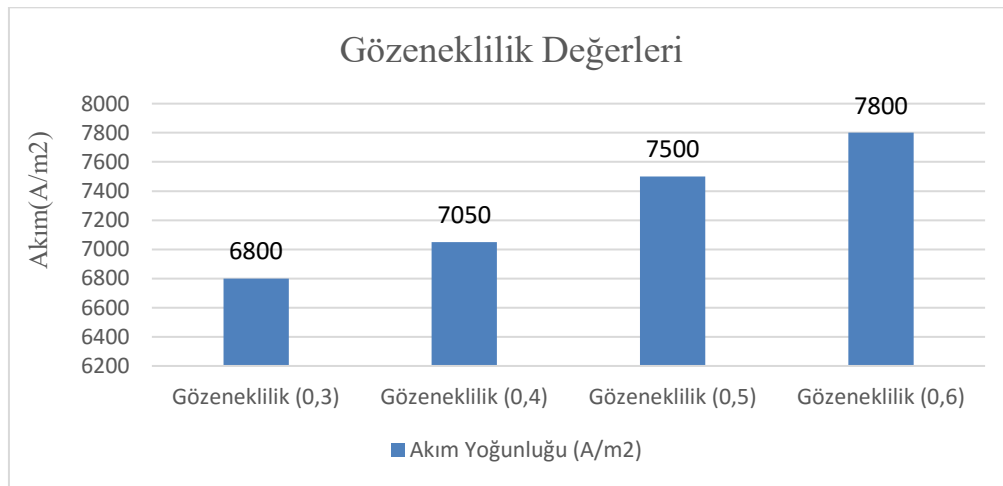
Şekil 6.15. Nanofiberlerin mekanik dayanım analizi sonuçları

Şekil 6.14’de görüleceği gibi elektriksel iletkenlik açısından GDL3 gaz difüzyon tabakası en iyi olduğu için GDL3’ün performans analizi yapılmıştır. Şekil 6.16’da 0,6 V’a katot tarafında nemin % 0, % 50 ve % 100 olduğu durumlarda GDL3 gaz difüzyon tabakasının performans sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.16. 0,6 V için GDL3 gaz difüzyon tabakasının performans sonuçları

Gaz difüzyon tabakasında farklı gözeneklilik değerleri (0,3, 0,4, 0,5 ve 0,6) kullanarak yakıt pilinin performansı sayısal olarak araştırılmıştır [109]. Şekil 6.17’de görüldüğü gibi 0,35 V’a en yüksek akım yoğunluğu 0,6 gözeneklilik değeriyle elde edilmiştir.

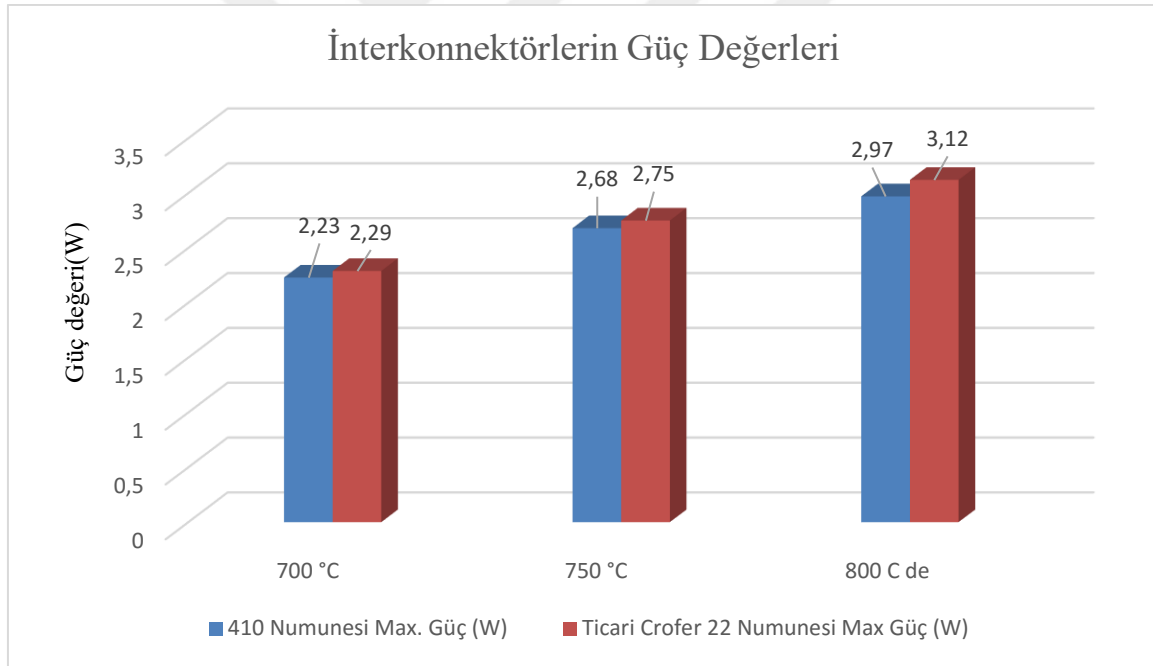


Şekil 6.17. 0,35 V için farklı gözeneklilik değerleri için performans sonuçları

## 6.2 KOYP Çalışmalarının Performans Açısından Karşılaştırılması

### 6.2.1 İnterkonnektör geliştirilmesi

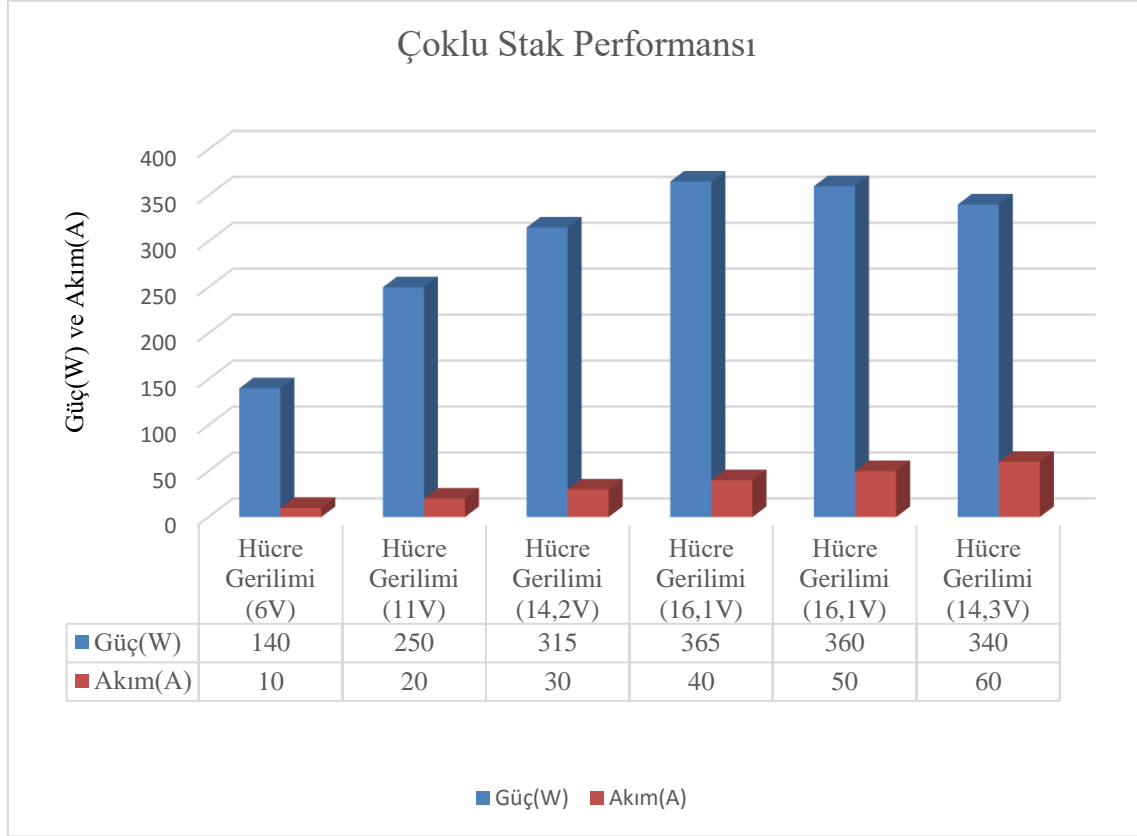
İnterkonnektörler nikel, grafit, metal köpük, paslanmaz çelik ve PVC gibi malzemelerden üretilirler. İnterkonnektörlerin üretilen akımın toplanması, oksijen ve yakıtın KOYP’de homojen dağılması gibi görevleri vardır. Crofer 22 metalik tozundan toz metalürjisi yöntemiyle üretilen 410 kodlu numune ile piyasada ticari olarak mevcut olan Crofer® 22 metalik tozundan üretilen interkonnektörler yakıt pili performansı açısından karşılaştırılmıştır [98]. Şekil 6.18’de görüldüğü gibi farklı sıcaklıklarda (700 °C, 750 °C ve 800 °C) güç değerleri birbirlerine yakın çıktığı için bu interkonnektör üretim yönteminin alternatif olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.18. İnterkonnektörlerin farklı sıcaklıklardaki güç değerleri

Elek yapısının ve interkonnektör geometrisinin çoklu stak yapısında etkileri deneysel olarak irdelenmiştir. Alınan sonuçlara göre en iyi akım toplayıcının gözenekli yapıda nikel elek olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile gözenekli yapıda nikel elek, kalın örgü nikel eleğin yerine alternatif olarak kullanılabilir. Aşağıda verilen Şekil 6.19’da yığın stakların pil performans verileri gösterilmiştir.

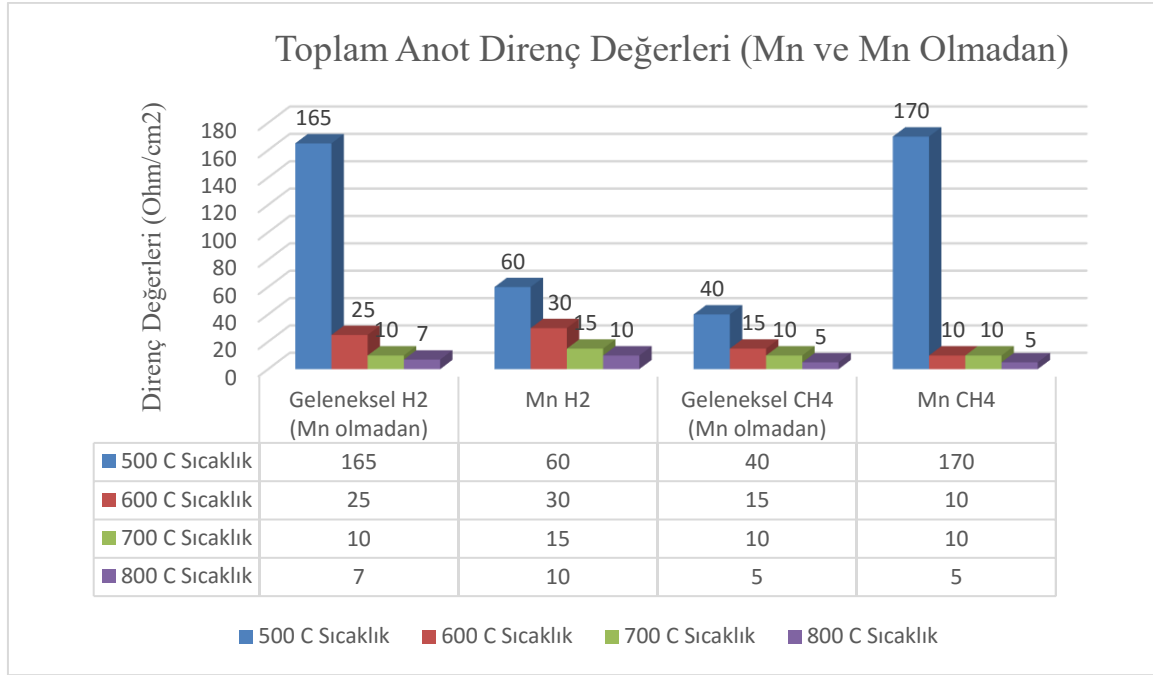




Şekil 6.19. Çoklu stak pil performansları

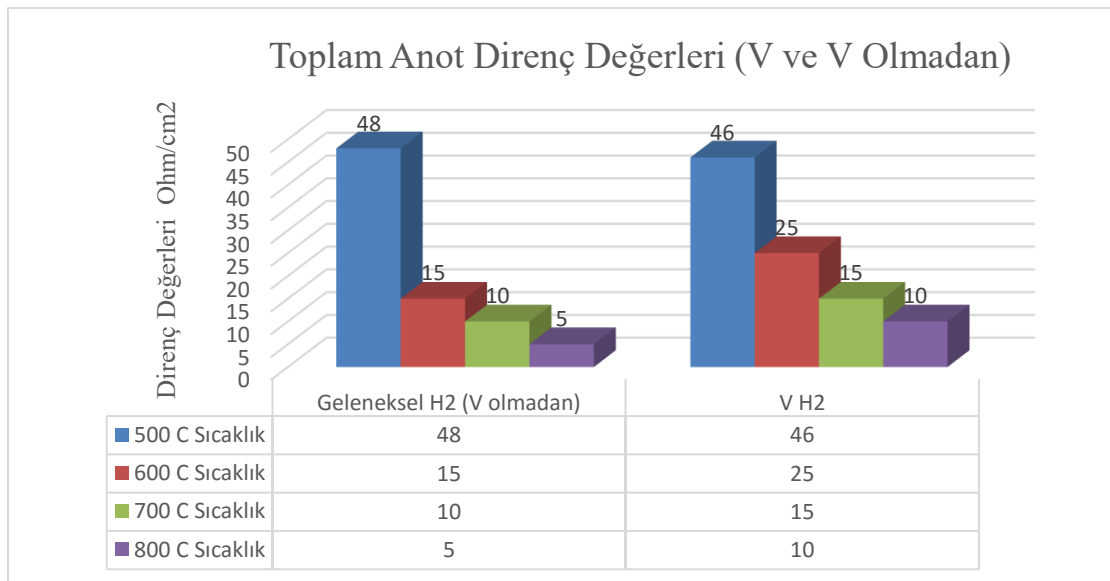
### 6.2.2 Anot geliştirilmesi

Orta sıcaklıkta çalışan KOYP’de anot geliştirilmesi ile ilgili olarak Platin gibi çok pahalı katalizörler yerine yüksek sıcaklıkta çalışabilecek çoklu oksidasyon özelliği içeren Mangan ve Vanadyum gibi alternatif geçiş metalleri üzerinde çalışma yapılmıştır [99]. Aşağıda verilen şekillerdeki veriler incelendiğinde emdirme işleminin  $\text{CH}_4$  ve  $\text{H}_2$  altında yapıldığında iyi sonuçlara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Orta sıcaklıkta çalışan KOYP için anot performans değerlerinde artış olduğundan dolayı Mn emdirme işleminin alternatif anot üretim tekniği olarak kullanılması tavsiye edilmektedir. Şekil 6.20’de farklı sıcaklık değerlerinde Mangan (Mn) emdirilmiş ve Mn emdirilmemiş yapıların  $\text{H}_2$  ve  $\text{CH}_4$  altında anot direnç değerleri gösterilmiştir.



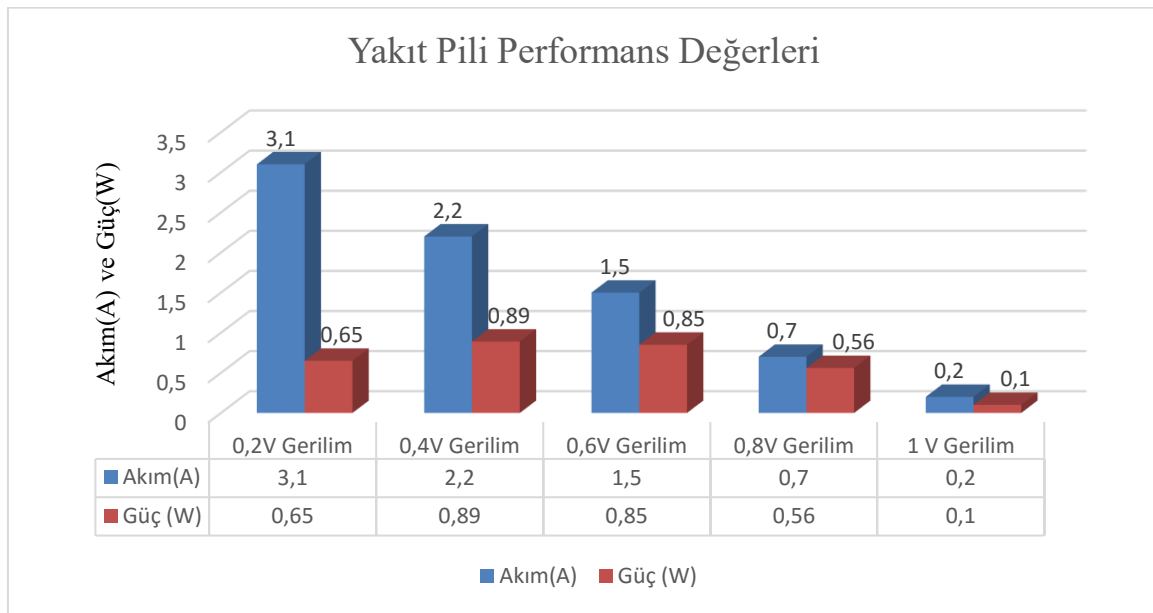
Şekil 6.20. Mn içeren ve Mn'siz yapıların H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> altında anot direnç değerleri

Aşağıda verilen şekillerdeki performans değerleri emdirme işleminin CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> altında yapıldığında daha iyi sonuçlara ulaşıldığı belirlenmiştir [99]. Orta sıcaklıkta çalışan KOYP için anot performans değerlerinde artış olduğundan dolayı V emdirme işleminin alternatif anot üretim tekniği olarak kullanılması tavsiye edilmektedir. Şekil 6.21'de farklı sıcaklık değerlerinde V emdirilmiş ve V emdirilmemiş yapıların H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> altında anot direnç değerleri gösterilmiştir.



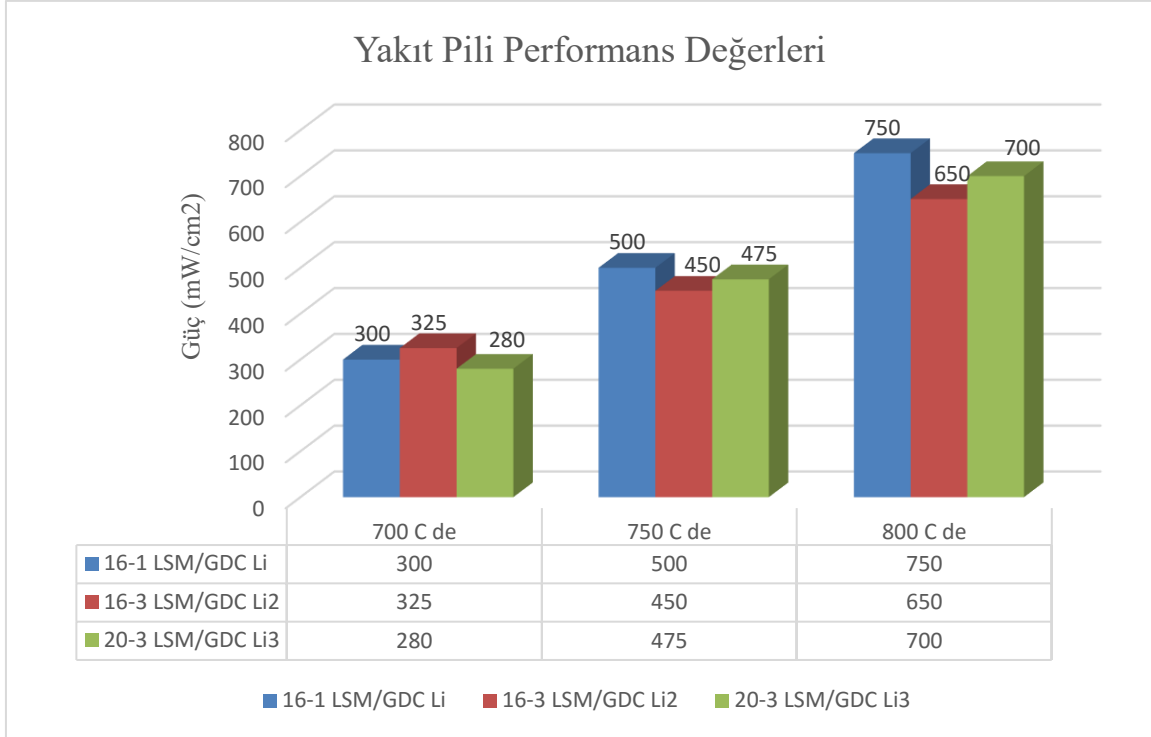
Şekil 6.21. V içeren ve V'siz yapıların H<sub>2</sub> altında anot tabakası direnç değerleri

Anot destekli mikrotüp KOYP üretim çalışmalarında en önemli etkenlerden birisi olan parafin miktarı konusunda %40 ile %20 arasında değişen oranlarda farklı denemeler yapılarak anot destek tabakasına en uygun parafin miktarının %35 parafin çamuru uygulanması sonrasında olduğu tespit edilmiştir [100]. Akabinde üretilen yakıt pili teste tabi tutularak sonuçlar aşağıda verilen şekilde paylaşılmıştır. Şekil 6.22’de 800 °C sıcaklık ve 150 ml/dk hacimsel debide saf hidrojen verilmesi durumunda KOYP performans test sonuçları gösterilmiştir.

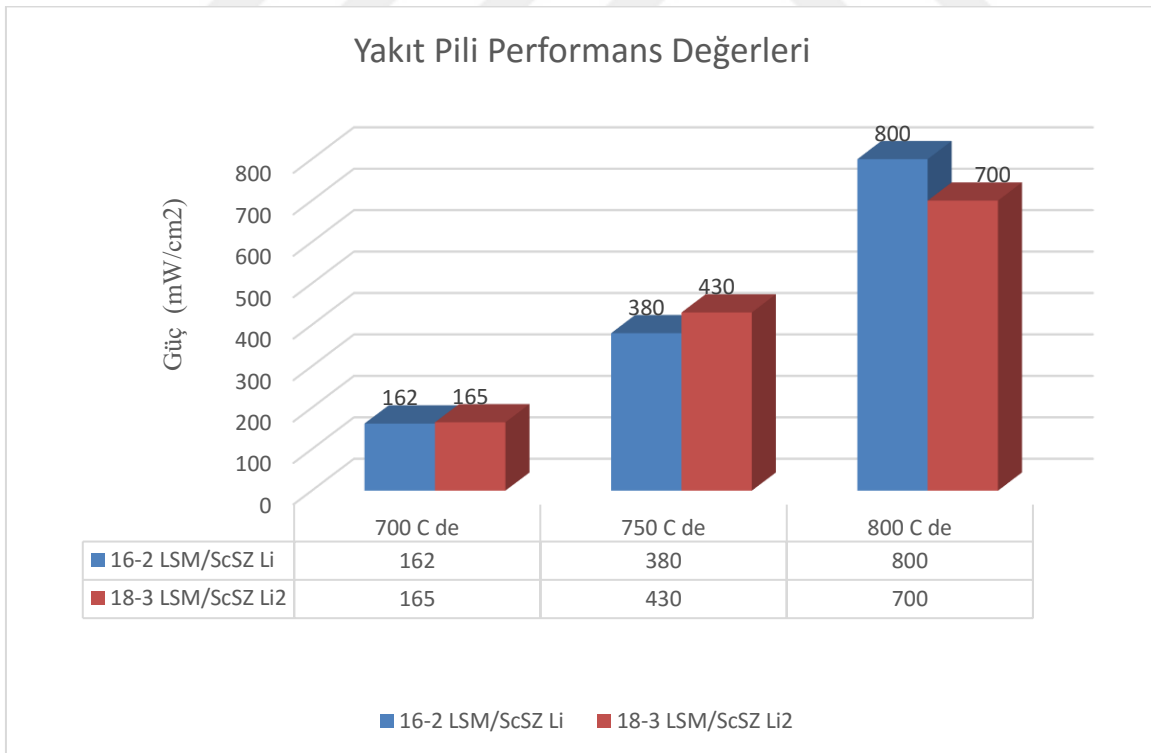


Şekil 6.22. Saf hidrojen verilmesi durumunda KOYP performans sonuçları

Orta sıcaklıkta çalışan KOYP’de yeni anot ve katot üretimi için gadolinyum katkılı serya (GDC) ve skandiyum oksit dop edilmiş zirkonyum oksit (ScSZ) katkıları kullanılarak üretilen yeni elektrotlar üzerinde yapılan performans sonuçları değerlendirilmiştir. Yüksek çalışma sıcaklığına sahip yitriya stabilize zirkonya (YSZ) elektrolitinin yerine orta sıcaklıkta çalışan ve daha iyi bir performans sergileyen LSM/GDC ve LSMScSZ nin kullanılabileceğini ortaya koymuştur [101]. Şekil 6.23’te LSM/GDC Li yapıda oluşturulmuş farklı sıcaklıklardaki yakıt pili performans test sonuçları gösterilmiştir. Şekil 6.24’te 16-2 LSMScSZ ve 18-3 LSMScSZ yapıda oluşturulmuş farklı sıcaklıklardaki yakıt pillerinin test sonuçları gösterilmiştir.



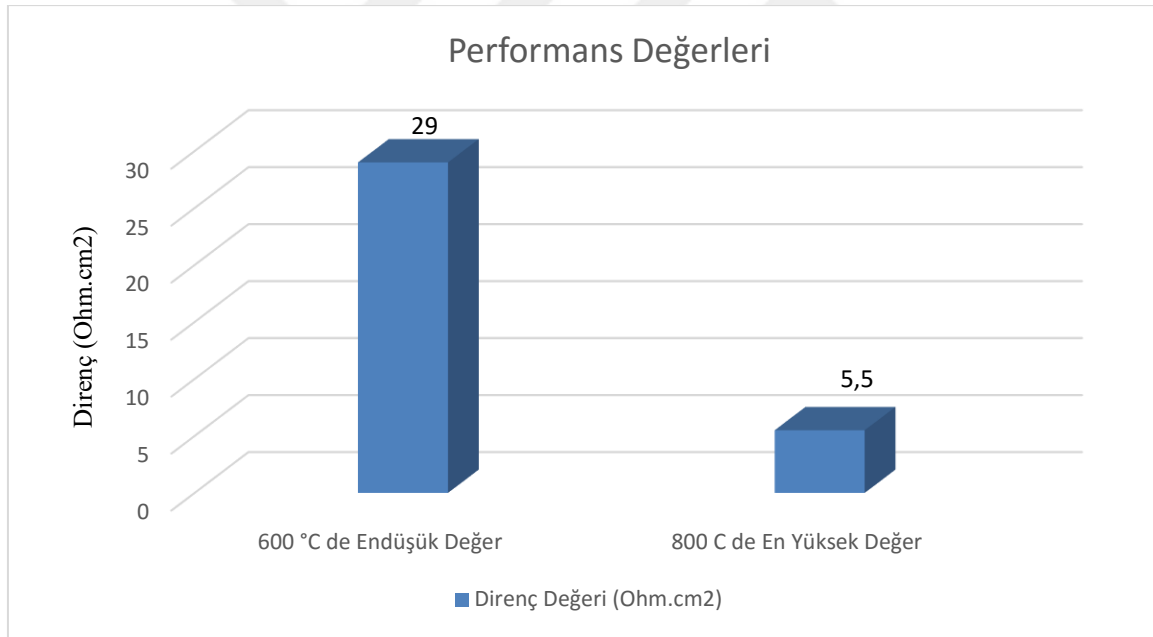
Şekil 6.23. LSM/GDC Li KOYP performans sonuçları



Şekil 6.24. 16-2 LSMScSZ ve 18-3 LSMScSZ KOYP test sonuçları

### 6.2.3 Katot geliştirilmesi

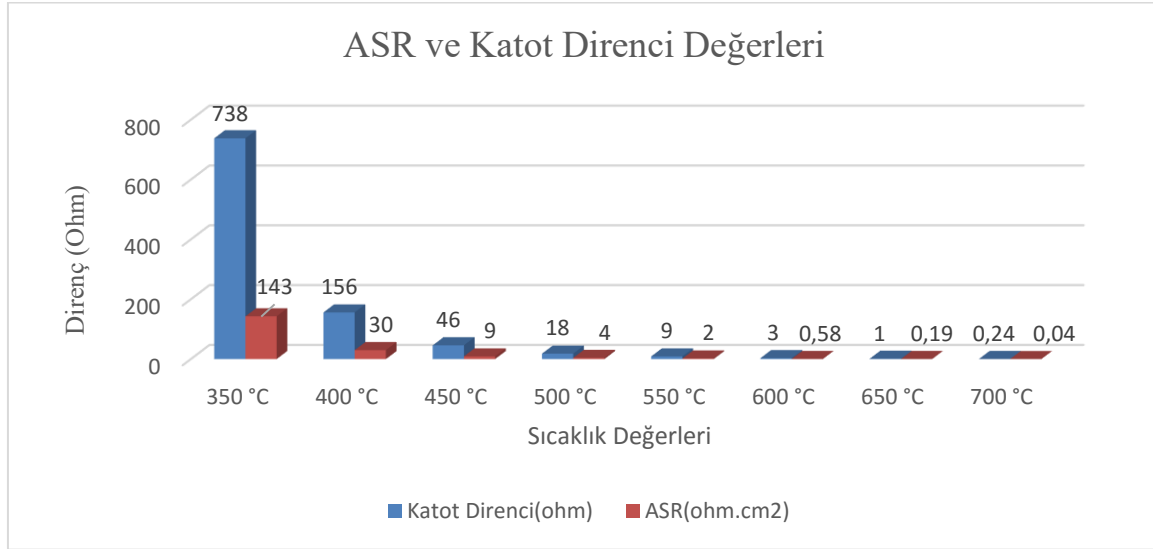
Orta sıcaklık katı oksit yakıt pillerinde LSF esaslı kompozit katotların kombinatoriyal yaklaşım ile üretilmesi çalışması alan spesifik direnç sonuçları açısından değerlendirildiğinde en verimli katot kompozisyonu  $LSM_{0.75}LSF_{0.125}ScSZ_{0.125}$  ve buna yakın kompozisyonlar olmuştur [110]. Ayrıca çalışma sıcaklığını daha düşük değerlere indirmek için LSM nin yerine hem elektronik iletkenlik hem de iyonik özellikler taşıyan rudlesden-poper tipinde bir oksit ile değiştirilmesinin sonuçlar üzerinde etkili olacağı önerilmiştir. Düşük sıcaklıklarda çalıştırma potansiyeli olan katot malzemesi  $LaSr_3Fe_3O_{10-\delta}$  (rp-LSF)'nin LSM ye önemli bir alternatif olarak kullanılabileceği önerilmiştir. Şekil 6.25'te kombinatoriyal yaklaşım ile oluşturulan katotların performans değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.25. Kombinatoriyal yaklaşım ile oluşturulan katotların performans değerleri

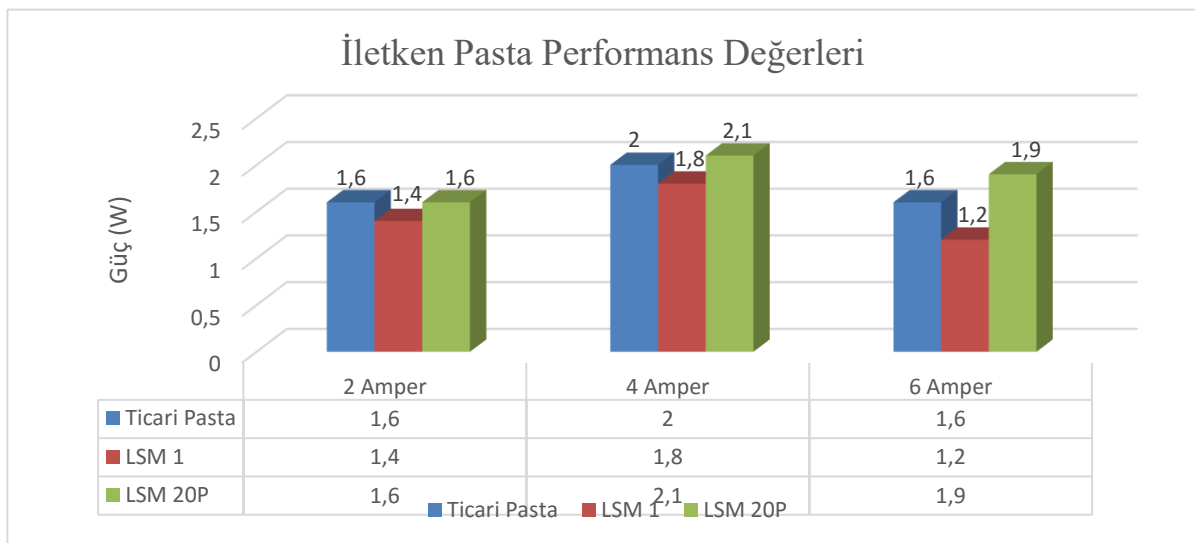
Orta sıcaklık katı oksit yakıt pilleri için plazmada üretimi yapılan toz ile eş zamanlı olarak çöktürme yönteminden faydalanılarak imal edilen katotların performans değerleri karşılaştırılmıştır [111]. Termal plaza yöntemiyle sentezlenen olan iki fazlı oksitler (LSC 113:LSC-124) karakterize edilmiştir ve molar fraksiyonları sırasıyla 0,3 ve 0,7 olarak bulunmuştur. 650 °C'deki ASR değeri 0,19 ohm.cm<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. 600 °C'den daha düşük sıcaklıklarda LSC-113:LSC-214 = 0,5:0,5 bileşimine sahip kompozit katotun

kullanılması önerilmektedir. Şekil 6.26’da katot ve sipesifik alan direnci (ASR) değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.26. Katot ve sipesifik alan direnci (ASR) değerleri

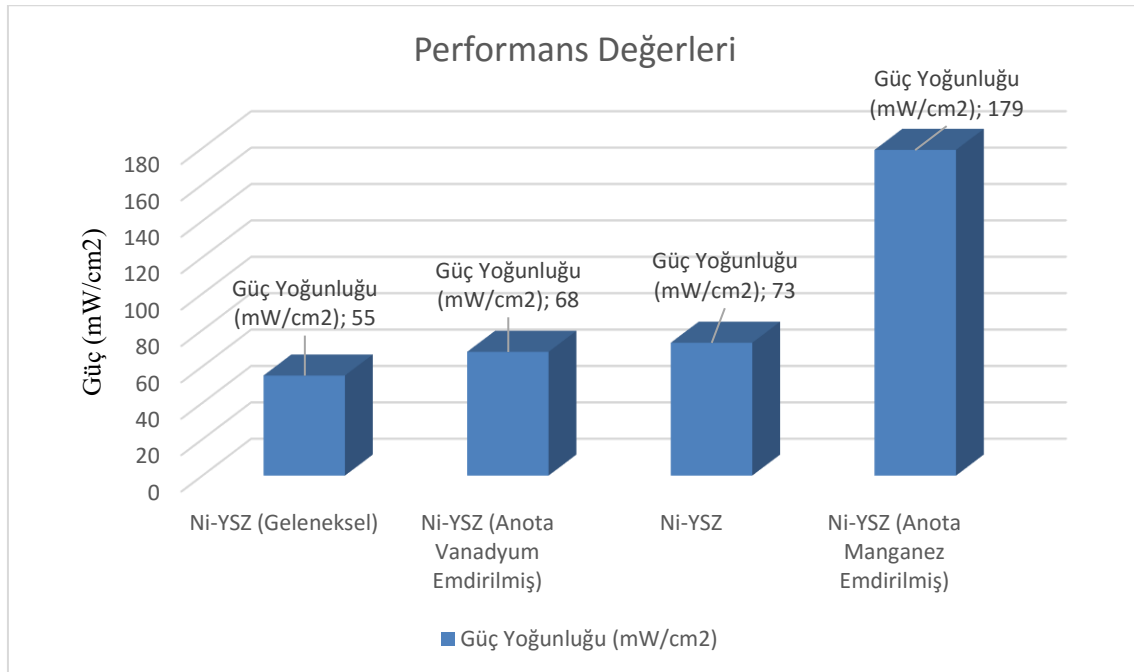
Katı oksit yakıt pillerinde akım toplayıcıları ile katot tabakası arasında iyi bir kontak kurulabilmesi için LSM 20P iletken pastası geliştirilerek ticari pastalar ile karşılaştırma test sonuçları şekilde verilmiştir [95]. Daha iyi bir performans sergilemesinden dolayı LSM 20P iletken pasta piyasada kullanılan ticari pastaların yerine kullanılması önerilmektedir. Şekil 6.27’de KOYP’nin katot tarafı için geliştirilen iletken pasta performans değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.27. Katot tarafı için geliştirilen iletken pasta performans değerleri

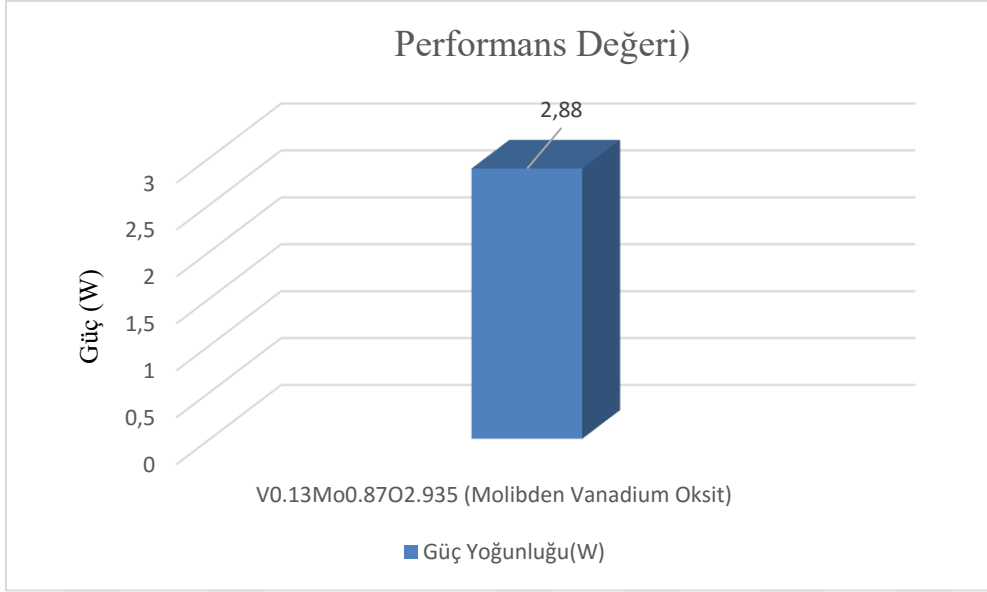
### 6.2.4 Elektrolit geliştirilmesi

Ni-YSZ yakıt pilinin anot tarafına vanadyum eklenmesi şekilden de görüldüğü gibi güç yoğunluğunu  $55 \text{ mW/cm}^2$ 'den  $68 \text{ mW/cm}^2$ 'ye yükselterek verimi yaklaşık %25 oranında artırmıştır. Ni-YSZ yakıt piline manganez emdirilmesi durumunda güç yoğunluğunu  $73 \text{ mW/cm}^2$ 'den  $179 \text{ mW/cm}^2$ 'ye yükselterek yaklaşık olarak %145 oranında artırmıştır [97]. Bu durum hücre performansında önemli bir gelişmeyi göstermektedir. Şekil 6.28'de Geleneksel yakıt pillerine manganez ve vanadyum emdirme işlemi yapılmasından sonraki performans değerleri gösterilmiştir.



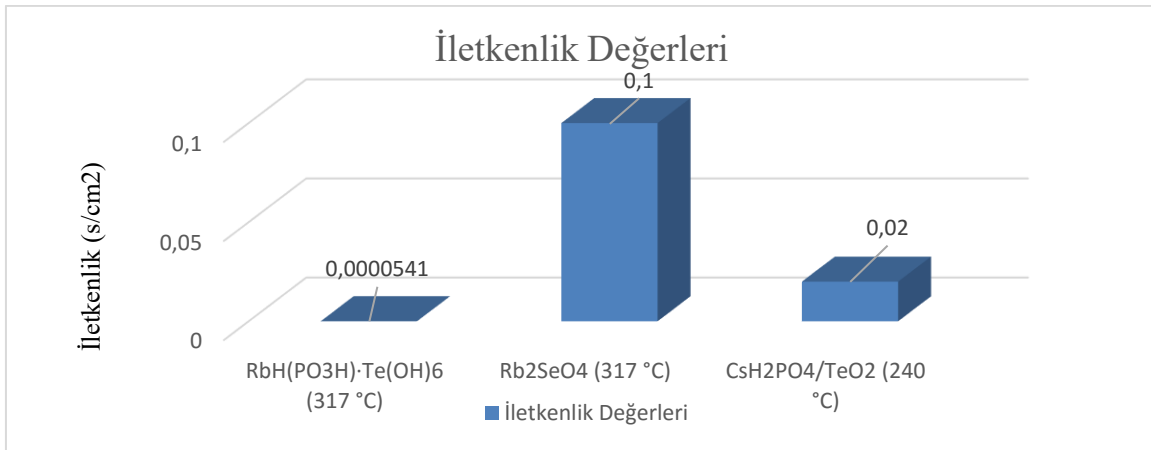
Şekil 6.28. Mn ve V emdirme işleminden sonraki performans değerleri

$V_{0.13} Mo_{0.87} O_{2.935}$  (molibden vanadyum oksit),  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de asitlendirilmiş vanadat-molibdat çözeltilisinden hidrojen sülfür gazı geçirilmesi yöntemi ile üretilmiş [102]. Literatürde ilk defa anot olarak test edilmiştir. Çalışma bizlere orta sıcaklık kati oksit yakıt pillerinde karma iyonik-elektronik iletken anot olarak molibden vanadyum oksitin iyi bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Şekil 6.29'da  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kuru hidrojen verilerek yapılan deneyde molibden vanadyum oksitin göstermiş olduğu performans değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.29. Molibden vanadyum oksitin göstermiş olduğu performans değerleri

Aşağıda performans değerleri verilen kuvvetli asitlerin alkali tuzlarından olan rubidyum hidroksit safsızlığı içeren rubidyum selenate, sezyum dihidrojen fosfat tellurit ve rubidyum fosfat tellurat'ın orta ve düşük sıcaklıkta çalışan katı oksit yakıt pillerinde elektrolit malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir [102]. Şekil 6.30'da rubidyum fosfat tellurat, rubidyum hidroksit safsızlığı içeren rubidyum selenate ve sezyum dihidrojen fosfat tellurit'in İletkenlik değerleri gösterilmiştir.

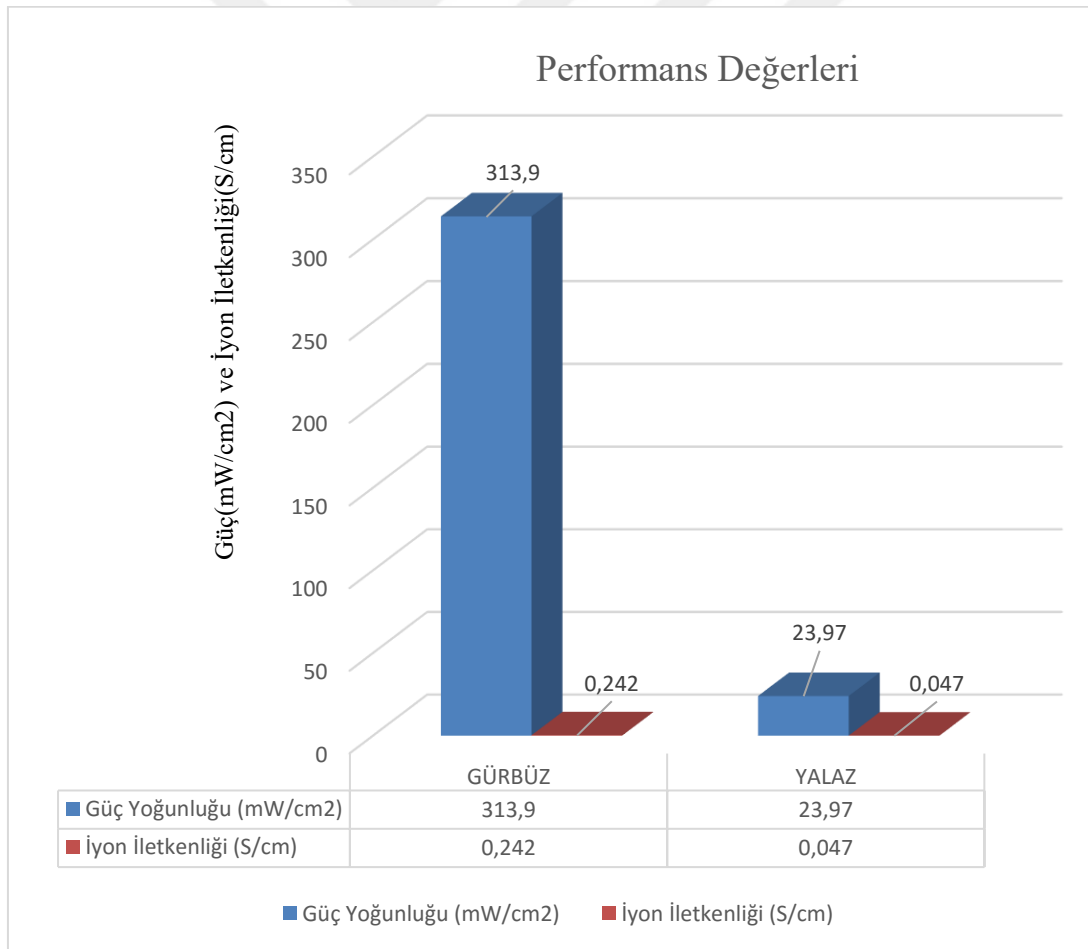


Şekil 6.30. Bazı alkali tuzların iletkenlik performans değerleri

Godalinyum katkılı katı ZrO<sub>2</sub> elektrolitlerin ve (Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>y</sub>(ZrO<sub>2</sub>)<sub>1-x-y</sub> bileşik formülüne sahip üçlü toz bileşiklerin sentezi ile yapılan çalışmada en yüksek iyonik



iletkenlik %6 mol  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  ve %2 mol  $\text{Y}_2\text{O}_3$  katkılı  $\text{ZrO}_2$  elektroliti için  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 0,242  $\text{Scm}^{-1}$  olduğu, başka bir çalışmada Şerit döküm tekniğiyle üretilen katı elektrolitin en yüksek iletkenlik düzeyi, % 8 mol  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  katkılanmış katı elektrolit sistemi için  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $4,74 \times 10^{-2}\text{ S/cm}$  olarak tespit edilmiştir. Ayrıca  $\text{NiO}|\text{NiO}-6\text{Yb}_2\text{YSZ}|6\text{Yb}_2\text{YSZ}|\text{LSM}-6\text{Yb}_2\text{YSZ}|\text{LSM}$  tabakalarından oluşturularak üretilen 5 bileşen içeren tek hücrenin güç yoğunluğu 313,9 olarak ölçülürken başka bir çalışmada  $\text{NiO}|\text{NiO}-\text{GdSZ}/\text{GdSZ}/\text{LSCFGdSZ}/\text{LSCF}$  tabakalarından oluşturulan 5 bileşenli yakıt pilinin performansı  $23,97\text{ mW/cm}^2$  olarak ölçülmüştür [104,105]. Değerler karşılaştırıldığında Gürbüz'ün yaptığı çalışma umut vadetmektedir. Şekil 6.31'de GÜRBÜZ olarak kodlanmış ( $\text{NiO}|\text{NiO}6\text{Yb}_2\text{YSZ}|6\text{Yb}_2\text{YSZ}|\text{LSM}-6\text{Yb}_2\text{YSZ}|\text{LSM}$ ) bileşiğinin ve YALAZ olarak kodlanmış ( $\text{NiO}|\text{NiO}-\text{GdSZ}/\text{GdSZ}/\text{LSCFGdSZ}/\text{LSCF}$ ) bileşiğinin güç yoğunluğu ve iyon iletkenlik değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6.31. GÜRBÜZ ve YALAZ bileşiklerinin güç yoğunluğu ve iletkenlik değerleri

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünyada enerji tüketiminin büyük bir kısmı enerjinin herhangi bir dönüşüme ve değişikliğe uğramamış biçimi olan birincil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar yenilenemez ve dünyada hızla rezervlerinin tükendiği birincil enerji kaynaklarıdır. Hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir ve diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında birim kütlede en fazla enerji bulundurma özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt pilleri, genel olarak anot tarafında yükseltgenme ve katot tarafında indirgenme reaksiyonları sonucu ısı, su ve elektrik enerjisi üreterek dünyada geleceğin teknolojisi olarak ön plana çıkmaktadır. Yakıt pilleri, çok düşük emisyon değerine sahip, diğer güç üreten sistemlerle karşılaştırıldığında yüksek verimli, modüler özelliğiyle büyük ve küçük ölçekli sektörlerin enerji ihtiyacını karşılayabilen aynı zamanda sessiz çalışan ve farklı yakıtların kullanılabilirdiği cihazlardır.

Bu tez çalışmasında yakıt pilleriyle ilgili geniş çaplı literatür araştırması yapılmıştır. YÖK Tez Merkezi veri tabanı taranarak 2000-2021 yılları arasında yazılmış yakıt pilleriyle ilgili 265 adet onaylanmış tez hem nicelik açısından hem de nitelik açısından detaylı olarak incelenmiştir. Bunun yanında, üniversite-sanayi iş birliğiyle üretime dönük yapılan çalışmalar incelenerek akademik çalışmalar arasında bağ kurulmaya çalışılmıştır. Yakıt pilleri ile ilgili dünya genelindeki araştırma eğilimine paralel olarak ülkemizde de araştırmalar PEMYP ve KOYP üzerine yoğunlaşmıştır. Bu nedenle PEMYP ve KOYP ile ilgili aynı konu üzerinde yapılan çalışmalar yakıt pili performansına göre detaylı olarak analiz edilmiştir. İncelenen tez çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Türkiye’de PEMYP’de su yönetimini iyileştirmesiyle ilgili yapılan deneysel çalışmalarda FEP, PTFE ve PDMS polimerleri hidrofobik malzeme olarak kullanılmıştır. Yakıt pili performans testleri karşılaştırıldığında, PDMS polimeriyle diğer polimerlere göre daha iyi sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. PDMS ile APTES polimerlerinin performans değerlerinin karşılaştırılması için iki farklı GDL yüzeyi ne (GDL 25 BC ve GDL 34 BC) polimerleri, çeşitli miktarlarda (%5, %10, %20) yüklenmesiyle membran elektrot yapıları oluşturulmuştur. APTES polimeri için %5 PDMS polimeri için %10 oranlarında oluşturulan piller hidrofobik açıdan en yüksek pil performansını göstermişlerdir.

PEMYP’de membran geliştirilmesi ile ilgili hidrokarbon bazlı nanokompozit malzemeye çeşitli fosforik asit yüzdeleri kullanılarak hazırlanan solüsyonlar içerisinde en iyi değer %30 fosforik asit ile oluşturulmuş polivinil alkol membran ile sağlamıştır. SP ve MS katkı maddeleri ile hazırlanan membranlar içinde 2MS-G kotlu %2 MS içeren nanokompozit membran nafion membrana alternatif membran olarak önerilmektedir.

Yüksek sıcaklıkta çalışan PEMYP için PBI bazlı BADGE, TPA ve DBpX kullanılarak kovalent bağlı oluşturulan membranlar arasında en verimli ağırlıkça %5 çapraz bağlayıcısı kullanılarak hazırlanan PBI-BADGE-5 membranı olmuştur. Diğer yandan, PEMYP’de SPEEK/PES/FBA-10 membranın diğer membranlara göre mekanik özellikler açısından üstünlük sağladığı belirlenmiştir.

PEMYP’de katalizör geliştirilmesi ile ilgili metal oksit destekli katalizör yüzey alanı yüksek  $TiO_2(1)$  içeren ve karbon miktarı katalizör yapısında ağırlıkça %75 olan pilin performansının ticari vulcan ve tanaka katalizörlerinin pil performansına yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca  $TiO_2$  kullanılan piller her durumda  $Al_2O_3$  kullanılarak üretilen pillerden daha yüksek performans sergilemiştir. Katalizörlerde destek malzemesi olarak  $TiO_2$ ’nin iyi bir alternatif olduğu tespit edilmiştir.

PEMYP’de Grafen, vulcan XC72, CNT ile oluşturulan destek malzemelerinin ve oksijen indirgenme katalizörü olarak CoPc (kobalt ftalosiyenin) kullanılmıştır. Çalışmada en iyi sonuçlara %100 nemli ortamda 60 °C’de ve 5 psi geri basıncında ulaşılmıştır. Vulcan-CNT hibrit yapısı yüksek performans sergilemesinden dolayı ticari katalizörlere yeni bir alternatif oluşturmaktadır. PEMYP’de gaz difüzyon tabakasında gözeneklilik değerlerindeki değişimin performansa etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak sayısal olarak incelenmiştir. Gaz difüzyon tabakalarında gözeneklilik değerinin yükselmesi ile hücre performansında artış meydana geldiği belirlenmiştir.

PEMYP’de elektrot geliştirilmesiyle ilgili yapılan çalışmada piyasada yaygın olarak kullanılan spreyleneş elektrotlar yerine elektrospreyleneş yöntemi ile üretilmiş elektrotlar kullanılmış ve bu elektrotların daha verimli olduğu tespit edilmiştir. PEMYP elektrotunda grafen nano kompozit malzeme kullanılmış ve grafit oksit’in yüzeyde oksijen taşıyan

fonksiyonel özelliğinden dolayı katot elektrotu olarak kullanılmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir.

KOYP'nin en önemli bileşenlerinden birisi olan interkonnektör üretimi ile ilgili toz metalürjisi yöntemi ile üretilen 410 kodlu numune ile ticari olarak kullanılan ve alışımdan talaş kaldırma klasik yöntemi ile üretilen crofer 22 numunesinin değerleri karşılaştırılmıştır. 410 numunesinin güç değerlerinin çok az fark ile düşük çıktığı tespit edilse de toz metalürjisi yöntemiyle interkonnektörlerin başarılı ve tekrarlanabilir bir şekilde elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu durumda interkonnektör, ara kademelere gerek kalmadan üretileceğinden işçilik, malzeme ve zamandan tasarruf sağlanacaktır.

KOYP'de anot geliştirilmesi ile ilgili Platin gibi çok pahalı katalizörler yerine yüksek sıcaklıkta çalışabilecek çoklu oksidasyon özelliği içeren Mn ve V gibi alternatif geçiş metalleri kullanılarak çalışma yapılmıştır. Emdirme işlemi CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> ile yapıldığında daha iyi sonuçlara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Orta sıcaklıkta çalışan KOYP için V ve Mn emdirme işlemiyle üretilen anot ile pil performans değerleri arttığı için bu yöntem alternatif anot üretim tekniği olarak kullanılabilir.

Anot destekli mikrotüp KOYP üretimiyle ilgili çalışmada parafin miktarı %20 ile %40 oranları arasında değiştirilerek destek tabakaları oluşturulmuş ve mikrotüp yapısı için en uygun parafin miktarının %35 olduğu tespit edilmiştir. Bu durum anot destekleri kullanılarak yapılan yakıt pili performans testlerinde umut verici sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

Yüksek çalışma sıcaklığında çalışan Yitriya Stabilize Zirkonya (YSZ) elektrolitinin yerine orta sıcaklıkta çalışan Gadolinyum katkılı serya (GDC) ve Skandiyum oksit dop edilmiş zirkonyum oksit (ScSZ) katkılı anot ve katot elektrotlar önerilmiştir. Sonuçlar orta sıcaklıkta çalışan LSM/GDC ve LSMScSZ elektrotlarıyla daha iyi bir performans sağlandığını ve yüksek çalışma sıcaklığında çalışan KOYP yerine kullanabileceğini göstermektedir.

KOYP'DE elektrolit ve anot geliştirmeye yeni bir yaklaşım olarak Ni-YSZ yakıt pilinin anot tarafına V eklenmesiyle güç yoğunluğunu 55 mW/cm<sup>2</sup>'den 68 mW/cm<sup>2</sup>'ye

yükselterek verimi yaklaşık %25 oranında artırmıştır. Ni-YSZ yakıt piline manganez emdirilmesi durumunda güç yoğunluğunu  $73 \text{ mW/cm}^2$ 'den  $179 \text{ mW/cm}^2$ 'ye yükselterek yaklaşık olarak %145 oranında artırmıştır.

KOYP'de  $V_{0.13} Mo_{0.87} O_{2.935}$  (molibden vanadyum oksit),  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de asitlendirilmiş vanadat-molibdat çözeltisinden hidrojen sülfür gazı geçirilmesi yöntemi ile üretilmiş performans değerleri orta sıcaklık KOYP'de karma iyonik-elektronik iletken anot olarak molibden vanadyum oksitin iyi bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Kuvvetli asitlerin alkali tuzlarından olan rubidyum hidroksit safsızlığı içeren rubidyum selenate, sezyum dihidrojen fosfat tellurit ve rubidyum fosfat tellurat'ın orta ve düşük sıcaklıkta çalışan KOYP'de elektrolit malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir

$(Yb_2O_3)_x(Y_2O_3)_y(ZrO_2)_{1-x-y}$  bileşik formülüne sahip üçlü toz bileşiklerin sentezi ile yapılan çalışmada en yüksek iyonik iletkenlik %6 mol  $Yb_2O_3$  ve %2 mol  $Y_2O_3$  katkılı  $ZrO_2$  elektroliti için  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $0,242 \text{ S/cm}$  olmuştur. Başka bir çalışmada şerit döküm tekniğiyle üretilen katı elektrolitin en yüksek iletkenlik düzeyi, % 8 mol  $Gd_2O_3$  katkılanmış katı elektrolit sistemi için  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $4,74 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$  olduğu belirlenmiştir. Ayrıca NiO|NiO- $6Yb_2YSZ$ | $6Yb_2YSZ$ |LSM- $6Yb_2YSZ$ |LSM tabakaları ile üretilen 5 bileşen içeren yakıt pilinin güç yoğunluğunun  $313,9 \text{ mW/cm}^2$  ve NiO/NiO-GdSZ/GdSZ/LSCFGdSZ/LSCF tabakalarından oluşturulan 5 bileşenli yakıt pilinin performansı  $23,97 \text{ mW/cm}^2$  olduğu belirlenmiştir.

KOYP'de akım toplayıcıları ile katot tabakası arasında iyi bir kontak kurulabilmesi için LSM 20P iletken pasta geliştirilmiştir. Bu pastalarla ticari pastalar göre daha iyi yakıt pili performansı elde edilmiştir ve LSM 20P iletken pastanın ticari pasta yerine kullanılabileceği tespit edilmiştir. KOYP için elek yapısı ve interkonnektör geometrisinin çoklu stak yapısına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi akım toplayıcının gözenekli yapıda nikel elek olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile gözenekli yapıda nikel eleğin, kalın örgü nikel elek yerine alternatif olarak kullanılması önerilmektedir.

Orta sıcaklık KOYP'de kombinatorial yaklaşımıyla üretilen LSF esaslı kompozit katotlarda alan spesifik direnci (ASR) testleri sonucunda en verimli katot kompozisyonunun  $LSM_{0.750}LSF_{0.125}ScSZ_{0.125}$  ve buna yakın kompozisyonlar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışma sıcaklığını daha düşük değerlere indirmek için LSM'nin

yerine hem daha iyi elektronik iletkenlik hem de iyonik özellikler taşıyan rudlesden-poper tipinde bir oksit ile değiştirilmesi önerilmiştir. Düşük sıcaklıklarda çalışma potansiyeli olan katot malzemesi  $\text{La Sr}_3\text{Fe}_3\text{O}_{10-\delta}$  (rp-LSF)'nin LSM ye önemli bir alternatif olarak kullanılabilceği önerilmiştir.

Orta sıcaklık KOYP için termal plazmada üretimi yapılan tozlar ile eş zamanlı olarak çöktürme yöntemiyle imal edilen katotların performans değerlerini karşılaştırılmıştır. Bu amaçla termal plazma yöntemiyle iki fazlı oksitler (LSC 113:LSC-124) karakterize edilmiştir ve LSC-113:LSC-124 iki fazlı oksitlerin molar fraksiyonları sırasıyla 0,3 ve 0,7 olarak belirlenmiştir. Bu katotun 650 °C'deki ASR değeri 0,19 ohm.cm<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir. 600 °C'den daha düşük sıcaklıklarda LSC-113:LSC-214 = 0,5:0,5 bileşimine sahip kompozit katotun kullanılması önerilmektedir.

Yakıt pili teknolojisinin gelişimiyle ilgili birçok olumlu yönlerin olmasına rağmen yakıt pilinin ticarileşmesinde ve kullanımının daha da yaygın hale gelmesinde bazı önemli problemler vardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara dayalı olarak aşağıdaki öneriler ileride yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

- Yakıt pili bileşenleri pahalı malzemelerden üretilmektedir. Bu nedenle mevcut yakıt piliyle aynı hatta daha iyi performans gösteren düşük maliyetle üretilen malzemelerden yakıt pilleri geliştirmelidir.
- Yakıt pillerinin uzun ve süreli kullanımlarında yakıt pili bileşenleri işlevini kaybetmektedir. Bu durum yakıt pillerinin verimini azaltmaktadır. Bu nedenle yakıt pili tasarlarken tüm bileşenlerin malzemeleri kimyasal ve mekanik bozulmalara karşı test edilmelidir. Ayrıca yakıt pili bileşenleri için seçilen malzemelerin birbiriyle uyumlu olması gerekir.
- PEMYP'de uygun su yönetimi için bipolar plaka, katalizör ve gaz difüzyon tabakalarındaki su taşmalarının önlenmesi ve aynı zamanda yeterli membran hidrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.
- Çok düşük ve çok yüksek çalışma sıcaklarında çalışan PEMYP'lerde sıcaklık değişimi nedeniyle mekanik gerilmeler oluşmakta ve yakıt pili bileşenleri hasar

görmektedir. Değişken sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri için ısı yönetimi iyileştirecek yeni malzemeler geliştirilmelidir.

- PEMYP’de gaz difüzyon tabakasındaki hidrofobik yapının zamanla bozulması tabakadan uzaklaştırılmayan suyun gözenekleri tıkanmasına neden olmaktadır. Bu konuda Türkiye’de gaz difüzyon tabakasında yüzeyin hidrofobikliğini önlemek için önemli çalışmalar yapılmıştır. Gaz difüzyon tabakasındaki tıkanıklık gaz akışını engellediği ve dolayısıyla performansı azalttığı için bu konudaki çalışmaların artması gerekir.
- PEMYP’de yabancı maddelerden veya yakıt pili bileşenlerini oluşturan malzemelerden dolayı kirlenme oluşmaktadır. PEMYP’de kirlenme düzeyini belirleyecek testler yapılmalı ve kirlenmeyi önleyecek malzemeler geliştirilmelidir.
- KOYP yüksek çalışma sıcaklığında çalıştığı için elektrot ve elektrolit malzemelerinde ve bu bileşenlerin ara yüzeylerinde termal gerilmeler, kimyasal değişiklikler ve özellikle bu bileşenlerin nano ölçekli malzemelerinde topaklanmalar oluşmaktadır. Bunun yanında KOYP’de yüksek çalışma sıcaklığı pil katmanlarında yapısal bozulmalara çatlamalara ve katmanların birbirinden ayrılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, düşük sıcaklıkta iletkenlik özelliğini koruyabilen, geleneksel yüksek sıcaklıkta çalışan malzemelerden daha yüksek verime sahip yeni ve ucuz elektrot ve elektrolit malzemeleri geliştirilmelidir.
- KOYP’nin katot tarafında havanın içinde bulunan CO<sub>2</sub> katot malzemelerini olumsuz yönde etkilemekte ve bu olaya CO<sub>2</sub> zehirlenmesi adı verilmektedir. Bu nedenle CO<sub>2</sub> zehirlenmesini önleyen yeni tasarımlar geliştirilmelidir.
- KOYP’de interkonnektörler yakıt pilinde üretilen akımın toplanmasını, oksijen ve yakıtın KOYP içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlayan önemli bir bileşendir. İnterkonnektörler için bu işlevleri yerine getirecek uzun ömürlü, dayanıklı ve ucuz malzemeler geliştirilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Sui, J., Chena, Z., Wang, C., Wang, Y., Liu J. and Wenjia, L. (2020). Efficient hydrogen production from solar energy and fossil fuel via water electrolysis and methane-steam-reforming hybridization. *Applied Energy*, 276, 115409.
2. Zore, U. K., Yedire, S. G., Pandi, N., Manickam S. and Sonawane S. H. (2021). A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105536.
3. Hancock, O. G. (1986). A photovoltaic-powered water electrolyzer: its performance and economics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 11(3), 153-160.
4. Baykara, S.Z. and Bilgen, E. (1989). An overall assessment of hydrogen production solar water termolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14(12), 881-891.
5. Engels H., Funk, J. E., Hesselmann, K. and Knoche, K.F. (1987). Thermochemical hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 12(5), 291-295.
6. Willner, I. and Steinberger-Willner, B. (1998). Solar hydrogen production through photo-biological. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13(10), 593-604.
7. Wyczalek, F. A. and Suh, C. M. (2002, July). *The End Of Petroleum*, 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington, DC, 775- 781.
8. Iguchi, S., Kimura, K., Ito, N., Tange, K. and Suzuki, H. (2004, November). *New Leads for Future FC Vehicle*, Fuel Cell Seminar, San Antonio, Texas, 210-217.
9. Midilli, A., Kucuk H., Topal, M. E., Akbulut, U. and Dincer I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(50), 25385-25412.
10. Kumar, S. S. and Himabindu, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2, 442–454.
11. Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971.
12. Safari, F. And Dincer, I. (2020). A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112182.
13. Hoffmann, P. (1981). *The Forever Fuel: The Story of Hydrogen* (First Edition). NewYork: Westview Pres, 272.
14. Bockris, J.O'M. (1975). *Energy: The Solar-Hydrogen Alternative* (First Edition). NewYork: John Wiley & Sons, 365.



15. Chen W., Ouyang L. Z., Liu J. W., Yao X. D., Wang. H., Liu Z. W. and Zhu M. (2017). Hydrolysis and regeneration of sodium borohydride (NaBH<sub>4</sub>) A - combination of hydrogen production and storage. *Journal of Power Sources*, 359, 400 - 407.
16. Liu, H., Xu, L., Han Y., Chen, X., Sheng, P., Wang, S., Huang, X., Wang, X., Lu C., Luo, H., He, S., Lan, Z. and Guo, J. (2021). Development of a gaseous and solid-state hybrid system for stationary hydrogen energy storage. *Green Energy & Environment*, 6(4), 528-537.
17. Ohta, T. (1979). *Solar-Hydrogen Energy Systems* (First Edition). Oxford: Pergamon Press, 276.
18. Revankar S. and Majumdar P. (2014). *Fuel Cells Principles, Design, and Analysis* (First Edition). BocaRaton: CRC Press, 748.
19. Veziroğlu, T.N., Proceedings of the Hydrogen Economy Miami Energy Conference (THEME), Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL, 2:90-124 (1974).
20. Ramezanizadeh, R., Nazari, M. A., Ahmadi, M. A. and Cheneri, L. (2019). A review on the approaches applied for cooling fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 517-525.
21. Barbir F. (2012). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice* (Second edition). London: Academic Press, 444.
22. Yıldırım, M. (2004). *Otomotiv Sektöründe Hidrojen Kullanımı ve Yakıt Pili Teknolojisi*, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul.
23. Spiegel C (2008). *PEM Fuel Cell Modeling and simulation Using MATLAB* (First edition). London: Academic Press, 456.
24. Çubukçu ,M. (2005). *PEM Tipi Yakıt Pili Bileşenleri ve Yakıt Pili Performans Parametreleri*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
25. Avcı, A.K., Önsani Z.L. and Trimm, D.L. (2001). On board fuel conversion for hydrogen fuel cells, *Applied Catalysis A-General*, 216(1-2), 243-256.
26. Park S., Lee J.-W. and Popov B. N. (2012). A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 5850–5865.
27. Zakaria Z., Awang Mat Z., Abu Hassan S. H. and Boon Kar Y. (2020). A review of solid oxide fuel cell component fabrication methods toward lowering temperature. *International Journal of Energy Research*, 44, 594-611.
28. Timurkutluk B. , Timurkutluk C., Mat M. D. and Kaplan Y. (2015). A review on cell/stack designs for high performance solid oxide fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1101-1121.

29. Choolaei M., Cai Q., Slade R. C. T. and Amini Horri B (2018). Nanocrystalline gadolinium-doped ceria (GDC) for SOFCs by an environmentally-friendly single step method. *Ceramics International*, 44, 13286-13292.
30. Singh M., Zappa D., Comini E. (2021). Solid oxide fuel cell: decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 27643-27674.
31. Panthi D., Hedayat N., Woodson T., Emley B. J. and Du Y. (2020). Tubular solid oxide fuel cells fabricated by a novel freeze casting method. *Journal of the American Ceramic Society*, 103, 878-888.
32. Wu J., Yuan X. Z., Martin J. J., Wang H., Zhang J., Shen J., Wu S. and Merida W. (2008). A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies. *Journal of Power Sources*, 184(1), 104-119.
33. Schmittinger W. and Vahidi A. (2008). A review of the main parameters influencing long term performance and durability of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 180(1), 1-14.
34. Li H., Tang Y., Wang Z., Shi Z., Wu S., Song D., Zhang J., Fatih K., Zhang J., Wang H., Liu Z., Abouatallah R. And Mazza A. (2008). A review of waterflooding issues in the proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 178(1), 103-117.
35. Kandlikar S. G. and Lu Z. (2009). Thermal management issues in a PEMFC stack - a brief review of current status. *Applied Thermal Engineering*, 29(7), 1276-1280.
36. Yousfi-Steiner N., Mocoteguy P., Candusso D., Hissel D., Hernandez A. and Aslanides A. (2008). *Journal of Power Sources*, 183, 260-274.
37. Dai W., Wang H., Yuan X.-Z., Martin J. J., Yang D., Qiao J. and Ma J. (2009). *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 9461-9478.
38. Ciureanu M. (2004). Effects of nafion dehydration in pem fuel cells. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34, 705-714.
39. Liu X., Guo H., YE F. and Ma C. F. (2007). Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 52(11), 3607-3614.
40. Wu B., Zhao M., Shi W., Liu W., Liu J., Xing D., Yao Y., Hou Z., Ming P., Gu J., Zou Z. (2014). The degradation study of nafion/ptfe composite membrane in PEM fuel cell under accelerated stress tests. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(26), 14381- 14390.
41. Afra M., Nazaria M., Kayhania M. H., Sharifpurb M. and Meyer J. P. (2019). 3D experimental visualization of water flooding in proton exchange membrane fuel cells. *Energy*, 175, 967-977.

42. Chen Q., Zhang G., Zhang X., Sun C., Jiao K., Wang Y. (2021). Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of cooling methods, material properties, and durability. *Applied Energy*, 286, 116496.
43. Casciola M., Alberti G., Sganappa M. and Narducci R. (2006). On the decay of nafion proton conductivity at high temperature and relative humidity. *Journal of Power Sources*, 162(1), 141 - 145.
44. Zhang S., Yuan X., Wang H., Merida W., Zhu H., Shen J., Wu S. and Zhang J. (2009). A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(1), 388-404.
45. Fly A. and Thring R. H. (2015). Temperature regulation of an evaporatively cooled proton exchange membrane fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11976-11982.
46. Borup R. L., Davey J. R., Garzon F. H., Wood D. L. and Inbody M.A. (2006). Short communication PEM fuel cell electrocatalyst durability measurements. *Journal of Power Sources*, 163, 76–81.
47. Pan Y. , Wang H., and Brandon N. P. (2021). Gas diffusion layer degradation in proton exchange membrane fuel cells: Mechanisms, characterization techniques and modelling approaches, *Journal of Power Sources*, 513, 230560.
48. Yang Y., Zhou X., Li B. and Zhang C. (2021) Recent progress of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: Material and structure designs of Microporous layer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 4259 – 4282.
49. Stein T., Ein-Eli Y. (2020). Challenges and Perspectives of Metal-Based Proton Exchange Membrane's Bipolar Plates: Exploring Durability and Longevity. *Energy Technology*, 8(6), 2000007.
50. Hinds G. (2004). Performance and Durability of PEM Fuel Cells: A Review, *NPL Report DEPC-MPE 002*, 25–42.
51. Cheng X., Shi Z., Glass N., Zhang L., Zhang J., Song D., Liu Z.-S., Wang H., Shen, J. (2007). *Journal of Power Sources*, 165, 739–756.
52. Zhang S., Yuan X. Z., Hin J. N. C., Wang H., Friedrich K. A. and Schulze M.. (2009). A review of platinum-based catalyst layer degradation in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 194(2), 588-600.
53. Sreedhar I., Agarwal B., Goyal P. and Singh S. A. (2019). Recent advances in material and performance aspects of solid oxide fuel cells. *Journal Electroanalytical Chemistry*, 848, 113315.
54. Yu Y., Luo H., Cetin D., Lin X., Ludwig K., Pal U., Gopalan S. and Basu S. (2014). Effect of atmospheric CO<sub>2</sub> on surface segregation and phase formation in La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.8</sub>O<sub>3</sub>. *Applied surface science*, 323, 71-77.

55. Bayrakçeken A., Türker L. and Eroğlu İ. (2008). Improvement of carbon dioxide tolerance of PEMFC electrocatalyst by using microwave irradiation technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 7527 – 7537.
56. Bayrakçeken A., Erkan S., Türker L. and Eroğlu İ. (2008). Effects of membrane electrode assembly components on proton exchange membrane fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 165 – 170.
57. Devrim Y., Erkan S., Baç N., and Eroğlu İ. (2009). Preparation and characterization of sulfonated polysulfone/titanium dioxide composite membranes for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 3467 – 3475.
58. Fıçıcılar B., Bayrakçeken A., and Eroğlu İ. (2010). Pt incorporated hollow core mesoporous shell carbon nanocomposite catalyst for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 9924 – 9933.
59. Turan C., Cora Ö. N. and Koc M. (2012). Contact resistance characteristics of coated metallic bipolar plates for PEM fuel cells e investigations on the effect of manufacturing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 18187 -18204.
60. Kahveci E. E. and Taymaz I. (2014). Experimental investigation on water and heat management in a PEM fuel cell using response surface methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 10655 -10663.
61. Avcioglu G. S., Fıçıcılar B., Eroglu I. (2017). Influence of FEP nanoparticles in catalyst layer on water management and performance of PEM fuel cell with high Pt loading. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 496-506.
62. Avcioglu G. S., Fıçıcılar B., Eroglu I. (2018). Effective factors improving catalyst layers of PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 10779 – 10797.
63. Eren E. O., Özkan N. and Devrim Y. (2020). Development of non-noble CoeNeC electrocatalyst for high-temperature proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 33957 – 33967.
64. Canavar M. and Timurkutluk B. (2017). Design and fabrication of novel anode flow-field for commercial size solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 346, 49-55.
65. Timurkutluk B., Altan T., Celik S., Timurkutluk C. and Palacı Y. (2019). Glass fiber reinforced sealants for solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 18308 – 18318.
66. Timurkutluk B., Dokuyucu S. and Onbilgin S. (2020). Novel structured anode-supported solid oxide fuel cells with porous GDC interlayers. *Ceramics International*, 46, 11066–11074.
67. Onbilgin, S., Timurkutluk, B., Timurkutluk C. and Celik, S. (2020). Comparison of electrolyte fabrication techniques on the performance of anode supported solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 35162-35170

68. Chowdhury, M. Z. and Timurkutluk B. (2018). Transport phenomena of convergent and divergent serpentine flow fields for PEMFC. *Energy*, 161, 104-117.
69. Genc, O., Toros, S. and Timurkutluk, B. (2018). Geometric optimization of an ejector for a 4kW SOFC system with anode off-gas recycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 9413-9422.
70. Timurkutluk, B. and Dokuyucu, S. (2018). The role of tape thickness on mechanical properties and performance of electrolyte supports in solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 44, 17399-17406.
71. Timurkutluk, B. and Chowdhury, M. Z. (2018). Numerical investigation of convergent and divergent parallel flow fields for PEMFCs. *Fuel Cells*, 18(4), 441-448.
72. Timurkutluk, B., Toros, S., Onbilgin, S., Korkmaz, H. G. (2018). Determination of formability characteristics of Crofer 22 APU sheets as interconnector for solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 14638-14647.
73. Timurkutluk, B., Timurkutluk, C., Toros, S. and Kaplan, Y. (2018). Influence of sintering support design on the properties of NiO-YSZ anode support micro-tubes. *Ceramics International*, 44, 5587-5593.
74. Genc, O., Timurkutluk, B. and Toros, S. (2019). Performance evaluation of ejector with different secondary flow directions and geometric properties for solid oxide fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 421, 76-90.
75. Timurkutluk, B., Celik, S. And Ucar, E. (2019). Influence of doctor blade gap on the properties of tape cast NiO/YSZ anode supports for solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 45, 3192-3198.
76. Timurkutluk, B., Celik, S. and Ucar, E. (2019). Effects of solid loading on joining and thermal cycling performance of glass-ceramic sealing pastes for solid oxide fuel cells, *Ceramics International*, 45, 12845-12850.
77. İnternet: URL: <https://www.ohu.edu.tr/drv-team/sayfa/projeler>. Son Erişim Tarihi: 04.01.2021.
78. İnternet:URL: <https://ee.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/yakit-pili-teknolojileri> Son Erişim Tarihi: 26.05.2021.
79. Yılmaz, B. (2006). *Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri için anot üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
80. Bulut, Ş. (2007). *Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt pillerinde kullanılacak bir gaz difüzyon plakasının geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

81. Kahraman, H. (2010). *Polimer elektrolitik membran (PEM) yakıt pillerinde kullanılacak metalik çift kutuplu plakanın geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
82. Daş, E. (2014). *PEM yakıt pilleri için iletken polimer karbon destekli platin katalizörlerin mikrodalga yöntemi ile hazırlanması*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
83. Öztürk, A. (2016). *Pem yakıt pillerinde su yönetiminin iyileştirilmesi için hidrofobik malzeme geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
84. Çelik, M. K. (2017). *PEM yakıt pilleri için metal oksit destekli katalizör geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
85. Nuriyev, F. (2018). *Pem yakıt pillerinde organik/inorganik nanokompozit membran geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
86. Özdemir, Y. (2018). *Yüksek sıcaklık PEM yakıt pilleri için çapraz bağlanmış polybenzimidazol membranlar*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
87. Dursun, S. (2019). *Farklı destek malzemeleri ile hazırlanmış kobalt fitalosiyanın katalizörünün üretimi karakterizasyonu ve pem yakıt pili performansının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
88. Bayrakçeken, A. (2008). *PEM yakıt pili uygulamaları için çeşitli karbon destekler üzerine Platin ve Platin-Rutenyum bazlı katalizörlerin farklı yöntemlerle hazırlanması*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
89. Okan, B. (2011). *Grafen nanotabakalarının ayırılması için geliştirilmiş yöntem ve grafen nokompozitlerinin yakıt pili elektrotu olarak kullanımı*, Doktora Tezi, Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
90. Avcıoğlu, S. E. (2016). *Polimer değişim zarlı yakıt pilinde su yönetiminin tanımlama ve karakterizasyon teknikleri ile optimizasyonu*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
91. Kaplan, B. Y. (2017). *PEM yakıt pilleri için karbon ve grafen esaslı gaz difüzyon elektrotlarının geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Sabancı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
92. Daş, E. (2018). *Süperkritik karbondioksit depozisyon tekniği ile hazırlanan grafen bazlı platin katalizörlerin sentezi, karakterizasyonu ve PEM yakıt pilinde kullanımı*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
93. Radha, M. A. R. (2018). *Pem yakıt pillerinde kullanılmak üzere hidrokarbon bazlı nanokompozit membran sentezi ve karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

94. Ungan, H. (2019). *PEM yakıt pilleri için hidrofobik yüzey geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
95. Mat, A. (2011). *Katı oksit yakıt pilleri için iletken pasta geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
96. Canavar, M. (2013). *Katı oksit yakıt pili için stak geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
97. Yaraşan, Ö. (2014). *Katı oksit yakıt pilleri için yeni elektrolit ve anot malzemelerin geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
98. Topcu, A. (2017). *Katı oksit yakıt pili interkonnektörlerinin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve performanslarının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
99. Fazlıoğlu, B. (2018). *Orta sıcaklıkta çalışan katı oksit yakıt pilleri için mangan ve vanadyum emdirilmiş anot sistemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
100. Uğur, A. (2018). *Anot Destekli Mikrotüp Katı Oksit Yakıt Pili Üretimi ve Mikroyapısının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
101. Evcimen, S. (2019). *Orta sıcaklıklarda çalışan katı oksit yakıt pilleri için anot/katot elektrotların geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
102. Beyribey, D. B. (2012). *Düşük ve orta sıcaklık katı oksit yakıt pilleri için geliştirilmiş elektrot/elektrolit malzemeleri*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
103. Özen, M. K. (2012). *Katı oksit yakıt pilleri için  $Bi_2O_3-Ho_2O_3-Dy_2O_3$  temelli elektrolit malzemesi geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
104. Yalaz, E. (2018). *Gadolinium katkılı  $ZrO_2$  katı elektrolitlerin üretilmesi, karakterizasyonu ve yakıt pili uygulaması*, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
105. Gürbüz, A. (2020).  *$(Yb_2O_3)_x(Y_2O_3)_y(ZrO_2)_{1-x-y}$  katı elektrolit bileşiğinin sentezi, karakterizasyonu ve katı oksit yakıt pili uygulaması*, Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
106. İnternet: URL: <https://istatistik.yok.gov.tr> Son Erişim Tarihi: 26.05.2021.

107. Ulaş, B. (2021) *Pem Yakıt Pilleri İçin Anot Katalizör ve Membran Sentezi, Karakterizasyonu ve Yakıt Pili Performans Testleri*. Doktora Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
108. Celep, G.K. (2017) Proton değişim membran yakıt hücresi gaz difüzyon tabakasının nanofiber/nanopartikül ile etkileşiminin elektriksel iletkenliği üzerindeki etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
109. Sevin, B. (2019). Gaz difüzyon tabakası gözeneklilik değerlerinin proton değişim membran yakıt hücresi (PEMFC) performansına etkisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
110. Kılıç, F. (2021), Kombinatorial Yaklaşım ile LSF Esaslı Kompozit Katotların Orta Sıcaklık Katı Oksit Yakıt Pilleri İçin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
111. Aysal, H.E. (2019), Termal Plazma İle Orta Sıcaklık Yakıt Pilleri İçin LSC-113 /LSC-214 Kompozit Katot Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Muhammet TÜRKYILMAZ

Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

### Eğitim Derecesi

### Okul/Program

### Mezuniyet Yılı

Lisans

Erciyes Üniversitesi

2013

Yüksek Lisans

Amasya Üniversitesi

### İş Deneyimi/Yıl

### Çalıştığı Yer

### Görevi

2016-

Amasya Üniversitesi

Yapı Denetimi

### Yabancı Dili

İngilizce

### Bilimsel Faaliyetler(Yayımlar, Bildiriler, Katıldığı Projeler)

1. Türkyılmaz M., Kaplan M. (2021). Türkiye’de yakıt pillerinin gelişimi, 5.Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar kongresi, Kayseri.