

## Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresinin Dolaylı Sodyum Borhidrür ile Çalıştırılması

Arzu EKİNCİ<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Siirt Üniversitesi Sağlık Yüksekokulu, Siirt  
aekinci@siirt.edu.tr

Ömer ŞAHİN<sup>2</sup> 

<sup>2</sup>Siirt Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Siirt  
omersahin@siirt.edu.tr

Sabit HOROZ<sup>3</sup> 

<sup>3</sup>Siirt Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
Siirt  
sabithoroz@siirt.edu.tr

Geliş Tarihi/Received:

24.06.2019

Kabul Tarihi/Accepted:

30.11.2021

Yayın Tarihi/Published:

30.12.2021

### Öz

Proton değişim membranı (PEM) yakıt hücreleri, son zamanlarda geleneksel motorlar için ümit vaat eden bir malzeme olarak büyük bir ilgi görmüştür. PEM yakıt hücre performansının, çalışma sıcaklığı ve gaz akışlarının nemlendirilmesi gibi birçok parametreden etkilendiği bilinmektedir. Bu çalışmada, Pt/C destekli tek hücreli PEM yakıt hücresi üretimi ve uygulaması için bir deney tasarımı dizayn edildi. PEM yakıt pilinin performans testleri, yakıt pili hücre çalışma sıcaklığı ve katalizör miktarları parametrelerine bağlı olarak incelendi. Farklı yakıt hücresi sıcaklıklarında ve farklı katalizör miktarlarında polarizasyon eğrileri elde edildi. Elde edilen veriler sonucunda; Co-B katalizörü için ideal voltaja göre %88, güce göre %56 ve Ni-B katalizörü kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonucunda ise, ideal voltaja göre verim %83 ve güce göre verim ise %54 olarak hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler:** Akım, Gerilim, Hidrojen Enerjisi, Katalizör, PEM Yakıt Pili

**Abstract**

Proton exchange membrane (PEM) fuel cells have drew great notice of last years as a promising modification for traditional engines. The performance of PEM fuel cells is known to be affected by many parameters such as operating temperature and humidification of the gas streams. In the present study, an experimental design for the production and application of Pt / C supported single cell PEM fuel cell was designed. The performance tests of the PEM fuel cell were examined depending on the fuel cell operating temperature and catalyst amounts parameters. Polarization curves were obtained by using different amounts of catalysts and different fuel cell operating temperatures. As a result of the data obtained; As a result of the experiments carried out using the Ni-B catalyst for the Co-B catalyst, 88% relative to the ideal voltage, 56% based on the power and the efficiency based on the Ni-B catalyst, the efficiency was calculated as 83% and the yield based on the power was 54%. In addition, ideal voltage values were measured between 0.87 volts and 1.1 volts.

**Keywords:** Catalyst, Current, Hydrogen Energy, PEM Fuel Cell, Voltage

**1.GİRİŞ**

Yakıt hücreleri, bir kimyasal reaksiyonun enerjisinin, hidrojen yakıtını havadan gelen oksijenle birleştirerek doğrudan elektriğe dönüştürüldüğü elektrokimyasal cihazlardır. Su ve ısı, yakıt kaynağı olarak hidrojen gazı kullanıldığında ürünler tarafından verilir (Bauen vd., 2000; Xiaochen vd., 2005; Moises vd., 2009). Birçok yakıt hücresi türü arasında, polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresi, son yirmi yılda, hafifliği, kompaktlığı, yüksek gücü ve düşük maliyeti nedeniyle büyük ilgi görmüştür (Rongzhong vd., 2001; Moises vd., 2007). PEM yakıt hücreleri, otomotiv, dağıtılmış enerji üretimi ve taşınabilir elektronik uygulamalarında gelecekteki enerji üreten cihazlar için en umut verici adaylar olarak geniş çapta kabul görmüştür (Costamagana vd., 2001; Ceraolo vd., 2003; Bilodeau vd., 2006). Son yıllarda, yakıt hücreleri ve yakıt hücresi sistemlerin de araştırma ve gelişme hızlanmıştır. Ancak, bugünün yakıt hücresi teknolojisinin performansı, kararlılığı ve güvenilirliği, içten yanmalı motorların yerini alabilecek kadar yeterli değildir. Öte yandan, yakıt hücresi sistemlerinin maliyeti hala uygulanabilir ticari ürünler olamayacak kadar yüksektir. Performanslarını iyileştirmek ve maliyetlerini düşürmek için bir takım temel sorunların üstesinden gelinmelidir (Buxbaum vd., 2003; Rodatz vd., 2004). Bir PEM yakıt hücresi yığnında, hücreler elektriksel olarak seri bir şekilde bağlanır ve bireysel hücrelerin polarizasyon eğrileri, tüm yığının akımı ve bireysel hücrelerin gerilimleri ölçülerek elde edilir.

Sistem basıncı, sıcaklık, nemlendirme ve gaz stokiyometrisi gibi belirli bir dizi işletme parametresi için, yakıt hücresi voltajı esas olarak uygulanan akım tarafından belirlenir (Yan vd., 2006).

Elektrot yüzeyleri üzerindeki gaz dağılımını daha düzgün hale getirerek, iletkenliği kaybetmeden destek tabakasının daha fazla gözenekliliği veya verimli su tahliyesi için elektrot tabakasını oluşturmak için kullanılan malzemelerin hidrofobik ve hidrofilik özelliklerinin doğru bir

kombinasyonunu yaparak kütle taşıma voltajı kayıpları azaltılabilir. PEM yakıt hücrelerinin yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması, reaksiyon kinetiği, katalizör toleransı, ısı reddi ve su yönetimi açısından performansı arttırmada etkili bir yol olarak kabul edilir. Su yönetimi konusunda, yakıt hücresi yüksek sıcaklıklarda çalıştırıldığında bile pratik bir performans elde etmek için yüksek bağıl nem gereklidir (Srinivasan vd., 1991). Su yönetimi, PEM yakıt hücrelerinin temel kritik ve tasarım konularından birini temsil eder, çünkü bir PEM yakıt hücresindeki membran nemlendirici, o yakıt hücresinin performansını ve dayanıklılığını belirler. Eğer membran uygun şekilde nemlendirilmez ise, daha yüksek iyon direnci gösterir ve zor durumlarda bile geri dönüşü olmayan bir şekilde hasar görebilir.

PEM yakıt hücrelerinde kullanılan polimer membran malzemeleri, yüksek proton iletkenliğini korumak için nemlendirilmeli ve aynı zamanda taşmayı önlemek için fazla su uzaklaştırılmalıdır. Membran hidrasyonu, zarın içindeki su taşıma olaylarından etkilenir, bu da giriş gazlarının durumundan ve yakıt hücresinin çalışma parametrelerinden etkilenir. Bu nedenle, PEM yakıt hücrelerinin çalışması sırasında en uygun su dengesini sağlamak çok önemlidir (Srinivasan vd., 1991; Yılmaz vd., 2017; Yılmaz vd., 2019).

Son zamanlarda, çevreye zarar vermeyen bir enerji kaynağı ve iyi bilinen bir temiz enerji taşıyıcısı olarak, hidrojen tüm dünyada büyük ilgi görmüştür (Mattos vd., 2012). Hidrojen sadece kimyasal sentez için çok yönlü bir reaktif değil, aynı zamanda enerji üretimi için çevreye zararsız bir yakıttır. Genel olarak hidrojen üretim yöntemleri, doğal gazın buharla yenilenmesi, hidrokarbonların kısmi oksidasyonu, kömür gazlaştırması, doğrudan dönüşüm için güneş fotovoltaik gücü, rüzgar enerjisi ve hidroelektrik enerjisi olarak açıklanmaktadır. Bunlar arasında buhar reformu, daha az CO<sub>x</sub> emisyonu ve diğer yöntemlerden daha ucuz olması nedeniyle en önemli olanlardan biridir (Kothari vd., 2008). Öte yandan, ticari hidrojen üretimi olan doğal gazın buharla yeniden şekillendirilmesi CO ve CO<sub>2</sub> gazlarını serbest bırakır ve bunlar çok düşük konsantrasyonda bile PEM yakıt pilini kirletir (Patel vd., 2009).

Kimyasal hidritler (NaBH<sub>4</sub>, NaH, LiH, KBH<sub>4</sub>, NaAlH<sub>4</sub>, vb.) saf hidrojen üretimi için umut verici adaylardır ve oda sıcaklığında saklanırlar. Yakıt hücrelerinde kullanım için hidrojen, borhidrürlerden verimli ve ucuz bir şekilde üretilebilir. Sodyum borhidrür (NaBH<sub>4</sub>), yüksek hidrojen kapasitesi (ağırlıkça% 10,8), toksik ve yanıcı olmayan ve alkali ortamdaki kararlılığı gibi farklı özelliklerinden dolayı en avantajlı hidrür çeşitlerinden bir tanesidir (Amendola vd., 2000; Okur, 2012; Dinçer vd., 2013; Lang vd., 2017).

Bu çalışmada, Pt/C destekli tek hücreli PEM yakıt hücresi üretimi ve uygulaması için bir deney tasarımı dizayn edildi. 50 °C sabit nemlendirme sıcaklığında, sodyum borhidrür'den farklı miktarlarda katalizör varlığında üretilen hidrojen gazı ve farklı çalışma sıcaklıklarının tek hücreli PEM yakıt pili hücresinin üzerine etkisi incelendi. Farklı yakıt hücresi sıcaklıklarında ve farklı katalizör miktarlarında polarizasyon eğrileri elde edildi.

## 2.MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kullanılan Kimyasallar

Deneyler için, Nikel nitrat hegzahidrat ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), kobalt nitrat hegzahidrat ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), sodyum borhidrür ( $\text{NaBH}_4$ ), sodyum hidroksil ( $\text{NaOH}$ ), Pt/C (ticari, E-tek ), Nafion çözültisi, propandiol, etil alkol, izopropanol, karbon siyahı malzemeleri kullanıldı.

### 2.2. Pt/C Katalizör Mürekkebinin Hazırlanması

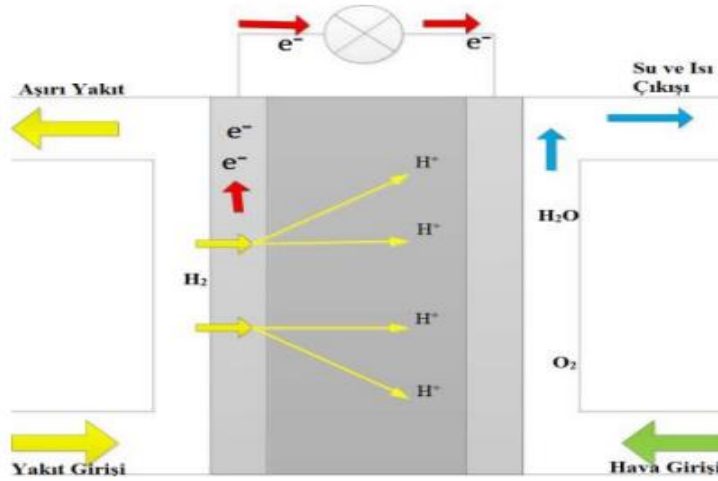
Kullanılan karbon destekli, yüksek yüzey alanına sahip Pt/C katalizörünün mürekkep haline getirilip, Membran Elektrot Atacı (MEA) yapısındaki elektrotların en etkin şekilde üretiminde kullanılmasıdır. Küçük bir behere yaklaşık 0.4 gr nafyon çözültisi ilave edildi. Standart olan 5:2 (katalizör/nafyon) oranını yakalamak için nafion çözültisi ağırlığı 20'ye bölünüp ve 5/2 ile çarpıldı. Bu işlem sonucunda ihtiyaç olan Pt/C katalizörünün ağırlığı bulunmuş oldu. Bulunan ağırlık kadar Pt/C katalizörü, nafyon çözültisinin bulunduğu behere eklendi. Çözelti en az 1 saat boyunca karıştırıldı. Çözeltiye yaklaşık olarak nafyon çözültisinin yarısı kadar propandiol ve eklenen propandiol miktarının da 3/4'ü kadar izopropanol eklendi. Bu maddeler eklendikten sonra, oluşan karışım kümeleşme yok olana kadar karıştırıldı.

### 2.3. Gaz Difüzyon Tabakalarının Hazırlanması

MEA'nın yapısını oluşturma aşamalarının en önemlilerinden birisi gaz difüzyon tabakalarının üzerindeki makroskobik boşlukların doldurulmasıdır. Bunun için karbon kumaş üzerine karbon yüklemesi yapılmaktadır. Karbon yüklemesi; hem anotta hem de katotta kullanılacak olan karbon kumaş için; PTFE iyonmer çözültisi ile karbon siyahının karıştırılması sonucunda hazırlanan mürekkeplerin, karbon kumaş üzerine bir fırça yardımıyla sürülmesi esası ile gerçekleştirilir. Hazırlanan mürekkeplerdeki PTFE çözültisinin oranı %30 olacak şekilde ayarlandı ve bu şekilde karbon siyahı ile karıştırıldı (Vielstich vd., 2003).

### 2.4. Membran Elektrot Atacının (MEA) Oluşturulması

Membran elektrot atacı (MEA); nafyon membranın, anot ve katot kısımlarında kullanılmak üzere hazırlanan iki gaz difüzyon tabakasının arasına konularak, sıcak baskı yöntemiyle sıkıştırılmasıyla oluşturulur. Sıcak baskı yönteminde; anot ve katot gaz difüzyon tabakaları aralarında nafyon membran olacak şekilde, sıcak baskı cihazının alt ve üst çeneleri arasına konur. Bu işlem yaklaşık 132 °C'de ve 75 kg/cm<sup>2</sup> basınç altında, 60 saniye süre boyunca gerçekleştirilir (Tang vd., 2007). Bu elektrokimyasal proses sürecin de; su, ısı ve elektrik açığa çıkar. Aşağıdaki Şekil 1 de PEM yakıt hücresinin yapısı gösterilmiştir ( Yılmaz vd., 2017; Das vd.,2017)

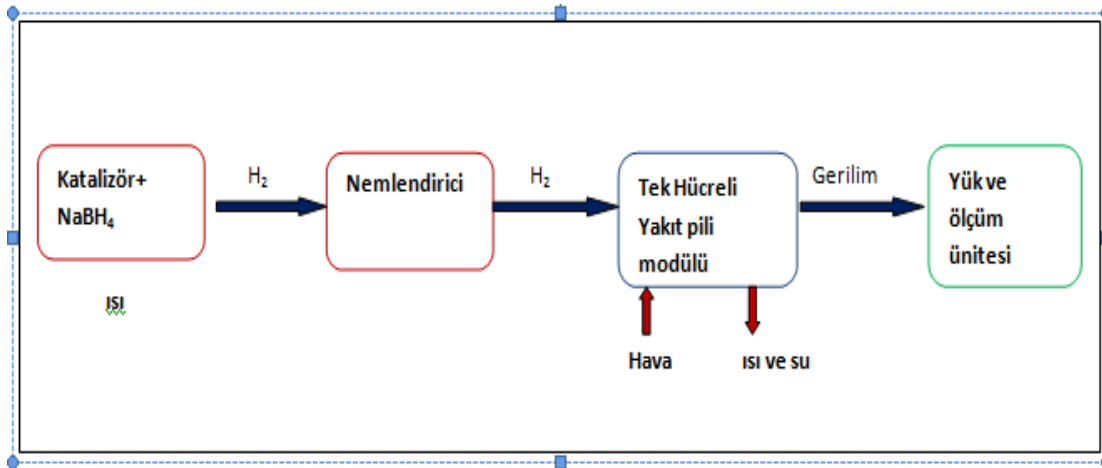


Şekil 1. PEM yakıt pili hücresi şematik gösterim

#### 2.4. Co-B ve Ni-B katalizörlerinin sentezlenmesi

Sırasıyla, 0.4 M 50 mL  $\text{CoCl}_2$  ve  $\text{NiCl}_2$  tuzları ile 0.26 M  $\text{NaBH}_4$  50 mL'lik çözeltileri hazırlandı. Daha sonra reaksiyonun gerçekleşeceği düzenek hazırlanarak azot gazı varlığında  $\text{CoCl}_2$  ve  $\text{NiCl}_2$  çözeltileri üzerine  $\text{NaBH}_4$  çözeltisi 1-2 saniye içerisinde eklendi. İndirgeme işlemi gerçekleştikten sonra Co-B ve Ni-B katalizörleri, vakum pompası yardımıyla süzüldü. Elde edilen ıslak numuler 3 defa deiyonize su ile yıkandıktan sonra 4 saat boyunca  $110\text{ }^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutuldu (Patel vd., 2010; Şahin vd., 2015; Hoşgün, 2018).

Deneyin yapılışının iş-akış şeması aşağıda Şekil 2 de gösterilmektedir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik görünümü

### 2.5. Yakıt pili Testi

Bu çalışmada tek hücreli PEM yakıt hücresinin anot ve katot kısımlarında Pt/C katalizörü ve nafyon 117 membranı kullanılarak 5x5 cm<sup>2</sup>'lik MEA hazırlandı. MEA'nın hazırlama işlemi tamamlandıktan sonra sistem yatışkın hale gelene kadar açık devre olarak çalıştırıldı. Devreye bağlanan yük ölçüm cihazı ve dijital multimeter (avometre) ile akım ve gerilim değerleri ölçümü için sistem hazır hale getirildi. Co-B ve Ni-B katalizörlerinin sodyum borhidrür ortamında indirgenmesiyle üretilen hidrojen gazları PEM yakıt pili sisteminde enerji üretmek için kullanıldı. Sabit 50 °C nemlendirme sıcaklığında, farklı yakıt pili çalışma sıcaklığı ve sodyum borhidrür'ün hidrolizinde kullanılan farklı Ni-B ve Co-B katalizör miktarları ile deneyler yapıldı. Elde edilen ölçümler sonucunda;

$$\text{Güç (P)} = \text{Gerilim (V)} \times \text{Akım (A)} \quad (1)$$

Denklem 1 kullanılarak; güç yoğunlukları, ölçülen gerilim ve kararlı haldeki akımdan hesaplandı. Ayrıca; çalışma voltajının ideal voltaja oranı ideal voltaja göre verim ifadesini verir.

$$\eta = V_g / V_i \quad (2)$$

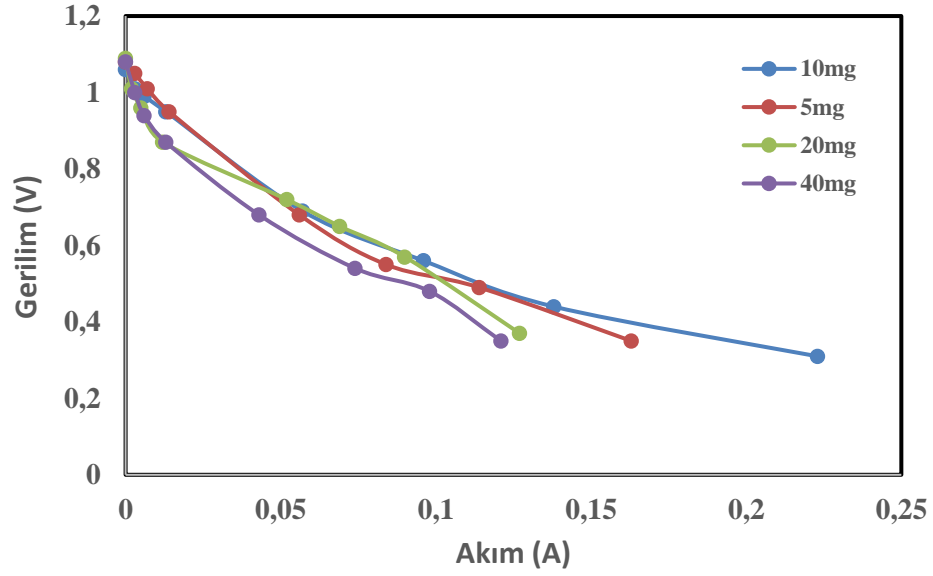
Bura da;  $\eta$  verim,  $V_g$  çalışma voltajı ve  $V_i$  ideal voltaj'dır.

Denklem 2 kullanılarak, ideal voltaja göre verim ve güce göre verim değerleri hesaplandı (Yılmaz vd., 2017; Yılmaz vd., 2019).

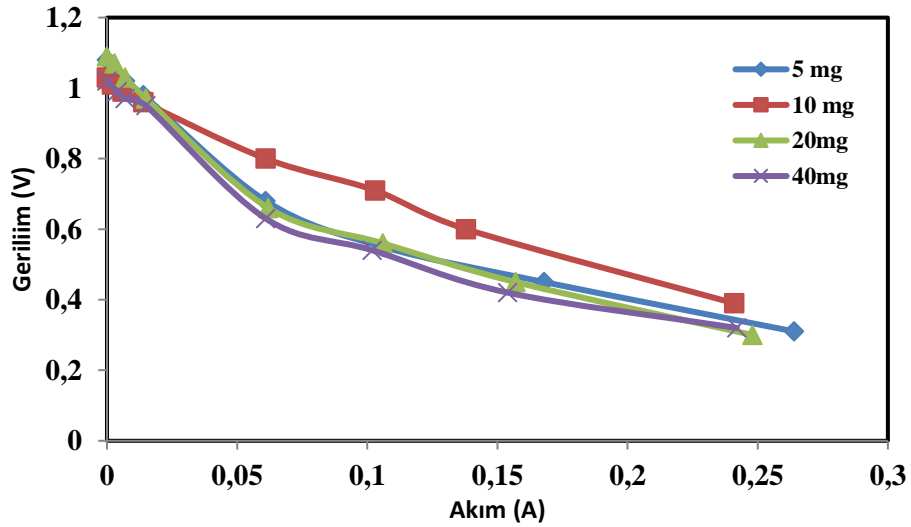
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sodyum borhidrür'ün hidrolizinde Co-B ve Ni-B katalizörleri varlığında üretilen hidrojen, PEM yakıt pilinde kullanılarak yakıt pili için ideal çalışma şartları belirlendi. Çalışmalar da 10 mL çözelti içerisinde %2.5 NaBH<sub>4</sub> ve %2.5 NaOH kullanıldı. Deneyler, PEM yakıt pilinin ideal şartlarda çalışma sıcaklığı ve kullanılan katalizör miktarını belirlemek için gerçekleştirildi.

Yakıt pilinin nemlendirme ve çalışma sıcaklığı 50 °C de sabit tutularak farklı miktarlarda (5 mg, 10 mg, 20 mg ve 40 mg) Co-B ve Ni-B katalizörleri varlığında, gerilim ve akım değerleri ölçüldü. Elde edilen verilerden, akıma karşı gerilim grafikleri Şekil 3a ve Şekil 3b de gösterildi.



(a)



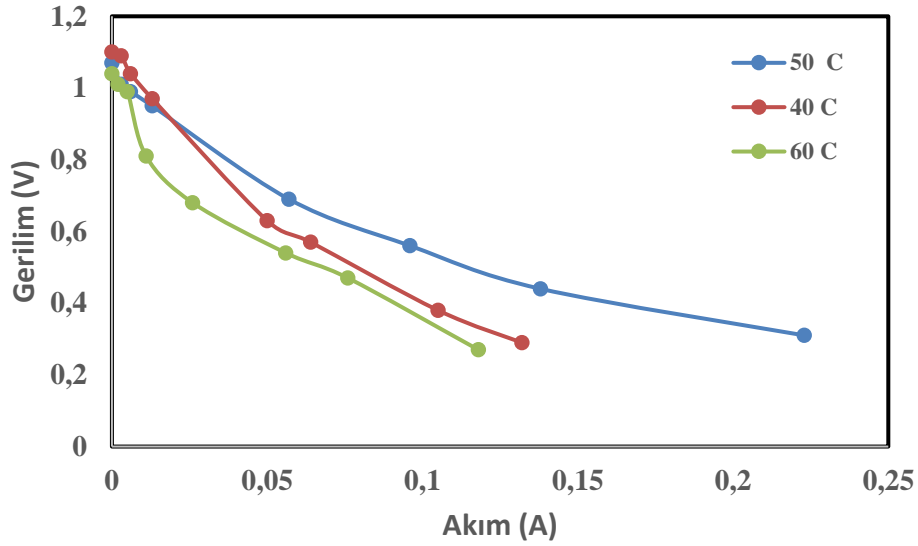
(b)

Şekil 3. Farklı katalizör miktarlarında akıma karşı gerilim grafiği.(a) Co-B katalizörü varlığında (b) Ni-B katalizörü varlığında

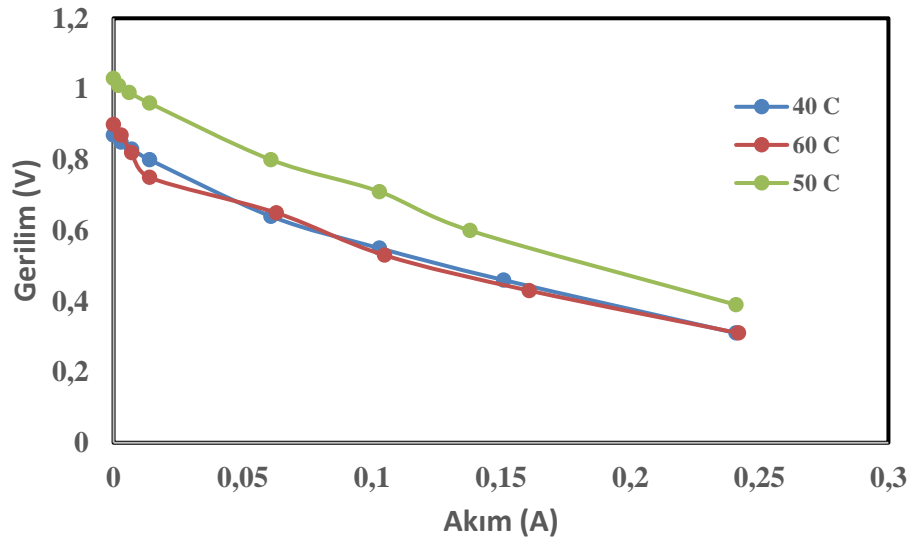
Grafikleri incelediğimizde en iyi gerilim değeri Co-B katalizöründen 20 mg kullanılarak ölçülmüş iken, Ni-B katalizöründe ise, bu değer 10 mg katalizör kullanımında gerçekleşti. En iyi akım değeri ise sırasıyla Co-B katalizöründe 10 mg, Ni-B katalizöründe ise 5 mg kullanımında ölçüldü. Bunun

muhtemel nedeni, Ni-B katalizörünün hidrojen üretim hızı Co-B katalizörüne göre daha yavaş ilerleyen bir reaksiyon olmasından kaynaklı olabilir (Hoşgün, 2018). Bu da üretilen hidrojenin PEM yakıt pilinde kullanım süresini ve akım-gerilim değerlerini değiştirmektedir.

Yakıt pili nemlendirme sıcaklığı 50 °C de sabit tutularak ve 10 mg Co-B ve Ni-B katalizörleri varlığında, yakıt pili çalışma sıcaklığı 40 °C, 50 °C ve 60 °C değiştirilmiş olup, yakıt pili sisteminin akıma karşı gerilim grafikleri Şekil 4a ve Şekil 4b'de gösterildi.



(a)



(b)

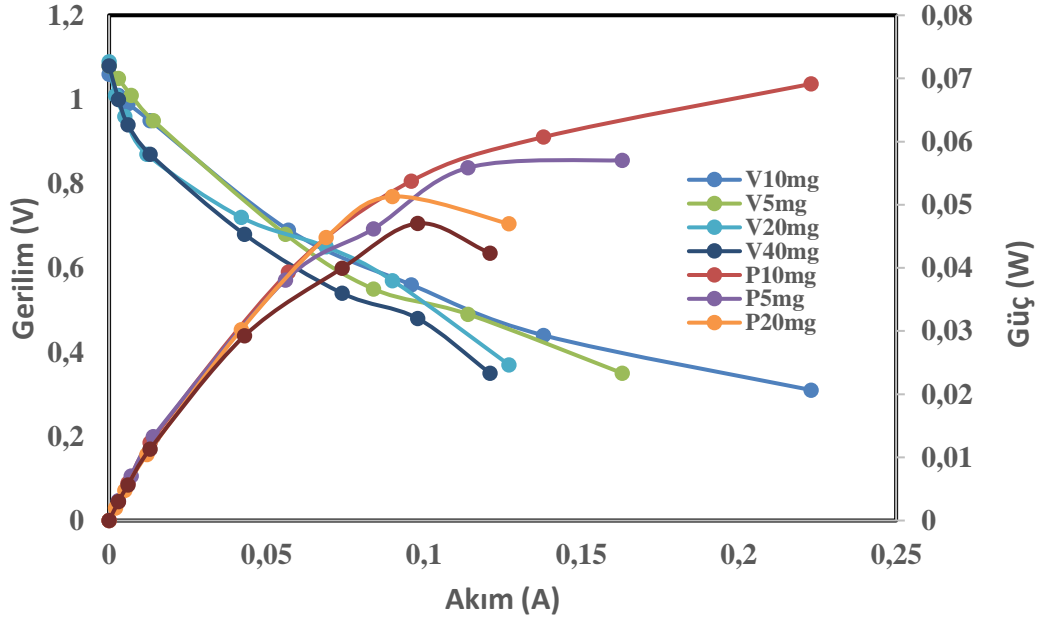
**Şekil 4.** PEM yakıt pili farklı çalışma sıcaklıklarında akıma karşı gerilim grafiği (a). Co-B katalizörü varlığında (b). Ni-B katalizörü varlığında

Grafikler incelendiğinde PEM yakıt pilinin, Co-B katalizörü varlığında, 40 °C de ve Ni-B katalizörü varlığında ise 50 °C de çalışma performansı ile ilgili daha iyi sonuçlar verdiği

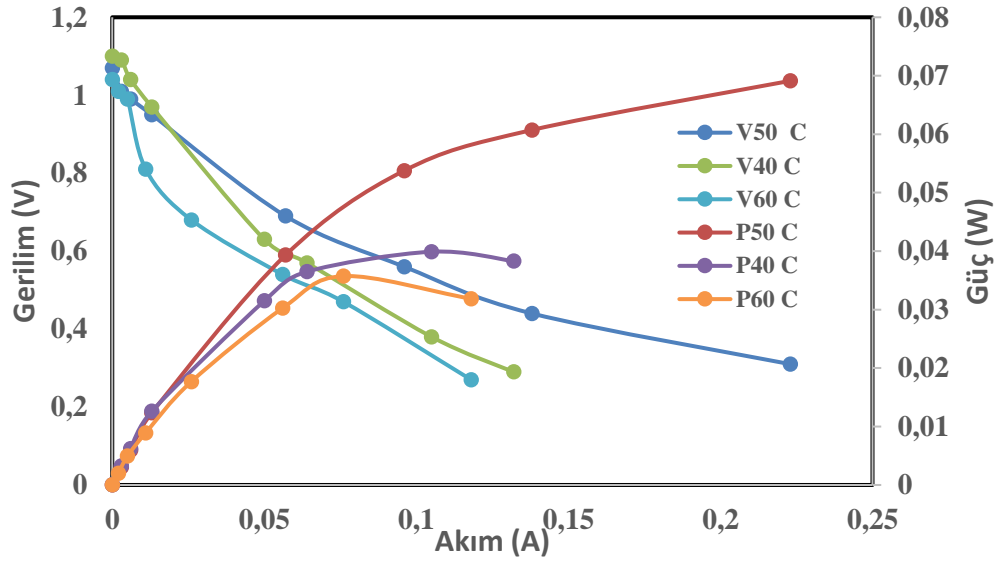


görülmektedir. 50 °C nemlendirme sıcaklığın da ve 40 °C - 60 °C farklı işlem sıcaklıkları için, işlem sıcaklığı arttığında yakıt hücresinin performansı düşmektedir. Bu düşük nemlendirme sıcaklığında, çalışma sıcaklığının artması, zarın kurummasına, zar iletkenliğinin azalmasına ve yakıt hücresinin performansının düşmesine neden olur. Bunun nedeni, yüksek çalışma sıcaklığında, katalizör katmanındaki zar malzemesinin tamamen hidre edilmemesi olabilir. Su, yüksek sıcaklıklarda daha kolay buharlaşır. Bu da, membran iletkenliğinde ve katalizörün aktif yüzey bölgesinde bir azalmaya ve ardından yakıt hücresi performansında bir düşüşe neden olabilir (Srinivasan vd., 1991; Amirinejad vd., 2006; Dincer vd., 2014).

Tek hücreli PEM yakıt pili için, Co-B katalizörü varlığında farklı miktarlarda katalizör kullanımında ve farklı değerler de yakıt pili çalışma sıcaklıkların da elde edilen ölçümlerden oluşturulan akım-gerilim-güç polarizasyon eğrileri Şekil 5a ve Şekil 5b de gösterildi.



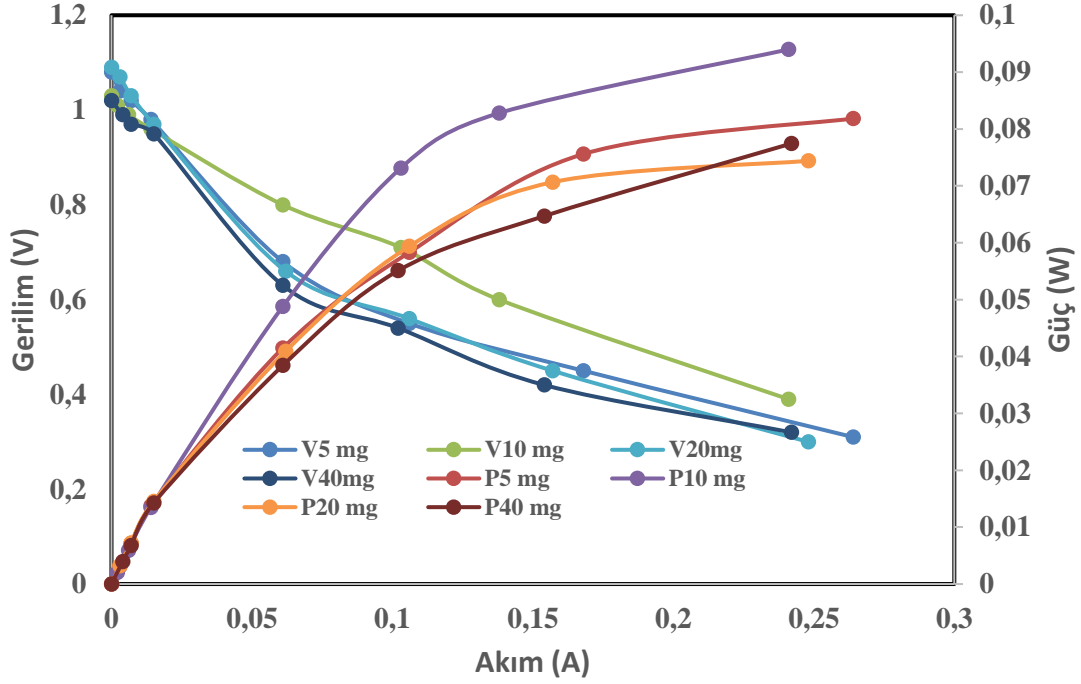
(a)



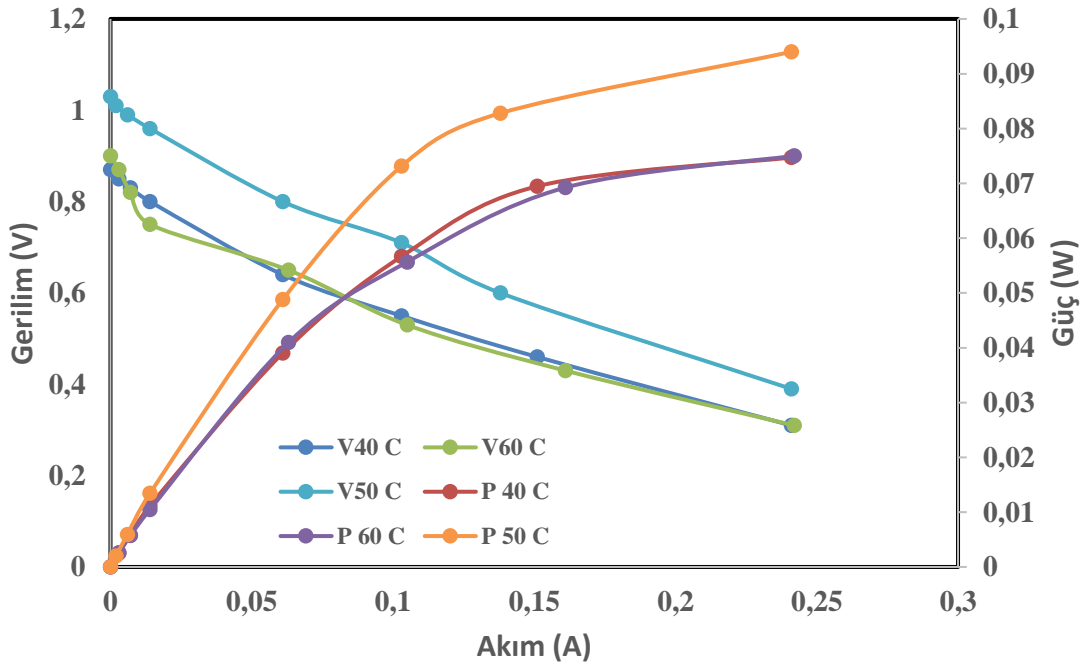
(b)

**Şekil 5. (a)** Co-B katalizörünün farklı miktarlarda kullanılması ve 50 °C yakıt pili çalışma sıcaklığında ölçülen akım-gerilim-güç değerlerinden oluşturulan grafik. **(b)** 10 mg Co-B katalizörü varlığında, farklı sıcaklıklarda ölçülen akım-gerilim-güç değerlerinden oluşturulan grafik.

Co-B katalizörü varlığında, PEM yakıt pili çalışma sıcaklığı 60 °C de iken akım 0.046 A ve gerilim 0.78 V olarak ölçüldü. Farklı miktarlar da katalizör çalışmasında ise, en iyi akım ve gerilim değerleri sırasıyla, 0.063 A ve 0.68 V olarak 50 °C çalışma sıcaklığında 40 mg katalizör kullanımında ölçüldü. Moises ve arkadaşları tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Moises vd., 2007). Tek hücreli PEM yakıt pili için, Ni-B katalizörü varlığında farklı miktarlarda katalizör kullanımında ve farklı değerler de yakıt pili çalışma sıcaklıklarının da elde edilen ölçümlerden oluşturulan akım-gerilim-güç polarizasyon eğrileri Şekil 6a ve Şekil 6b de gösterildi.



(a)



(b)

**Şekil 6. (a)** Ni-B katalizörünün farklı miktarlarda kullanılması ve 50 °C yakıt pili çalışma sıcaklığında ölçülen akım-gerilim-güç değerlerinden oluşturulan grafik. **(b)** 10 mg Ni-B katalizörü varlığında, farklı sıcaklıklarda ölçülen akım-gerilim-güç değerlerinden oluşturulan grafik.

Ni-B katalizörü için ise, en iyi çalışma gerilimi ve akım değerleri 50 °C çalışma sıcaklığında 10 mg katalizör kullanımından 0.68 V ve 0.061 A olarak ölçüldü. Yılmaz ve arkadaşları da PEM yakıt hücresi ile ilgili çalışmalarında akım ve gerilim değerlerini sırasıyla, 0.3 A ve 5.6 V olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca, Ni-B ve Co-B katalizörleri varlığında sodyum borhidür'ün hidrolizinden üretilen hidrojenin tek hücreli PEM yakıt pilinde kullanımı sonucu maksimum güç değerleri ve güce göre verim değerleri hesaplandı. Ni-B katalizörü için maksimum güç değeri 0.049 W ve güce göre verim %55, Co-B katalizörü için ise bu değerler 0.043 W ve %55 olarak hesaplandı. Değerleri incelediğimiz zaman, PEM yakıt hücresi çalışma sıcaklığı ve nemlendirme sıcaklığı aynı değerde 50 °C olduğu zaman gerçekleşmiştir. Bunun muhtemel nedeni ise, membranın iyi hidratlanması durumunda, çalışma sıcaklığının artırılması, aktivasyon kayıplarını azaltan değişim akımı yoğunluğunun artmasından ve daha yüksek sıcaklıklarda gaz difüzyonunun ve membran iletkenliğinin artmasından dolayı, yakıt hücresinin performansını artırır. Bu değerleri incelediğimizde, Ni-B katalizörünün hızının yavaş olması nedeniyle yakıt pili hücresinin gücünü arttırdığını ifade edebiliriz. Ancak, gücün artması çalışma geriliminden dolayı güce göre verim değerini değiştirmemiştir. Co-B katalizörü ve Ni-B katalizörleri için, farklı sıcaklık ve farklı miktarlarda katalizör kullanılarak ölçülen akım-gerilim değerlerinden yola çıkılarak sabit yük altında güç değerleri ve yakıt pilinin verimi hesaplandı. Değerler sırasıyla, aşağıdaki Tablo 1 de ve Tablo 2 de verildi.

**Çizelge 1.** Co-B katalizörü varlığında PEM yakıt pilinin çalıştırılması ile elde edilen veriler

Sıcaklık	Katalizör miktarı	Akım (A)	Gerilim (V)	Açık devre Gerilimi (V)	Güç (W)	% verim Güce göre	% verim İdeal voltaja göre
40 °C	10 mg	0.05	0.63	1.02	0.032	0.52	0.83
50 °C	5mg	0.056	0.68	1.08	0.034	0.56	0.88
	10mg	0.057	0.69	1.06	0.040	0.56	0.86
	20mg	0.052	0.72	1.06	0.037	0.59	0.87
	40mg	0.063	0.68	1.08	0.043	0.55	0.88
60 °C	10mg	0.046	0.68	1.04	0.036	0.55	0.85

**Çizelge 2.** Ni-B katalizörü varlığında PEM yakıt pilinin çalıştırılması ile elde edilen veriler

Sıcaklık	Katalizör mik	Akım (A)	Gerilim (V)	Açıkdevre ger (V)	Güç (W)	% verim Güce göre	% verim İdealvoltaja göre
40 °C	10 mg	0.061	0.63	0.87	0.038	0.51	0.71
50 °C	5mg	0.061	0.68	1.04	0.042	0.55	0.84
	10mg	0.061	0.68	1.03	0.049	0.55	0.83
	20mg	0.062	0.66	1.02	0.041	0.54	0.82
	40mg	0.061	0.63	1.02	0.038	0.51	0.82
60 °C	10mg	0.061	0.65	0.90	0.040	0.53	0.73

#### 4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında ilk önce, deneysel olarak hazırlanan Pt/C destekli MEA yapısı ticari hidrojen gazı ve çeşitli katalizör kullanılarak sodyum borhidrür'ün hidrolizinde üretilen hidrojen gazları test edildi. 5x5cm<sup>2</sup> aktif yüzey alanına sahip bir MEA kullanıldı. Bu yapı, diğer sistem parametreleri sabit tutularak, 40 °C, 50 °C ve 60 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıklar da test edildi. Farklı katalizör miktarları kullanılarak üretilen hidrojen miktarına bağlı olarak yakıt pilinin davranışı belirlendi. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar;

- Yüksek sıcaklıklarda PEM yakıt pili verimi düşmektedir.
- Katalizör miktarı arttıkça hidrojen üretimi hızlanmakta ve yakıt pili hücrelerinin verimini düşürmektedir.
- Hidrojen üretim süreci yavaş olan Ni-B katalizörü çalışmada en iyi performansı vermektedir.
- Literatürde (Vielstich vd., 2003; Dincer vd., 2014) geçen PEM yakıt pili verimi çalışma gerilimine göre Co-B katalizörü için %88 ve güce göre %56 aralığında olması iyi bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Çalışmamız da 50 °C de 20 mg Ni-B katalizörü kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen çalışmagerilimine göre verim %83 ve güce göre verim ise %54 olarak hesaplanmıştır.
- Yine literatürde (Vielstich vd., 2003; Dincer vd., 2014) teorik olarak açık devre gerilimi 1.23 volt olarak hesaplanmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda açık devre gerilimi 0.5 volt ile 0.9 volt aralığını ideal gerilim olarak kabul edilmektedir. Çalışmamızda da 0.87 volt ile 1.1 volt aralığında ideal gerilim değerleri ölçüldü.

#### Teşekkür

Yazarlar finansal destek için BAP'a (proje numarası 2017-SİÜSYO-31) teşekkür ederler.

## 5. KAYNAKLAR

- Amirinejad, M., Rowshanzamir, S., MohammadEikani, H., 2006, Effects of operating parameters on performance of a proton exchange membrane fuel cell, *Journal Power Sources*, 161, 2, 872.
- Amendola, S.C., Sharp-Goldman, S.L., Janjua, M.S., Petillo, K.J., 2000, A safe, portable, hydrogen gas generator using aqueous borohydride solution and Ru catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy*, 25, 10, 969-75.
- Bauen, D.H., 2000, Assessment of the environmental benefits of transport and stationary fuel cells, *Journal Power Sources*, 86, 2, 482.
- Bilodeau, A., Agbossou K., 2006, Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications, *Journal Power Sources*, 162, 2, 757.
- Buxbaum, R., Lei H., 2003, Power output and load following in a fuel cell fueled by membrane reactor hydrogen, *Journal Power Sources*, 123, 1, 43.
- Ceraolo, M., Miulli, C., Pozio, A., 2003, Modelling static and dynamic behaviour of proton exchange membrane fuel cells on the basis of electro-chemical description, *Journal Power Sources*, 113, 1, 131.
- Costamagana, P., Srinivasan, S., 2001, Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000: Part II. Engineering, technology development and application aspects, *Journal Power Sources*, 102, 1, 242.
- Das, V., Padmanaban, S., Venkitesamy, K., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., Siano, P. 2017, Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 10-18.
- Dinçer, K., 2013, Pem Yakıt Hücresinin Katod Tarafı Performansının Geliştirilmesi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 12, 2.
- Dincer, K., Şahin, O., Yayla, S., Avcı, A., 2014, Anot tarafı elektrosin metodu ile YSZ+SDC+nacaniboile kaplanmış PEM yakıt hücresinin performansının deneysel olarak incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi*.
- ELSayed, Y., Khairia, E. A., Moataz, H. K., 2010, Lumped Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), *International Journal of Electrochemical Science*, 5, 267.
- Hoşgün, Seda., “Kobalt ve Nikel İçerikli Destekli Katalizörlerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Sodyum Borhidrürden Hidroliz Tepkimesi ile Hidrojen Üretiminde Kullanılması”, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R.L., 2008, Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2, 553-63.
- Lang, C., Jia, Y., Liu, J., Wang, H., Ouyang, L., Zhu, M., 2017, NaBH<sub>4</sub> regeneration from NaBO<sub>2</sub> by high-energy ball milling and its plausible mechanism, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 18, 13127-35.

- Mattos, L.V., Jacobs, G., Davis, B.H., Noronha, F.B., 2012, Production of hydrogen from ethanol: review of reaction mechanism and catalyst deactivation, *Chemical Review*, 112, 7, 4094-4123.
- Moises, B. R., Araceli, R. P., Andres, R. C., J. Antonio, R. M., Omar, S. F., Antonio, G. G., Ignacio, C. V., 2007, Study of the Flow Fluids and Design Engineering Under PEM Fuel Cell Working Conditions, *International Journal of Electrochemical Science*, 2, 820.
- Moises, B. R., Araceli, R. P., Antonio, R. M., Belen, T. P., Roberto, G.V., 2009, Effect of a Rigid Gas Diffusion Media Applied as Distributor of Reagents in a PEMFC in Operation, Part I: Dry Gases. *International Journal of Electrochemical Science*, 4, 1754.
- Okur, Osman, “Doğrudan Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili Anot ve Katot Elektrokatalizörünün Sentezi ve Karakterizasyonu”, Doktora tezi, Hacatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- Patel, N., Fernandes, R., Miotello, A., (2009). Hydrogen generation by hydrolysis of  $\text{NaBH}_4$  with efficient Co-P-B catalyst: a kinetic study, *Journal Power Sources*, 188, 1, 411-20.
- Patel, N., Fernandes, R., Miotello, A., (2010). Promoting effect of transition metal-doped Co-B alloy catalysts for hydrogen production by hydrolysis of alkaline  $\text{NaBH}_4$  solution, *Journal Catalysis*, 271,2, 315-324.
- Rodatz, P., Büchi, F., Onder, C., Guzzela, L., (2004). Operational aspects of a large PEFC stack under practical conditions, *Journal Power Sources*, 128, 1, 208.
- Rongzhong, J., Deryn, C., (2001). [Voltage–time behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack at constant current discharge](#), *Journal Power Sources*, 92, 1, 193.
- Srinivasan, S., Velev, O. A., Parthasarathy, A., Manko, D. J., Appleby, A. J., (1991). High energy efficiency and high power density proton exchange membrane fuel cells—electrode kinetics and mass transport, *Journal Power Sources*, 36, 1, 299.
- Şahin, Ö., İzgi, M.S., Kaya, M., Saka, C., (2015). Effect of Microwave Irradiation on a Co-B Based Catalyst for Hydrogen Generation by Hydrolysis of  $\text{NaBH}_4$  Solution, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 37, 5, 462-467.
- Tang, H., Wang, S., Pan, M., Jiang, S.P., Ruan, Y., (2007). Performance of DMFC’s prepared by hot-pressed MEA and catalyst-coated membrane (CCM), *Electrochimica Acta*, 52, 5, 3714-3718.
- Wang, L., Husar, A., Zhou, T., Liu, H., (2003). A parametric study of PEM fuel cell performances, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 11, 1263
- Xiaochen, Y., Biao, Z., Andrzej, S., (2005). Water and thermal management for Ballard PEM fuel cell stack, *Journal Power Sources*, 147, 2, 184.
- Vielstich, W., Lamm, A. G., (2003). Handbook of Fuel cells, Fundamentals technology and applications, *Electrocatalysis*, Wiley, Volume 2.

- Yan, Q., Toghiani, H., Causey, H., (2006). Steady state and dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) under various operating conditions and load changes, *Journal Power Sources*, 161, 1, 492.
- Yılmaz, A., Şefik, S., (2017). Sodyum Borhidrür (NaBH<sub>4</sub>) Destekli Bir Hidrojen/Hava PEM Yakıt Hücresi İle Elektrik Üretiminin Deneysel Analizi, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7, 2
- Yılmaz, A., Şefik, S., Yakut, R., (2019). Cell-Based Experimental Analysis of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8, 4, 1446-1457.