

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PALADYUM KAPLI NİKEL KÖPÜK KULLANIMININ  
DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİ PERFORMANSINA  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**BURAK SARAÇ**

**KOCAELİ 2019**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

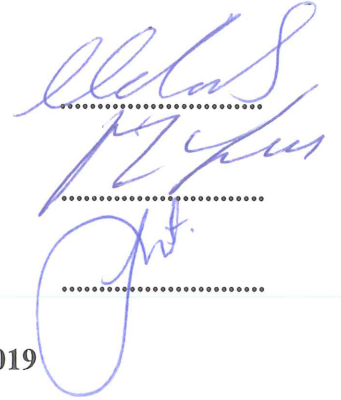
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PALADYUM KAPLI NİKEL KÖPÜK KULLANIMININ  
DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİ PERFORMANSINA  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BURAK SARAÇ

Prof. Dr. Cenk ÇELİK  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
Prof. Dr. Muharrem YILMAZ  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ  
Jüri Üyesi, Kırklareli Üniversitesi

  
.....  
.....  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2019

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Tez yazım sürecinde her türlü desteği veren, çalışma disiplini aşılayan, akademik olarak gelişmemi sağlayan ve üzerimde emeği olan danışmanım Prof. Dr. Cenk Çelik'e teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım boyunca değerli bilgilerinden ve desteklerinden faydalandığım Prof. Dr. Muharrem YILMAZ, Prof. Dr. Sibel ZOR ve Prof. Dr. Halil İbrahim SARAÇ hocalarıma ve yıl içinde kaybettiğim Prof. Dr. Mustafa ÇÖL hocama teşekkür ederim.

Yapılan çalışma TÜBİTAK (215M255 Nolu Proje) desteği ile sundukları imkanlardan dolayı teşekkür ederim.

Çalışmamda yanımda olan, bilgi paylaşımlarında bulunduğum, destek ve yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans ve doktora öğrencisi arkadaşlarıma teşekkür ederim. Özellikle tez yazım aşamasının bütün aşamalarında yardım, destek ve bilgilerini esirgemeyen yüksek lisan öğrencisi İpek ÇAĞLAYAN ve Sevgi AYDIN'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında beni her konuda destekleyen, geleceğim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan aileme teşekkür ederim.

Haziran – 2019

Burak SARAÇ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	v
SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT .....	viii
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİ.....	2
2. YAKIT PİLLERİ .....	6
2.1. Yakıt Pilinin Gelişimi.....	6
2.2. Yakıt Pili Bileşenleri .....	7
2.2.1. Gaz difüzyon tabakası.....	7
2.2.2. Akış dağıtıcı plaka .....	9
2.2.3. Elektrolit .....	9
2.3. Yakıt Pili Çeşitleri .....	9
2.3.1. Prolimer elektrolit membranlı yalıt pili (PEMYP) .....	10
2.3.2. Alkali yakıt pili (AYP) .....	11
2.3.3. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP) .....	12
2.3.4. Formik asit yakıt pili (FAYP).....	13
2.3.5. Katı oksit yakıt pili (KOYP).....	14
3. DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİ .....	15
3.1. Katyon Değişim Membranlı Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili (KDM DBHYP).....	15
3.2. Anyon Değişim Membranlı Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili (ADM DBHYP).....	16
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR.....	17
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	25
KAYNAKLAR .....	27
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	29
ÖZGEÇMİŞ .....	30

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Grove (fuel cell projects for the evil genius)ve Grove'un gaz bataryası (1839). ....	6
Şekil 2.2.	Bacon'nun geliştirdiği alkali hidrojen- oksijen yakıt pili. ....	7
Şekil 2.3.	GDL malzemeleri a) karbon kumaş b) karbon kağıt .....	8
Şekil 2.4.	Akış dağıtıcı plaka kanal tasarımları a) paralel b) serpantin c) paralel serpantin.....	9
Şekil 2.5.	PEM yakıt pili çalışma şeması.....	11
Şekil 2.6.	AYP çalışma şeması .....	12
Şekil 2.7.	EKYP çalışma şeması.....	13
Şekil 2.8.	FAYP çalışma şeması .....	13
Şekil 2.9.	KOYP çalışma şeması .....	14
Şekil 3.1.	KDM DBHYP elektron ve kütle transfer prosesi .....	15
Şekil 3.2.	ADM DBHYP elektron ve kütle transfer prosesi .....	16
Şekil 4.1.	Kaplama işlemi yardımcı elemanlar A) DC güç kaynağı, B) Manyetik karıştırıcılı ocak, C) Bağlantı elemanları.....	17
Şekil 4.2.	A) Yağ giderme işlemi B) Dağlama işlemi C) Pd kaplama.....	18
Şekil 4.3.	Tek hücre test sistemi. ....	19
Şekil 4.4.	2x2 cm <sup>2</sup> 'lik yakıt pili test hücresi. ....	19
Şekil 4.5.	4V 1dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/cm <sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH <sub>4</sub> +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L /dak). ....	20
Şekil 4.6.	4V 2dak. kaplama için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg /cm <sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH <sub>4</sub> +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak).....	21
Şekil 4.7.	4V 5dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/cm <sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH <sub>4</sub> + %12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/ dak).....	21
Şekil 4.8.	4V 10 dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/cm <sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH <sub>4</sub> +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/ dak). ....	22
Şekil 4.9.	4V 16dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/ cm <sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH <sub>4</sub> +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/dak). ....	23
Şekil 4.10.	5x5 cm <sup>2</sup> 'lik Nikel köpüklerin 3 ml/dak yakıt besleme değerinde karşılaştırılması (Katot:1 mg/cm <sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH <sub>4</sub> +%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/dak). ....	23

Şekil 4.11. Köpüklerin performans karşılaştırma grafiği. Katot: 1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C, Sıcaklık: 80 °C, Yakıt Çözeltisi (% ağırlık): %2 NaBH<sub>4</sub>+ %12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/dak). ..... 24



## **TABLULAR DİZİNİ**

Tablo 2.1. Yakıt pili çeşitleri tablo özeti.....	10
Tablo 4.1. Kaplama işlemi verileri.....	18



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

wt%	: Ağırlıkça yüzde
Au	: Altın
Cu	: Bakır
BH <sub>4</sub>	: Borhidrür
Ag	: Gümüş
OH	: Hidroksil
Ni	: Nikel
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
K	: Potasyum
Na	: Sodyum
NaBH <sub>4</sub>	: Sodyum borhidrür
NaOH	: Sodyum hidroksit

### Kısaltmalar

ADM	: Anyon değişim membranı
ADM-DEYP	: Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili
ADP	: Akış dağıtıcı plaka
AYP	: Alkali yakıt pili
DBHYP	: Doğrudan borhidrür yakıt pili
DEYP	: Doğrudan etanol yakıt pili
DGYP	: Doğrudan glikoz yakıt pili
DMYP	: Doğrudan metanol yakıt pili
DSYP	: Doğrudan sıvı yakıt pili
DT	: Difüzyon tabakası
EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını
EKYP	: Erimiş karbonat yakıt pili
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
GDT	: Gaz difüzyon tabakası
KBH <sub>4</sub>	: Potasyum borhidrür
KDM	: Katyon değişim membranı
KOYP	: Katı oksit yakıt pili
PEMYP	: Polimer elektrolit membranlı yakıt pili
PPI	: İnç başına düşen porozite
PTFE	: Politetrafloretillen
SEM	: Scanning Electron Microscope



## PALADYUM KAPLI NİKEL KÖPÜK KULLANIMININ DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

### ÖZET

Her geçen gün insan nüfusunun hızlı artışı ve küresel ekonominin büyümesi, dünya üzerindeki enerji talebinin artmasına neden olmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtların gelecekte tükenerek olması ve çevre kirlenici etkileri araştırmacıların yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelmesine neden olmuştur. Bu kapsamda araştırmacılar; güneş, rüzgar, hidrolik enerji, jeotermal, biokütle ve hidrojen enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğu (güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal) doğa şartlarındaki anlık değişimler sebebiyle kararlı bir güç çıkışı vermemesi gibi önemli bir dezavantaja sahiptir. DBHYP'lerinin verimli, kararlı ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için anot difüzyon tabakası tasarımı büyük önem teşkil etmektedir. Bu sebeple tez kapsamında DBHYP için anot difüzyon tabakası üzerine çalışılmıştır. Metal köpükler metalden gelen yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, gözenekli yapının sağladığı yüksek geçirgenlik, dar akış kanalları, geniş özgül yüzey alan, kılcak ve difüzyon kuvvetleri sayesinde yakıt pilleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında mükemmel performans sağlayan bir malzemedir ve yakıt pillerinde kullanımı popülerleşmiştir.

Bu çalışmada Nikel köpük üzerine yapılan Pd kaplamaların DBHYP'nde verime etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada kaplamaların farklı koşullardaki etkinliğinin yakıt pili performansına etkisini görebilmek için tek hücre testleri yapılmıştır. İnceleme sonucunda yakıt pilinde en iyi performans 4V 1 dakika kaplama süresi uygulanan, 5 ml/dak. yakıt debisinde 35,21 mWcm<sup>-2</sup> güç yoğunluğu değeri ile elde edilmiştir. Kaplama yapılmamış ticari Nikel köpük ve yalnızca Pd kaplanmış Nikel köpük polarizasyon ve güç eğrilerine bakıldığında Pd kaplanmış Nikel köpüğün performansının yakıt pili içerisinde daha yüksek olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Difüzyon Tabakası, Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili, Elektro-Kaplama, Hidrojen Enerjisi, Metal Köpük.

## **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PALLADIUM-COATED NICKEL FOAM ON PERFORMANCE IN DIRECT BOROHYDRIDE FUEL CELL**

### **ABSTRACT**

The rapid growth of the human population and growth of the global economy, are increasing the demand for energy in the world. Fossil fuels, which provide a large part of the energy need, will be exhausted in the future and environmental pollutants have caused researchers to search to renewable energy technologies. In this context, researchers search; solar, wind, hydraulic energy, geothermal, biomass and hydrogen energy. Most renewable energy sources (solar, wind, hydraulic, geothermal) have a significant disadvantage that they do not give a stable power output due to instantaneous changes in natural conditions. Anode diffusion layer design is very important for, stable and safe operation of DBHYPs. For this reason, anode diffusion layer was studied for DBHYP. Metal foams are a material that provides excellent performance in many engineering applications, and they has become very popular in fuel cells.

In this study, the effect of Pd coatings on nickel foam on DBHYP was investigated. In this study, single cell tests were performed in order to see the how effect of the efficiency of the coatings under different conditions on fuel cell performance. At the end of the examination, the best performance of the fuel cell is 5 ml / min with a coating time of 4 V 1 minute. It has been obtained with the power density value of  $35.21 \text{ mWcm}^{-2}$  at the fuel flow rate. Looking at the polarization and the power curves of uncoated commercial Nickel foam, and Pd coated Nickel only, it was found that the performance of Pd coated Nickel foam was higher in the fuel cell.

**Keywords:** Diffusion Layer, Direct Borohydride Fuel Cell, Electro-Coating, Hydrogen Energy, Metal Foam.

## GİRİŞ

Son yıllarda, hidrojen enerjisinin kullanıldığı, hidrojenin kimyasal enerjini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yakıt pili sistemlerine olan ilgi artmıştır. Kuşkusuz bunun sebeplerinden biri, ülkelerin küresel ısınmanın önlenmesi sebebiyle aldığı yasal önlemler, bu sistemin diğer yenilenebilir enerji sistemlerine göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve sürdürülebilir güç çıkışı elde edilebilmesidir. Yakıt pili sistemleri ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine, yakıt sağlandığı takdirde sürekli bir güç çıkışı elde edilebilmektedir.

Yakıt pili sistemlerinde yakıt olarak saf hidrojen veya hidrojen taşıyıcı sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Yakıt olarak saf hidrojenin kullanıldığı yakıt pili sistemlerinde, hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özelliği, yakıt depolama ve taşıma problemleri meydana gelmektedir. Bu doğrultuda hidrojen taşıyıcı sıvı yakıtların kullanıldığı yakıt pili sistemleri yoğun ilgi görmektedir. Bor minerali rezervlerinin büyük bir kısmının ülkemiz topraklarında bulunduğu göz önünde bulundurulursa, yakıt olarak borhidrür bileşikler kullanılarak doğrudan borhidrür yakıt pillerinin (DBHYP) geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması ülkemiz açısından stratejik bir öneme sahiptir.

DBHYP'lerinin yaygınlaştırılması ve ticarileştirilmesi, diğer yakıt pili türleri için de olduğu gibi hücre performansını arttırarak, hücre hacmini ve maliyeti azaltarak gerçekleştirilecektir. Bilindiği gibi malzeme bilimindeki gelişmelerle paralel birçok endüstride ilerleme kat edilmektedir. Metal köpüklerin yakıt hücrelerinde kullanılmaya başlanması da yakıt pili sistemlerinde hücre performansında önemli gelişmeler elde edilmesini sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda metal köpük olarak Ni köpüğün yaygın bir şekilde tercih edildiği görülmüştür. Bu çalışmada Ni köpüğe Pd kaplama yapılarak yakıt hücresinde gaz difüzyon elektrotu olarak kullanılabilirliği test edilmiştir. Nikel köpük katalitik özelliklere ve korozyon dayanımına sahip Pd ile kaplanmıştır. Kaplama için yüksek dayanıklılık ve kalitede kaplama elde edilebilen elektrolitik kaplama metodu kullanılmıştır. Elde edilen gaz difüzyon elektrotunun yakıt hücresi içerisinde kullanılabilirliği ve performans etkileri araştırılmıştır.

## 1. GENEL BİLGİ

Yakıt pili sistemleri yakıtın içinde depolanan kimyasal enerjiyi, doğrudan elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren yüksek verimliliğe sahip elektrokimyasal cihazlardır. Fosil yakıtların yanması sonucu enerji üretilen ısı motorları (içten yanmalı motorlar) düşük verimliliğe ve çevre kirletici etkilere sahiptir. Yakıt pilleri, %50-70 arasındaki yüksek enerji verimliliğine sahip olmaları ve çevreye zehirli gaz salmamaları sebebiyle gelecekte içten yanmalı motorlar başta olmak üzere güç üretim sistemlerinin yerine kullanılmaya önemli bir adaydır.

Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP) ve doğrudan metanol yakıt pili (DMYP) günümüzde en çok ilgi gören yakıt pili türleridir. PEMYP’de yakıt olarak kullanılan yanıcı ve patlayıcı özelliği sebebiyle kullanım esnasında yaşanabilecek taşıma ve depolama zorlukları özellikle portatif (taşınabilir) küçük ve orta büyüklükteki güç üretim sistemlerinde büyük problem teşkil etmektedir. Bu problem, alternatif yakıt arayışını gerektirmektedir. Yakıt olarak hidrojen taşıyıcı kimyasal sıvıların kullanılan doğrudan sıvı yakıt pilleri, sıvı yakıtların yanıcı ve patlayıcı olamamaları sebebiyle daha kolay dağıtım ve depolanabilmeleri ile hidrojen kullanımındaki zorluklara çözüm oluşturmaktadır. Sıvı yakıt pillerinde kullanılan temel yakıtlar; metanol, etanol, etilen, dimetil, glikol, sodyum borhidrür olarak sıralanabilmektedir (Arges vd. 2014, Gauthier ve Benziger 2014, He vd. 2012, Li vd. 2003, Ma, Choudhury vd. 2010, Pinto, Oliveira ve Falcão 2018, Sørensen 2008, Wang, He ve Lan 2012, Wang ve Wang 2003).

Yakıt pili hücreleri anot ve katot akış dağıtıcı plaka (ADP), membran, anot ve katot difüzyon tabakası (DT), anot ve katot katalizör tabakasından oluşmaktadır. Sıvı yakıt, oksidasyon reaksiyonunu gerçekleştirmek için anottan hücre içerisine gönderilmektedir. Oksidan ise aynı anda indirgeme reaksiyonunu gerçekleştirmek için katottan gönderilmektedir. Katalizör tabakasına ulaşan reaktifler kimyasal reaksiyona uğrar. Bu reaksiyonların sonucu oluşan iyonlar elektrolitten geçerken; elektronlar, harici bir devreden geçmektedir. Yakıtın türün bağlı olarak reaksiyon

ürünleri değişse de katotta genellikle çevreye her hangi bir zararlı etkisi olmayan su üretilmektedir (Colpan vd. 2018, Kamarudin, Achmad ve Daud 2009, Ling, Ee ve Birgersson 2013 Ong, Kamarudin ve Basri 2017, Schenk, Cermenek and Hacker 2018).

Doğrudan sıvı yakıt pillerinde anot ve katot akış dağıtıcı ve difüzyon tabakası, sıvı ve gaz fazdaki reaktiflerin ve reaksiyon ürünlerinin iki fazlı kütle taşınmasına olanak sağlamalıdır. Sıvı yakıt pillerinde çift fazlı akış nedeni ile kütle taşıma ve yakıt kullanım verim kayıpları oldukça önem arz etmektedir (Li vd. 2003, Li, Liu, vd. 2013, Zabel vd. 2009, Zamel ve Li 2013). Doğrudan sıvı yakıt pillerinde sıvı yakıtın ve reaksiyon ürünlerinin etkili bir şekilde taşınması hücre verimini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Sıvı yakıt pillerinde reaktif ve reaksiyon ürünlerinin taşınmasının etkin bir şekilde gerçekleştirilememesi katalizör bölgesinde tıkanıklıklar oluşturarak reaksiyon verimini düşürmektedir. Bu sebeple sıvı yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka ve gaz difüzyon tabakası tasarımı büyük önem arz etmektedir ve çok fazlı akışa izin verecek şekilde tasarlanmalıdır (Gauthier ve Benziger 2014, He vd. 2012, Oliveira, Pereira, ve Pinto 2016, Shrivastava ve Harris 2017, Wang ve Wang 2003).

DSYP ile ilgili yaptığımız araştırmada DMYP'nin en çok ilgi gören sıvı yakıt pili olduğu görülmektedir. DBHYP borhidrürün yüksek parlama noktası ve enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen görmesi gereken ilgiyi son yıllara kadar görmemiştir. Son yıllarda DBHYP'ne olan ilgi artış göstermiştir (Arges vd. 2014). Bor minerali rezervlerinin %70'den fazlasının ülkemiz topraklarında bulunması sebebiyle, alkali çözeltilerde çözülmüş borhidrürün yakıt olarak kullanıldığı DBHYP'lerin geliştirilmesi ülkemiz açısından stratejik bir öneme sahiptir (Cenk Çelik 2006, Okur 2012). Bu sebeple tez kapsamında DBHYP'leri üzerine çalışılmıştır.

DBHYP'lerinde reaksiyon ürünlerinin yakıt hücresi içerisinden etkin bir şekilde uzaklaştırılmaması hücre performansında kademeli olarak azalma meydana gelmesine neden olmaktadır (An ve Jung 2017, Yang vd. 2015). Ayrıca yakıt hücresinin anot tarafında yakıt olarak kullanılan borhidrürün %100 verimle reaksiyona girememesinden dolayı borhidrür hidrolize uğrayarak ( $\text{NaBH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow$

$\text{NaBO}_2 + 4\text{H}_2$ ) hidrojen oluşturmaktadır. Yakıt hücresi içerisinde hidrojen birikimi hücre verimini azaltmakla kalmaz, yakıt pili için göz ardı edilemeyecek güvenlik problemleri oluşturmaktadır (An vd Jung 2017, Cao vd. 2010, Li vd. 2003, Liu, Li, ve Suda 2004). DBHYP'lerinin verimli, kararlı ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için anot difüzyon tabakası tasarımı büyük önem teşkil etmektedir. Bu sebeple tez kapsamında DBHYP için anot difüzyon tabakası üzerine çalışılmıştır.

Malzeme bilimindeki gelişmeler kuşkusuz birçok endüstrinin gelişmesine neden olduğu gibi yakıt pili sistemlerinin de gelişmesine katkıda bulunmuştur. Metal köpüklerin 1900 yılların ilk yarına dayanan yen bir malzeme türü olmasına rağmen, günümüzde enerji, kimya, yapı, medikal sanayi olmak üzere birçok endüstride vaz geçilemez bir malzeme türü haline gelmiştir. Metal köpükler metalden gelen yüksek elektriksel ve termal iletkenlikleri, gözenekli yapının sağladığı yüksek geçirgenlik, dar akış kanalları, geniş özgül yüzey alan, kılcal ve difüzyon kuvvetleri sayesinde yakıt pilleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında mükemmel performans sağlayan bir malzemedir (Arbak vd. 2017, Banhart 2001, Lefebvre, Banhart, ve Dunand 2008, Shirazy, Blais, ve Fréchet 2012, Xu, Mao, ve Hu 2018). Metal köpükler yakıt pillerinde akış dağıtıcı plaka, elektrot mimarisi ve yakıt pilinin ısı yönetimini sağlamak için kullanılmaktadır. Özellikle akış dağıtıcı ve elektrot olarak metal köpük kullanılması hücre performansında, hücre ağırlık ve hacminde önemli artılar sağlamaktadır (Baroutaji vd. 2017, Ferreira-Aparicio, Conde, ve Chaparro 2018, Ong vd. 2017, Tan vd. 2018, Tseng vd. 2012, Xu vd. 2018, Yuan vd. 2012).

Son yirmi yılda yakıt pili sistemlerinde metal köpük akış dağıtıcı ve elektrot mimarisi kullanılmasına artan bir ilgi görülmüştür. Metal köpükler yüksek özgül yüzey alanları ve üç boyutlu yapıları elektrokimyasal ve katalitik uygulamalarda dikkat çeken bir performans arışı meydana gelmesinde neden olmaktadır. Difüzyon tabakası ve akış alanı görevi gören metal köpüklerin katalizör malzemesi ile kaplanması ile üretilen metal köpük matrisli elektrotlar yakıt hücresi performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Metal köpüğün yüksek özgül yüzey alanı katalizör kaplanan aktif yüzey alanı artırarak reaksiyon oranını arttırdığından ve yüksek geçirgenliği, kılcal, difüzyon kuvvetleri nedeniyle ile kütle taşınmasını kolaylaştırdığından

hücre performansını arttırmaktadır (Alsabet ve Jerkiewicz 2012, Gao vd. 2018, Oh vd. 2015, Oh ve Kwon 2012, Yuan vd. 2012).

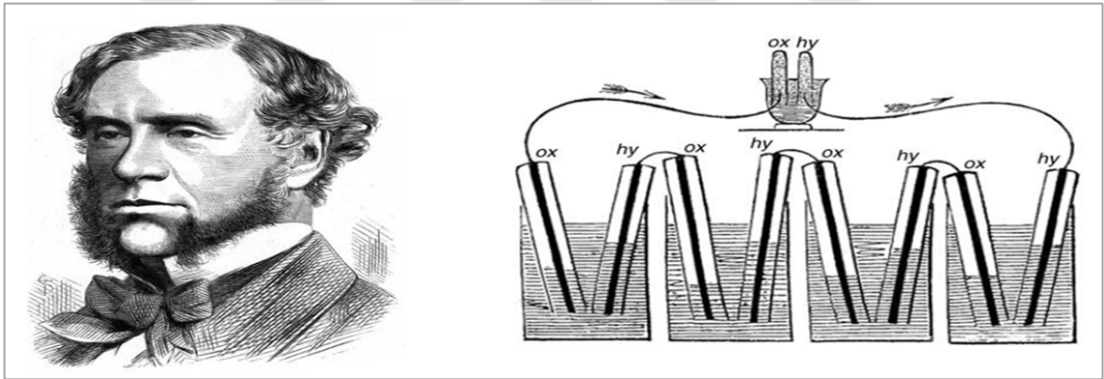
Nikel köpük malzemenin yakıt pillerinde akış dağıtıcı ve elektrot olarak yaygın bir şekilde tercih edilginini yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bu tez kapsamında nikel köpüğün yüzeyine, katalitik özelliklere ve korozyon dayanımına sahip Pd kaplanmıştır. Kaplama yöntemi olarak yüksek dayanıklılık ve kalitede kaplama ele edilebilen elektrolitik kaplama metodu kullanılmıştır.



## 2. YAKIT PİLLERİ

### 2.1. Yakıt Pilinin Gelişimi

Yakıt pilinin temelleri 1790'lı yıllarda Galvani ve Volta'nın elektrokimyası keşfetmesi ile atılmıştır. İngiliz avukat, yargıç ve kimyacı William Robert Grove, suyu hidroliz yolu ile hidrojen ve oksijen atomlarına ayırmasından yola çıkarak, ters tepkime ile elektrik elde edilebileceğinden yola çıkarak aşağıdaki Şekil 2.1 de gösterilen deney düzeneği ile gerçekleştirdiği deneylerle elektrik elde etmiştir. Sülfirik asit çözeltisi içerisinde yerleştirilmiş hidrojen ve oksijen depoları bulunan platin elektrotlar arasına bağlantı oluşturulduğunda devreden elektrik geçtiğini görmüştür. Grove'nin 1839 yılında 'Gaz Voltaik Batarya' olarak felsefe dergisinde bilim dünyasına tanıttığı bu buluşu ilk yakıt pili olarak kabul edilmektedir.

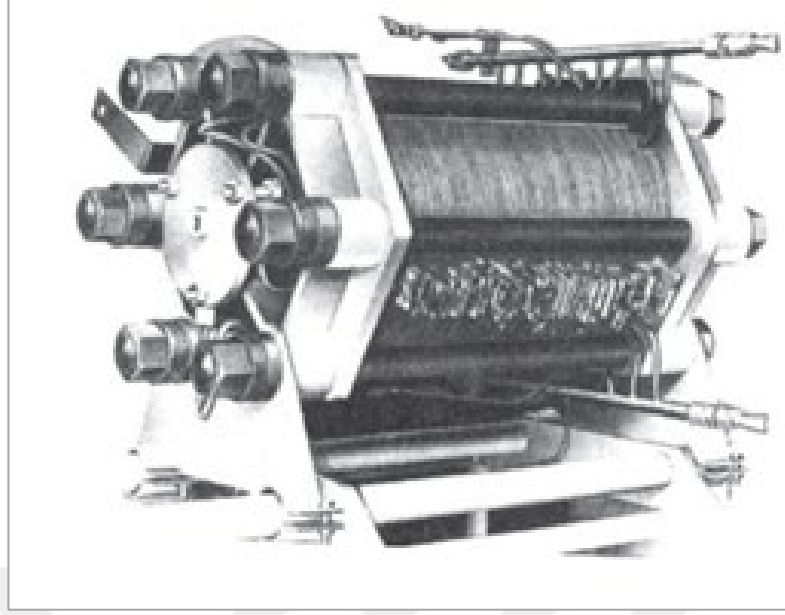


Şekil 2.1. Grove (fuel cell projects for the evil genius)ve Grove'un gaz bataryası (1839) (J. Harper, 2008).

Günümüzde geliştirilen yakıt pilinin ilk prototipi 1889 yılında yeni gaz aküsü adı ile Mond ve Langer tarafından bilim dünyasına tanıtılmıştır. 1900'lü yılların ilk yarısında kömür ve kömür gazlarının kimyasal oksidasyonu üzerine birçok araştırma gerçekleştiren Emir Baur 1937 yılında ilk katı oksit elektrolitli yakıt hücresini üretmiştir.

1959 yılında aşırı korozif etkilere sahip elektrolit yerine alkali elektrolitin kullanılması üzerine çalışmalar yürüten Bacon ilk başarı ile çalışan alkali hidrojen-oksijen yakıt hücresini üretmiştir.





Şekil 2.2. Bacon'nun geliştirdiği alkali hidrojen- oksijen yakıt pili (J. Harper, 2008).

Yakıt pili ile çalışan ilk araç 1959 yılında Harry Karl İhrig üretmiştir. Harry Karl'ın 15 kW güç çıkışı veren 1008 hücreli yakıt pilli traktörü yakıt pilli makinelerin başlangıcı olmuştur.

1960'lı yıllarda Amerikan uray uygulamalarında yakıt pili kullanımına yönelik bir trend hakimdi. Bu doğrultuda Gemini V uzay gemisinde (polimer elektrolit membranlı yakıt pili) ve Apollo uzay gemisinde (alkali yakıt pili) yakıt pili kullanılmıştır.

1960'lı yıllarda hücre veriminin ve ömrünün artmasını sağlayan polimer iyon değişim membranı Nafionun geliştirilmesi yakıt pili üzerine çalışmaların artmasına neden olmuş ve yakıt hücrelerinin geliştirilmesinin önü açılmıştır (Ausilio Bauen, Eric Chen, David Hart, Martina Hinsberger, Martin Hongarth, Richard Stone, vd., Bagotsky, vd., J. Harper, 2008).

## **2.2. Yakıt Pili Bileşenleri**

### **2.2.1. Gaz difüzyon tabakası**

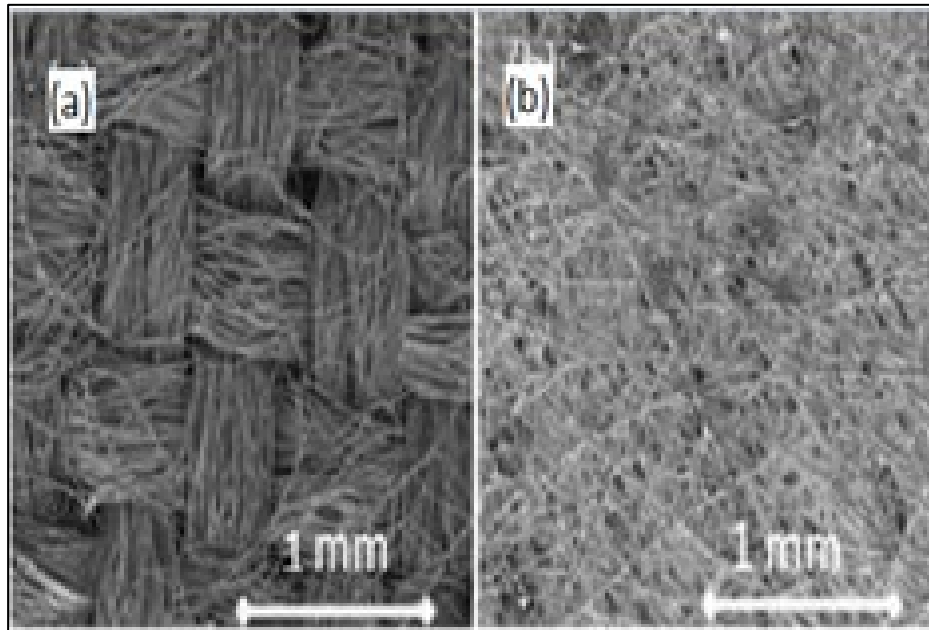
Hücre içerisinde anot ve katot olmak üzere iki adet bulunan GDT hücre içerisinde doğrudan elektrokimyasal reaksiyona girmemekle birlikte, reaktiflerin akış dağıtıcı

plakadan katalizör aktif bölgesine taşınmasından ve reaksiyon ürünlerinin katalizör aktif bölgesinden akış dağıtıcı plakaya taşınmasından sorumlu hücre elemanıdır (Colpan, Nalbant ve Ercelik, 2018, Morgan ve Datta, 2014, Omrani ve Shabani, 2017).

GDT aranılan özellikler;

1. Katalizör bölgesine reaktif transferini kesintisiz bir şekilde sağlamaya yetecek geçirgenliğe sahip olmalı.
2. Katalizör bölgesindeki reaksiyon ürünlerinin hücre içerisinden etkin bir şekilde uzaklaştıracak yapıya sahip olmalı ve katalizör bölgesinde tıkanıklıklar oluşmasına sebebiyet vermemeli.
3. Elektriksel iletkenliği yüksek bir malzemeden imal edilmeli ki hücre içerisindeki kayıplar sebebiyle performans düşüşü düşük olmalı.
4. Akış dağıtıcı yapının elektrolite zarar vermeni sağlamak için akış dağıtıcı ile elektrolit arasında için iyi bir mekanik destek sağlamalıdır (Atiyeh vd., 2007, Cindrella vd., 2009, Fadzillah, Rosli, Talib, Kamarudin ve Daud, 2017, Kandlikar, See, Koz, Gopalan ve Banerjee, 2014).

Yukarıda belirtilen özellikleri karşılaması sebebiyle karbon kumaş ve karbon kâğıt yaygın bir şekilde tercih edilen GDT malzemeleridir.

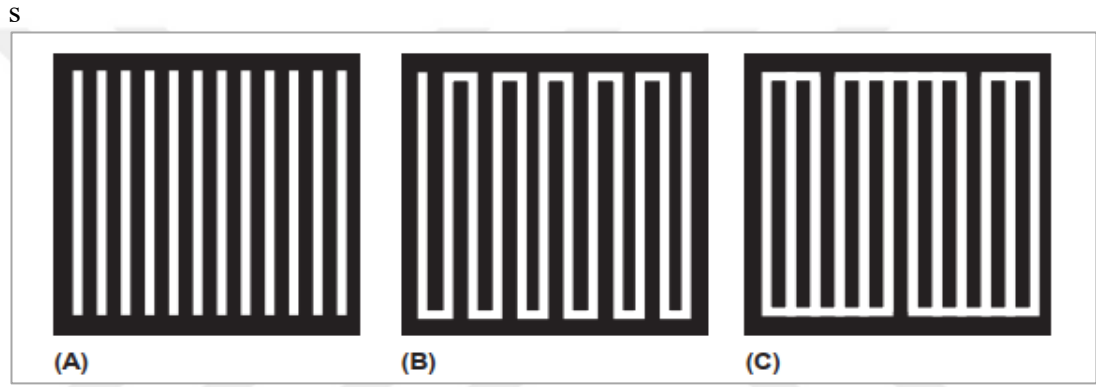


Şekil 2.3. GDL malzemeleri a) karbon kumaş b) karbon kâğıt (Gauthier ve Benziger, 2014)

### 2.2.2. Akış dağıtıcı plaka

Hücre içerisindeki akışı yönlendiren, hücre yığını içerisindeki hücreleri birbirinden fiziksel olarak birbirinden ayırırken elektriksel olarak birbirine bağlayan, hücre yığına mekanik destek oluşturan hücre elemanıdır (Arisetty, Prasad ve Advani, 2007, Hermann, Chaudhuri ve Spagnol, 2005).

Akış kanalı açılmış grafit malzeme yaygın bir şekilde tercih edilen akış dağıtıcı plaka malzemesidir. Akış dağıtıcı plakaya akışın gerçekleşeceği kanallar paralel, serpantin, interdijit ve fraksiyonel olmak üzere değişik şekillerde açılabilir.



Şekil 2.4. Akış dağıtıcı plaka kanal tasarımları a) paralel b) serpantin c) paralel serpantin (Colpan vd., 2018)

### 2.2.3. Elektrolit

Yakıt hücresinin anot ve katot bölgelerini fiziksel olarak birbirinden ayıran, reaktiflerin karışmasını önleyen, iyon iletkenliğine sahip hücre elemanıdır (Gao, Blunier ve Miraoui, 2013, Gao, Kabalo, Rylko, Blunier ve Miraoui, 2013).

### 2.3. Yakıt Pili Çeşitleri

Günümüz teknolojisinde birçok çeşit yakıt pili türü mevcuttur. Yakıt pili türleri üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

1. Yakıt ve oksidan türüne bağlı olarak: yakıt olarak hidrojen, metanol, etanol, glikol, glikoz, etilenglikol, borhidrür ve hidrazin kullanılmaktadır. Oksidan olarak hava, oksijen ve hidrojen peroksit kullanılmaktadır.

2. Elektrolit türüne bağlı olarak: Asit, baz ve tuzların sulu çözeltilerinden oluşan iyonik iletkenliğe sahip sıvı elektrolitler ve iyonik iletkenliğe sahip katı elektrolitler kullanılmaktadır.

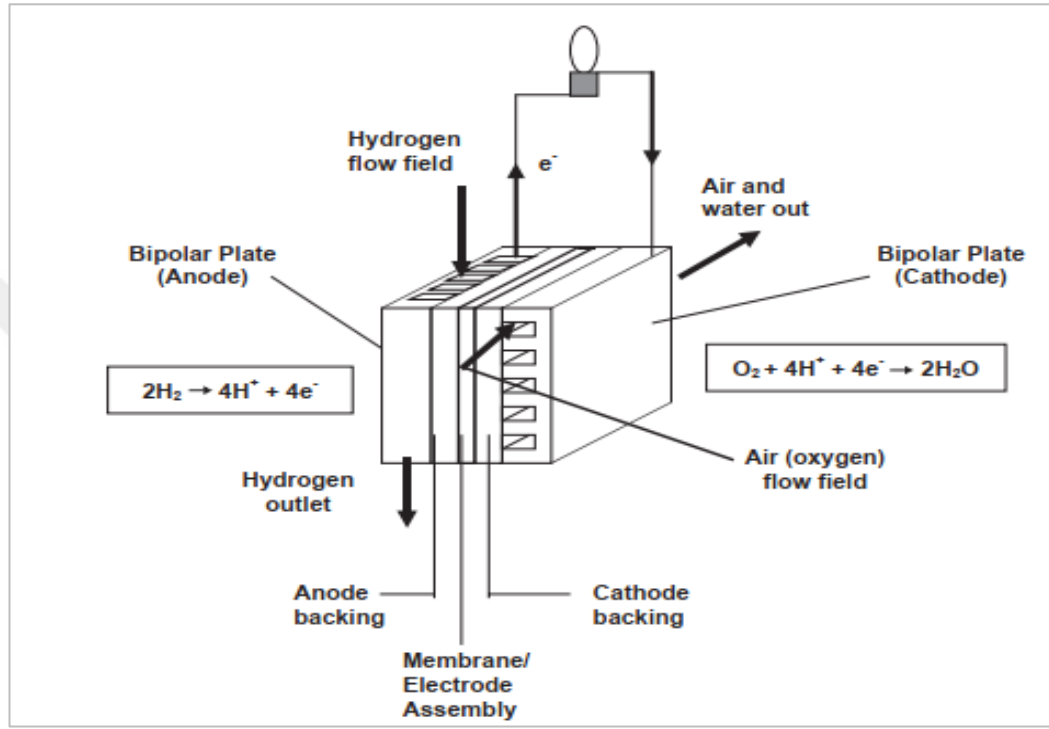
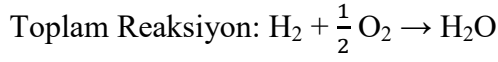
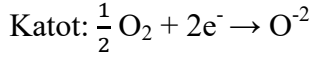
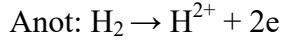
3. Çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak: 50-250 °C arası sıcaklıklarda çalışan düşük çalışma sıcaklıklı, 500 °C üzeri çalışma sıcaklıklarında çalışan yüksek çalışma sıcaklıklı yakıt hücreleri olarak sınıflandırılmaktadır (Kaya ve Öztürk, 2012).

Tablo 2.1. Yakıt pili çeşitleri tablo özeti (Gao, Blunier, vd., 2013)

Types of fuel cells	Acronym	Electrolyte	Operating temperature	Applications
Proton exchange membrane fuel cell	PEFC/ PEMFC	Solid polymer membrane	80°C	Transport, stationary, portable
Alkaline fuel cell	AFC	Potassium hydroxide	60–250°C	Transport, stationary
Phosphoric acid fuel cell	PAFC	Phosphoric acid	200°C	Stationary (cogeneration)
Molten carbonate fuel cell	MCFC	Alkali metal carbonates	600–800°C	Stationary (cogeneration)
Solid oxide fuel cell	SOFC	Ceramic	800–1000°C	Stationary (cogeneration), transport
	IT-SOFC		550°C	
Direct methanol fuel cell	DMFC	Polymer membrane	80°C	Portable, stationary, transport

### 2.3.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMYP)

Adının kullanılan iyon iletiminden sorumlu katı polimer elektrolitten alan düşük çalışma sıcaklıklarında çalışan yakıt pilidir. Hücre güç çıkışının hızla değişiklik ve yüksek güç çıkışı sağlaması nedeni ile otomobil uygulamalarında gelecekte içten yanmalı motorların yerini alacağı düşünülmektedir. Taşınabilir ve sabit uygulamalara uygun olan bu yakıt pili türünde %40 civarı hücre verimi elde edilmektedir (Kaya ve Öztürk, 2012). PEM yakıt pilide gerçekleşen hücre reaksiyonu aşağıda verilmiştir;

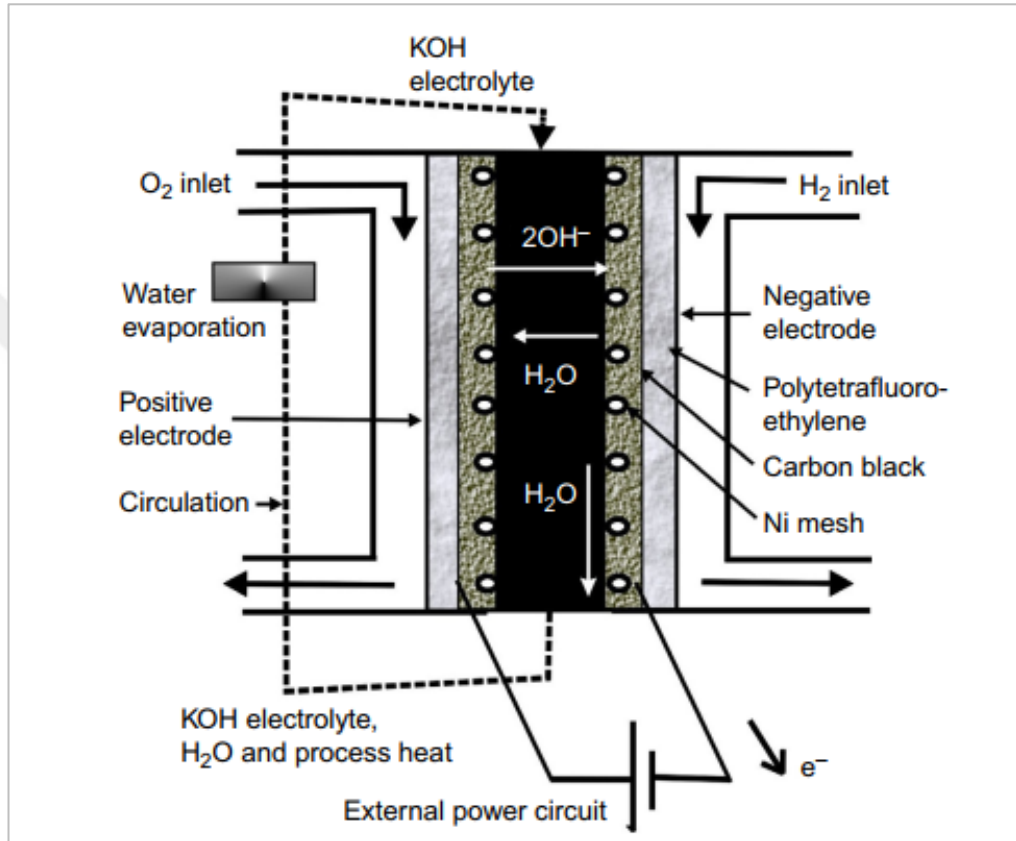
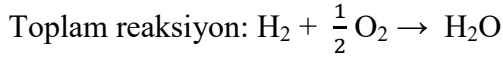
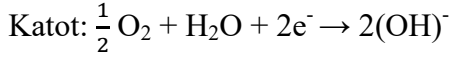


Şekil 2.5. PEM yakıt pili çalışma şeması (Hermann vd, 2005)

### 2.3.2. Alkali yakıt pili (AYP)

Elektrolit olarak alkali iyonik iletkenliğe sahip KOH kullanılmaktadır. Alkali ortamda reaksiyon kinetiği asidik ortama göre daha yüksek olduğundan dolayı reaksiyon kinetiği asidik elektrolite göre daha yüksektir ve değerli olmayan katalizörlerin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Katalizör maliyetinin düşük olması nedeniyle diğer yakıt hücrelerine göre daha kolay imal edilebilme avantajına sahiptir. En önemli dezavantajları ise sıvı elektrolitin sızdırma problemi ve elektrolitin  $CO_2$  toleransının olmamasıdır. Düşük çalışma sıcaklıklarında çalışan yakıt hücresi olan alkali yakıt hücresinde %60'larda verimlik değerlerine sahiptir (Coralli vd, 2019; Sørensen, 2008).

AYP yakıt hücresi temel kimyasal reaksiyon;

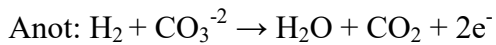


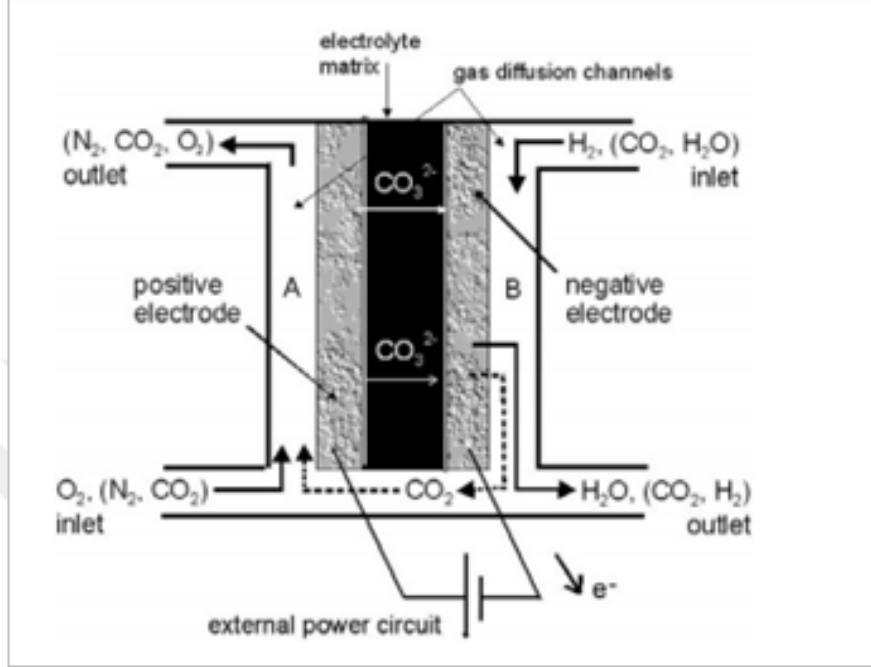
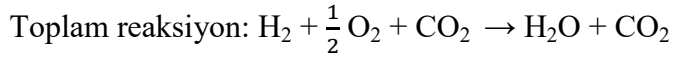
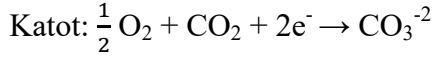
Şekil 2.6. AYP çalışma şeması (Sørensen, 2008)

### 2.3.3. Erimiş karbonat yakıt pili (EKYP)

Adını iyonik iletkenliğe sahip alkali metal karbonatların erimiş tuzlarından almaktadır. Yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışan yakıt pili türlerindedir. Sabit uygulamalara yönelik olan bu yakıt pili türü elektrik santrallerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. bu yakıt pili türünün en önemli dezavantajı yüksek çalışma sıcaklıkları dolayısıyla hücre kullanım ömürlerinin kısa olmasıdır(Kaya & Öztürk, 2012; Sørensen, 2008).

Şekilde çalışma mekanizması verilen yakıt pilin hücre kimyasal reaksiyonu;

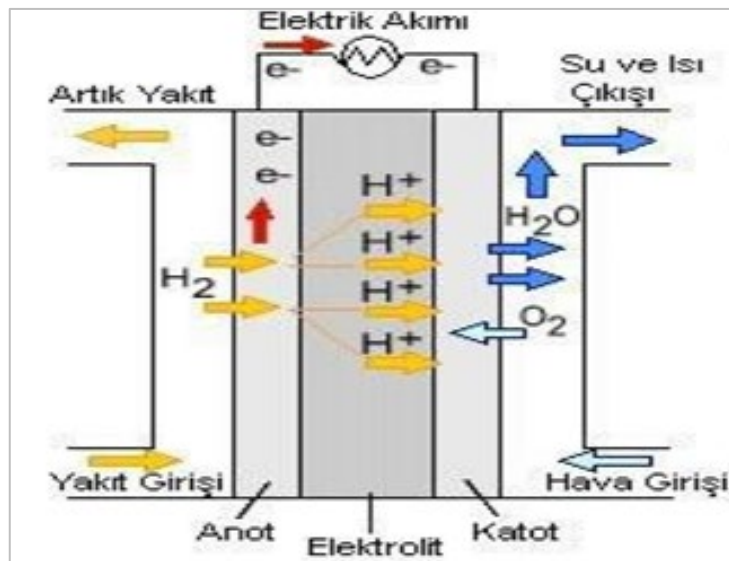




Şekil 2.7. EKYP çalışma şeması (Sørensen, 2008)

### 2.3.4. Formik asit yakıt pili (FAYP)

Adını elektrolit olarak kullanılan formik asitten alan bu yakıt pili türünde yakıt olarak doğal gaz, LPG ve kömür gazları kullanılmaktadır. FAYP yeni nesil yakıt pillerinin ilk uygulama örneğidir. Sabit uygulamalara yönelik yakıt pili türüdür (Sørensen, 2008).



Şekil 2.8. FAYP çalışma şeması (Aydın, 2007)

FAYP yakıt hücresi temel kimyasal reaksiyon

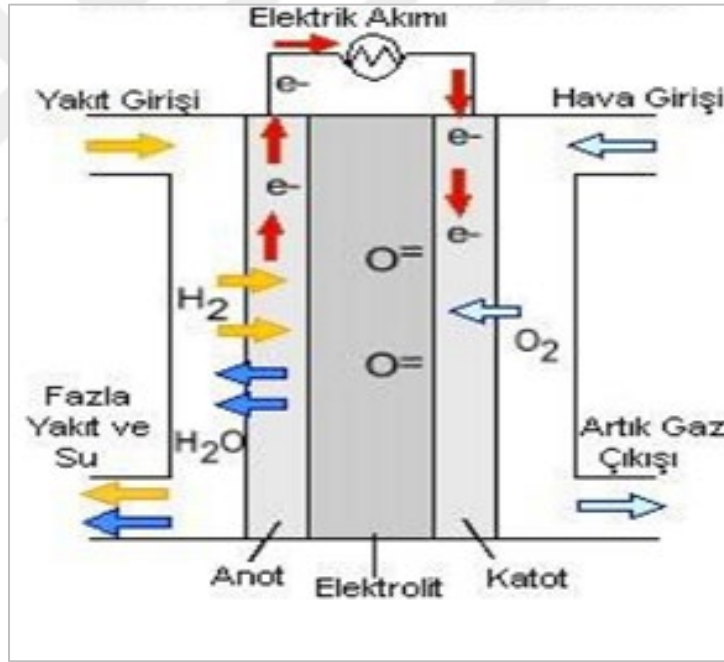
Anot reaksiyonu:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Katot reaksiyonu:  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Toplam kimyasal reaksiyon:  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

### 2.3.5. Katı oksit yakıt pili (KOYP)

Elektrolit olarak alkali erimiş metal karışımları kullanılmaktadır. Yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışan yakıt pili türüdür. Sabit uygulamalara yöneliktir. Yakıt olarak Hidrojen, karbon monoksit, hidrokarbonlar ve bio yakıtlar (kömür ve doğal gaz) kullanılmaktadır.



Şekil 2.9. KOYP çalışma şeması (Aydın, 2007)

KOYP' lerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

Anot:  $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$

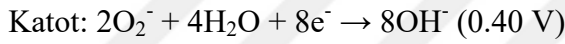
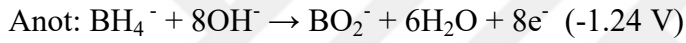
Katot:  $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

Toplam reaksiyon:  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$



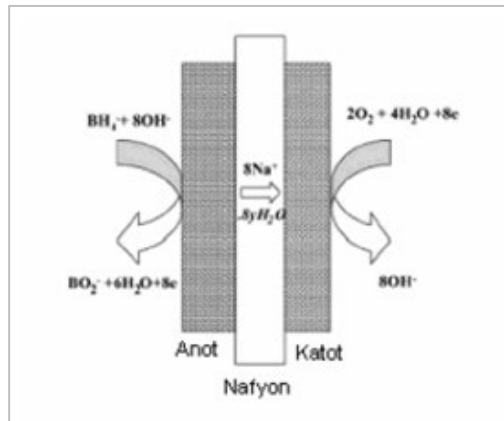
### 3. DOĞRUDAN BORHİDRÜR YAKIT PİLİ

DMYP, AYP ve PEM yakıt pili ile çalışma prensibi olarak benzerlik taşıyan DBHYP'nin bu yakıt pillerinden temel farkı sıvı fazdaki borhidrür çözeltisinden enerji üretmesidir. DBHYP de yakıt olarak NaOH ve iyonize su ile seyreltilmiş borhidrür kullanılmaktadır. Yakıt olarak hidrojen kullanılan yakıt pillerine göre sıvı borhidrür çözeltisinin kullanılması birçok avantaj sağlamaktadır. %10,6 gibi yüksek hidrojen kapasitesine sahip borhidrür çözeltisinin yakıt olarak kullanılması ile hidrojenin yanıcı ve patlayıcı özelliğinden dolayı depola problemlerinin önüne geçilmektedir. DBHYP ne yakıt beslenmesi ile aşağıdaki kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir (Cenk Çelik, 2006).



#### 3.1. Katyon Değişim Membranlı Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili (KDM DBHYP)

Elektrolit olarak kullanılan katyon değişim membranlı elektrolit ile anot kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan  $\text{Na}^+$  iyonlarının anottan katota transfer edilmektedir.

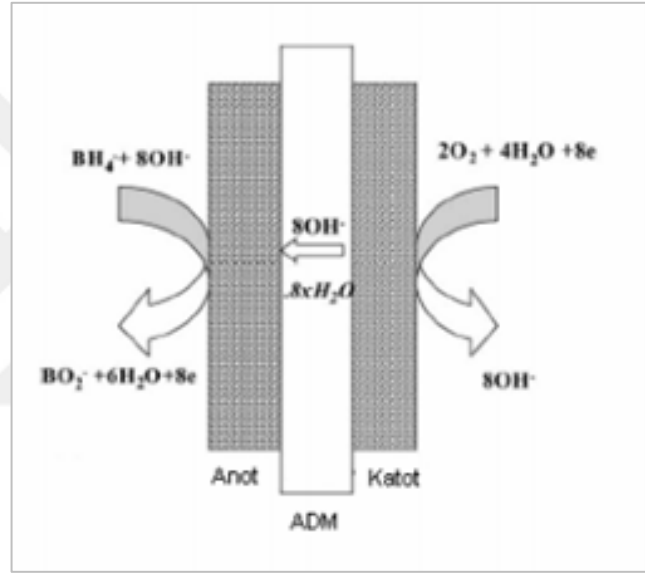


Şekil 3.1. KDM DBHYP elektron ve kütle transfer prosesi (Çelik, 2006)

KDM DBHYP de  $\text{BH}_4^-$  iyonlarının geçiş oranı ADM'li DBHYP ne nazaran daha dūşūktür dolayısıyla, KDM DBHYP, ADM DBHYP ne nazaran daha verimlidir (elik, 2006).

### 3.2. Anyon Değişim Membranlı Doğrudan Borhidrür Yakıt Pili (ADM DBHYP)

Elektrolit olarak kullanılan anyon değişim membranlı elektrolit ile katot kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan  $\text{OH}^-$  iyonlarının katottan anotta transfer edilmektedir (elik, 2006).



Şekil 3.2. ADM DBHYP elektron ve kütle transfer prosesi (elik, 2006)

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE BULGULAR

2x2 cm<sup>2</sup>'lik Nikel köpük katalizör kaplanarak gaz difüzyon elektroliti oluşturulmuştur. Kaplama işlemi için DC güç kaynağı, bağlantı elemanları, manyetik karıştırıcılı ocak gibi yardımcı elemanlar kullanılmıştır (Şekil 4.1.). Bunlara ek kaplama aşamaları sonrasında Ni köpüğün kurutulması için ısıtıcı ve kompresör kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Kaplama işlemi yardımcı elemanlar A) DC güç kaynağı, B) Manyetik karıştırıcılı ocak, C) Bağlantı elemanları.

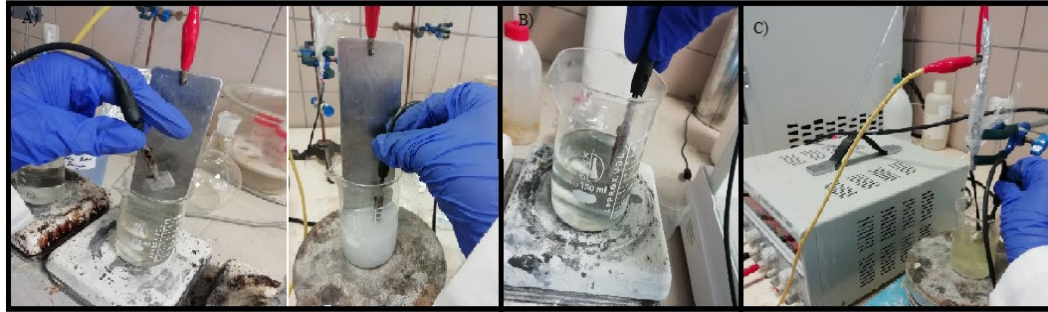
Kaplama işlemi aşağıda verilen işlem aşamaları ile gerçekleştirilmiştir;

- 1) 20 gr yağ giderme kimyasalı ve saf su ile hazırlanan 350 ml'lik yağ giderme çözeltisi ile köpük malzemenin yüzeyi yağlardan ve kimyasallarda arındırılır. DC güç kaynağının pozitif ucu Paslanmaz çelik anoda, negatif ucu köpük malzemeye bağlanır ve güç kaynağından 20 saniye 4 V de güç verilerek yağ giderme işlemi gerçekleştirilmektedir.
- 2) Yağ giderme işlemi sonrası metal köpük saf su ile yıkanarak yağ giderme banyosundan arındırılır. Ardından metal köpük parça ısıtıcı ve kompresör yardımı ile kurutulur bir sonraki işlem için hazır hale getirilir.
- 3) Ni köpük 11,2 gr Amonyum biflorür, 175 ml Nitrik asit ve saf su ile hazırlanan 350 ml dağlama banyosuna 20 saniye daldırarak yüzeyindeki oksit tabakasından arındırılır.

4) Dağlama işlemi sonrası metal köpük saf su ile yıkanarak dağlama banyosundan arındırılır. Ardından metal köpük parça ısıtıcı ve kompresör yardımı ile kurutulur bir sonraki işlem için hazır hale getirilir. Diğer bir aşamaya geçmeden köpük malzeme, kaplama öncesi ağırlığı belirlenmesi maksadı ile tartılır.

5) 50-55 °C arasındaki Pd çözeltisi içerisine daldırılan platin anot DC güç kaynağının pozitif ucuna, köpük malzeme ise güç kaynağının negatif ucuna bağlanır ve güç kaynağından 4 V de güç verilerek Ni köpük farklı kaplama sürelerinde kaplanır.

6) Kaplama işlemi sonrası metal köpük saf su ile yıkanarak kaplama banyosundan arındırılır. Ardından metal köpük parça ısıtıcı ve kompresör yardımı ile kurutulur ve kaplama sonrası ağırlık ölçümü alınır.

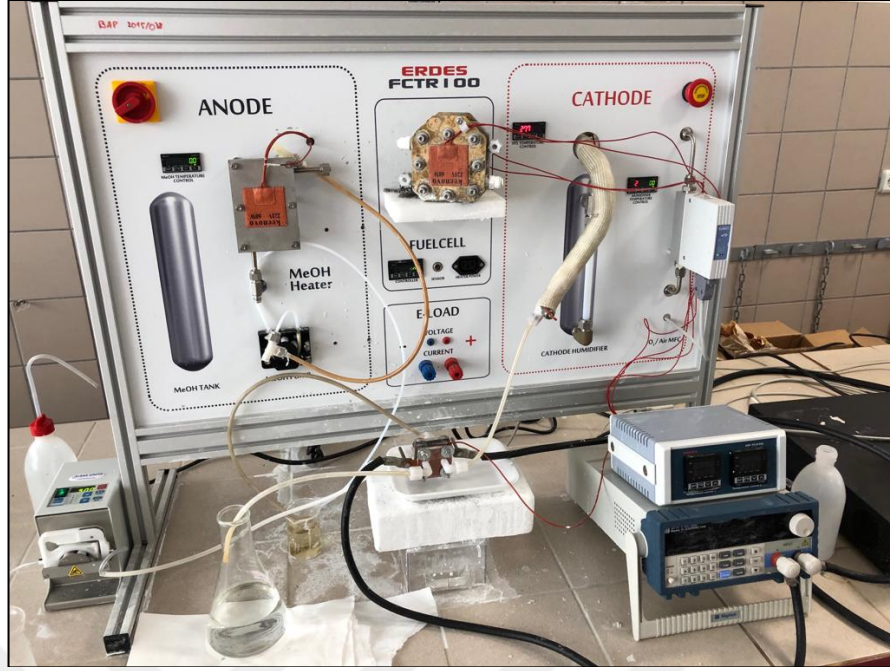


Şekil 4.2. A) Yağ giderme işlemi B) Dağlama işlemi C) Pd kaplama.

4 V sabit gerilim verilerek 1,2,5,10,16. dakikalarda yapılan her bir kaplama işlemi 0,4 A sabit akımda gerçekleşmiştir. Tablo 4.1’de kaplama işlemleri ile elde edilen Pd yükleme oranları verilmiştir.

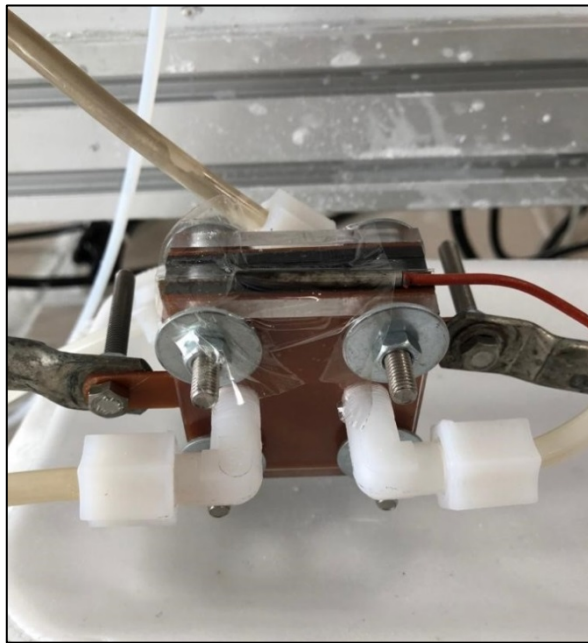
Tablo 4.1. Kaplama işlemi verileri

	Ağırlık (mg)		Tutma Süresi (d)	Gerilim (V)	Akım (A)	Kaplama Metali	Althk Metal	Sıcaklık (°C)
ilk	son	fark						
7,5950	7,6620	0,0670	1	4,0	0,40	Pd	Ni köpük	50-55
7,4140	7,5560	0,1420	2	4,0	0,40	Pd	Ni köpük	50-55
8,2950	8,4940	0,1990	5	4,0	0,40	Pd	Ni köpük	50-55
8,5440	9,1570	0,6130	10	4,0	0,40	Pd	Ni köpük	50-55
8,5430	9,3280	0,7850	16	4,0	0,40	Pd	Ni köpük	50-55



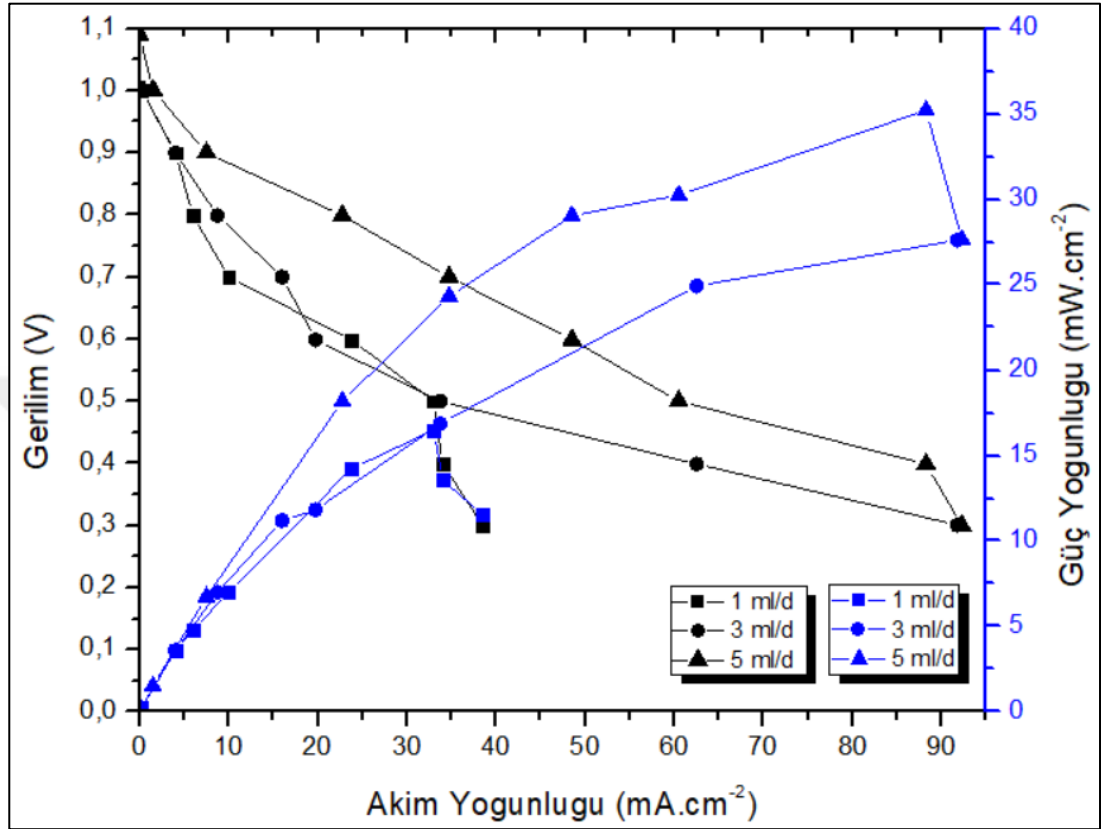
Şekil 4.3. Tek hücre test sistemi.

Tek hücre test çalışmalarında yakıt pilinin bileşen kısımlarında; anot kısmı için 2x2x0,5 cm'lik Pd kaplı nikel köpük, yakıt pilinin katot kısmı için 1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C katalizör kaplı difüzyon tabakası, yakıt pili yakıt çözeltisi (% ağı.) %4 NaBH<sub>4</sub> + %12 NaOH, membran olarak Nafyon 117 ve son olarak 0,3 L/ dak kuru Oksijen oksidant olarak beslenmiştir. Belli bir koşullandırma prosesi altında deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. 2x2 cm<sup>2</sup> 'lik yakıt pili test hücresi.

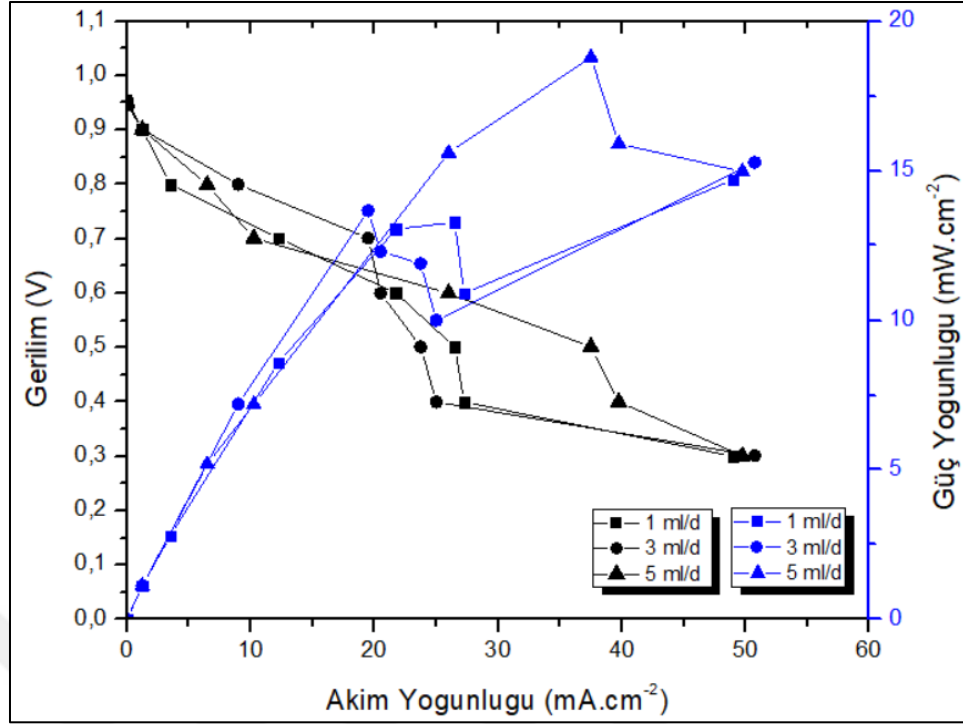
Tek hücre testleri için kullanılan yakıt hücresi Şekil 4.4'te görülmektedir. Bu hücrede ısıtıcı ped olmadığı için deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır. Yakıt debisi 1, 3, 5 ml/dak'larda alınmış olup her bir numune için bakılmıştır.



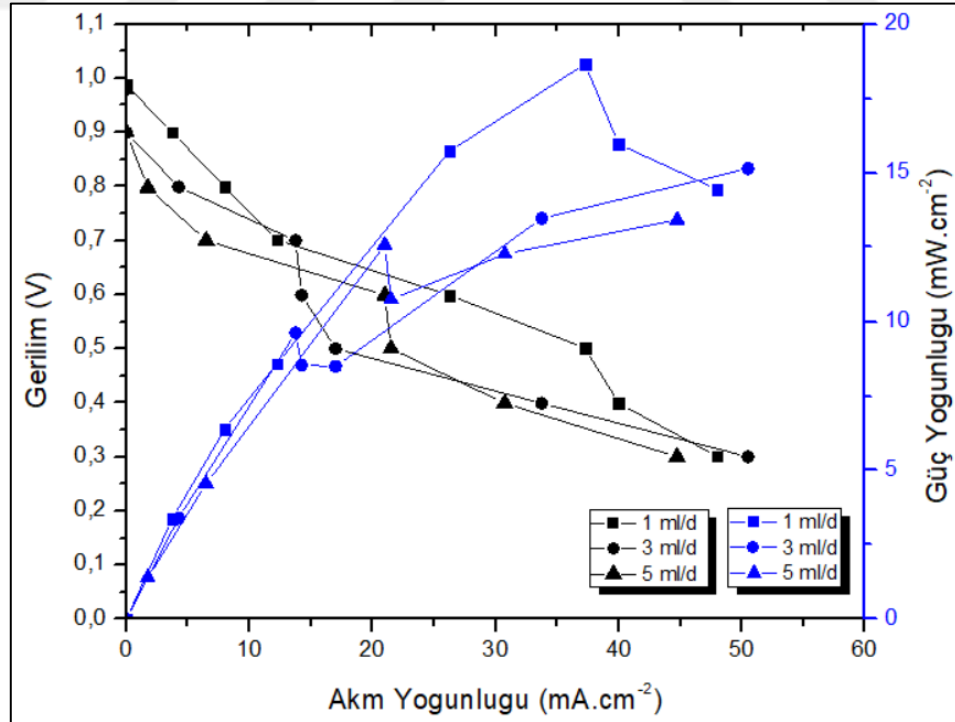
Şekil 4.5. 4V 1dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH<sub>4</sub>+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L /dak).

4 V 1 dakika kaplama süresi olan Pd/Ni köpük için 5 ml/dak en iyi güç ve akım yoğunluğunda elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.5'te verilen polarizasyon eğrilerine bakıldığında derişim arttıkça akım yoğunluğunun arttığı gözükmetedir. Bu durumun sebebi derişim arttıkça proton iletkenliğinin ve indirgenme reaksiyonlarının hızlanmasından dolayı, yakıt hücresinin veriminin artmasıdır. En yüksek güç yoğunluğu 35,21 mW/cm<sup>2</sup> olup 0,4 V'da elde edilmiştir.

4 V 2 dakika kaplama süresi için Şekil 4.6'ye bakıldığında 0,8 V'a kadar aktivasyon eğrisinin tüm derişim değerleri için aynı kaldığı görülmektedir. Bu da 0,8 V'a kadar aynı güç yoğunluğunda seyredeceklerini göstermektedir. Bu numune için en yüksek güç yoğunluğu 5 ml/dak derişimde olduğu gözlenmiştir.

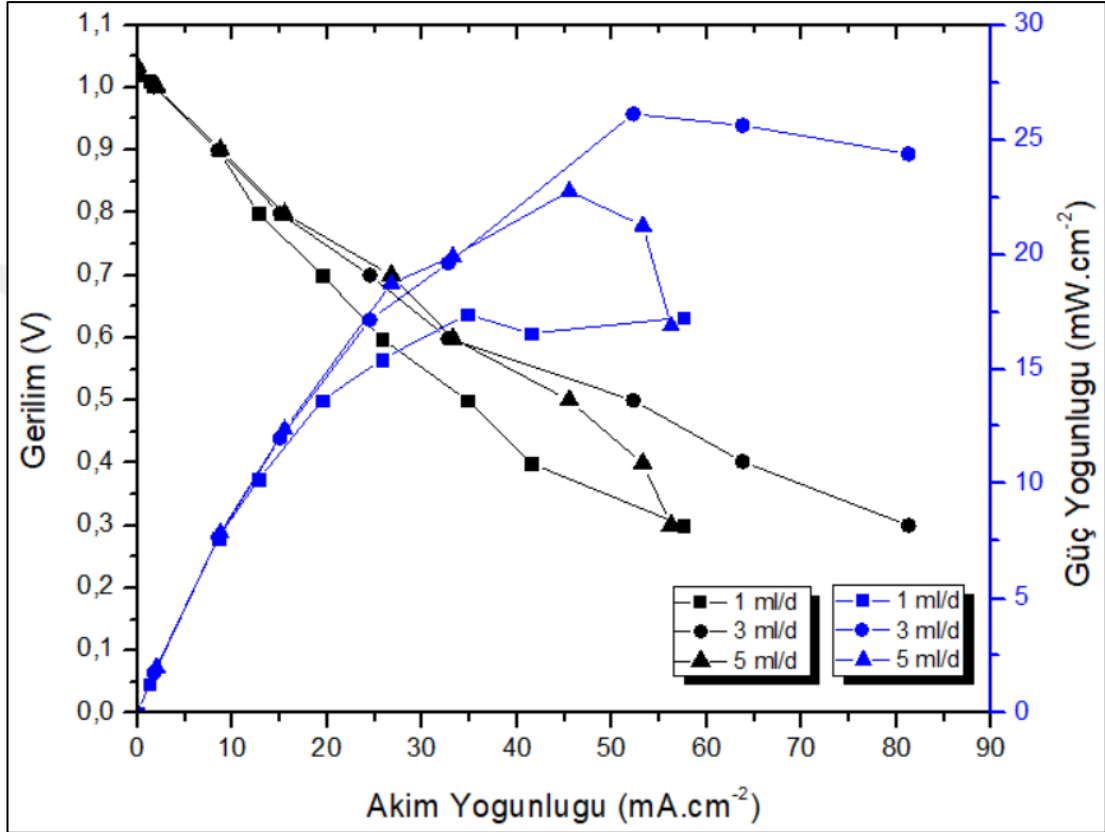


Şekil 4.6. 4V 2dak. kaplama için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg /cm<sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH<sub>4</sub>+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3L/dak).



Şekil 4.7. 4V 5dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH<sub>4</sub>+ %12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/ dak).

4 V 5 dakika kaplama süresinde kırılma görülmektedir (Şekil 4.7). Bu kırılmanın konsantrasyondan kaynaklı akım limitine ulaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafikte 1 ml/dak. yakıt besleme yapıldığında 4 V 5 dakika kaplama yapılmış numune DBHYP’inde kullanıldığı durumda en iyi performansta çalışabileceği görülmektedir.

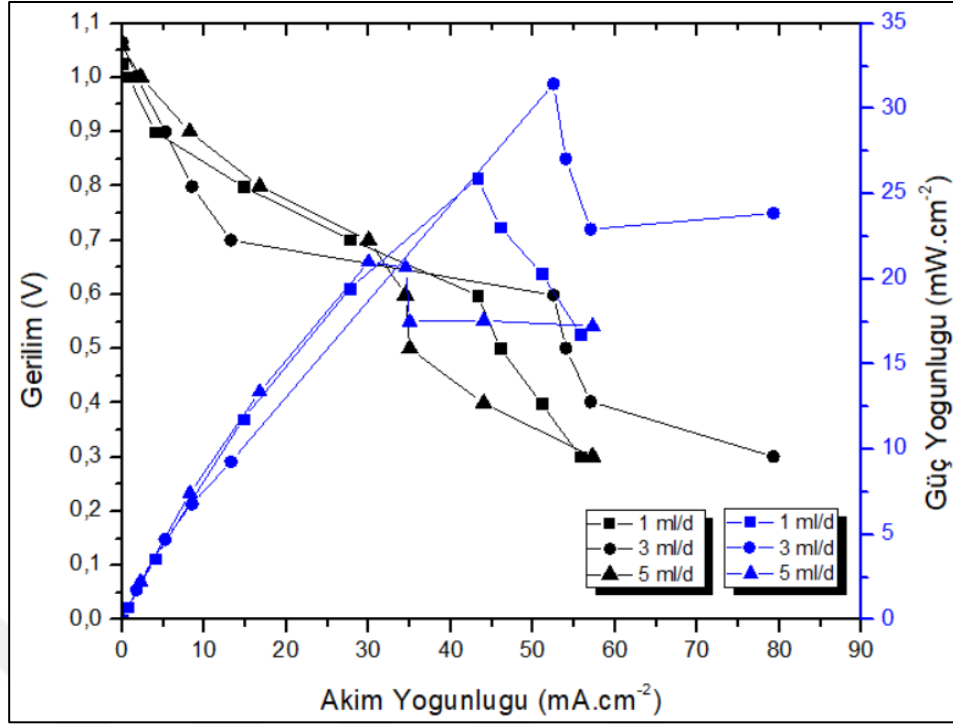


Şekil 4.8. 4V 10 dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH<sub>4</sub>+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/ dak).

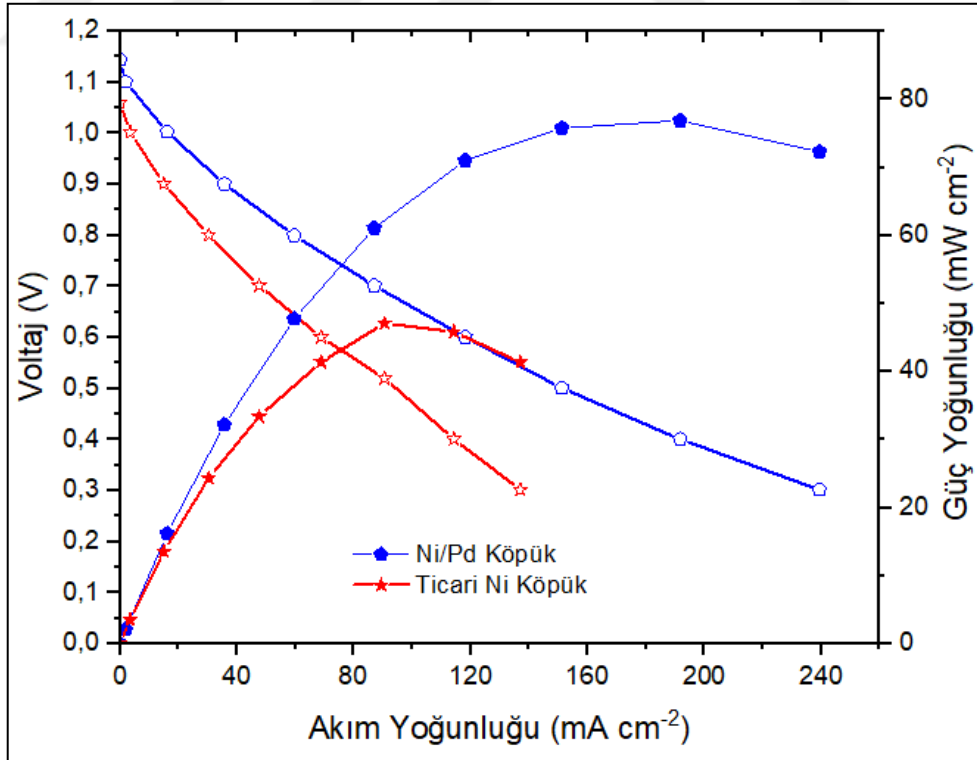
4 V 10 dakika kaplama süresi olan numunede en yüksek güç yoğunluğu 3 ml/dak’da elde edilmiştir. 5 ve 1 ml/dak’lık yakıt besleme değerlerinin bir birine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buradan 3 ml/dak yakıt besleme değerinin bu numune için optimum değer olduğu görülmektedir (Şekil 4.7).

4 V 16 dakikalık kaplama süresi uygulanan numunede eğrilerde kırılmalar olduğu görülmektedir. 3 ml/dak. yakıt besleme debisinde 0,6 V’dan sonra güç yoğunluğunda azalma olduğu görülmektedir (Şekil 4.9). 0,6 V’daki performansın 0,4 V’da büyük bir hızla düştüğü görülmektedir. Bunun durumun sebebi 0,4 V’a gelindiğinde limit akım yoğunluğuna ulaşılması olarak düşünülmektedir.



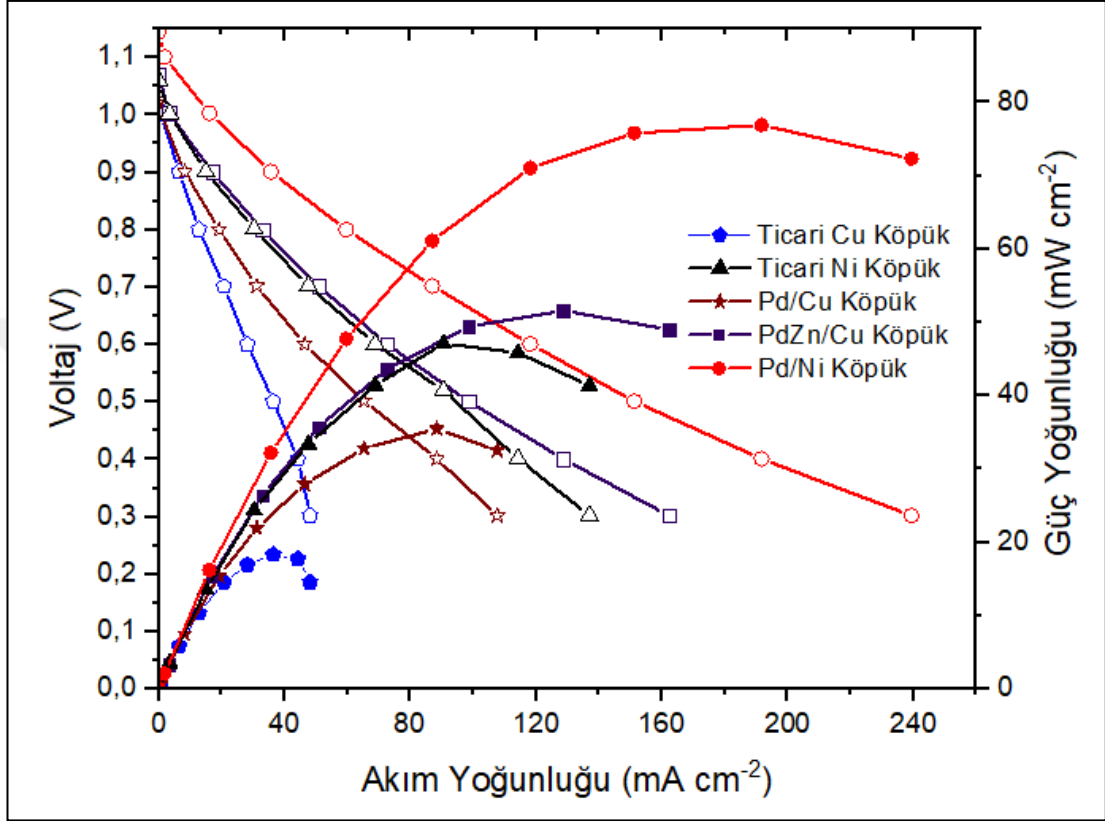


Şekil 4.9. 4V 16dak. kaplama süresi için yapılan tek hücre test sonucu (Katot:1 mg/ cm<sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH<sub>4</sub>+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/dak).



Şekil 4.10. 5x5 cm<sup>2</sup>'lik Nikel köpüklerin 3 ml/dak yakıt besleme değerinde karşılaştırılması (Katot:1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C, Yakıt Çözeltisi(%ağ.): %4 NaBH<sub>4</sub>+%12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/dak).

Şekil 4.10'da yakıt pili test hücresinde Pd kaplı ve kaplamasız ticari Nikel köpüklerin 3 ml/dak'daki polarizasyon ve güç eğrileri verilmiştir. Buna göre Nikel köpük üzerine yapılan Pd kaplamanın yakıt pili hücresinde verim artışı sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Köpüklerin performans karşılaştırma grafiği. Katot: 1 mg/cm<sup>2</sup> Pt/C, Sıcaklık: 80 °C, Yakıt Çözeltisi (% ağırlık): %2 NaBH<sub>4</sub>+ %12 NaOH, Membran: Nafyon 117, Oksidant: Kuru Oksijen: 0,3 L/dak).

Şekil 4.10'te de görüldüğü üzere farklı kaplamalar ve farklı köpüklerdeki polarizasyon ve güç eğrileri görülmektedir. En iyi sonucun Pd/Ni köpükte elde edildiği görülmüştür. Sırasıyla PdZn/Cu köpük, Ticari Ni köpük, Pd/Cu köpük ve Ticari Cu köpük izlemiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, literatürde PEMYP ve DBHYP'leri için yapılan difüzyon tabakaları göz önünde bulundurularak, metal köpük kullanımı ile ilgili çalışmalara katkı sağlamak için çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar gözlemlendiğinde Ni köpük kullanımının literatürde bu konudaki yapılan çalışmalarda boşluğun doldurulması adına bu çalışma yapılmıştır.

DBHYP için ilk olarak anot tarafı için nikel köpük seçilmiş olup, sıcaklık, banyo karıştırma devri ve pH sabit tutularak 4 V gerilim uygulanarak 1,2,5,10 ve 16 dakikalık sürelerle kaplama banyosunda tutulup Pd kaplamalar yapılmıştır. Her bir tutma süresi için akım değerleri not edilmiş, kaplama öncesi ve sonrası ağırlıklar ölçülerek çıkan farktan yapılan kaplama ağırlıkları bulunmuştur.

DBHYP tek hücre testleri ile kaplanan nikel köpüklerin performansa etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda yakıt pilinde en iyi performans 5 ml/dak. yakıt debisinde  $92,25 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu ve  $35,21 \text{ mW/cm}^2$  güç yoğunluğu değerleri ile 4 V 1 dakika kaplama süresinde elde edilmiştir. Kaplama yapılmamış ticari nikel köpük ve yalnızca Pd kaplanmış nikel köpüklerin polarizasyon ve güç eğrilerine bakıldığında Pd kaplanmış nikel köpüğün performansının yakıt pili içerisinde daha yüksek olduğu görülmüştür. Kaplama süresi için 1,2,5,10 ve 16 dakikalık süreler seçilmiştir. Buna istinaden en iyi yakıt pili performansını 4 V'da kaplanan 1 dakika kaplama süresinde 5 ml/dak yakıt beslemesi yapılan numune göstermiştir. Bunu 3 ml/dak yakıt besleme debisinde  $31,45 \text{ mW/cm}^2$  güç yoğunluğu ile 16 dakika kaplama süresi uygulanmış numune takip etmektedir.

Polarizasyon eğrilerine bakıldığında yakıt debisi arttıkça 1, 2 ve 5 dakika tutma sürelerinde akım yoğunluğunun arttığı gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi yakıt debisi arttıkça proton iletkenliğinin ve indirgenme reaksiyonlarının hızlanmasından dolayı, yakıt hücresinin veriminin artmasıdır. Diğerleriyle kıyaslandığında Pd kaplanmış nikel köpüğün yakıt pili tek hücre performansının kaplanmamış bakır köpüğe, Pd kaplı bakır köpüğe, kaplanmamış ticari nikel köpüğe ve kaplanmış Pd-Zn

bakır köpüğe göre daha yüksek olduğu görölmektedir. Bu durum Pd kaplı nikel köpüklerin tek hücre testlerine göre performansa olumlu etkisi olduğunu göstermiştir.



## KAYNAKLAR

Arisetty, S., Prasad, A. K., Advani, S. G., Metal Foams as Flow Field and Gas Diffusion Layer in Direct Methanol Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 2007 **165**(1), 49–57.

Atiyeh, H. K., Karan, K., Peppley, B., Phoenix, A., Halliop, E., Pharoah, J., Experimental Investigation of the Role of a Microporous Layer on the Water Transport and Performance of a PEM Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 2007 **170**(1), 111–121.

Hoogers G., Bauen A., Chen E., Hart D., Hinsberger M., Hongarth M., Stone R., *Fuel Cell Technology Handbook*, 1st ed.. CRC Press, USA, 2003.

Aydın, M., Pem Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2007, 185605.

Bagotsky V. S., *Fuel cells*, 2nd ed., Wiley, Moscow, 2012.

Çelik C., Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pilinde Proses Parametrelerinin Verim Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197911.

Cindrella L., Kannan A. M., Lin J. F., Saminathan K., Ho Y., Lin C. W., Wertz J., Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells-A Review, *Journal of Power Sources*, 2009, **194**(1), 146–160.

Colpan C.O., Nalbant Y., Ercelik M., Fundamentals of Fuel Cell Technologies, *Comprehensive Energy Systems*, 2018, **4**, 1107–1130.

Coralli A., Sarruf B. J. M., de Miranda P. E. V., Osmieri L., Specchia S., Minh N. Q., Fuel Cells, Editors: de Miranda P. E. V., *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*, 1st ed. Academic Press, Rio de Janeiro, 39-122, 2019.

Fadzillah D. M., Rosli M. I., Talib M. Z. M., Kamarudin S. K., Daud W. R. W., Review on Microstructure Modelling of a Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **77**(1), 1001–1009.

Gao F., Blunier B., Miraoui A., *Proton Exchange Membrane Fuel Cells Modeling*, 1st ed., John Wiley & Sons Inc., Surrey UK, 2013.

Gao F., Kabalo M., Rylko M. S., Blunier B., Miraoui A. Fuel Cell System, Editors: Chakraborty S., Simões M. G., Kramer W. E., *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems*, 1st ed., Springer, Golden, CO, 185-234, 2012.

Gauthier E., Benziger J. B., Gas Management and Multiphase Flow in Direct Alcohol Fuel Cells, *Electrochimica Acta*, 2014, **128**(1), 238–247.

Harper G. D. J, *Fuel cell projects for the evil genius*, 1st ed., McGraw-Hill Education TAB, New York, 2008.

Hermann A., Chaudhuri T., Spagnol P., Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, **30**(12), 1297–1302.

Kandlikar S. G., See E. J., Koz M., Gopalan P., Banerjee R., Two-Phase Flow in GDL and Reactant Channels of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(12), 6620–6636.

Kaya D., Öztürk H., *Yakıt Pili Teknolojileri*, Umuttepe Yayıncılık, 1. baskı, İstanbul, 2012.

Morgan J. M., Datta R., Understanding the Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. I. How its structural characteristics affect diffusion and performance, *Journal of Power Sources*, 2014, **251**, 269–278.

Omrani R., Shabani B., Gas Diffusion Layer Modifications and Treatments for Improving the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolysers: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**(47), 28515–28536.

Sørensen B., Fuel cells, Editors: Sørensen B., *Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage*, 1st ed., Academic Press, Massachusetts, 169-178, 2007.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aydın S., Çağlayan İ., **Saraç B.**, Sarac H.İ., Celik C., Sıvı Yakıt Hücreleri için Metalik Köpüğe Genel Bakış, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Kasım 2018.



## ÖZGEÇMİŞ

23.05.1989 yılında Kocaeli/İzmit'te doğdu ve halen bu şehirde yaşamaktadır. İlköğretimi Ulugazi İlköğretim Okulunda okudu. Lise eğitimini İzmit Lisesinde tamamlayarak mezun oldu. 2008 yılında eğitime başladığı Işık Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. Üniversiteyi bitirdikten sonra 2015-2016 tarihleri arasında Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisinde çalıştı. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek lisans programına başlayarak, 2019 tarihinde Makina Yüksek Mühendisi unvanını aldı. 2016-2018 yılları arasında dil eğitimi için gittiğim Amerika'da Los Angeles Southern States University 'de MBA programına dahil oldu. 2019 Mart ayından itibaren Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Etüt ve Projeler Daire Başkanlığında makine mühendisi olarak görev yapmaktadır.