

Sıkıştırma Basıncının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi

H.Kahraman^{1*}, I.Çevik² and S. Coşman²

¹Technical Education Faculty, Mechanical Education Department, Sakarya University, Turkey

²Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Sakarya University, Turkey

Abstract

In this study, the effects of compressive force on the performance of a single cell proton exchange membrane (PEM) fuel cell have been studied experimentally. Pure hydrogen on the anode side and pure oxygen on the cathode side have been used. A single PEM fuel cell with active surface area of 5 centimeters square was used for all experiments in this study. Experiments with different fuel cell compressive forces have been carried out. The experimental results show the effects of the compressive forces on the performance of the PEM fuel cell and the reasons of these effects are discussed.

Key words: PEM, fuel cell, compressive force, hydrogen.

Özet

Bu çalışmada hücre sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansı üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Anot ve katot taraflarında saf hidrojen ve oksijen kullanılmıştır. Tüm deneyler için 5 santimetrekare aktif alana sahip tek hücreli bir yakıt pili kullanılmıştır. Sonuçlar farklı sıkıştırma basınçlarının performans üzerindeki etkilerini göstermiştir ve bu etkilerin sebepleri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PEM, yakıt pili, sıkıştırma basıncı, hidrojen.

1. Giriş

Proton dönüşüm membran (PEM) yakıt pilleri yakın geleceğin otomotiv, taşınır uygulamalar ve şebeke bağımsız güç üretimi konularında en umut verici güç üretim cihazı adaylarından birisi olarak göze çarpmaktadır. Son yıllarda yakıt pilleri ve yakıt pili sistemleri ile ilgili araştırmalar hızla artmıştır. Fakat maliyet açısından incelendiğinde yakıt pilleri ticarileştirilmek ve yaygın bir şekilde kullanılmak için oldukça pahalıdırlar.

Yakıt pillerinin performansı sıcaklık, basınç ve reaktant gazların nemlendirilmesi, su ve ısı yönetimi, reaktantların stokiyometrisi, gazların debisi gibi farklı çalışma şartlarının yanı sıra hücre sıkıştırma basıncından da etkilenmektedir. Bu değişkenler yakıt pili iç voltaj kaybını tetikleyen üç adet tersinmez kayıp mekanizması olan aktivasyon kaybı, dirençsel kayıplar ve kütle transfer kayıplarını etkilemektedir [1]. Aktivasyon kaybı yavaş reaksiyon kinetikleri ve düşük katalizör aktifliği ile ilişkilidir. Dirençsel kayıplar, düşük membran iletkenliği, yüksek temas direnci ve hücre bileşenlerinin elektrik dirençlerinin yüksek olmasının bir sonucu olarak

meydana gelmektedir. Kütle transfer kayıpları ise reaktant gazların kısmi basınçlarının azalması ve reaktantların elektrot içinde transferidir.

Yakıt pili performansını artırmak için yukarıda sayılan parametrik etkilerin yakıt pili çalışmasına etkilerinin anlaşılması oldukça önemlidir. Literatürde yakıt pilleri hakkında farklı çalışmalar mevcuttur.

Rho ve ark. [2] PEM yakıt pillerinde oksijen ve değişik inert gaz karışımları kullanarak kütle transferi üzerine çalışmışlardır. Jordan ve ark. [3] difüzyon tabakasının yapısal etkilerinin PEM yakıt pili performansını incelemişlerdir.

Rajalakshmi ve ark. [4] reaktant gazların nemlendirilmesinin etkisini 370 cm^2 alana sahip bir MEA(membran elektrot birleşimi) ile test etmişlerdir. Yazarlar gazların nemlendirilmesinin performansa olumlu etki yaptığını, fakat nemlendirme miktarının aşırı artmasıyla performansın azalmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Artan nemlendirmenin hücre kanalları içinde biriken su miktarını artırdığı ve bu birikme dolayısıyla reaktant gazların gaz difüzyon tabakasından geçişi zorlaştığı ve aktif alana ulaşamayıp performansın düştüğü gözlemlenmiştir.

Natarajan ve Nguyen [5] reaktant gaz oranları ve gaz nemlendirilmesinin membran üzerinde akım yoğunluğu dağılımına etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Nemlendirilen gaz akışlarının akış kanalı boyunca üniform bir akım yoğunluğuna sebebiyet vermiştir. Kuru gaz kullanılması durumunda performansta önemli ölçüde düşüş olduğunu belirtmektedirler.

PEM yakıt hücrelerinde su katotta üretilir. En ideal halde bu oluşan su, elektroliti gereken nemlilikte tutar. Katottan verilen hava, reaksiyon için gereken oksijeni karşılamaya ve oluşan fazla suyu uzaklaştırmaya yeterli olur. Katottan anoda suyun difüzyonu sonucu elektrolitin tüm yüzeyi istenilen nemlilikte olur [6]. Bu nedenle katotta üretilen suyun yönetimi oldukça önem kazanır. Eğer su taşınımı, suyun üretiminden az ise katotta aşırı su birikimi olması sonucunda su taşmaları oluşarak oksijenin katot katalizör ve gaz difüzyon tabakalarının gözeneklerinden transferi engellenmiş olur. Bu problem yakıt hücresinin performansını düşürür [7]. Su taşınımı su üretiminden fazla ise membranın kuruması söz konusu olur. Bu da membran iletkenliğinin azalmasına, dolayısıyla membranın proton geçirgenliğinin azalmasına neden olur.

Santarelli ve Torchio [8] çalışmalarında nemlendirmenin yüksek hücre sıcaklıklarında yüksek membran iletkenliği dolayısıyla performansı artırdığını, fakat düşük sıcaklık ve yüksek akım yoğunluğunda katotta meydana gelen su birikimi nedeniyle performansı azalttığını belirtmişlerdir.

Wang ve ark. [9] Nafion 115 membran kullandıkları tek hücre yakıt pilinde değişik hücre sıcaklıkları ($50-90\text{C}^0$), farklı nemlendirme sıcaklıkları, farklı çalışma basınçları ($1-3.74 \text{ atm}$), ve bu değişkenlerin farklı kombinasyonlarını test etmişlerdir. Anot nemlendirme sıcaklığının hücre performansına özellikle düşük akım yoğunluklarında önemli ölçüde etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek basınç altında çalışan hücrenin performansının, reaktantların kısmi basınçlarının artmasından dolayı arttığını gözlemlemişlerdir.

Zhang ve ark. [10] tek hücre PEM üzerinde $23-120 \text{ C}^0$ sıcaklık ve $1-3 \text{ atm}$ basınç aralıklarında tam nemlendirilmiş H_2/hava ve kuru H_2/hava ile sıcaklığın tek hücreli yakıt pili performansına

etkisini ortaya koymak amacıyla deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar katalist tabaka üzerinden daha hızlı proton geçişi sebebiyle tam nemlendirilmiş koşullarda performansın daha iyi olduğu yönündedir. Ayrıca Nafion 112 membranın 0% RH (relative humidity-bağıl nem)'ta düşük gaz debisi ve yüksek geri basınç değerlerinde daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir.

Xu ve ark. [11] 120°C sıcaklıkta çalıştırdıkları PEM yakıt pilinin performansının oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Buna sebep olarak yüksek sıcaklık dolayısıyla azalan bağıl nem (RH), artan membran ve elektrot direnci, katot aktivasyon kaybı ve oksijen transfer kaybı olarak belirtilmiştir.

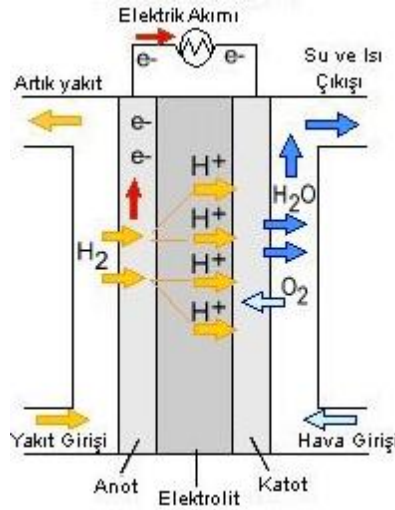
Jin-Cherng Shyu ve ark. [12] tek hücre yakıt pilinin polarizasyon eğrisini 35%, 70% ve 100% bağıl nem, 65-120°C sıcaklık ve 0-1 atm basınçta test etmişlerdir. Sonuçlar en iyi hücre performansının 0.6V operasyon voltajında sıfır basınç değerinde 65°C sıcaklıkta 1000mA/cm² olduğunu, fakat 1 atm basınçta 1300 mA/cm² olduğunu tespit etmişlerdir. 90°C anot ve katot nemlendirme sıcaklığı ve 100°C hücre sıcaklığında 0-1 atm arasındaki basınç değişiminde, basıncın artmasıyla membran direnci azalmış, katalizör daha aktif hale gelmiştir. Bahsedilen bu sonuç; basıncın artırılmasının yakıt pili performansını oldukça artırdığı ve nemlendirmeden daha çok hücre iç direncini azalttığı görülmüştür.

Yukarıda incelenen çalışma koşullarının yanında yakıt hücresinin sıkıştırılması hücre içindeki operasyon parametrelerinden birkaçını doğrudan etkilemektedir. Hücrenin sıkıştırma miktarı gaz difüzyon tabakası (GDT) kalınlığını, temas direncini ve sızdırmazlık kuvvetini etkilemektedir. Artan sıkıştırma kuvveti elektriksel temas direncini azaltmaktadır. Aynı zamanda sızdırmazlık kuvvetini de artırarak hücre içindeki akış bölgelerindeki reaktant kaybını azaltır. Sıkıştırma kuvveti GDT'nin fiziksel özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Artan sıkıştırma basıncı GDT içindeki gözenekli yapıyı değiştirmekte, boş alan oranını azaltmaktadır. Gostick ve ark. [13] boşluk alanındaki azalmanın hücrenin difüzyon özelliklerini değiştirmesinin yanı sıra elektriksel iletkenliğini de etkilediğini ifade etmiştir. Çalışmaları GDT geçirgenlik ve gözeneklilik özellikleri arasında tutarlı bir ters orantı olduğunu göstermiştir. Geçirgenlik ve gözeneklilik özellikleri arasındaki durum Tomadakis ve ark. [14] tarafından yapılan ve çeşitli gözenekli malzemelerin kullanıldığı çalışmada ilişkilendirilmiştir. Sıkıştırma hakkında bazı deneysel verileri gösteren çalışmalar yapılmıştır. Barber ve ark. [15] değişken sıkıştırma yükleri için temas direncinin değişimini incelemiştir. Sonuç olarak yüzey teması elde edilebilen maksimum basınçta optimize edildiği gözlemlenmiştir. Su [16] ve ark. hücre sıkıştırma kuvvetinin performans üzerindeki etkisini incelemek için nümerik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmalarının odak noktası olarak sıkıştırma kuvvetinin gaz difüzyon tabakası malzemesinin kütle transfer özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Yani tabakanın gözenekli ve gaz geçirgen yapısının uygulanan kuvvet ile nasıl değiştiği tespit edilmesi amaçlanmıştır. Porometre vasıtasıyla gözenekli ve gaz geçirgen yapının ölçümleri sıkıştırılmış ve normal halde iken ölçülmüştür. Ölçümlerin doğruluğu nümerik simülasyon ile de teyit edilmiştir. Hesaplamalar için iki paralel kanal ve membran elektrot bileşimini içeren 3B model oluşturulmuştur. Sonuç olarak sıkıştırma etkisinin gaz difüzyon tabakası kütle transfer özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Yukarıdaki bölümde görüldüğü üzere sıkıştırma kuvvetinin yüzey temas dirençleri ile sızdırmazlık basıncına etki ettiği, bu faktörlerinde performansla etki ettiği anlaşılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda GDT geçirgenliği ile iletkenliğinin performansı etkileyen bir parametre olduğunu göstermektedir.

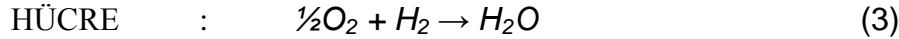
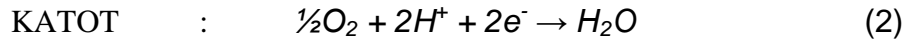
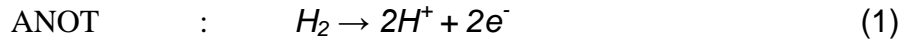
2. Yapısı ve Çalışması

Bir PEM yakıt hücresi iki elektrot ile bu elektrotlar arasında yerleştirilmiş elektrolitten (membran) meydana gelir. Anoda gönderilen hidrojen, anot üzerindeki gaz kanallarından geçerken protonlara (H^+) ayrışır. Elektrolit sadece protonların geçişine izin verir ve protonlar elektrolit üzerinden katoda geçerler. Elektronlar ise dış devre yoluyla katoda ulaşırlar. Benzer şekilde katottaki gaz kanallarından geçen hava katoda gelir. Katotta oksijen, proton ve elektronların reaksiyona girmesi sonucu su elde edilir. Elektronların dış devre yoluyla iletilmesi ile de elektrik akımı üretilir.



Şekil 1: PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi

PEM yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonlar şu şekildedir:

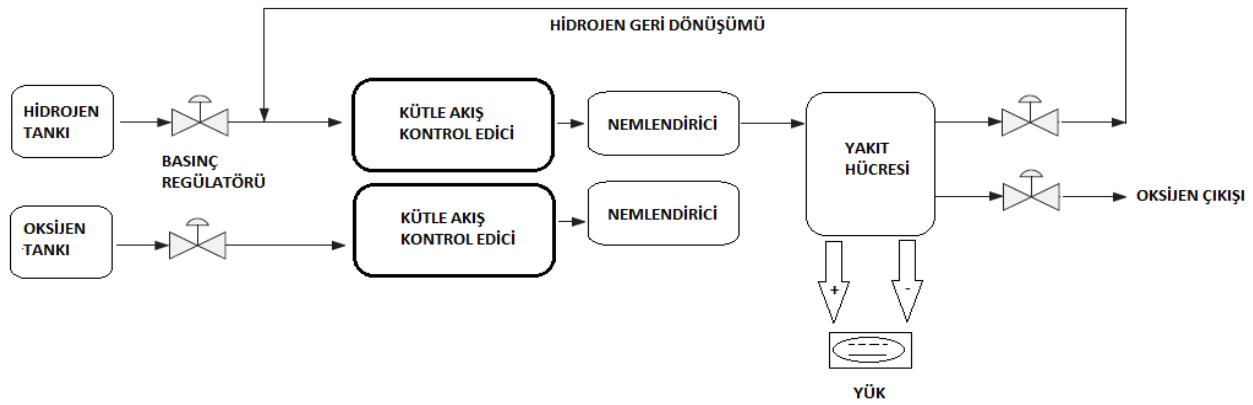


Yakıt hücresinde iki kimyasal reaksiyon olan: Anotta yükseltgenme reaksiyonu ve katotta indirgenme reaksiyonu oluşur. Membran iki elektrot arasında yer alır. Elektrotlar gaz difüzyon tabakası ve katalist tabakadan oluşmaktadır.

3. Deneysel Metot

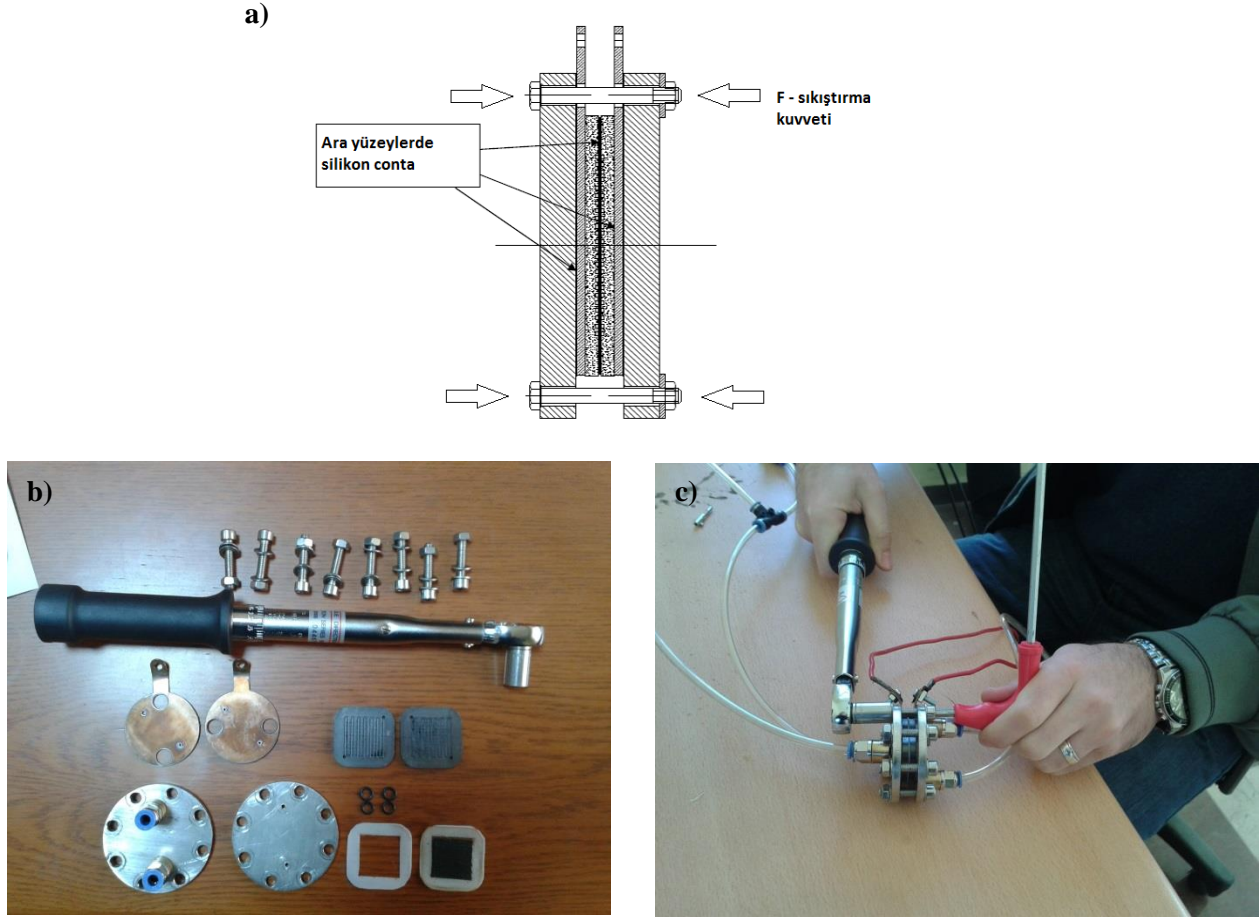
Bu çalışmada Şekil 3'te gösterilen 150mW gücünde $5cm^2$ aktif alana sahip tek hücreli polimer elektrolitik membran yakıt pilinin çalışması deneysel olarak incelenmiştir. Membran malzemesi

olarak Nafion 112 kullanılmıştır. Her iki elektrotta (anot ve katot) 0.5mg/cm^2 karbon üzerine platin yüklenmiştir. Hücre sıkıştırma basıncının yakıt pili çıkış değerlerine etkisi incelenmiştir. Şekil 2.'de hazırlanan deneysel düzenek şematik olarak gösterilmiştir. Sistemin çalıştırılması ile yakıt pilinin akım-voltaj, akım-güç karakterizasyonları elde edilmiştir. Düzenek üzerindeki tanklar reaktant gazların depolanmasına olanak vermektedir. Basınç regülatörleri tank içindeki yüksek basıncı 10bar'a indirerek sınırlamaktadır. Kütle akış kontrol ediciler yakıt pili içine gönderilecek reaktant gazların miktarını belirlemektedir. Nemlendiriciler yakıt pili için hayati bir önem taşıyan reaktantların nemlendirilmesini sağlamaktadır. Hidrojen geri dönüşüm sistemi tüm hidrojenin hücre tarafından kullanılmasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Oksijen ve hidrojenin hücre içerisinden çıkış yaptığı bölgedeki iki adet basınç regülatörü "back pressure" olarak adlandırılan basıncı sağlamak için kullanılmıştır.



Şekil 2: Deneysel düzenek şematik gösterimi

Polarizasyon eğrisi olarak da bilinen gerilim-akım yoğunluğu değişim eğrisi; yakıt pilinden çekilen akıma bağlı olarak, gerilimin değişimini gösterir. Bu değişime göre yakıt pilinden çekilen akım arttıkça, yakıt pilinin sağlayacağı gerilim azalmaktadır. Ölçümler esnasında hidrojen ve oksijenin kütleli debileri sırasıyla 1-2 lt/dakika, anot ve katot basınçları 2 bar, nemlendirme ve hücre sıcaklıkları sırasıyla $75-80^{\circ}\text{C}$ olarak ayarlanmıştır. Hücre sıkıştırma kuvveti bir tork anahtarı vasıtasıyla sağlanmıştır.



Şekil 3. a) Hücre kesiti üzerinde sıkıştırma kuvvetinin etkisi, b) Hücrenin bileşenleri, c) Tork anahtarı ile hücreye sıkıştırma kuvvetinin uygulanması

Şekilde görüldüğü gibi bir tork anahtarı vasıtasıyla hücrenin cıvatalarına uygulanan sıkma torku, GDT yüzeyine sıkıştırma kuvveti olarak etki etmektedir. Bu kuvveti tespit edebilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$F = \frac{\tau x N}{C x D} \quad (4)$$

Burada τ uygulanan tork değeri, N kullanılan cıvata sayısı, C sürtünme katsayısı (0.2), D ise nominal çapı ifade etmektedir. Tablo 1. de uygulanan tork değerleri ve bu değer karşısında oluşan sıkıştırma kuvvetleri verilmiştir.

Tablo 1. Uygulanan tork ve karşılık gelen sıkıştırma kuvveti değerleri

	Tork (Nm)	Sıkıştırma kuvveti (kN)
T1	4	43.6
T2	8	89.3
T3	12	138.1
T4	16	182.6
T5	20	221.8

4. Deneysel Bulgular

Gözenekli bir yapıda olan GDT'nin özellikleri PEM yakıt hücresinin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Tabakanın gözeneklilik, geçirgenlik, çarpıklık, termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerinin yanı sıra, yüzeysel özellikler olan su tutma kabiliyeti ve yüzey pürüzlülüğü de önemli performans parametreleridir. Bu parametrelerin PEM yakıt pili performansına etkileri literatürde sıklıkla görülebilir [17–21].

Genelde difüzyon ile gerçekleşen gaz ürünlerin kütle transferi gözenekli ve çarpık yapı ile alakalı iken, basınç değişiminin tetiklediği kütle transferi ise tabakanın geçirgenliği ile alakalıdır.

Uygulanan sıkma kuvveti tarafından üretilen sıkıştırma etkisinden dolayı GDT gözenekliliği ve kalınlığı azalmaktadır. GDT gözenekliliğine bağlı olarak difüzyon ve geçirgenlik katsayısının azalmasına bağlı olarak kütle transfer direnci artmaktadır.

GDT'nin deforme olduğu girişe yakın bölgelerde, GDT ile katalist tabaka arasında sıvı suyun buharlaşma miktarı fazladır. Bu yüksek miktardaki buharlaşma gaz fazının düşük transfer hızından kaynaklanmaktadır. Gaz ve sıvı yüzeyindeki sürüklenme kuvvet katsayısı suyun tahliyesine yardımcı bir etki doğurmaktadır. Sıvı suyun buharlaşması küçük de olsa bir miktar reaksiyon alanını etkinleştirmektedir.

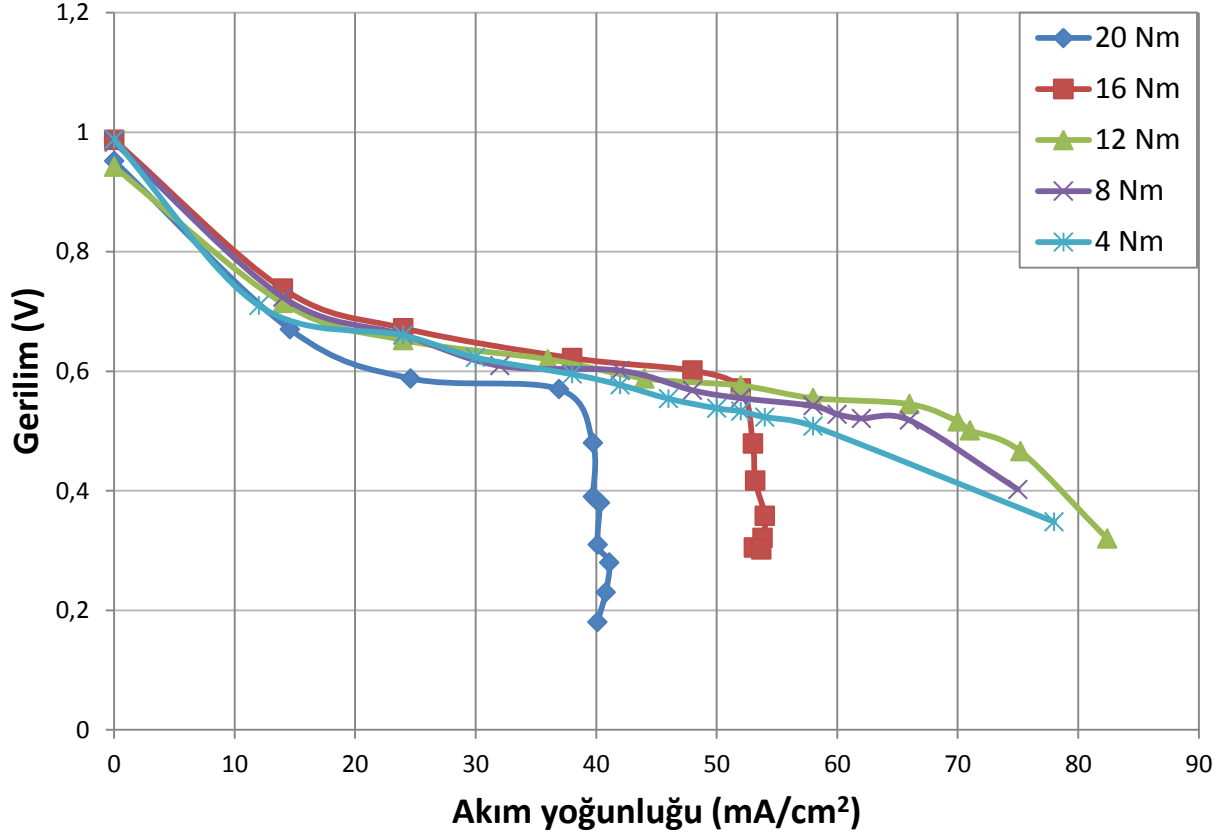
Sıkıştırma basıncının yüzey temas direnci ve gözeneklilik arasında iki zıt etkisi bulunmaktadır;

1. Yüksek sıkıştırma basıncı düşük temas direnci sağlar
2. GDT gözenekliliği artan sıkıştırma basıncı ile azalır

Bu etkilerden temas direncinin azalması hücre iç direncini dolayısıyla dirençsel kayıpları azaltırken, gözenekliliğin azalması ise sistem verimini azaltmaktadır. Yüksek temas direncine sahip omuz bölgesi için düşük sıkıştırma basınçlarında yüzey temas direnci hayati bir önem taşımaktadır. Ancak yüksek sıkıştırma basınçlarında bu tarz bir yüzey ve karbon GDT için temas direnci azalmaktadır. Bu durumda ise güç yoğunluğunun tespit edilmesinde GDT deformasyonu çok önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

Bu analizler sonucunda bir yakıt hücresi için optimum sıkıştırma basıncının uygulanması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Güç yoğunluğu artan sıkıştırma kuvveti ile direnç kayıplarının etkisinin GDL gözenekliliğinden kaynaklanan etkilerden küçük olduğu durumda azalmaktadır.

Akım yoğunluğu-güç eğrisindeki maksimum güç yoğunluğuna karşılık gelen akım yoğunluğu, dirençsel kayıp bölgesinin eğimine bağlıdır. Dirençsel kayıp bölgesinin eğimi, sıkıştırma kuvvetinin etkilediği kontak direnci ve transfer direnci tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 4. Farklı sıkıştırma basınçlarında hücrenin polarizasyon eğrisi

Şekil 4. hücrenin değişen sıkıştırma basınçları (4 - 20 Nm) altındaki polarizasyon eğrisini göstermektedir. Bu basınç değerleri 3 farklı polarizasyon bölgesi meydana getirmiştir. Şekilde görüldüğü üzere hücrenin 4 - 12 Nm e kadar sıkıştırılması performansı artırırken, daha yüksek kompresyon değerleri performansta ani düşümlere sebep olmuştur. Gözlemlenen düşümler düşük akım yoğunluğu değerlerinde (aktivasyon bölgesi) az olmasına karşın, yüksek akım yoğunluğu değerlerinde (direnç ve kütle transfer kayıpları bölgeleri) oldukça yüksektir. Güç artışı en çok 0 - 8 Nm arasında gerçekleşmiştir ve 8 - 12 Nm sıkıştırma değerleri arasındaki güç artışından daha tutarlıdır. Sıkıştırma miktarı 0-12Nm ye artarken güç yoğunluğundaki maksimum değişim kütle transfer kaybı bölgesinde gerçekleşmiştir. Bu şartlarda 5cm²'lik alandan elde edilen güç

yoğunluğu değeri 158 mW'dir ($\Delta P = [P_{2MNm^{-2}} - P_{0MNm^{-2}}] \times \text{hücre boyutu}$). 60 mA/cm² akım yoğunluğu değerinde; 4 Nm'lik her artış değeri için, sıkıştırma değerinin 0 – 8 Nm aralığında hücre voltajı yaklaşık 40 mV artarken, 8 - 12 Nm aralığında ise bu artış sadece 8 mV'ta kalmıştır.

5. Sonuç

Performans etkilerini inceleyebilmek için sıkıştırma kuvveti tek hücreli polimer elektrolit membran yakıt piline uygulanmıştır. Her sıkıştırma değeri için diğer operasyon şartları (çalışma basınç ve sıcaklığı, nemlendirme ve nemlendirme sıcaklığı, stokiyometri) sabit tutulmuş ve bu şekilde hücre voltajı ve akım yoğunluğu ölçülmüştür. Sonuçlar 12Nm sıkıştırma torkuna kadar performansın arttığını ortaya koymuştur. Dirençsel kayıp bölgesindeki gerilim artışının kütle transfer kayıp bölgesindeki artışa nazaran daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat hücre akım yoğunluğu için kütle transfer kaybı bölgesi daha fazla artış sergilemiştir. Hücrenin 0-12 Nm sıkıştırma tork değerlerinde, özgül gücündeki artış dirençsel kayıp bölgesinde 7 W/cm² iken kütle transfer kaybı bölgesinde 16 W/cm² değerindedir. Ancak bu iki bölgede sıkıştırma torku 12 Nm'den 16 ve 20 Nm değerlerine yükseltildiğinde hücre performansı oldukça düşmektedir. Direnç bölgesindeki güç azalması beklenen bir sonuç değildir. Sıkıştırma torkunun artmasıyla plakalar ile GDT arasındaki yüzey temas direncinin azalması beklenmektedir fakat yüksek tork değerlerinde plakaların sehim yaparak hücre iç direncini artırması söz konusu olduğundan performansın düştüğü düşünülmektedir. Kütle transfer bölgesindeki önemli performans düşmesinin sebebi ise GDT'nin gözenekli yapısını kaybetmesidir. Bu durum reaktantların membran üzerindeki katalist yüzeye ulaşmalarını zorlaştırmaktadır.

6. Kaynaklar

- [1] Williams M.V., Kunz H.R., Fenton J.M., J. Electrochem. Soc. 152 (2005) A635.
- [2] Rho YW, Velev OA, Srinivasan S. Mass transport phenomena in proton exchange membrane fuel cells using O₂=He, O₂=Ar, and O₂=N₂ mixtures. I. Experimental analysis. J Electrochem Soc1994;141:2084–9.
- [3] Jordan LR, Shukla AK, Behrsing T, Avery NR, Muddle BC, Forsyth M. Diffusion layer parameters influencing optimal fuel cell performance. J Power Sources 2000;86:250–4.
- [4] Rajalakshmi N., Raja M., Dhathathereyan K.S., J. Power Sources 112 (2002) 331.
- [5] Natarajan D., Nguyen T.V., AICHE J. 51 (2005) 2587.
- [6] Kınav E., "Hidrojenin ulaşımında yakıt olarak kullanılması:Hibrit elektrikli şehir içi kişisel ulaşım aracı konsepti", Yıldız Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,2007
- [7] Li H., Tang Y. et al., "A review of water flooding issues in proton Exchange membrane fuel cell", Journal of Power Sources 178(2008)103-117,Review
- [8] Santarelli M.G., Torchio M.F., Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC. Energy Conver Manage 2007;48:40–51.
- [9] Wang L., Husar A., Zhou T., Liu H., A parametric study of PEM fuel cell performances. Int J Hydrogen Energy 2003;28:1263–72.
- [10] Zhang J., Tang Y., Song C., Cheng X., Zhang J., Wang H., PEM fuel cells operated at 0% relative humidity in the temperature range of 23–120 °C. Electrochim Acta 2007;52:5095–101.
- [11] Xu H., Kunz HR., Fenton JM., Analysis of proton exchange membrane fuel cell polarization losses at elevated temperature 120 °C and reduced relative humidity. Electrochim Acta 2007;52:3525–33.
- [12] Shan-Jen C., Jr-Ming M., Sheng-Ju W., Renewable Energy 39 (2012) 250-260
- [13] Gostick J. T., Fowler W.M., Pritzker D., Ioannidis M.A. and L. M. Behra. In-plane and through-plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers. Journal of Power Sources, 162(1):228–238, 2006
- [14] Tomadakis M.M. and Robertson T.J., Viscous Permeability of Random Fiber Structures: Comparison of Electrical and Diffusional Estimates with Experimental and Analytical Results. Journal of Composite Materials, 39(2):163-188, 2005.
- [15] Barber M., Sun T. S., Petrach E., Wang X. and Zou Q., Contact mechanics approach to determine contact surface area between bipolar plates and current collector in proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources, 2008, doi:10.1016/j.jpowsour.2008.08.091
- [16] Su Z.Y., Liu C.T., Chang H.P., Li C.H., Huang K.J., Sui P.C., A numerical investigation of the effects of compression force on PEM fuel cell performance, Journal of Power Sources 183 (2008) 182–192
- [17] Kong C.S., Kim D.Y., Lee H.K., Shul Y.G., Lee T.H., J. Power Sources 108 (2002) 185–191.
- [18] Cheng X., Yi B., Han M., Zhang J., Qiao Y., Yu J., J. Power Sources 79 (1999) 75–81.
- [19] Jordan L.R., Shukla A.K., Behrsing T., Avery N.R., Muddle B.C., Forsyth M., J. Appl. Electrochem. 30 (2000) 641–646.
- [20] Jordan L.R., Shukla A.K., Behrsing T., Avery N.R., Muddle B.C., Forsyth M., J. Power Sources 86 (2000) 250–254.
- [21] Paganin V.A., Ticianelli E.A., Gonzalez E.R., J. Appl. Electrochem. 26 (1996) 297–304.