



T.C.
NIĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONTAK DİRENCİ ve SIKIŞTIRMA KUVVETİNİN PROTON GEÇİRGEN
MEMBRANLI ELEKTROLİZÖR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ve
HIZLANDIRILMIŞ ÖMÜR TESTLERİ ile PERFORMANS DÜŞÜŞLERİNİN
İNCELENMESİ

MUHAMMED SAİD ERGÖKTAŞ

Haziran 2015

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONTAK DİRENCİ ve SIKIŞTIRMA KUVVETİNİN PROTON GEÇİRGEN
MEMBRANLI ELEKTROLİZÖR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ve
HIZLANDIRILMIŞ ÖMÜR TESTLERİ ile PERFORMANS DÜŞÜŞLERİNİN
İNCELENMESİ

MUHAMMED SAİD ERGÖKTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

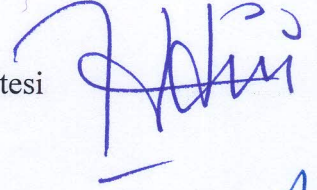
Danışman

Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET

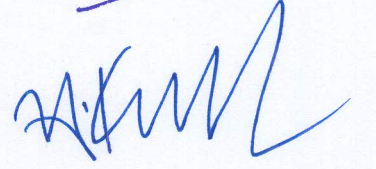
Haziran 2015

Muhammed Said ERGÖKTAŞ tarafından **Yrd. Doç Dr. Ömer Faruk SELAMET** danışmanlığında hazırlanan “**KONTAK DİRENCİ ve SIKIŞTIRMA KUVVETİNİN PROTON GEÇİRGEN MEMBRANLI ELEKTROLİZÖR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ve HIZLANDIRILMIŞ ÖMÜR TESTLERİ ile PERFORMANS DÜŞÜŞLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

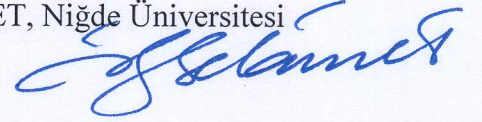
Başkan : Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN, Erciyes Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET, Niğde Üniversitesi



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Muhammed Said ERGÖKTAŞ

ÖZET

KONTAK DİRENCİ ve SIKIŞTIRMA KUVVETİNİN PROTON GEÇİRGEN MEMBRANLI ELEKTROLİZÖR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ve HIZLANDIRILMIŞ ÖMÜR TESTLERİ ile PERFORMANS DÜŞÜŞLERİNİN İNCELENMESİ

ERGÖKTAŞ, Muhammed Said

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET

Haziran 2015, 55 sayfa

Hücre bileşenleri arasında oluşan kontak direncinin ve cıvata sıkma torkunun proton geçirgen zarlı (PEM) elektrolizör hücresi performansı üzerindeki etkileri ve hızlandırılmış ömür testi ile performans düşüşleri 50 cm² aktif alana sahip PEM elektrolizör hücresi üzerinde incelenmiştir. PEM elektrolizör hücresinden en yüksek verimi elde edebilmek için homojen basınç dağılımı ve düşük kontak direnci elde edilmelidir. Farklı sızdırmazlık elemanları ve sıkıştırma torkları ile yapılan çalışmalarda en uygun basınç dağılımı, kontak direnci ve yüksek performans değerleri 10 Nm sıkıştırma torku ile silikon sızdırmazlık elemanının kullanıldığı hücrede elde edilmiştir. Sıkıştırma torku arttıkça hücre bileşenleri arasındaki temasın arttığı dolayısıyla daha homojen basınç dağılımı ve düşük kontak direnci ile birlikte performans artışı görülmüş, ancak yüksek torklarda hücre bileşenleri zarar görmeye başlamış ve performansta düşüşler görülmüştür. Hızlandırılmış ömür testlerinde ise PEM elektrolizör hücresi yüksek akım yoğunluklarında çalıştırıldığı zaman performans düşüşünün daha hızlı olmuştur.

Anahtar sözcükler: Proton Geçirgen Membranlı (PEM) Elektrolizör hücresi, kontak direnci, basınç dağılımı, sıkıştırma kuvveti, hızlandırılmış ömür testi, performans bozunumu

SUMMARY

INVESTIGATION of the EFFECTS of CONTACT RESISTANCE and CLAMPING
FORCE on the PERFORMANCE of PROTON EXCHANGE MEMBRANE
ELECTROLYZER and PERFORMANCE DEGRADATION with ACCELERATED
LIFE TESTING

ERGÖKTAŞ, Muhammed Said

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Ömer Faruk SELAMET

June 2015, 55 pages

The effects of contact resistance between cell components and bolt torque on the performance of proton exchange membrane electrolyzer (PEM) and performance degradation with accelerated life testing are investigated on 50 cm² PEM electrolyzer cell. To obtain the maximum efficiency from the electrolyzer the most homogeneous pressure distribution and the lowest contact resistance must be achieved. Different gasket materials and compression bolt torques are used during the experiments. The best performance is achieved with silicon gaskets and 10 Nm bolt torque. Increasing bolt torque results more homogeneous pressure distribution and decreasing contact resistance which increases the performance but higher bolt torques result physical deformations on cell parts resulting lower performance. The fastest performance degradation is observed when the highest current density applied during the accelerated life tests.

Keywords: Proton Exchange Membrane Electrolyzer (PEM) cell, contact resistance, pressure distribution, compression force, accelerated life testing, performance degradation

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, PEM elektrolizör hücrelerinin basınç dağılımı ve kontak direnci parametreleri farklı sızdırmazlık elemanları ve cıvata sıkma torkları ile incelenerek, en yüksek performansın elde edilebilmesi için hücre montajı esnasında uygulanması gereken cıvata sıkma torku ve hücre içerisinde kullanılacak en uygun sızdırmazlık elemanı tespit edilmiştir. Ayrıca, farklı akım yoğunlukları altında performans değişimi hızlandırılmış ömür testi metodu ile incelenmiş ve akım yoğunluklarının hücre ömrü üzerindeki etkisi tespit edilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim süresince çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk SELAMET'e şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarında tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım, Mustafa AKGÜN'e teşekkür ederim.

Bu tezi, tüm öğrenim hayatım boyunca büyük bir özveri ile maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, desteklerini sürekli üzerimde hissettiğim babama, anneme ve kız kardeşime ithaf ediyorum.

Ayrıca, 2210-C Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Tez Teşvik Bursu ile çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Hidrojenin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	1
1.2 Hidrojenin Kullanım Alanları	2
1.3 Hidrojen Üretim Yöntemleri	3
1.3.1 Hidrojenin Termal İşlemler İle Üretilmesi	4
1.3.2 Hidrojenin Biyolojik Yöntemler ile Üretilmesi	5
1.3.3 Hidrojenin Elektrokimyasal Yöntemler İle Üretilmesi	6
1.3.4 Polimer Elektrolit Elektrolizör	8
BÖLÜM II TEORİK ESASLAR	13
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR	22
3.1 Hücre Bileşenleri ve Hücre Tasarımı	22
3.2 Deneysel Düzenek	24
3.3 Basınç Dağılımı Ölçümleri ve Analizi	25
3.4 Elektrokimyasal Performans Ölçümleri	28
3.5 Kontak Direnci Ölçümleri	28
3.6 Hızlandırılmış Performans Ölçümleri ile Ömür Testi	31
BÖLÜM IV DENEYSEL SONUÇLAR	32
4.1 Basınç Dağılımı Ölçüm ve Analiz Sonuçları	32

4.2 Elektrokimyasal Performans Ölçüm Sonuçları.....	36
4.3 Kontak Direnci Ölçüm Sonuçları	40
4.4 Hızlandırılmış Performans Ölçümleri ile Ömür Testi Sonuçları	43
BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	46
KAYNAKLAR	48
ÖZ GEÇMİŞ.....	54
TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN ESERLER.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Hidrojen Molekülü Atomik Yapısı (College of Desert, 2001)	1
Şekil 2.1. Tipik bir PEM elektrolizör hücresindeki kayıplar	14
Şekil 3.1. 50 cm ² PEM elektrolizör hücresi CAD çizimi ve montajlanmış hali	23
Şekil 4.1. Silikon sızdırmazlık elemanı için a) basınç filmleri b) 3B basınç profilleri ...	33
Şekil 4.2. PTFE basınç dağılımı	34
Şekil 4.3. EPDM basınç dağılımı	34
Şekil 4.5. Silikon, EPDM ve PTFE için 15 Nm sıkma tork değerinde basınç dağılımı karşılaştırmaları a) basınç filmleri, b) 2 boyutlu basınç dağılımları, c) 3 boyutlu basınç profilleri	36
Şekil 4.6. Silikon sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma torkları altında performans grafikleri	37
Şekil 4.7. PTFE sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma torkları altında performans grafikleri	38
Şekil 4.8. EPDM sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma torkları altında performans grafikleri	39
Şekil 4.9. 15 Nm tork değeri için performans karşılaştırması	40
Şekil 4.10. Sızdırmazlık elemanları için farklı tork değerleri altında kontak direnci ölçümleri	41
Şekil 4.11. 0,5A/cm ² akım yoğunluğunda EPDM sızdırmazlık elemanı kullanılarak cıvata sıkma torku ile kontak direncini ve performans değişimi	42
Şekil 4.12. Farklı sıkıştırma basınçları altında kontak direnci ölçümleri	43
Şekil 4.13. a) 0,2 A/cm ² b) 0,4 A/cm ² c) 0,6 A/cm ² d) karşılaştırmalı performans bozunum grafikleri	45

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Sızdırmazlık elemanları a) EPDM, b) Silikon, c) PTFE	24
Fotoğraf 3.2. Yüksek sıkma torkundan dolayı plastik deformasyona uğramış a) karbon kağıt, b) gözenekli titanyum.....	29
Fotoğraf 3.3. Hücrenin ortasından preslenerek kontak direncinin ölçüldüğü deneysel düzenek	30

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Hidrojenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (College of Desert, 2001; Yamin, 2007)	2
Tablo 1.2. Elektroliz Teknikleri ve Karşılaştırılmaları (Smolinka, 2012).....	6
Tablo 1.3. Elektrolizörlerde gerçekleşen reaksiyonlar (Tsiplakides, 2012)	7
Tablo 3.1. Sızdırmazlık Elemanları ve Akış Alanlarına Ait Kalınlıklar	24

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Açıklama

H^+	Hidrojen iyonu
H_2	Hidrojen atomu
e^-	Elektron

Kısaltmalar

Açıklama

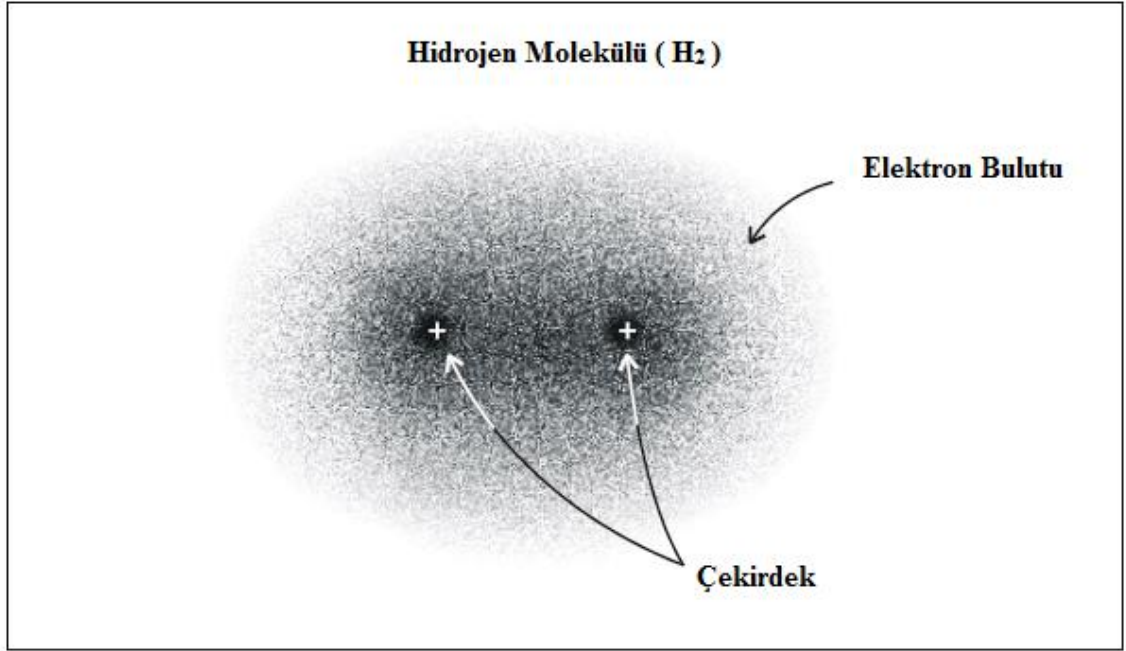
PEM	Proton exchange membrane
MEG	Membran elektrot grubu
GDT	Gaz difüzyon tabakası
BP	Bipolar plaka
HTPEMFC	High temperataure proton exchange membrane fuel cell

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Hidrojenin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Hidrojen oda sıcaklığında gaz halinde bulunan renksiz, kokusuz, tatsız ve yanıcı bir moleküldür. İki hidrojen elementinden oluşan bu molekül kimyasal olarak H - H şeklinde gösterilir ve H₂ şeklinde sembolize edilir. Periyodik tablonun ilk elementi olan hidrojen bir ametaldir ve sahip olduğu bir proton ve bir elektron ile 1,00794 g/mol atom ağırlığına sahiptir.



Şekil 1.1. Hidrojen Molekülü Atomik Yapısı (College of Desert, 2001)

Hidrojenin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1.1. de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Hidrojenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (College of Desert, 2001; Yamin, 2007)

Özellik	Hidrojen
Yoğunluk - 1 atm ve 300 K' de (kg/m^3)	0,082
Erime Noktası (K)	14 (-259°C)
Kaynama Noktası (K)	20 (- 253°C)
Havadaki stokiometrik oranı (% Hacim)	29,53
300 K' de Kinematik Viskozitesi (mm^2/s)	110
Oktan Sayısı	130
Alt Isıl Değeri (Mj/kg)	119,7
300K' de Isıl İletkenliği (mW/mK)	182,0
Normal Şartlarda Havadaki Difüzyon Katsayısı (cm^2/s)	0,61
Stokiometrik yakıt/hava kütle oranı	0,029
Alevlenme Limiti (% Hacim)	4 - 75
Minimum Ateşleme Enerjisi (mJ)	0,02
Normal Şartlarda Laminer Alev Hızı (m/s)	1,9
Adyabatik Alev Sıcaklığı (K)	2318
Otomatik Ateşlenme Sıcaklığı (K)	858

1.2 Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen genellikle yakıt pilleri ile birlikte kullanılmaktadır. Yakıt pilleri ise uygulama alanı olarak geniş bir yelpazeye sahiptir. Yakıt pilleri araçlarda içten yanmalı motorlar yerine kullanılarak elektrik motorlarının güç beslemelerinde, bir binanın, işletmenin ya da alanın aydınlatma, ısıtma vb. enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında, askeri ve endüstriyel alanda enerji ihtiyacının karşılanması ya da yedek enerji sistemlerinde kullanılabilir. Kısacası enerji ihtiyacının olduğu her alanda yakıt pilleri kullanılabilir. Ayrıca enerji alanında türbin soğutmalarında da hidrojen gazı kullanılabilir. Enerji sektörü haricinde ise metal endüstrisinde ısıtma işlemi ve tavlama işlemlerinde, yarı iletkenlerin üretilmesi esnasında, kimya sektöründe gaz analiz cihaz kolonlarında yüksek saflıkta taşıyıcı gaz olarak, gıda sektöründe doymuş

yağların üretilmesi işlemi için ve meteoroloji sektöründe hava tahmin balonlarının havalandırılması gibi çeşitli sektörlerde farklı amaçlar için kullanılabilmektedir.

1.3 Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen tabiatta saf moleküler halde bulunmayan ve genellikle oksijen ve karbon gibi diğer elementler ile bileşik halde bulunabilen bir elementtir. Hidrojenin kullanılabilmesi için ise bu bileşiklerden ayrıştırılması gerekir. Bu ayrıştırma işlemi hidrojenin özelliklerden dolayı zor ve maliyetli bir işlemdir. İşlem türüne göre termal, elektrokimyasal ve biyolojik olmak üzere 3 ana hidrojen üretim yöntemi vardır ve yöntemler de kendi aralarında yapılan işlem türüne göre çeşitli yöntemlere ayrılırlar. Bu yöntemler genel olarak;

*** Termal İşlemler**

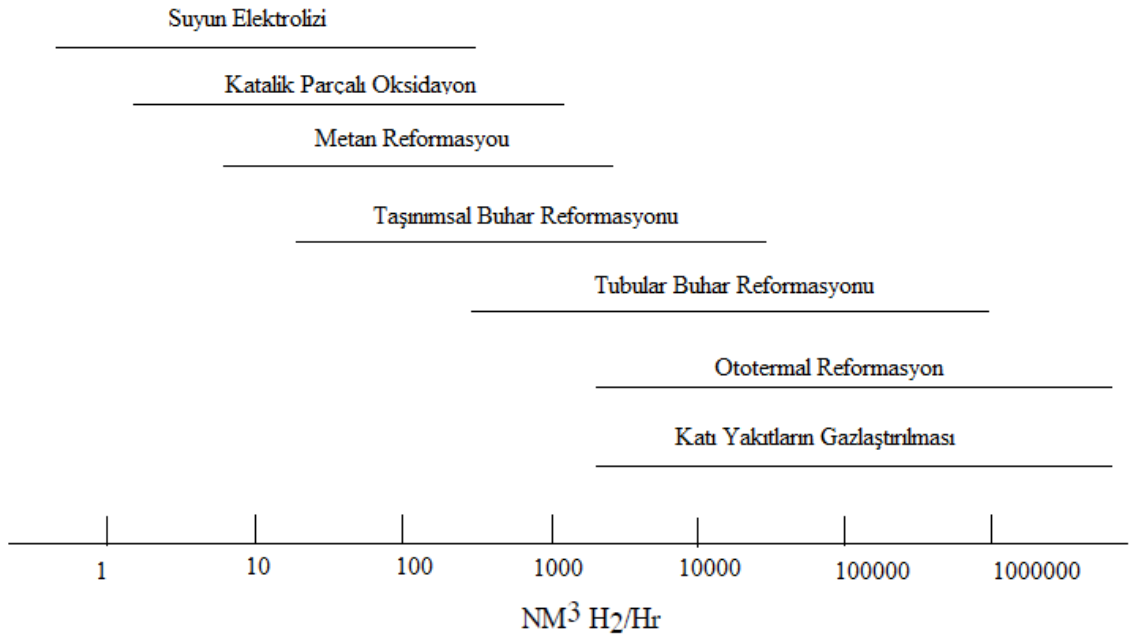
- Doğalgazın Buhar Reformasyonu
- Suyun Termokimyasal Ayrıştırılması
- Kömür ve Biokütlenin Gazlaştırılması

***Biyolojik**

- Foto Biyolojik Yöntem
- Anaerobik Öğütme
- Mikroorganizmaların Fermantasyonu

*** Elektrokimyasal İşlemler**

- Suyun Elektrolizi
- Suyun Foto Elektrokimyasal İşlenmesi



Şekil 1.2. Üretim teknolojisine göre hidrojen üretim kapasitelerinin karşılaştırılması (Lipman, 2011)

Bu yöntemlerden en yaygın kullanılanları inceleyecek olursak;

1.3.1 Hidrojenin Termal İşlemler İle Üretilmesi

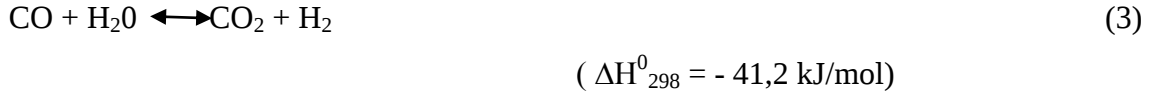
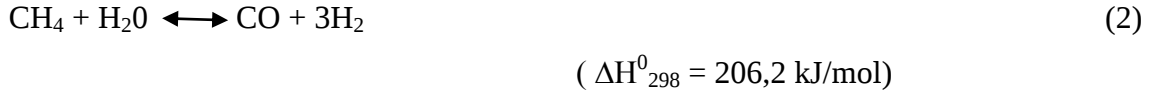
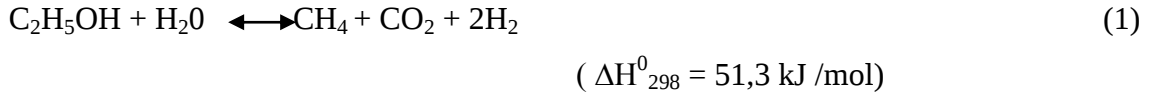
Isı enerjisi kullanılarak hidrojenin üretildiği yöntemdir. Kullanılan kaynak ve yapılan işleme göre kendi arasında çeşitli türleri vardır.

1.3.1.1. Doğalgazın Buhar Reformasyonu

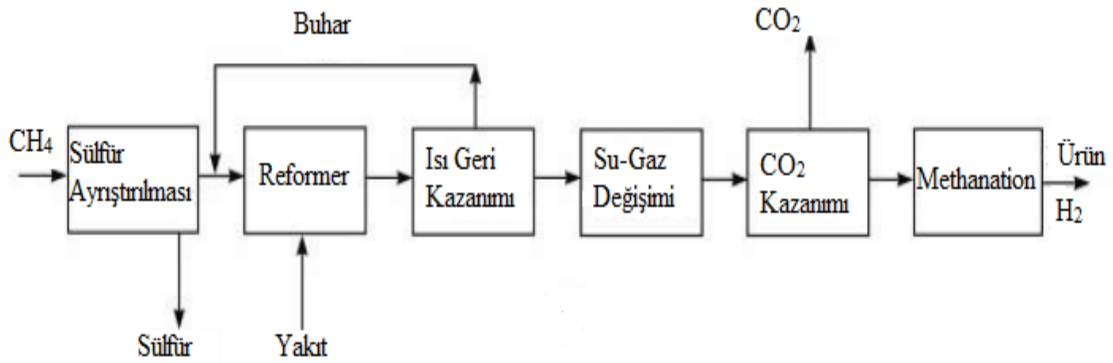
Doğalgazın (yaygın olarak metan CH_4) katalist olarak kullanıldığı ve buhar ile reaksiyona girmesi sonucu H_2 ve CO_2 üretilen bir yöntemdir. Üretilen hidrojenin saflık değeri % 97-98 aralığındadır. Günümüzde kullanılan hidrojenin büyük kısmı bu yöntemle üretilmektedir. Bu yöntemin ilk kurulum maliyeti yüksektir.

Bu yöntemde doğalgazın yanı sıra etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) de yaygın olarak kullanılır.

Gerçekleşen reaksiyonlar;



(1) ve (2) nolu reaksiyonlarda metan ve etanolün buhar reformasyonu ile hidrojen üretimi gerçekleşirken (3) nolu reaksiyonda karbon monoksit gazı ve su arasında su-gaz değişimi reaksiyonu ile hidrojen ve karbondioksit üretimi reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. (3) nolu reaksiyon zehirli olan karbon monoksitin karbondioksite dönüştürülmesi için önemli bir reaksiyondur.



Şekil 1.3. Doğalgazın Buhar Reformasyonu Şematik Gösterimi (Song, 2003)

1.3.1.2. Kömür ve Biokütle' nin Gazlaştırılması ile Hidrojen Üretimi

Kömür ya da diğer hidrokarbonların (biokütle) kısmi oksidasyonu ya da gazlaştırılması olarak adlandırılan yöntem ile hidrojen üretilmesidir. Hidrokarbonlar stokiometrik orandan daha düşük oksijen ile reaksiyona girerek 1200° C - 1350° C de karbon monoksit ve hidrojen üretebilirler. (Pre Investigation of Water Electrolysis, PSO-F&U 2006-1-6287)

1.3.2 Hidrojenin Biyolojik Yöntemler ile Üretilmesi

Hidrojenin fosil kaynaklardan üretilmesine alternatif olarak ortaya çıkmış bir yöntemdir. Bu yöntemde algler ve mikroorganizmalar gibi biyolojik faktörler güneş ve

ışık enerjisi gibi kaynaklar ile birlikte kullanılarak hidrojen üretimi gerçekleşir. Biyolojik yöntemler kendi içerisinde dolaylı ve dolaysız biofotoliz, fermentasyon ve foto biyolojik gibi çeşitli yöntemleri vardır.

1.3.3 Hidrojenin Elektrokimyasal Yöntemler İle Üretilmesi

Hidrojenin elektrokimyasal yöntemle üretilmesi genel anlamda elektroliz yöntemi ile hidrojen üretilmesi olarak adlandırılabilir. Bu yöntemde hidrojen molekülü içeren bileşiklere elektrik akımı verilmesi sonucu bu bileşiklerden hidrojenin ayrıştırılması temel prensibine dayalı bir hidrojen üretimi söz konusudur.

1.3.3.1 Elektroliz Teknikleri ve Karşılaştırılmaları

Elektroliz denildiğinde akla ilk olarak suyun elektrolizi gelmektedir. Elektrolizör çeşitlerine bakıldığında zamanda reaktant olarak genellikle su kullanıldığı görülmektedir. Elektroliz işlemi temel olarak H_2O molekülüne elektrik akımı verilip H_2 ve O_2 gazlarının üretilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Çevreci ve elektroliz çeşidine göre zararlı gaz emisyonu olmayan bir hidrojen üretim yöntemidir.

Elektroliz çeşitleri hakkında genel bilgi ve karşılaştırmaları Tablo 1.2.'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Elektroliz Teknikleri ve Karşılaştırmaları (Smolinka, 2012)

Elektrolizör Çeşidi	Alkali	Asit	Polimer Elektrolit	Katı Oksit
Yük Taşıyıcısı	OH^-	H^+	H^+	O^{2-}
Reaktant	Su	Su	Su	Su, CO_2
Elektrolit	Sodyum ya da Potasyum Hidroksit	Sülfürik ya da Fosforik Asit	Polimer	Seramik
Elektrot	Nikel	Pt Grafit, Polimer	Pt Grafit, Polimer	Nikel, Seramik
Sıcaklık	80° C	150° C	80° C	850° C

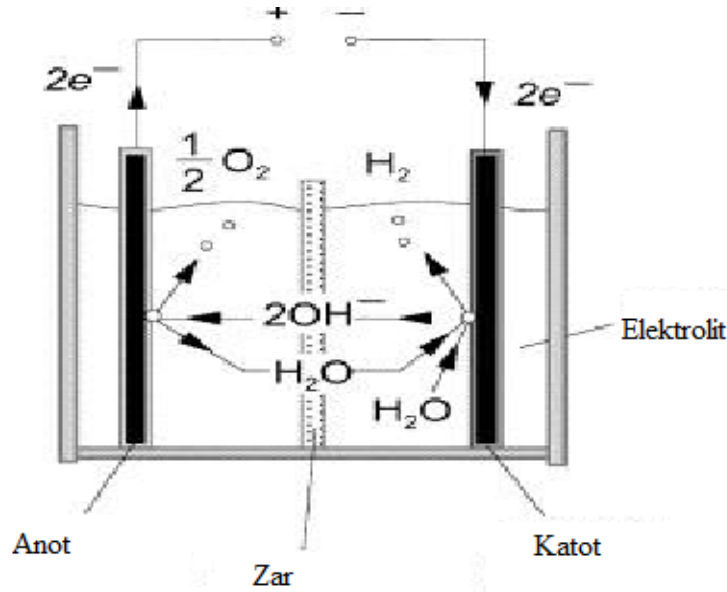
Bu elektrolizör sistemlerinde gerçekleşen reaksiyonlar ise Tablo 1.3.' de verilmiştir.

Tablo 1.3. Elektrolizörlerde gerçekleşen reaksiyonlar (Tsiplakides, 2012)

Elektrolizör Çeşidi	Katot Reaksiyonu	Anot Reaksiyonu
Alkali	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{OH}^- \rightarrow 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Polimer Elektrolit	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Katı Oksit	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$	$\text{O}^{2-} \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
Asit	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2 + 2\text{e}^-$

Elektrolizör hücrelerinde gerçekleşen toplam reaksiyon ise $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$ şeklindedir.

Elektrolizör sistemlerinin çalışma prensibi örnek olarak Şekil 1.4' de gösterilmiştir.

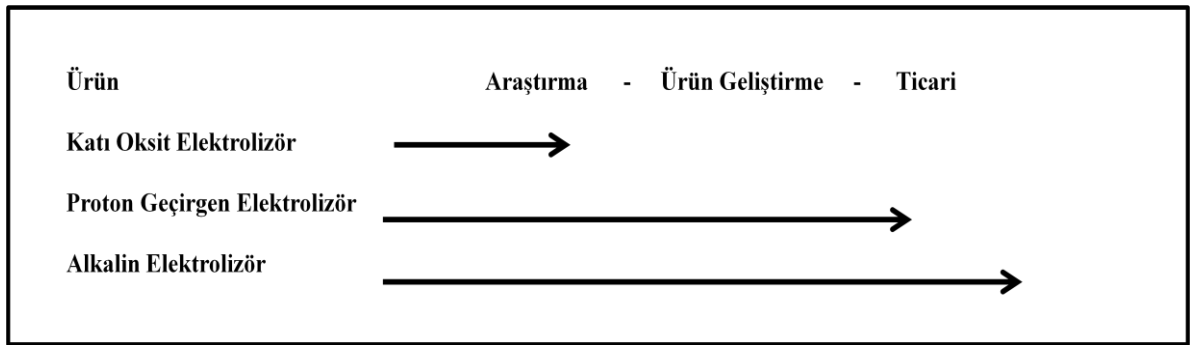


Şekil 1.4. Örnek elektrolizör çalışma prensibi (Carmo vd., 2013)

Bu elektrolizör çeşitleri arasında en gelişmiş olanı ve ticari kullanıma diğerlerinden daha önce sunulmuş olanı alkali elektrolizörlerdir. Alkali elektrolizörler polimer elektrolit ve katı oksit elektrolizörlerden farklı olarak katı değil de sıvı elektrolit

kullanırlar. Son zamanlarda alkali elektrolizör üzerine yapılan çalışmalar azalmış olup çalışmalar daha çok hidrojen verimliliği ve saflığı daha yüksek olan polimer elektrolit elektrolizörler ile daha yeni bir teknoloji sayılabilecek katı oksit elektrolizörler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Elektrolizör çeşitleri üzerindeki çalışma ve ürün geliştirmelerine ilişkin karşılaştırma Şekil 1.5' de verilmiştir.



Şekil 1.5. Elektrolizör Çeşitlerinin Gelişmişliklerinin Karşılaştırılması (Smolinka, 2012)

Elektroliz işlemi sırasında kullanılan elektrik akımı güneş panelleri yardımı ile güneş enerjisinden de sağlanabilir. Bu şekildeki sistemleri birleştirilmiş sistemler olarak adlandırabiliriz. Birleştirilmiş sistemlerin en önemli avantajı gereken elektrik ihtiyacını şebeke yerine doğrudan enerji kaynağı olan güneşten temin etmesinden dolayı daha çevreci bir yöntem olmasıdır.

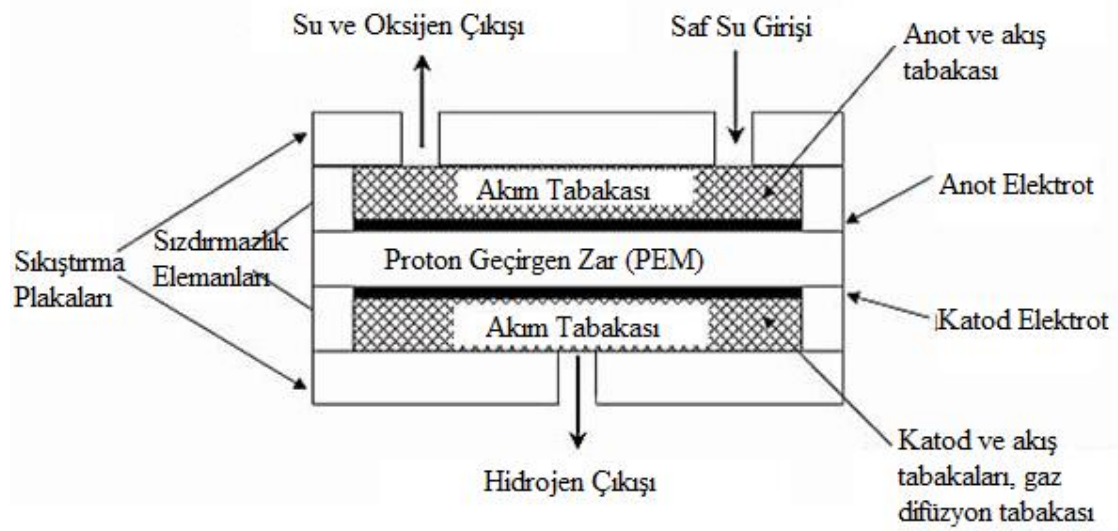
Tez çalışma konusu olan polimer elektrolit ya da diğer bir deyişle proton geçirgen zar elektrolizörler ayrı bir başlık altında detaylı olarak incelenecektir.

1.3.4 Polimer Elektrolit Elektrolizör

Polimer elektrolit ya da proton geçirgen zar (PEM) elektrolizör olarak da adlandırılan bu sistemler pozitif yüklü protonu geçirebilen membran (zar) olarak da isimlendirilebilen bir polimer elektrolit kullanarak su molekülünü yüksek verimlilik ve saflıkta hidrojen ve oksijen moleküllerine ayırabilen geleneksel alkali elektrolizörlere göre daha kompakt yapıda elektroliz sistemleridir.

1.3.4.1. PEM Elektrolizörlerde Kullanılan Malzemeler

PEM elektrolizör hücrelerinin temel bileşenleri paslanmaz çelik malzemeden imal edilen sıkıştırma plakaları, korozyona olan dayanımları ve yüksek iletkenliklerinden dolayı akım tabakası olarak titanyum malzeme, EPDM, PTFE ve silikon benzeri malzemelerden sızdırmazlık elemanları, karbon kağıt ya da gözenekli titanyumdan oluşan gaz difüzyon tabakası, reaksiyon gerçekleştiği katalizör tabakalarını üzerinde barındıran Nafion tabanlı membran (polimer zar) ve yine korozyona karşı dayanımından dolayı titanyum malzemeden oluşan akış tabakaları şeklinde sıralanabilir.



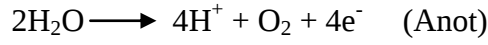
Şekil 1.6. PEM Elektrolizör Bileşenleri (Smolinka, 2012)

Akış tabakası olarak kullanılan malzemeler elektriksel iletkenliği artırmak ve korozyon ihtimalini azaltmak için genellikle platin (Pt) kaplanırlar, bu ise PEM elektrolizörlerde maliyeti artıran bir dezavantajdır.

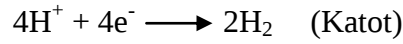
1.3.4.2. PEM Elektrolizörlerin Çalışma Yapısı

PEM elektrolizörler temel olarak elektrik akımı uygulaması ile su molekülünün hidrojen ve oksijen moleküllerine ayrılması prensibi ile çalışırlar. Elektrik akımı doğrudan şebekeden sağlanabileceği gibi güneş panelleri yardımı ile foto elektrokimyasal olarak adlandırılan sistemler ile de sağlanabilir. Bu şekildeki sistemler sıfır emisyona sahip hidrojen üreten sistemlerdir.

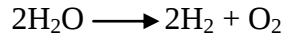
Su PEM elektroliz hücresine anot tarafından verilir. Burada su molekülüne elektrik akımı verilir ve anot tarafında;



reaksiyonu gerçekleşir. Elektronlarından ayrılan H^+ iyonu sadece proton geçirme özelliği olan ve "*proton geçirgen zar*" tipi elektrolizöre adını veren zardan katot tarafına geçer. Elektronlar bu zardan geçemez. Sudan ayrılan oksijen ise tekrar anot tarafından kullanılmayan su ile birlikte hücre dışına atılır. Katot tarafına geçen H^+ iyonları burada elektronları ile birleşerek katotta H_2 çıkışı gerçekleşir. Katot tarafında gerçekleşen reaksiyon ise;

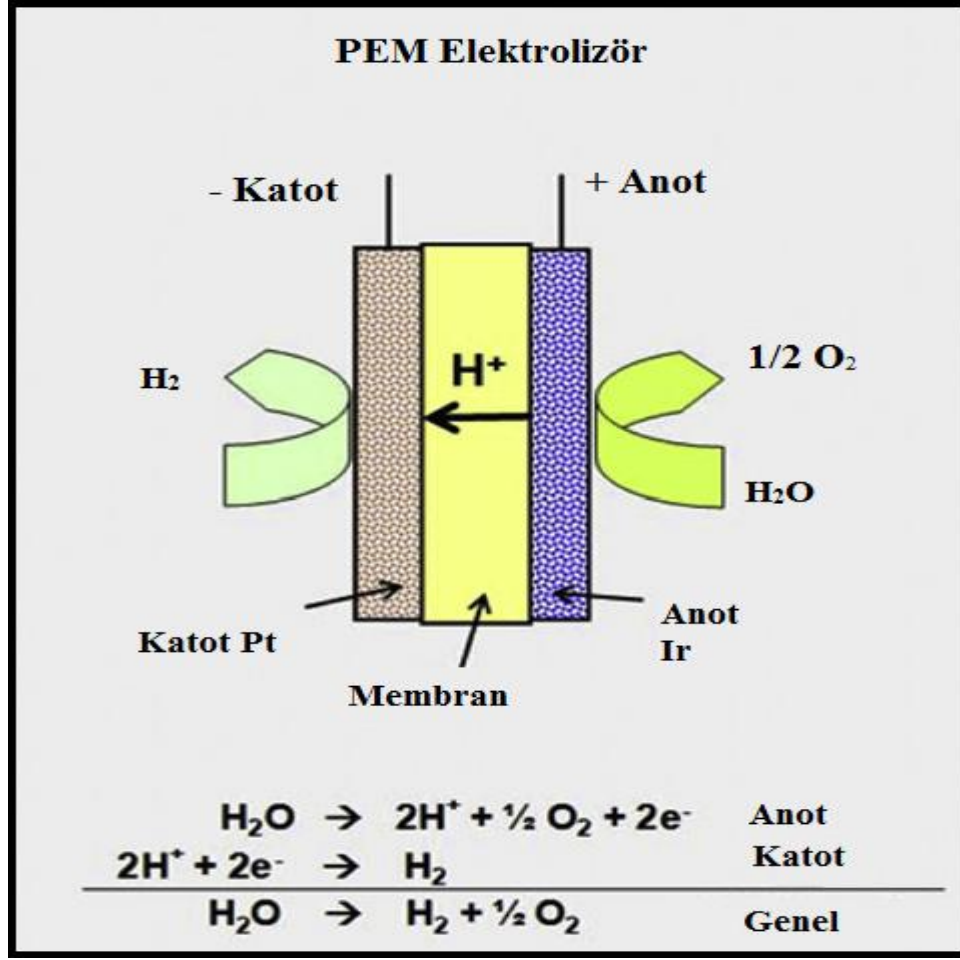


Bu iki reaksiyon birleştirildiği zaman ise hücre genel reaksiyon denklemi;



şeklinde olacaktır.

PEM elektrolizörün çalışma şekli Şekil 1.7' de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. PEM Elektrolizör Çalışma Prensibi (Millet vd., 2009)

1.3.4.3. PEM Elektrolizin Başlıca Avantajları

Diğer hidrojen üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığı zaman PEM elektroliz ile hidrojen üretmenin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek performans ile çalışmaları (> %85-90 verimlilik),
- Herhangi bir yardımcı elemana ihtiyaç yüksek basınçta hidrojen ve oksijen üretebilmeleri,
- Yüksek saflıkta hidrojen ve oksijen üretebilmeleri (%99,999),
- Diğer yenilenebilir ve temiz enerji sistemleri ile entegre edilerek zararlı gaz emisyonu olmadan, çevreye duyarlı bir şekilde hidrojen ve oksijen üretebilmeleri,
- Asit ve bazlar gibi tehlikeli maddeler içermemeleri,
- Kompakt bir tasarıma sahip olmaları.

Çeşitli firmalar tarafından üretilen PEM elektrolizör sistemleri Şekil 1.8' de görülebilmektedir.



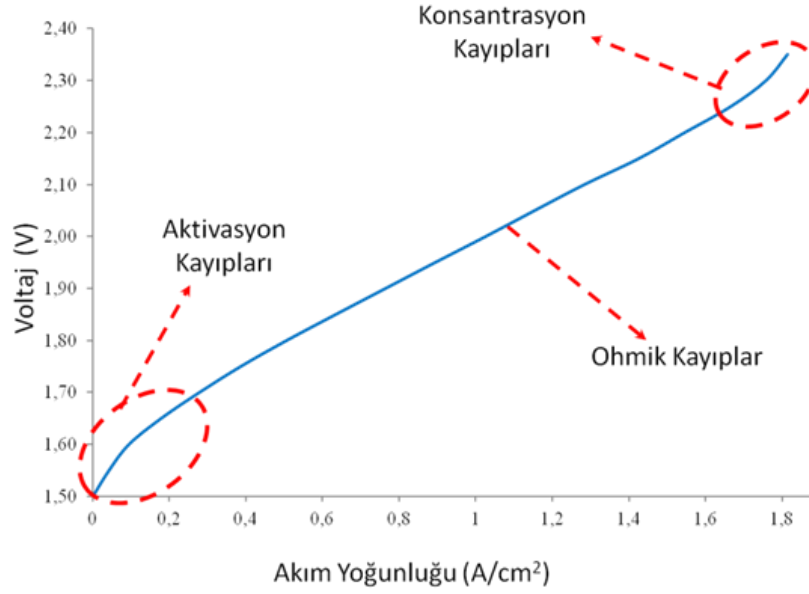
Şekil 1.8. Farklı firmalar tarafından geliştirilen ve ürün haline dönüştürülen PEM elektrolizörler (Smolinka, 2012)

BÖLÜM II

TEORİK ESASLAR

PEM elektrolizörlerin performanslarını etkileyen birçok etken vardır. Bunlardan birisi de hücrenin/yığının doğru montajlanmasıdır. PEM elektrolizör hücresinin montajı sırasında cıvatalara uygulanan sıkıştırma kuvveti hücre bileşenlerinin bir arada kalmasını sağlar. Ancak bu kuvvetin düşük ya da yüksek olması hücre bileşenlerinin birbirlerine olan temasını etkileyebilir. Sıkıştırma kuvveti kontak direncini etkileyen ana sebeplerdendir. Kontak direncinin yüksek olması ohmik kayıpları artırdığı için hücre performansının düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle öncelikli olarak bu sıkıştırma kuvvetinin optimize edilmesi gerekmektedir. Sıkıştırma kuvvetinin optimize edilmesi ile daha yüksek performans ve uzun ömre sahip PEM elektrolizör hücreleri geliştirilebilmektedir.

PEM elektrolizörlerde gerçekleşen kayıplar 3 ana grup altında toplanabilir; aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıplar. PEM yakıt pili ve elektrolizör gibi elektrokimyasal sistemlerin ilk çalıştırılmaları esnasında reaksiyonların başlaması için bir miktar enerji gereklidir, bu esnada gerçekleşen kayıplar aktivasyon kayıplarıdır. Konsantrasyon kayıpları ise reaksiyona girenlerin katalizör tabakasına yeterince ulaştırılamaması veya ürünlerin katalizör tabakalarından zamanında uzaklaştırılamaması sonucu reaksiyon için gerekli reaktantın sağlanamamasından kaynaklanan kayıplardır. Ohmik kayıplar hücrelerin elektriksel olarak iletken bileşenlerindeki iyonik ve elektriksel dirençlere bağlı olarak oluşmaktadır. Doğru montajlanmış yeni bir hücredeki ohmik kayıpların en büyük sebebi membran üzerindeki iyonik yüklerden kaynaklanmaktadır. Bunun dışında hücre bileşenlerinin öz dirençlerinin yüksek olması ya da korozyon vb. deformasyonlardan dolayı yüksek dirençlere sebep olmaları, membran katalizör tabakasındaki üçlü faz bölgesinin efektif kullanılamaması gibi bazı sebeplerden dolayı ohmik kayıplar artmaktadır. Ayrıca hücrenin yeterince ve homojen sıkıştırılamamasından kaynaklanan hücre bileşenleri arasındaki temas noktalarının yetersiz olması ya da bu temasın homojen olmaması da ohmik kayıpları artıran önemli etkenlerdendir. Şekil 2.1' de ilgili kayıplar ve gerçekleştikleri alanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Tipik bir PEM elektrolizör hücresindeki kayıplar

Literatürde PEM elektrolizörlerde sıkıştırma kuvveti ve etkilerine dair bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak benzer elektrokimyasal sistem olması ve elektrolizöre göre tersinir olarak çalışmasından dolayı yakıt pilleri üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Hücre montajı esnasında uygulanan sıkıştırma kuvvetinin hücre içi basınç dağılımına etkileri basınca duyarlı filmler (Wen vd., 2009; Wang vd., 2008; Ous ve Arcoumanis, 2007) ve elektronik basınç sensörleri (Gatto vd., 2011; Montanini vd., 2011) kullanılarak incelenmiştir. Hücre içi basınç dağılımının yeterli miktarda ve homojen olması yüksek performans için bir zorunluluktur. Yetersiz sıkıştırma kuvveti ile montajı yapılmış ve hücre bileşenleri arasındaki basınç dağılımının homojen olmamasına, aktif alan boyunca kontak noktalarının sayısının azalmasına, katalizör tabakasının efektif kullanılamamasına ve aynı çalıştırma akım yoğunluğunda daha yüksek gerilim çekmesine neden olmaktadır (Selamet vd., 2013). Gatto vd. (2011) hücre performanslarını farklı cıvata sıkma tork değerleri ve akım yoğunluklarında ölçmüşler ve sızdırmazlık elemanına bağlı olarak en uygun sıkma tork değerinin 9-11 Nm arasında olduğunu belirlemişler. Hücre performansları cıvata sıkma torku arttıkça belirli bir değere kadar artmakta ancak bir değerden sonra aşırı sıkışmaya bağlı olarak hücre içi kütle transfer sınırlamalarından dolayı düştüğünü rapor etmişlerdir (Wen vd., 2009).

Sıkıştırma kuvvetinden en çok etkilenen parametreler, aktif alan üzerindeki basınç dağılımı, anot ve katot bölmelerindeki sıvı-gaz iki fazlı akışı, kontak direnci ve kütle transferi olarak belirlenmiştir. Wen vd. (2009) faklı cıvata konfigürasyonuna sahip tek hücreli PEM yakıt pili ve 10 hücreli yakıt pili yığını üzerinde yaptıkları çalışmalarda artan sıkıştırma kuvvetinin hücre performansına olumlu etkilediğini tespit etmişlerdir. Performanstaki iyileşmeyi, hücre içi basınç dağılımındaki homojenliğe ve kontak direncinin düşmesine bağlamışlardır. Tan ve arkadaşları ise sıkıştırma için uygulanan tork ile sızdırmazlık elemanının sıkışması arasında matematiksel bir bağlantı kurarak sayısal bir çalışma yapmışlar ve daha sonra bu çalışmalarını deneysel olarak doğrulamışlar (Tan vd., 2007). Yüksek sıkıştırma kuvvetleri membran elektrot grubu (MEG) ve gaz difüzyon tabakası (GDT) gibi hassas hücre bileşenlerinin zarar görmesine dahası plastik deformasyona uğramasına sebep olabilmektedir (Lua vd., 2011). Sıkıştırma kuvvetinin GDT üzerine etkisinin incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır (Lee vd., 1999; Ge vd., 2006; Lin vd., 2008; Yim vd., 2010; Radhakrishnan ve Haridos, 2011; Chang vd., 2007). Bu çalışmalarda aşırı sıkıştırma kuvvetinin hücre performansını olumsuz yönde etkileyecek şekilde GDT üzerinde fiziksel kusurlara, GDT gözeneklilik oranının azalmasına ve dolayısıyla da iki fazlı akışta sorunlara yol açtığı rapor edilmiştir.

Kontak direnci üzerine yapılan çalışmalarda ise hücre üzerine etkiyen kuvvet arttıkça hücre bileşenleri arasındaki temas noktalarının sayısının arttığı ve buna bağlı olarak temas yüzeyi arttığı için hücre bileşenlerinin ara yüzeylerindeki kontak dirençlerinin düştüğü gözlemlenmiştir (Zhang vd., 2006; Netwall vd., 2013; Mishra vd., 2004; Ismail vd., 2013; Nitta vd., 2008). Kontak direncinin düşmesi ohmik kayıpları azaltacağı için hücre performansının iyileşmesini sağlamaktadır. Sıkıştırma kuvvetinin etkileri özetlenecek olursa; sıkıştırma kuvvetinin artması kontak direncini düşürdüğü için performansını arttırmaktadır, ancak yan etki olarak GDT gözenekliliği azaltmakta, geçirgenliği düşmekte ve belirli bir değerden sonra performansın düşmesine neden olabilmektedir. Belirli kuvvet değerlerine kadar kontak direncinin düşmesi performans üzerinde baskın parametre iken bu değer üzerinde GDT'sının geçirgenliğinin azalması nedeniyle kütle transferi performans üzerinde baskınlık kazanmakta ve performans düşmesi gerçekleşmektedir. Bu sebeple optimum sıkıştırma kuvvetinin belirlenmesi gerekmektedir.

Ayrıca, deneysel çalışmaların sonuçları ile örtüşen bir çok sayısal çalışmalarda yapılmıştır (Su vd., 2008; Taymaz ve Benli, 2010; Mikkola vd., 2009; Lee vd., 2005; Xing vd., 2010; Zhou vd., 2007; Ahmed vd., 2008; Zhou vd., 2011). PEM elektrolizör hücrelerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi de elektrolizör hücrelerinin çalışma ömürleri boyunca performanslarında görülen düşüştür. Bu performans düşüşü verimi azalttığı gibi tüketilen enerji miktarının artması ile de zaman içerisinde işletme maliyetlerini de artırmaktadır. Halihazırda üretim maliyetleri yüksek olan bu sistemlerinin işletme maliyetlerinin de zamanla artması büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca performans düşüşü ve elektrolizör tükettiği enerji miktarının artması hücrenin toplam kullanım ömrünü de olumsuz yönde etkilemektedir.

PEM elektrolizör hücrelerinin performanslarında meydana gelen bu düşüşler ve nedenleri çeşitli çalışmalar ile incelenmiştir. Bu çalışmalar hücrelerin uzun süre çalıştırıldıkları ömür testleri, hızlandırılmış ömür testleri ve bu testler esnasında hücre performansını etkileyecek şekilde değişime uğramış, bozulmuş hücre bileşenlerinin incelenmelerinden oluşmaktadır. PEM elektrolizör hücrelerinde zamanla meydana gelen performans düşüşlerinin sebeplerini bulmak daha uzun ömürlü sistemler imal edebilmek açısından önem arz etmektedir. Ayrıca hücre bileşenlerinde meydana gelen bozulmalara ve kirlenmelere nelerin sebep olduğu belirlenip bu sorunlar giderildiğinde başta maliyetleri yüksek olan MEG ve GDT gibi hücre bileşenlerinin ömürleri uzatılmış olacaktır ve aynı zamanda üretilen hidrojen saflığı/kalitesi zaman içerisinde korunmuş olacaktır.

PEM yakıt pilleri PEM elektrolizörler ile karşılaştırıldıklarında benzer elektrokimyasal özelliklere sahiptirler ve birbirlerine göre tersinir olarak çalışırlar. Bu sebepten literatür taraması PEM elektrolizörlerin yanı sıra PEM yakıt pillerini de içermektedir. Literatürde yer alan çalışmaları 3 başlık altında toparlayabiliriz;

i) Performans ve Hücre Bileşenlerinde Meydana Gelen Bozulmalar;

Elektrolizör hücre performansı ve bileşenlerinde meydana gelen bozulmalar farklı sebeplerden kaynaklanabilir. Bu sebepler karakterlerine göre 3 grupta toplanabilir; mekanik, kimyasal ve ısıl bozulmalar.

** Mekanik Bozulmalar;*

Mekanik bozulmalar genellikle hücre bileşenlerinde meydana gelen çatlama, kırılma, delinme vb. fiziksel bozulmalardır. Bu bozulmalara ana sebepler olarak membranda meydana gelen florite kaybı, MET ve BP arasında homojen olmayan ve yetersiz basınç bağılımı ve membranın kırılma hızına yol açan yetersiz nemlendirme gösterilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık ve basınç bozulma hızlarının artmasına sebep olmaktadır (Collier vd., 2006).

** Kimyasal ve Elektrokimyasal Bozulmalar;*

Kimyasal bozulmalara ana sebep olarak membranın anot ve katot taraflarında gerçekleşen oksitleyici ve indirgenme reaksiyonların etkilerine mazur kalması ve oluşan peroksi ve hidroperoksi gruplarının membrana zarar vermesi gösterilir. Zamanla (10.000 saat civarı) hücrede başlayan metalik katyon kirlenmesi, metalik iyonların H^+ nın oksijen ile bağ yapmasını engellemesinden dolayı bozulmaya sebep olmaktadır. Bu durumda metalik katyona bağlı olarak membran kurumasına sebep olmaktadır ve membran suyunun azalması mekanik bozulmalara yol açmaktadır (Collier vd., 2006). Ayrıca hidroksil gruplarının oluşması da membranda bozulmalara, Pt kopmalarına ve performans düşüşlerine sebep olabilmektedir (Atrazhev vd., 2006).

** Isıl Bozulmalar;*

Yüksek sıcaklığın PEM yakıt pilleri için bazı avantajları olmasına rağmen sıcaklığın aşırı artması bozulma problemlerini de beraberinde getirmektedir. Nafion membranı oluşturan iyonomerlerin kimyasal yapıları 150 °C sıcaklık ve üzerinde bozulmaya başlar. Ancak daha yüksek sıcaklıklara çıktığı zaman florür içerikli (HF vb.) yan ürünler oluşmaya başlar ve bu durum flüorür kaybı ile sülfatlı grupların membrandan kopmaya başladıklarını gösterir. Ayrıca yüksek sıcaklığın geri dönüşü olmayan membran kurumasına sebep olacağı için mekanik bozulmalara yol açabilir (Collier vd., 2006).

Hücre çalışması esnasında çalışma zamanına bağlı olarak PEM elektrolizörlerde hücre içerisinde devri daim eden suda, PEM yakıt pillerinde ise yan ürün olarak çıkan suda metalik iyonlara rastlanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda çelik son plakalar ve alüminyum son plakalar kullanılarak PEM yakıt pilindeki metalik iyon değişimi yan ürün olarak açığa çıkan suyun pH değeri ölçülerek hesaplanmış ve çelik son plakalar kullanıldığı zaman suda yapılan ölçümlerde pH değeri düşük yani su daha fazla metalik iyon içeriğine sahip ve asidiktir. Çelik son plakalar kullanıldığı zaman membranda flüorür kaybına bağlı bozulma hızı ve performans düşüşü daha hızlı görülmeye başlayabilir (Pozio vd., 2003). MEG' de meydana gelen kirlenmeler de uzun dönem çalışma performansının düşmesinde önemli bir etkiye sahiptir (Ahn vd., 2002). Bu kirlenmeler katalizör tabaka, sızdırmazlık elemanı ve diğer hücre bileşenlerinden kaynaklanabilir.

ii) Uzun Dönem Çalıştırma Ömür Testleri

PEM elektrolizör ve yakıt pili sistemleri uzun dönem çalışma testlerine tabi tutulmuşlar. Bu çalışma süreleri boyunca performanslarında meydana gelen değişim takip edilmiş ve bu değişimlerin sebepleri araştırılmış. Genel olarak uzun dönem çalışmalarda performans düşüşü görülmüş. Bu performans düşüşünün genel sebepleri ise zamanla hücre bileşenleri meydana gelen bozulmalardır.

Membran bir elektrolizör hücresinin en zayıf parçasıdır. Çalışma süresi boyunca membrandan kopan parçalar membranın incelmesine, dizayn ve montaj sırasında yapılan hatalar ise bu incelmenin homojen olmamasına yol açar. Dolayısı ile membran üzerinde kalınlık dağılımının değişmesine bağlı olarak fiziksel deformasyonlar ve hot spotlar oluşur (Stucki vd., 1998). Sun vd. (2014) 9 hücreli bir PEM elektrolizör yığını üzerinde 7800 saatlik uzun dönem çalışma testi uygulamışlar ve bu süre boyunca hücre başına ortalama $35,5 \text{ mVh}^{-1}$ lik performans düşüşü gerçekleşmiş. Ancak 5000 saat civarlarında performansa bir miktar iyileşme görülmüş ve buna sebep olarak zamanla membranda meydana gelen incelme gösterilmiş. Bu performans düşüşünün sebebini bulmak için kullanılmamış, 7800 saat kullanılmış ve 7800lik kullanım sonrası bir çözelti kullanılarak yenilenmiş membranlardan numuneler alınarak çeşitli testler gerçekleştirmişler. H_2 ' nin karşı tarafa geçme oranının ve elektrokimyasal anot alanının hesaplanması için cyclic ve lineer scam voltamogram, yöntemlerini kullanmışlar.

Performans düşüşünün temel sebebi olarak metalik katyon kirlenmesini göstermişler. Metalik katyonlar katalizör gözeneklerini tıkararak yük transferi esnasındaki ohmik kayıpları artırmaktadır (Sun vd., 2014). Uzun dönem çalışma sırasında katalizör tabakalardan karbon oksidasyonundan ve hidroksil gruplarının etkilerinden kaynaklı Pt kopmaları gerçekleşmektedir (Atrazhev vd., 2006; Oono vd., 2012; Luo vd., 2006; Berejnov vd, 2012). Pt parçalarının kopması aktif alanın daralmasına ve bu durum da reaksiyonların daha zayıf gerçekleşmesine sebep olabilmektedir (Oono vd., 2012; Luo vd., 2006; Cai vd., 2010). Buna ek olarak Oono vd. (2012) HTPEMFC üzerinde yaptıkları çalışmalarda katalizör tabakadaki bu bozunumun ayrıca membran incelmeye yol açtığını, membrandan kopan parçaların katalizör tabakaya nüfuz ettiğini ve çalışma zamanı uzadıkça Pt parçacık dağılımlarındaki homojenliğin bozulduğunu gözlemlemişler. Mamat vd. (2010) Pt parçalarının sülfat grupları ile bağ yaparak PtS oluşturduğu ve bu oluşumun akım yoğunluğunu düşürdüğü bulgularına ulaşmışlar. Rubio vd. (2010) iki eşdeğer devre modeli üzerinde yaptıkları çalışmalarda performans düşüşünün sebeplerini tersinir ve tersinmez olarak ikiye ayırmışlar. 10^5 s çalışma zamanına kadar ortaya çıkabilen kuruma, su basması ve CO zehirlenmesi tersinir, daha uzun zamanlarda ortaya çıkan H_2 karşıya geçişi ve diğer kusurlar ise tersinmez kusurlar olarak sıralanmış.

iii) Hızlandırılmış Ömür Testleri

Hızlandırılmış ömür testleri, hücre ve bileşenlerinde zamanla meydana gelen bozulmaların hücrelerin yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılarak ya da hücre bileşenlerinin çeşitli çözeltiler içerisinde bekletilerek bozulmaların hızlandırıldığı çalışmalardır.

Hücre performanslarında meydana gelen değişimlerin hücre bileşenlerinde meydana gelen bozulmalardan kaynaklanabileceğinden bahsedilmişti. Tan vd. (2007) sızdırmazlık elemanlarında meydana gelen değişimleri gözlemlemek için Silikon S, Silikon G, EPDM ve FL (fluoroelastomer) sızdırmazlık elemanlarını farklı oranlardaki HF ve H_2SO_4 çözeltileri içerisinde hem hızlandırılmış hem de normal çalışma anını simüle edecek şekilde bekletiyorlar. Sızdırmazlık elemanı üzerinde uygulanan kuvvetin artmasının bozulma miktarını artırdığı, silikon sızdırmazlık elemanlarının sıcaklığa

karşın daha hassas oldukları ve 45 haftalık çalışma sonrasında EPDM de daha az bozulmanın olduğu sonuçlarına ulaşmışlar.

Hücre bileşenlerinde meydana gelebilecek bozulmalar aynı zamanda hücre içerisinde kirlenmelere yol açabileceği için de performans düşüşlerine sebep olabilmektedir. Örnek olarak sızdırmazlık elemanından zaman içerisinde kopan parçaların zaman içerisinde hücre içerisinde diğer hücre bileşenlerine özellikle membrana tutunması sonucu bu hücre bileşenlerinin işlevlerini yerine getirememesi verilebilir. Elektrolizör hücrelerine yüksek akım yoğunluğu uygulanması (Millet vd., 2012) bozulma sürecini hızlandıracaktır. Millet vd. (2010) elektrolizör yığınının çalışması sırasında voltaj düşmelerinin kısa devreden, yükselmelerinin ise suyun azalmasından ve anotta H_2 moleküllerine rastlanılmasından kaynaklandığını belirtmiş. H_2 ve O_2 'nin hücre içerisinde birbirine karışması patlamalara yol açmış ve membran başta olmak üzere bütün hücre bileşenlerinin delinmesine ve fiziksel olarak dönüşü olmayan bir deformasyona uğramalarına yol açmış. Bu durum akım dağılımının düzgün olmamasından dolayı membran üzerinde hot spotların oluşmaları ya da hücre içerisine gönderilen suyun zorlanması sonucu membrana sürtünme yolu ile zarar vererek delik oluşturmaktadır. Farklı bir hızlandırılmış test metodu olarak Bae vd. (2014) yakıt pili hücresinin sürekli çalışma yerine farklı çalışma şartları altında durdurulup-çalıştırılması ile yapıldığını belirtmiş. Ayrıca yakıt pilleri için nemlilik, sıcaklık, pH vb değerlerin artırılması ya da düşürülmesi ve membran bozulmasının incelenmesi için yüksek basınçta ve farklı gerilimler altında çalışılması ile de hızlandırılmış ömür testleri gerçekleştirilebilir (Yuan vd., 2011). Bu parametrelerin değiştirilmesi karbon oksidasyonunu hızlandıracığı için katalizör tabakadan Pt kopması da hızlanacak ve uzun süre içerisinde görülmesi beklenen performans bozulmaları daha erken zamanlarda görülebilecektir.

Bu tez çalışması PEM elektrolizör hücrelerinde hücre içi basınç dağılımı, hücre ara yüzeylerinde oluşan kontak direnci ve sıkıştırma kuvvetlerine karşılık gelen performans ile hızlandırılmış performans bozunum ölçümlerini kapsamaktadır. Bu ölçümler doğrultusunda çalışmanın amacı PEM elektrolizör hücrelerinde en iyi performansın elde edilebilmesi için cıvatalara uygulanan sıkma kuvvetlerinin farklı sızdırmazlık elemanları kullanılarak optimize edilmesidir. Hücre içi basınç dağılımı her bir sıkıştırma kuvveti ve sızdırmazlık elemanı için basınç filmleri kullanılarak incelenmiştir. Hücre

ara yüzeylerinde oluşan kontak direnci ise direnç ölçer ile hücre üzerinden ölçülmüştür. Ayrıca hücre bir presin içerisine yerleştirilerek üzerine uygulanan kuvvetin değeri değiştirildiğinde, hücre elemanları arasındaki kontak direnci değişimleri incelenmiştir. Performans ölçümleri sırasında hücreye uygulanan akım yoğunluğuna karşılık gelen gerilimler multimetre ile ölçülmüş ve performans grafikleri oluşturulmuştur. Hızlandırılmış performans çalışmaları sırasında ise hücre üzerine farklı yükler verecek şekilde bir döngü belirlenmiş ve hücreyi aç kapa yaparak bu döngü tekrarlanmıştır.

BÖLÜM III

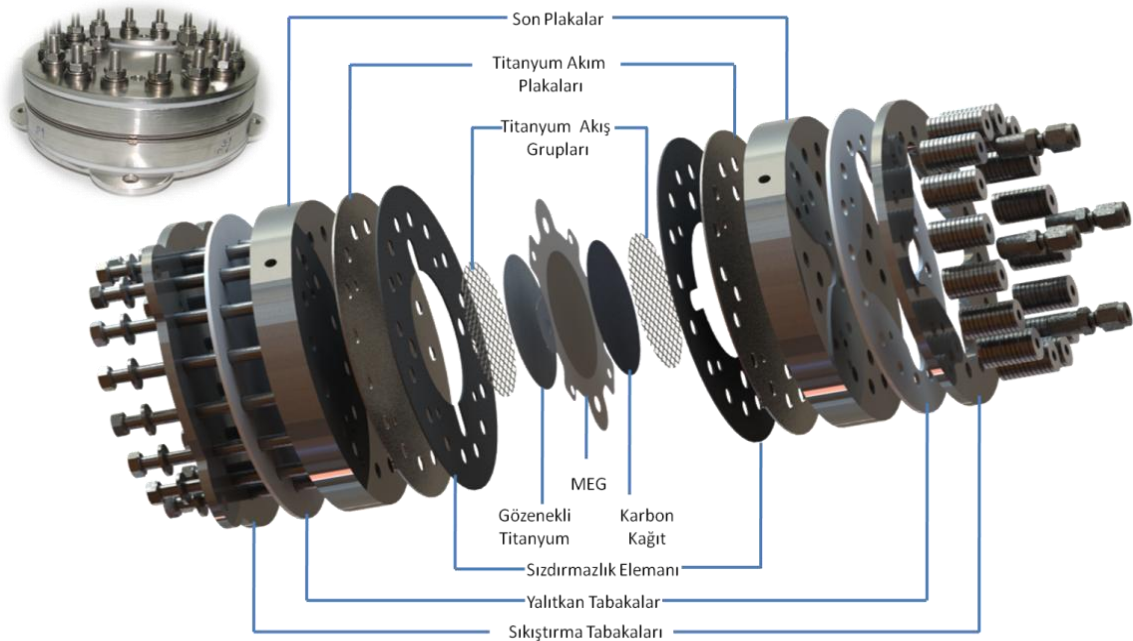
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

PEM elektrolizör hücreleri montajı esnasında hücre bileşenleri cıvatalar kullanılarak bir arada tutulur. Ayrıca bu cıvatalara uygulanan sıkma kuvveti ile hücre bileşenleri aralarındaki temas sağlanmış olmaktadır. Hücre montajı sırasında hücreyi bir arada tutan cıvatalara uygulanan bu sıkıştırma kuvvetinin hücre performansı, ömrü ve bileşenlerinin dayanımının üzerine etkisi oldukça büyüktür. Halihazırda kullanılan GDT, akış alanı ve membran gibi özel malzemelerden ötürü maliyetleri yüksek olan bu sistemlerin ömürlerinin uzatılması ise üretilen hidrojen maliyetlerinin düşürülmesi adına önem taşımaktadır. Bu çalışma sırasında Gatto vd. (2011) farklı sızdırmazlık elemanları kullanarak yaptıkları çalışma ile Zhang vd. (2006) kontak direnci üzerine yaptıkları çalışmalar temel alınmıştır.

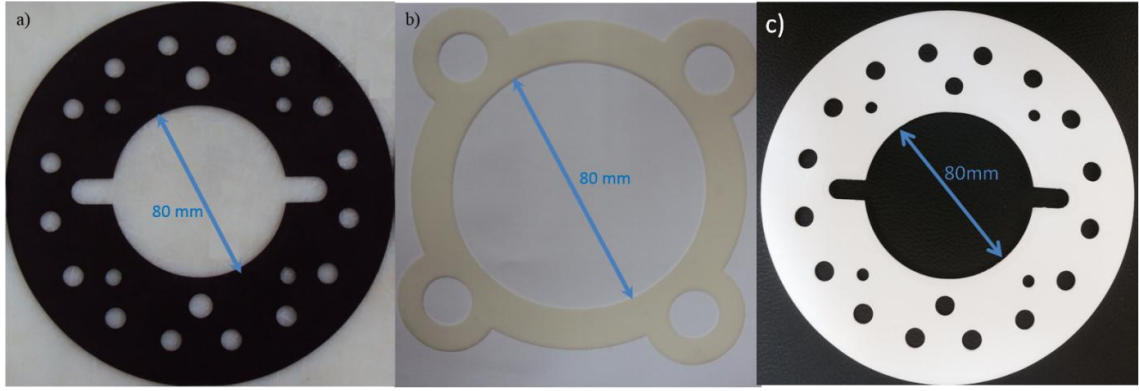
3.1 Hücre Bileşenleri ve Hücre Tasarımı

50 cm² dairesel aktif alana sahip PEM elektrolizör hücresi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Hücre çizimi ve montajı yapılmış hali Şekil 3.1' de görülmektedir. Hücre üzerine uygulanan kuvvetler hücre dış kenarından etkidiği için son plakalarda bükülmeye sebep olabilmektedir. Bu yüzden son plaka olarak 20mm kalınlığında paslanmaz çelik (316S) malzeme tercih edilmiştir. Elektrik bağlantıları son plakalar üzerinden yapıldığından dolayı son plakalar ve cıvatalar ile temas halinde olan sıkıştırma plakaları arasında elektriksel yalıtım sağlamak ve kısa devrenin önüne geçmek amacıyla yalıtkan plaka olarak Delrin malzeme kullanılmıştır. Sıkıştırma plakası olarak ise 5 mm kalınlığında paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Elektroliz işlemi sonucu ortaya çıkan oksijen, hücreye verilen deiyonize su ve yüksek anodik potansiyel birçok malzeme için korozyona elverişli ortam oluşturmaktadır. Bu yüzden akış alanlarında ve akımın geçtiği parçalarda korozyona karşı mukavemeti yüksek titanyum malzeme kullanılması uygun görülmüştür. Difüzyon tabakası olarak anot tarafında gözenekli titanyum ve katot tarafında ise karbon kağıt kullanılmıştır. Membran olarak dairesel aktif alana sahip kuru haldeki kalınlığı 254 µm olan, anot katalizörü 2 mg/cm² Ir ve 2 mg/cm² ve katot katalizörü 4 mg/cm² Pt' den oluşan Nafion 1110 tercih edilmiştir. Sızdırmazlık elemanı olarak Polyetrafluoroethylene (PTFE), ethylene

propylene diene monomer (EPDM) ve silikon malzemeleri seçilmiş ve bu sızdırmazlık elemanları ayrı ayrı kullanılarak farklı sızdırmazlık elemanlarının hücre performansı, basınç dağılımı ve kontak direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. EPDM, PTFE ve silikon sızdırmazlık elemanlarının tasarımlarına ait fotoğraflar Şekil 3.2. de görülmektedir, PTFE sızdırmazlık elemanı EPDM ile aynı tasarıma sahiptir. Silikon sızdırmazlık elemanları ince oldukları ve akış alanı ile GDT kalınlığını tek başına karşılayamadıkları için bu sızdırmazlık elemanı ile birlikte kalınlığı dengeleyebilmek için 1 mm kalınlığında titanyum çerçeveler kullanılmıştır. Hücre 16 adet 100 mm boyunda M8 paslanmaz çelik cıvata kullanılarak sıkıştırılmıştır. Bu cıvataların sıkıştırılması işlemi için ayarlanabilir mekanik tork anahtarı kullanılmıştır. Tork anahtarı kolu üzerinden istenilen tork değeri ayarlanarak bütün cıvatalar aynı oranda sıkılabilmekte ve böylece sıkma işlemi sırasında mümkün olduğunca homojen kuvvet dağılımı sağlanarak montaj sırasında oluşabilecek fiziksel kusurların önüne geçilebilmektedir.



Şekil 3.1. 50 cm2 PEM elektrolizör hücresi CAD çizimi ve montajlanmış hali



Fotoğraf 3.1. Sızdırmazlık elemanları a) EPDM, b) Silikon, c) PTFE

Sızdırmazlık elemanları ve bu sızdırmazlık elemanları ile birlikte kullanılan akış alanları ve gaz difüzyon tabakalarına ait kalınlıklar Tablo 3.1 de verilmiştir.

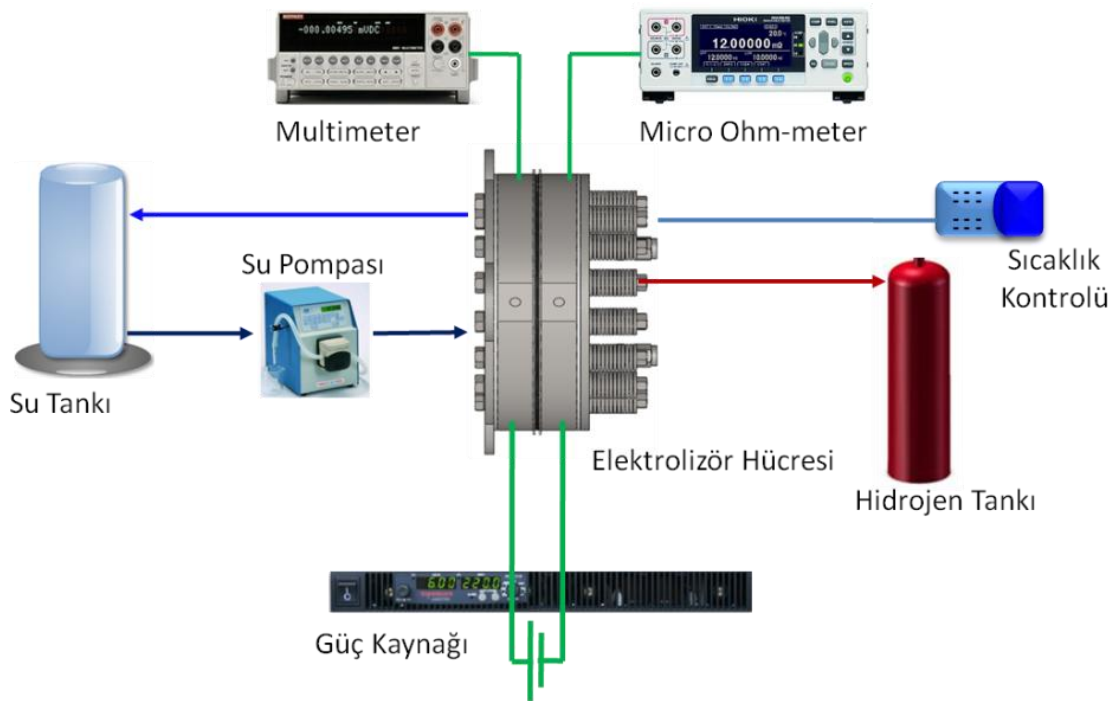
Tablo 3.1. Sızdırmazlık Elemanları ve Akış Alanlarına Ait Kalınlıklar

Sızdırmazlık Elemanı	Akış Alanı+GDT Kalınlığı (mm)	Sızdırmazlık Elemanı Kalınlığı (mm)
Silikon + Akış Alanı Çerçevesi	1,62	1,64
PTFE	1,57	1,60
EPDM	1,54	1,59

3.2 Deneysel Düzenek

Çalışmalar esnasında kullanılan deneysel düzenek Şekil 3.4’de şematik olarak gösterilmiştir. Elektrolizör test hücresi ile su deposu arasındaki su devir daimi bir peristaltik pompa kullanılarak sağlanmıştır. PEM elektrolizörler safsızlıklara karşı oldukça hassas olmasından dolayı deiyonize suya ($>18.2\text{M}\Omega.\text{cm}$) ihtiyaç duymaktadır, bu yüzden testler sırasında ultra saf su kullanılmıştır. Elektrolizör hücresinin ihtiyaç duyduğu elektrik akımı, bir DC güç kaynağı kullanılarak son plaklar üzerinden sağlanmıştır. Hücre anot tarafına DC güç kaynağının pozitif (+) çıkışı, katot tarafına ise

negatif (-) çıkışı bağlanmıştır. Testler sırasında ihtiyaç duyulan akım değerleri bu güç kaynağı üzerinden ayarlanmıştır. Güç kaynağı içerisinde ve güç kaynağı ile test hücresi arasındaki kablolarda oluşan elektriksel kayıplar nedeniyle uygulanan akıma karşılık gelen voltaj değerleri ise güç kaynağı üzerinden değil de bir multimeter kullanılarak yine son plakalar üzerinden okunmuştur. Hücrede üretilen oksijen gazı, reaksiyona girmeyen su ile birlikte su deposuna geri gönderilmiştir ve burada sudan ayrıştırılarak atmosfere bırakılmıştır. Üretilen hidrojen gazı, elektro-osmotik sürüklenme kuvvetinin etkisi altında katot tarafına geçen su ile birlikte doğal taşınım yolu ile hücreden uzaklaştırılarak atmosfere bırakılmıştır.



Şekil 3.2. Performans ve kontak direnci ölçüm testleri için kullanılan deneysel düzenek

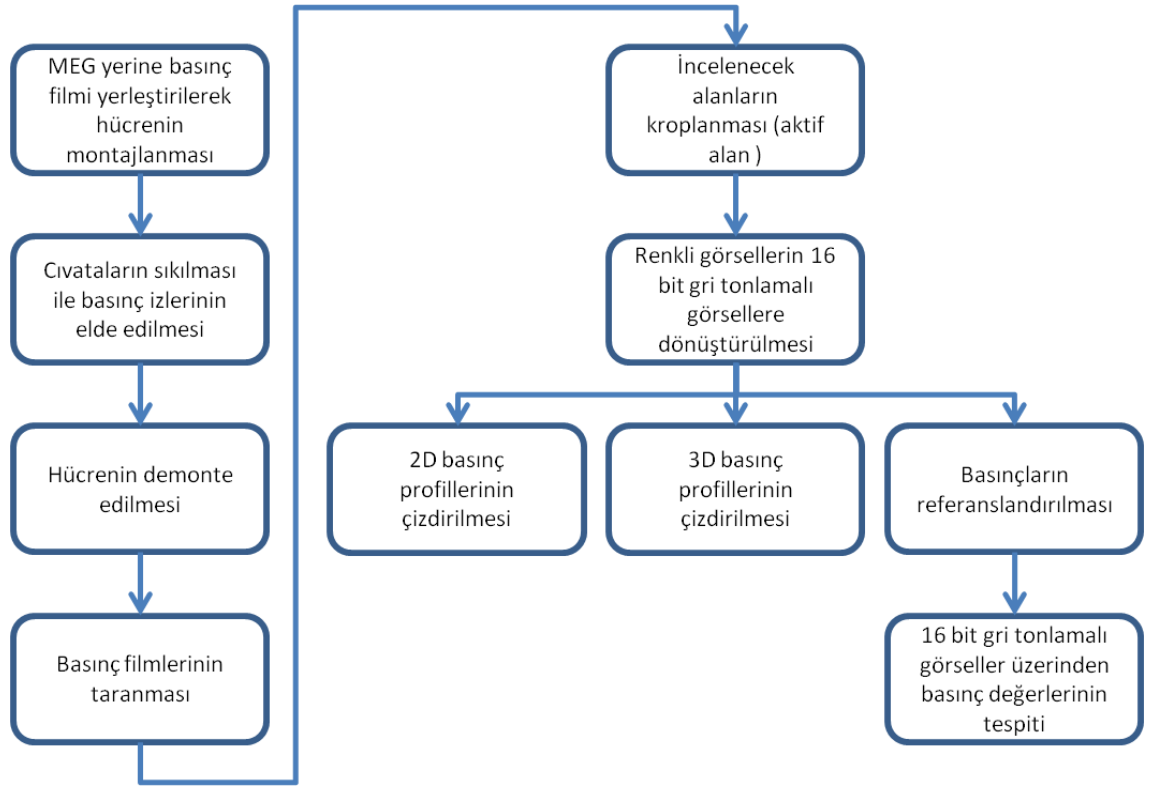
3.3 Basınç Dağılımı Ölçümleri ve Analizi

Hücrede aktif alan üzerindeki basınç dağılımları her bir sızdırmazlık elemanı için 3, 5, 10, 15 ve 20 Nm sıkma tork değerlerinde basınca duyarlı Pressurex™ basınç filmleri kullanılarak elde edilmiştir. Pressurex basınç filmleri basınca maruz kaldıklarında pembe-kırmızı renk almaktadırlar. Uygulanan basıncın artması ile film üzerindeki renk koyulaşmakta kırmızıya yaklaşmaktadır. Basınca göre rengin koyulaşması doğrusala

yakın bir eğilim izlemektedir. Hatalı sıkıştırma olmaması ve montaj esnasında doğabilecek kusurlardan kaçınmak için civatalar önceden belirlenmiş tork değerlerine sıkma değeri belirli aralıklarla artırılarak ulaşılmaktadır. Basınç dağılımı ölçüm çalışmaları gerçekleştirilirken basınç filmleri MEG ebatlarında hazırlanmış ve hücre içerisinden MEG çıkartılarak onun yerine yerleştirilmiştir. Diğer bütün hücre bileşenleri sabit tutulmuştur. Hücre bileşenlerinin kendi içerisinde oluşabilecek fiziksel farklılıklardan dolayı bütün ölçümler sırasında hücre bileşenleri aynı yönelimde yerleştirilmiştir. Böylece, deneylerde değişen tek parametrenin civata sıkma torku olması sağlanmıştır.

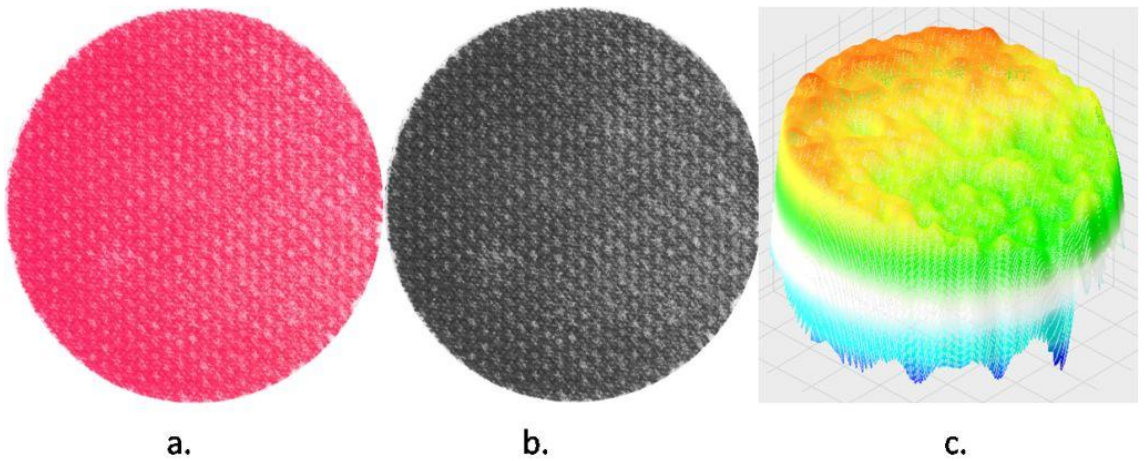
Deneylerden elde edilen basınç filmleri bir tarayıcı yardımıyla dijital ortama aktarılmıştır. NIH tarafından hazırlanan ImageJ görsel analiz yazılımı ile dijital ortamdaki resimler üzerindeki izler analiz edilmiştir. Bu analiz işlemleri sırasında sadece aktif alan üzerinde oluşan izler dikkate alınmıştır. Basınç filmi üzerindeki kırmızı renk yoğunluk dağılımı basınç dağılımı hakkında kaba bir fikir verse de sayısal basınç değerleri elde etmek, ayrıntılı basınç haritası çıkarmak ve kesin bir yargıya varmak mümkün değildir. Daha ayrıntılı bir inceleme için taranan basınç filmleri öncelikle gri tonlamalı resme dönüştürülmüş ve ardından 3 boyutlu basınç grafikleri oluşturulmuştur. Her bir pikseldeki renk yoğunlukları sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Renk yoğunluğuna karşılık gelen basınç değerleri önceden hazırlanmış ve üzerindeki basınç değeri bilinen referans basınç filmleri ile karşılaştırılarak basınç filmleri üzerindeki noktalara karşılık gelen basınç değerleri MPa olarak hesaplanmıştır.

Basınç dağılımı ölçümleri sırasında izlenen yol Şekil 3.5 de şematize edilmiştir.



Şekil 3.3. Basınç dağılımı ölçümlerinde izlenilen yol

Yazılım ile yapılan işlemi özetlemek adına silikon sızdırmazlık elemanı kullanılarak 15 Nm tork ile sıkıştırılmış hücreye ait basınç filmi, gri tonlamalı görsel ve 3B basınç grafiği sırasıyla Şekil 3.6. a), b) ve c) de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. a) Basınç filmi b) gri tonlamalı resim c) 3 boyutlu basınç profili

3.4 Elektrokimyasal Performans Ölçümleri

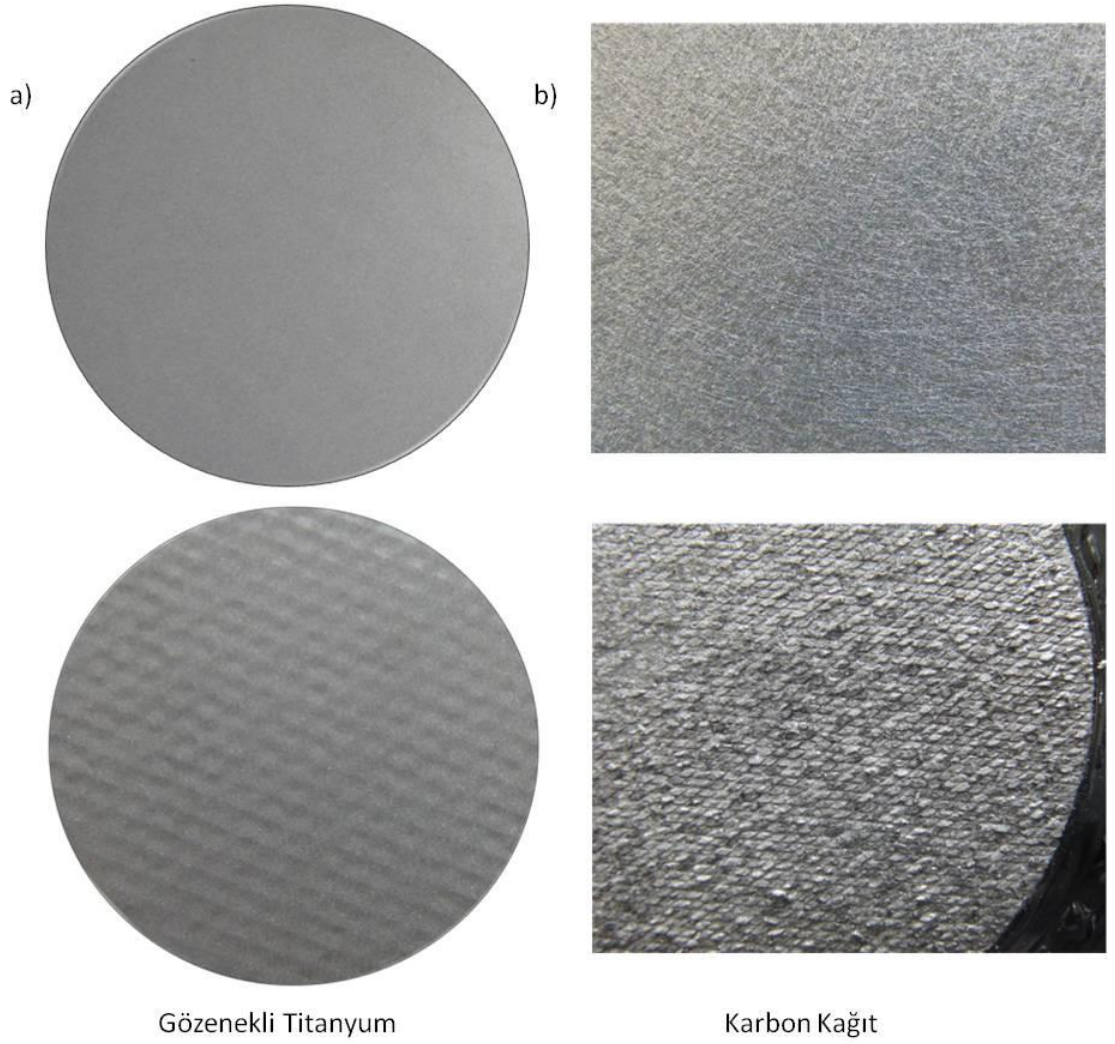
PEM elektrolizör hücresinin farklı sıkma kuvvetleri altında performans değişiminin görülebilmesi için 3 farklı sızdırmazlık elemanı ve 3, 5, 10, 15 ve 20 Nm sıkma tork değerleri için ayrı ayrı performans ölçümleri gerçekleştirilmiş ve performans grafikleri oluşturulmuştur. Her bir test öncesi hücrenin çalışmasının dengelenmesi ve ani voltaj değişimlerinin test sonuçlarını etkilememesi için hücre belirli bir süre çalıştırılmış ve daha sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir. 5 dakikalık bu ön çalıştırma sonrası DC güç kaynağı ile hücreye 1 – 50 A aralığında akım uygulanmış ve uygulanan bu akım değerlerine karşılık gelen voltaj değişimleri multimetre ile okunarak kaydedilmiştir. Ölçümler aynı ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir.

3.5 Kontak Direnci Ölçümleri

Aktif alan üzerindeki yetersiz basınç hücre bileşenleri arasındaki temas noktalarının yetersiz olmasına ve akım dağılımının da homojen olmamasına yol açmaktadır. Ayrıca yüksek kontak direncine ve buna bağlı olarak yüksek ohmik kayıplardan dolayı düşük performansa sebep olmaktadır. Yüksek kontak direnci elektrolizör hücrelerinde en yaygın karşılaşılan montaj kusurlarından birisidir. Bu yüzden her bir sızdırmazlık elemanı ve sıkma tork değerleri için kontak direnç değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu ölçümler Hioki RM3545-02 direnç ölçer kullanılmıştır. Hücre içerisinde iletkenliği engellememesi için yalıtkan özellik gösteren polimer membran çıkartılmıştır. Ancak membran üzerinde bulunan katalizör tabakalarının da çıkartılmış olmasından kaynaklı kalınlık farkının giderilebilmesi için membran yerine aktif alan ölçülerinde hazırlanmış, iç direnci çok düşük olan ve kuvvetle sıkıştırarak istenilen kalınlığa indirgenebilen Nikel köpük yerleştirilmiştir.

Kontak direnci ölçümlerinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde, cıvatalar 3, 5, 10 ve 15 Nm tork değerlerinde sıkılarak toplam direnç değerleri ölçülmüştür. Basınç dağılımı ölçümleri esnasında 20 Nm sıkma tork değerinde hücre bileşenlerinin zarar gördüğü tespit edilmiştir. Fiziksel deformasyona uğramış karbon kağıt ve gözenekli titanyum difüzyon tabakaları ve deformasyona uğramamış durumlarına ait fotoğraflar Fotoğraf 3.2' de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Hücre

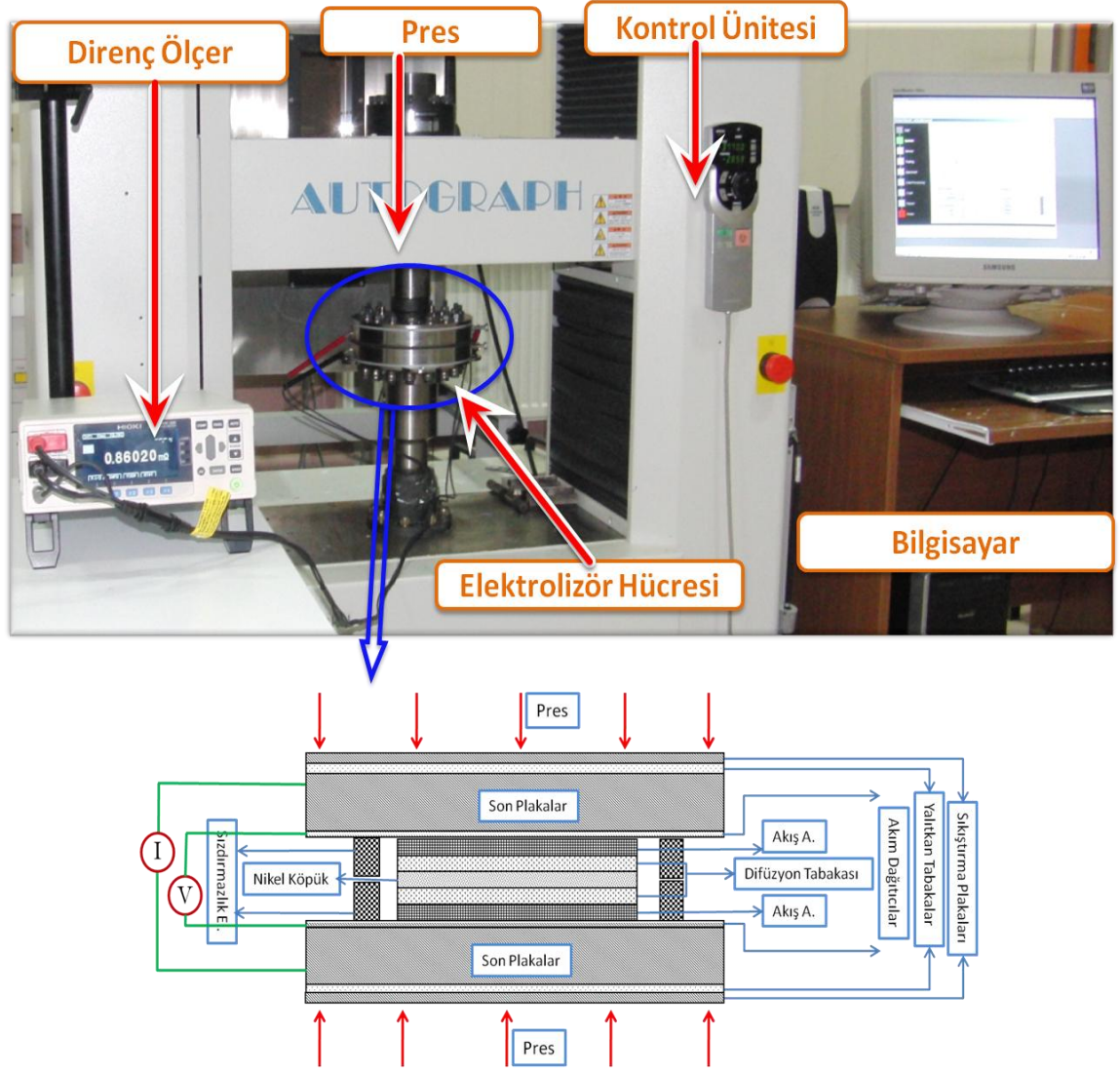
bileşenlerine zarar vermemek için kontak direnci çalışmaları esnasında 20 Nm sıkma tork değerine çıkılmamıştır.



Fotoğraf 3.2. Yüksek sıkma torkundan dolayı plastik deformasyona uğramış a) karbon kağıt, b) gözenekli titanyum

İkinci yöntemde ise hücre hassas bir pres içerisine yerleştirilmiş ve hücre üzerine etkiyen kuvvet cıvatalara uygulanan tork yerine doğrudan aktif alan üzerine baskı ile uygulanmıştır. İkinci yöntemde kullanılan deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.7’de verilmiştir. İkinci çalışmanın amacı hem birinci yöntemdeki ölçümlerin doğruluğunun sağlanması hem de hücre üzerine farklı noktadan kuvvet uygulandığı zaman kontak direnci değişimlerinin anlaşılabilmesi ve karşılaştırılabilmesidir. Her iki yöntemde de ölçümler esnasında sıcaklık takip edilmiştir. Ölçümler voltaj problemleri son plakalar, akım

probları ise akım plakaları üzerine yerleştirilerek ve her ölçüm öncesinde direnç ölçer cihazının kalibrasyonu yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Fotograf 3.3. Hücresinin ortasından preslenerek kontak direncinin ölçüldüğü deneysel düzenek

3.6 Hızlandırılmış Performans Ölçümleri ile Ömür Testi

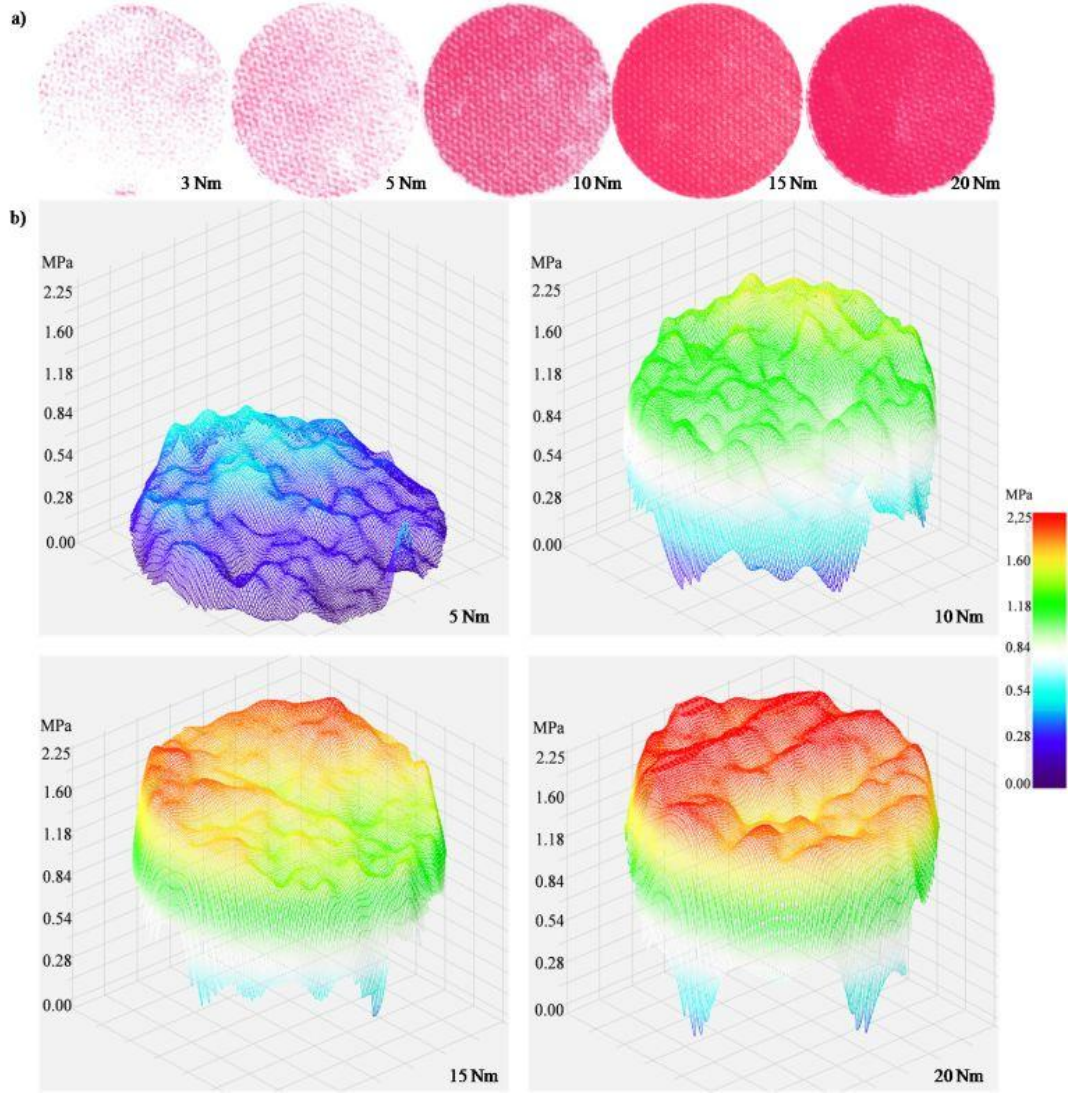
Bir PEM elektrolizör hücresinin performansı zamanla ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle hücrenin yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılması ve sürekli aç-kapa yapılması hücre performansını ciddi bir şekilde etkileyerek ömrü azaltmaktadır. Deneylerde kullanılan 50cm² aktif alana sahip PEM elektrolizör hücresinin zaman içerisinde performansındaki düşüşün incelenmesi için hızlandırılmış ömür testi uygulanmıştır. Bu test sırasında bölüm 3.2 de bahsedilen ve şekil 3.3 de şematize edilen deneysel düzenek kullanılmıştır. Testlerin performans ve kontak direnci çalışmalarında en uygun sonuçların elde edildiği 10 Nm ile sıkıştırılmış ve silikon sızdırmazlık elemanlarının kullanıldığı PEM elektrolizör hücresi üzerinde yapılması uygun görülmüştür. Farklı akım yoğunluklarının zamanla performans üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için hücreye sırasıyla 0,2-0,4-0,6 A/cm² akım yoğunlukları uygulanmıştır. Hücre ilk olarak 0,2 A/cm² de çalıştırılmaya başlanılmış ve ardından 0,4 ve 0,6 A/cm² akım yoğunlukları 5' er dk lık süreler ile uygulanmıştır. Dolayısıyla toplamda 15 dk lık çalışma zamanı ve farklı akım yoğunluklarından oluşan bir döngü oluşturulmuştur. Döngü sonunda hücre kapatılıp bir süre beklenilmiş ve ardından tekrarlanarak ölçümlere devam edilmiştir. Bu döngü ciddi performans değişimleri olana kadar tekrarlanmıştır.

BÖLÜM IV

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Basınç Dağılımı Ölçüm ve Analiz Sonuçları

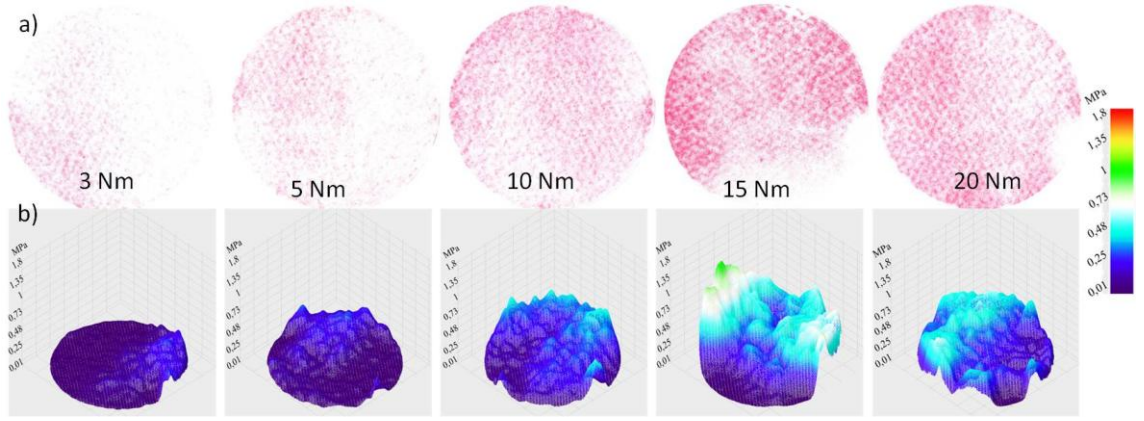
Silikon sızdırmazlık elemanına ait 3, 5, 10, 15 ve 20 Nm sıkma tork değerlerine karşılık gelen basınç dağılımları Şekil 4.1-a. da verilmiştir. Kırmızı rengin giderek yoğunlaşması sıkıştırma torku ile birlikte hücre üzerine etkiyen basıncın arttığını göstermektedir. Sadece basınç filmine bakarak hücre üzerine etkiyen basınç miktarı hakkında fikir sahibi olmak zordur. Şekil 4.1-b. de basınç değerlerinin yer aldığı 3 boyutlu grafikler görülmektedir. Daha önce referans basınç filmleri yardımıyla hazırlanan renk yoğunluğu-basınç miktarı cetveli dikkate alınarak incelendiğinde silikon sızdırmazlık elemanı üzerinde 3 Nm sıkıştırma kuvvetine karşılık aktif alan üzerinde 0,15-0,25 MPa aralığında basınç olduğu görülmektedir. Hücre bileşenleri arasında daha az temas olduğu Şekil 4.a' dan da görülebilmektedir. Basınç filmi üzerindeki beyaz renk miktarının fazla olması bu noktalarda temasın gerçekleşmediğini göstermektedir. Temas noktalarının az olması kontak direncinin yüksek çıkmasına diğer bir ifade ile ohmik kayıpların artmasına neden olmaktadır. Ayrıca düşük sıkma tork değerlerinde sıkıştırma tam anlamıyla gerçekleşmediği için sızdırmazlık elemanlarının da tam olarak temas etmemesinden dolayı hücrede sızdırma vb. sorunlar görülebilmektedir.



Şekil 4.1.Silikon sızdırmazlık elemanı için a) basınç filmleri b) 3B basınç profilleri

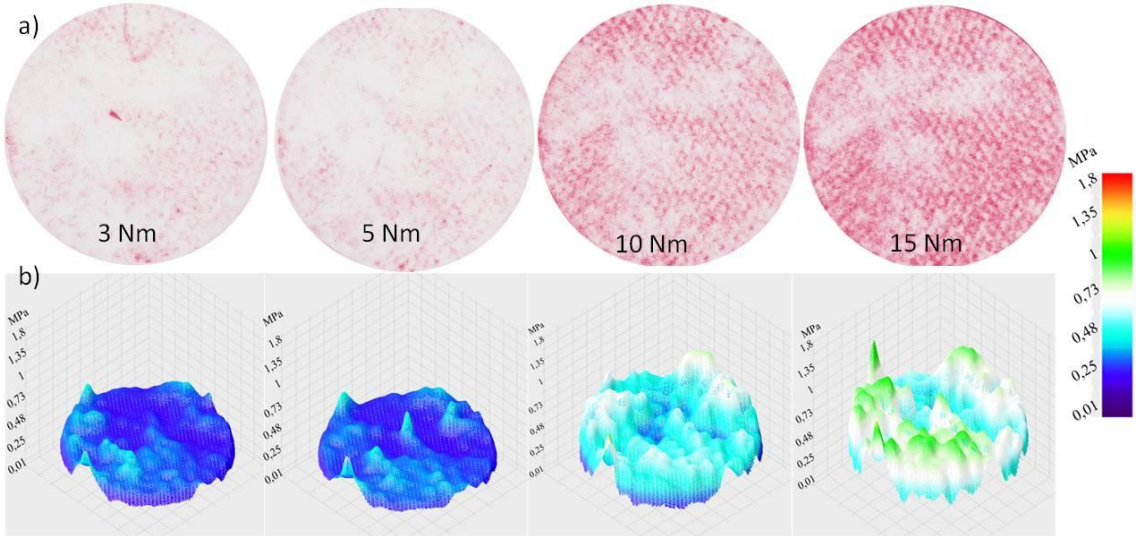
Silikon sızdırmazlık elemanı ile yapılan deneylerde 5, 10, 15 ve 20 Nm sıkıştırma tork değerleri için ise hücre üzerindeki ortalama basınç değerleri sırasıyla 0,5 MPa, 1,4 MPa, 2 MPa ve 2,25 MPa olarak hesaplanmıştır. 20 Nm tork değerinde yüksek kırmızı renk yoğunluğu hücre içerisinde aşırı sıkışmanın olduğunu göstermektedir. Aşırı sıkışma ise hücre bileşenlerinin fiziksel olarak zara görmesine ve işlevlerini yerine getirememelerine sebep olabilmektedir.

PTFE sızdırmazlık elemanı kullanıldığı zaman sıkma torku 3 Nm - 20 Nm aralığında değiştikçe MEG üzerindeki ortalama basınç miktarı da 0,5 MPa - 1,5 MPa aralığında değişmektedir. PTFE sızdırmazlık elemanına ait basınç filmleri ve 3 boyutlu basınç dağılımları şekil 4.2 de görülmektedir.



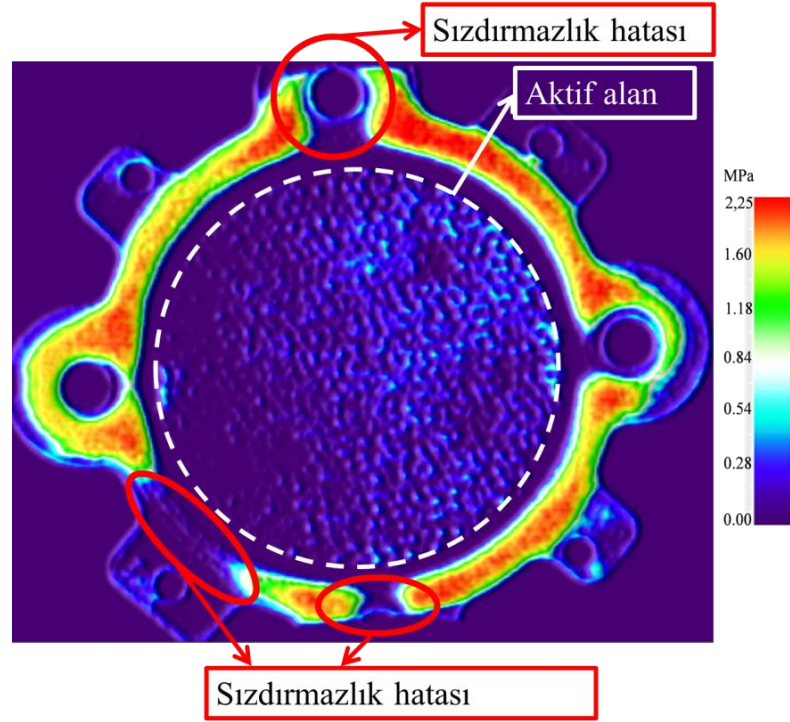
Şekil 4.2.PTFE basınç dağılımı

EPDM sızdırmazlık elemanı için ise sıkma tork değeri 3 Nm - 20 Nm aralığında değiştikçe MEG üzerine etkiyen ortalama basınç da 0,5 MPa - 1,9 MPa aralığında değişmektedir. EPDM sızdırmazlık elemanına ait basınç filmleri ve 3 boyutlu basınç dağılımları şekil 4.3 de görülmektedir.



Şekil 4.3. EPDM basınç dağılımı

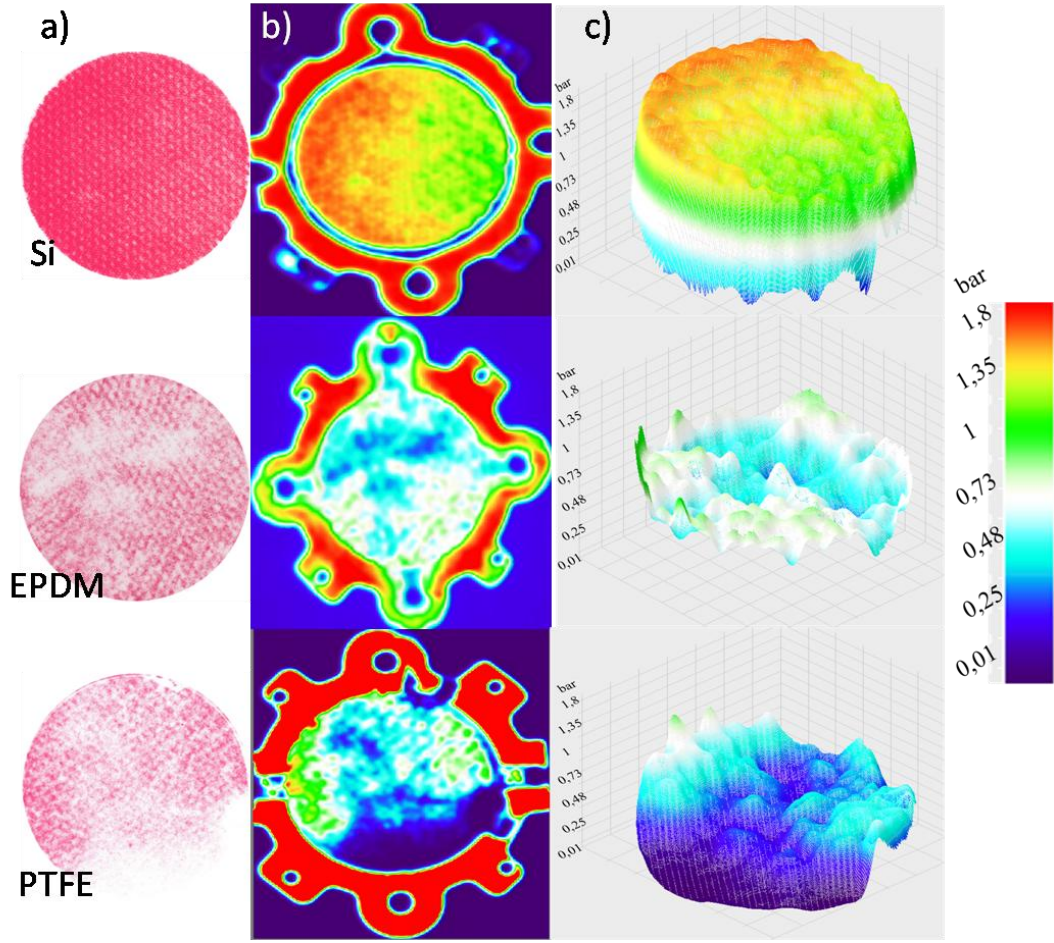
Her üç sızdırmazlık elemanı içinde 3 Nm ve 5 Nm sıkma tork değerlerinde yetersiz ve homojen olmayan basınç dağılımları görülmüştür. Ayrıca sızdırmazlık elemanlarının tam temas etmemesinden dolayı da düşük tork değerlerinde hücre çalışması esnasında sızırmalar gözlemlenmiştir. Sızdırmazlık hatalarının olduğu bölgeler Şekil 4.4' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Nm ile sıkılmış silikon sızdırmazlık elemanı için 2 boyutlu basınç dağılımı ve sızdırma problemi olan noktalar

Düşük sıkma tork değerlerinde sızdırmazlık hatalarının yanı sıra hücre bileşenleri arasında tam olarak temas gerçekleşmemesinden dolayı yüksek kontak dirençleri ve düşük performanslar beklenilmektedir. Ayrıca, sıkma tork değeri arttıkça artan temas noktaları ve iyileşen basınç dağılımından dolayı yüksek sıkma tork değerlerinde daha düşük kontak direnci ve daha yüksek performans beklenilmektedir.

Optimum basınç dağılımlarının sağlandığı 15 Nm sıkma tork değeri için basınç dağılımı karşılaştırması Şekil 4.5' de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere optimum basınç dağılımı silikon sızdırmazlık elemanlarının kullanıldığı hücrede sağlanmıştır.

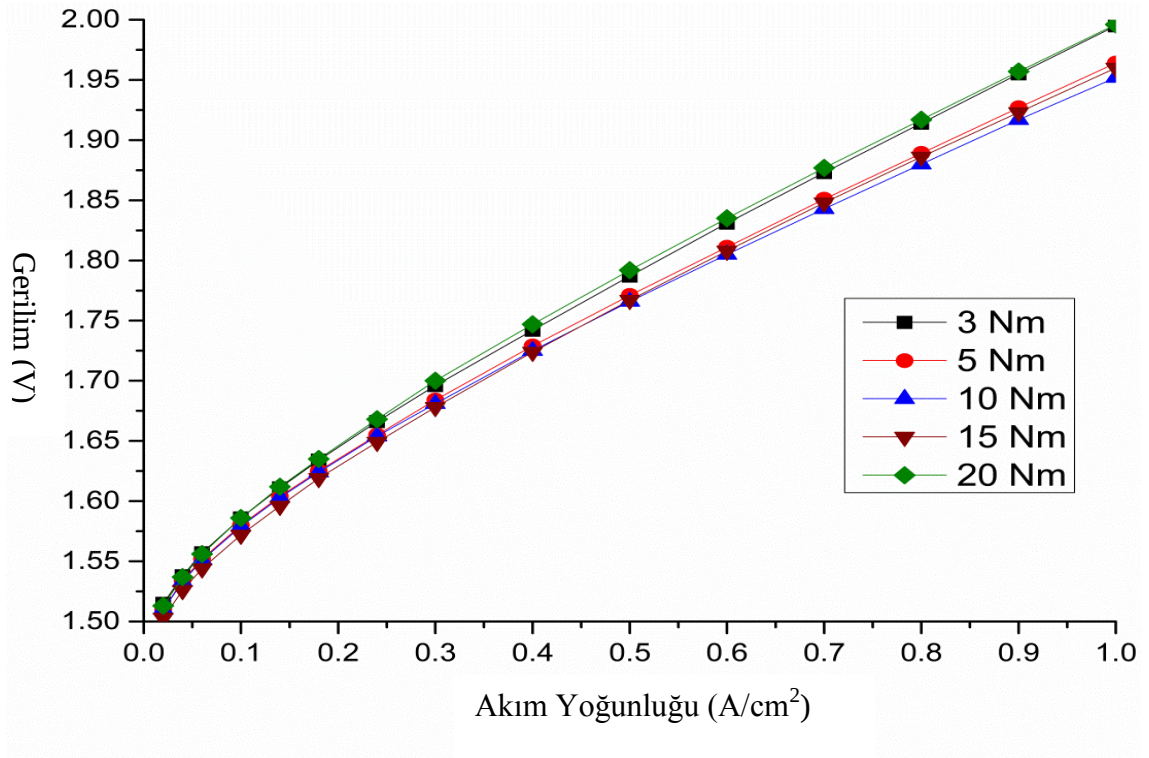


Şekil 4.4. Silikon, EPDM ve PTFE için 15 Nm sıkma tork değerinde basınç dağılımı karşılaştırmaları a) basınç filmleri, b) 2 boyutlu basınç dağılımları, c) 3 boyutlu basınç profilleri

4.2 Elektrokimyasal Performans Ölçüm Sonuçları

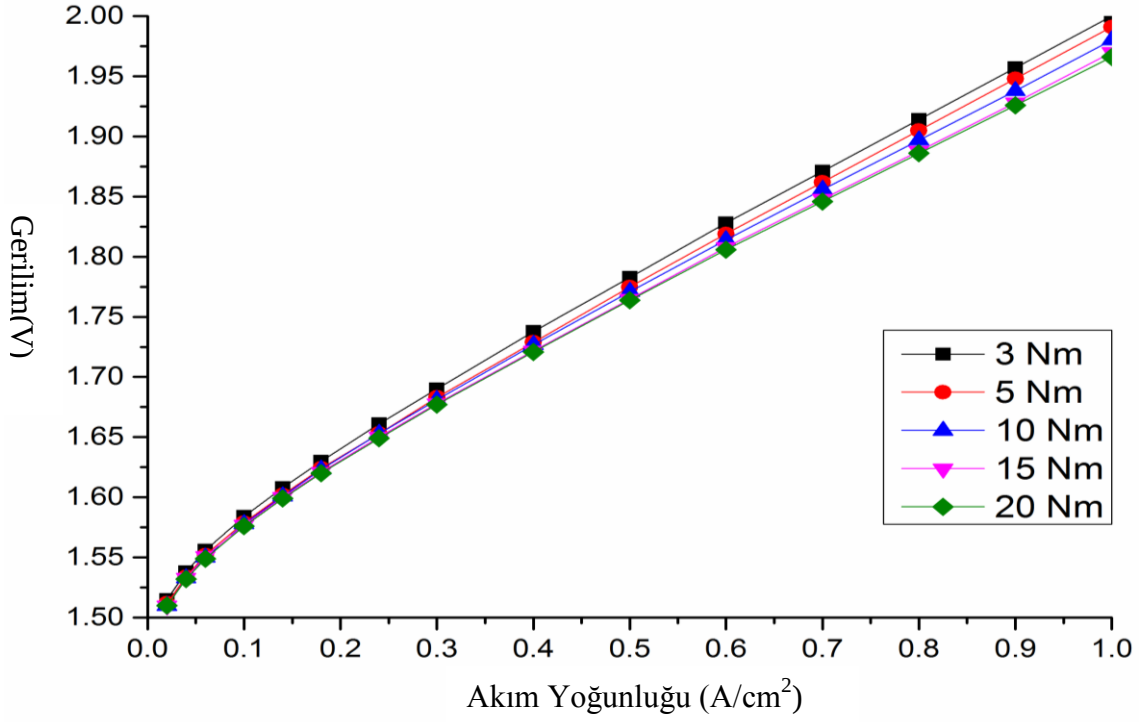
Silikon sızdırmazlık elemanı için farklı sıkma tork değerleri altındaki performans grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. 3 Nm de performansın çok düşük olduğu ancak 5 Nm de bir artış ve olduğu görülmektedir. Tork değeri 10 Nm ye ayarlandığı zaman performanstaki artış devam etmektedir. En yüksek performans düşük akım yoğunluklarında 15 Nm ve yüksek akım yoğunluklarında ise 10 Nm de görülmüştür. Sıkma torkunun artması aynı zamanda kütle transferindeki zorlanmayı da beraberinde getirmektedir. Düşük akım yoğunluklarında kütle transferinin etkisinin fazla olmamasından dolayı düşük akım yoğunluklarında en iyi performans 15 Nm değerinde elde edilmiştir. Ancak 20 Nm tork değerinde hücre bileşenlerinin zarar görmesi ve kütle

transferindeki zorlanmaların baskın hale gelmesinden dolayı performansta ciddi oranda bir düşüş gerçekleşmiştir.



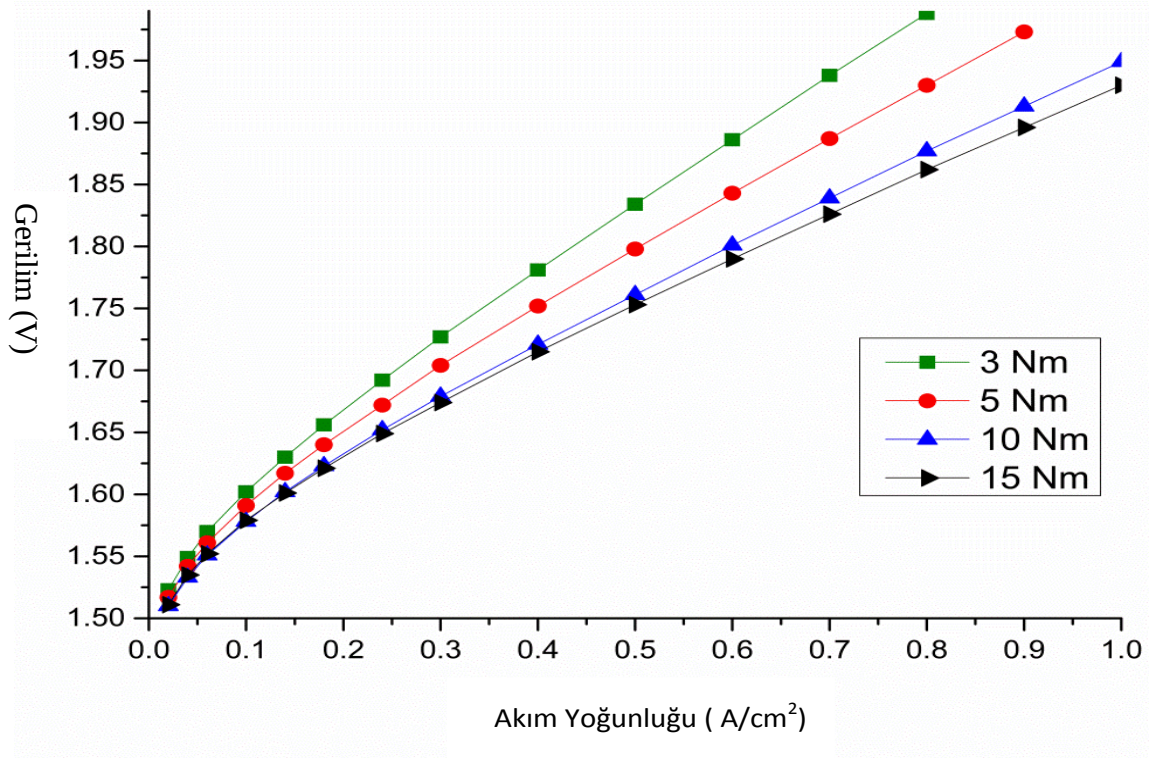
Şekil 4.5. Silikon sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma torkları altında performans grafikleri

PTFE sızdırmazlık elemanı kullanılarak yapılan performans ölçümlerinin sonucuna ilişkin grafik Şekil 4.7’de verilmiştir. Artan sıkma torku ile birlikte performans iyileşmesinin olduğu gözlemlenmiştir. Ancak yüksek akım yoğunluklarında 15 Nm sıkma tork değeri için en iyi performans değeri elde edilmiştir. Ancak PTFE kullanılarak yapılan çalışmalardaki performans değişimleri arasında çok ciddi bir fark yoktur. PTFE sızdırmazlık elemanı diğer sızdırmazlık elemanları ile karşılaştırıldığı zaman hücre tasarımına daha iyi yerleşmektedir ve daha rijit olduğu için hem performans hem de kontak direnci değerlerinde çok ciddi değişimler gözlemlenmemiştir.



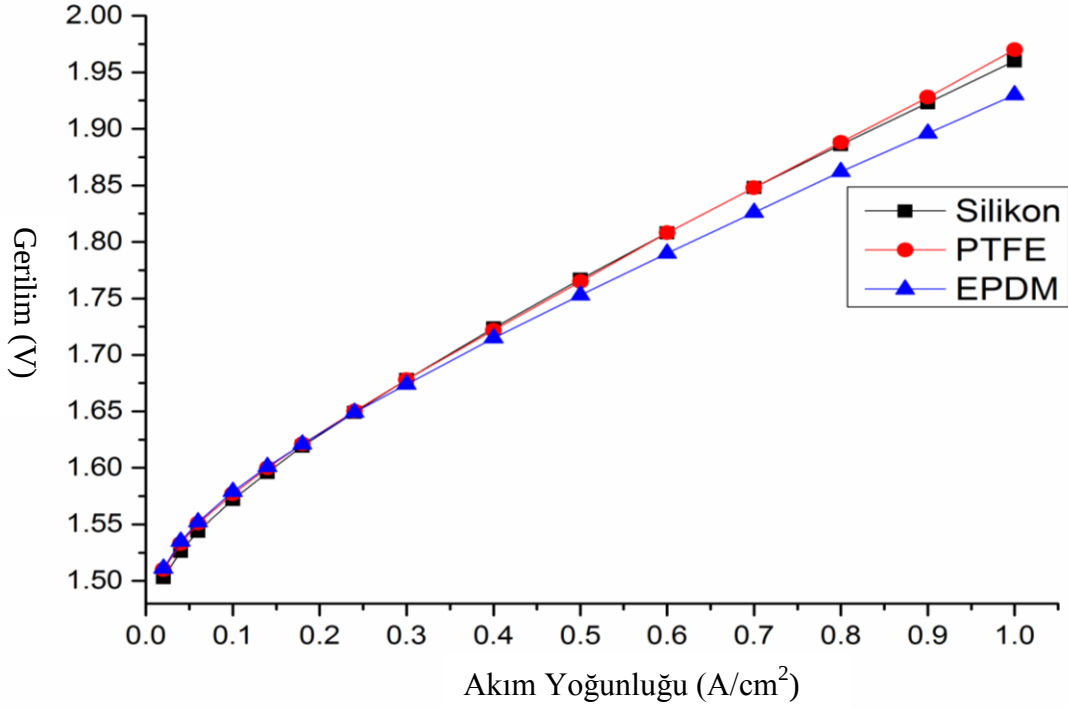
Şekil 4.6. PTFE sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma torkları altında performans grafikleri

EPDM sızdırmazlık elemanını kullanılarak yapılan ölçümler sonucuna ilişkin grafik Şekil 4.8’de verilmiştir. Sıkma torku arttıkça performansın diğer sızdırmazlık elemanlarına göre daha belirgin şekilde iyileşme göstermesi dikkat çekmektedir. Bunun sebebi olarak hücre üzerine uygulanan kuvvet arttıkça EPDM’ in daha fazla sıkışması ve akış alanları ile daha iyi temasın sağlanması gösterilebilir. Özellikle MEG’in zarar görmesini engellemek için uygulanan akım yoğunluğuna karşılık gelen gerilimin 2 V’ u geçmemesine dikkat edilmiş, bu değer üzerindeki ölçümler yapılmamıştır.



Şekil 4.7. EPDM sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma torkları altında performans grafikleri

En uygun performans değerlerinin sağlandığı 15 Nm sıkma tork değeri için performans karşılaştırması Şekil 4.9’de verilmiştir. Grafik incelendiği zaman 15 Nm tork değerinde EPDM’ in en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Ancak basınç dağılımları ile birlikte yorumlandığı zaman silikon sızdırmazlık elemanında daha iyi hücre içi temas ve homojen basınç dağılımı olduğu görülmektedir. Bu durum aynı zamanda daha iyi akım dağılımına da sebep olabileceği için hücre ömrünün daha uzun olabileceği düşünülmektedir.

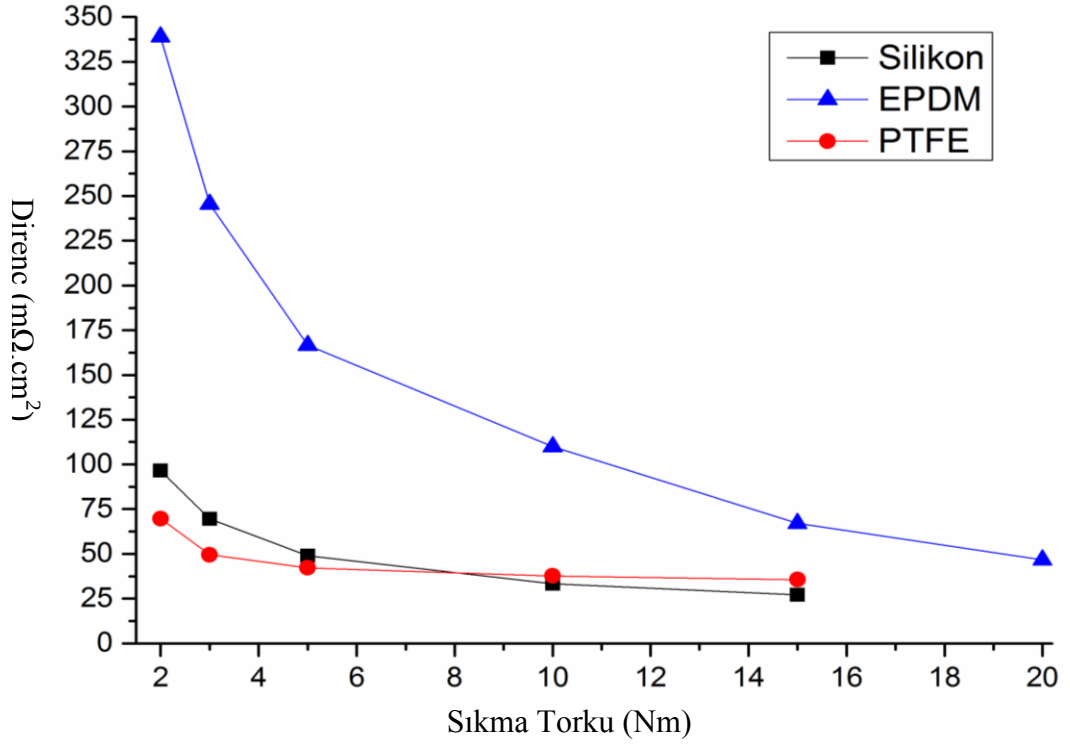


Şekil 4.8. 15 Nm tork değeri için performans karşılaştırması

4.3 Kontak Direnci Ölçüm Sonuçları

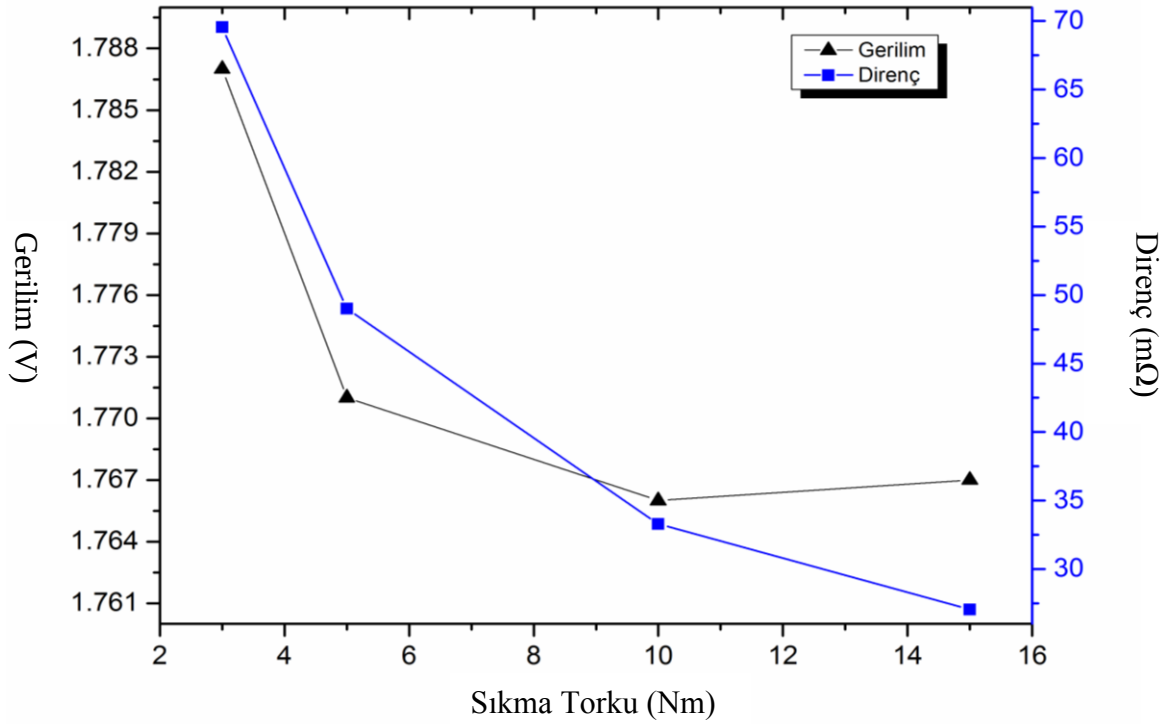
Her bir sızdırmazlık elemanına ait farklı sıkma tork değerleri altındaki kontak direnç grafikleri Şekil 4.10' da gösterilmektedir. Hücre bileşenlerine ait iç dirençler çok düşük olduğu için ihmal edilebilir ve ölçümler sonucundaki toplam direnç değerleri kontak direnci olarak yorumlanabilir (Zhang vd., 2006). Sızdırmazlık elemanlarının farklı tork değerleri altındaki kontak dirençleri karşılaştırıldığı zaman EPDM' in düşük sıkma tork değerlerinde daha yüksek kontak direncine sahip olduğu görülmektedir. Sıkma tork değeri arttıkça kontak direncinin 20 Nm sıkma torkunda 46,6055 mΩ.cm² değerine kadar düşerek PTFE ve silikon sızdırmazlık elemanlarının değerlerine yaklaştığı görülmektedir. EPDM' in kontak direncindeki büyük orandaki değişimin ana sebebinin malzemenin mekanik özellikleri ve sızdırmazlık elemanı ile akış alanı kalınlık optimizasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıkma tork değeri arttıkça kontak direncindeki en düşük değişim PTFE de görülmüştür. 3 Nm'den 15 Nm'ye kontak direnci 49,539 mΩ.cm² ile 35,637 mΩ.cm² değerleri aralığında ölçülmüştür. Bu durum sızdırmazlık elemanının kuvvete karşı gösterdiği reaksiyondan kaynaklandığı düşünülmüştür. PTFE silikon ve EPDM malzemelere göre aynı kuvvet altında daha az

sıkışmakta ve kalınlık dengesini daha iyi koruyabilmektedir. Kontak dirençleri 3 Nm'den 15 Nm sıkma tork değerleri aralığında EPDM için 245,5025 m Ω .cm² ile 67,0015 m Ω .cm² ve silikon için 69,5415 m Ω .cm² ile 27,0490 m Ω .cm² aralıklarında değişmiştir..



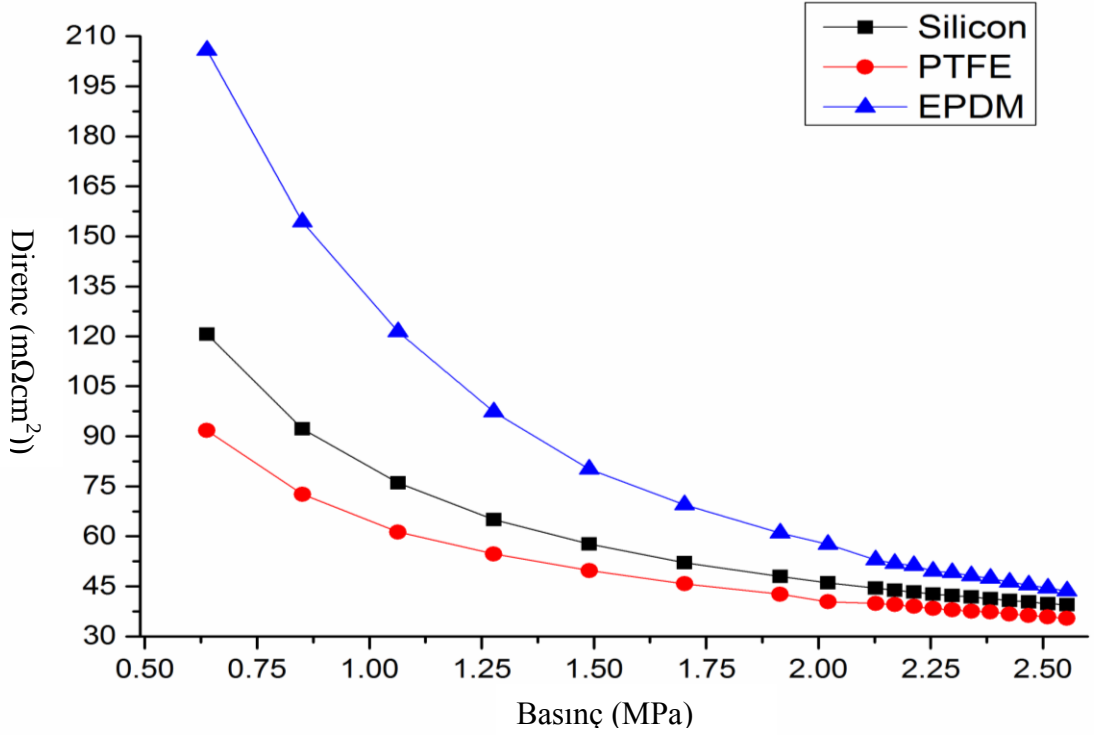
Şekil 4.9. Sızdırmazlık elemanları için farklı tork değerleri altında kontak direnci ölçümleri

Cıvata sıkma tork değerinin artırılması ile birlikte kontak direncinin düşmesi ve buna bağlı olarak hücre performansında 0,5A/cm² akım yoğunluğunda gerçekleşen iyileşme EPDM sızdırmazlık elemanının kullanıldığı durumda Şekil 4.11. de görülebilmektedir.



Şekil 4.10. 0,5A/cm² akım yoğunluğunda EPDM sızdırmazlık elemanı kullanılarak cıvata sıkma torku ile kontak direncini ve performans değişimi

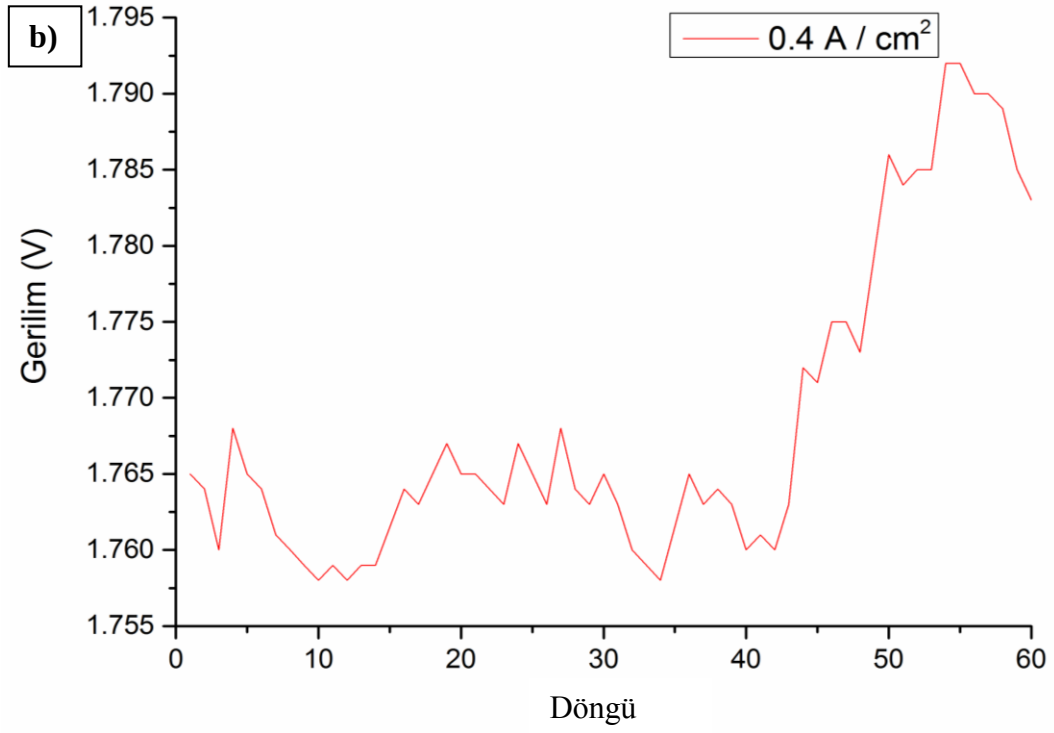
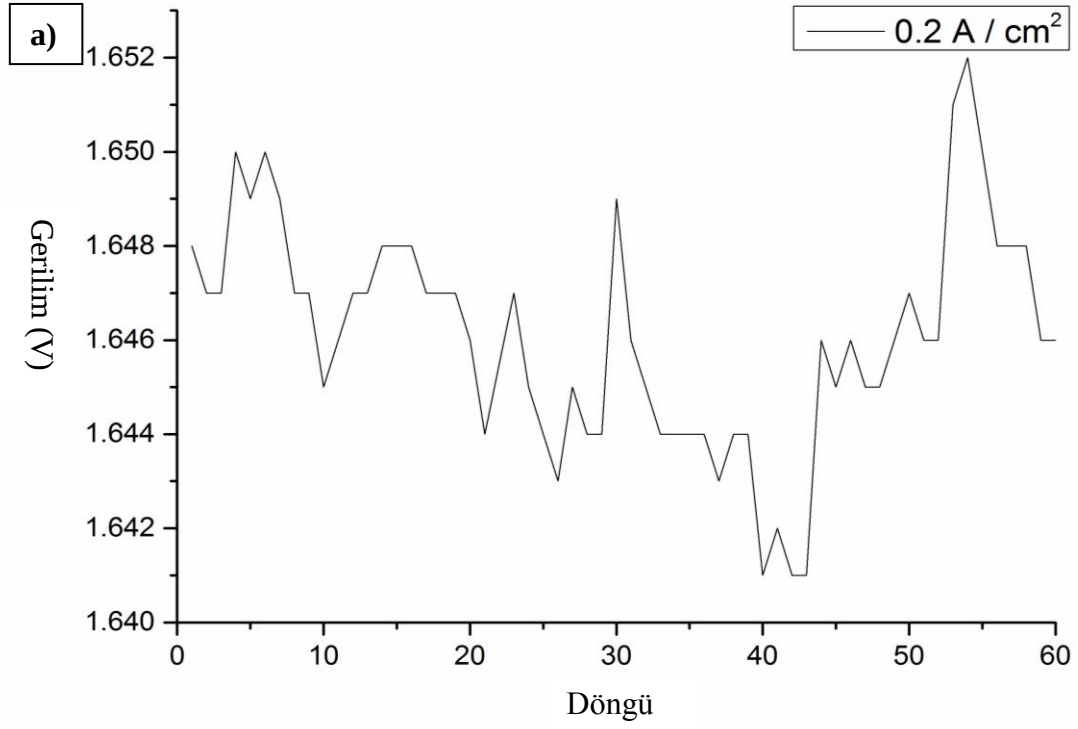
Hücrenin hassas bir pres (Autograph) içinde çok küçük kuvvet artışlarıyla yapılan ölçüm sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu sonuçların sıkma torku ile yapılan ölçümlerin sonuçları ile paralellik gösterdiği görülebilmektedir. Hücre üzerine uygulanan kuvvete bağlı olarak kontak direnç değerinin 35 - 45 mΩ.cm² aralığında değiştiği görülebilmektedir. Oluşan küçük farklılıkların ise hücre üzerine uygulanan kuvvetin etki noktasının değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda (Mishra vd., 2004; Ismail vd., 2013; Xing vd., 2010; Lai vd., 2008; Nitta vd., 2008) hücre bileşenleri arası kontak direncinin 2 - 10 mΩ.cm² aralığında değiştiği belirtilmiş. Bu çalışmada 15 bileşenin ara yüzeylerinde oluşan toplam direnç değerinin 35 - 45 mΩ.cm² olduğu düşünüldüğü zaman elde edilen sonuçların literatür ile paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

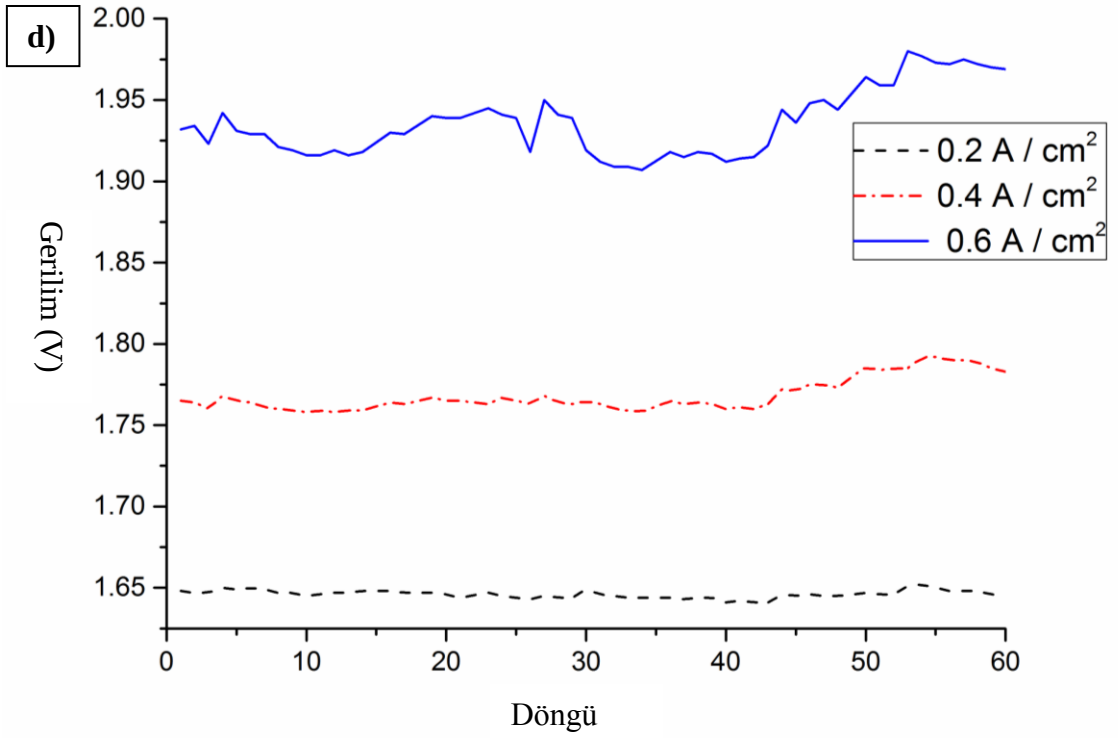
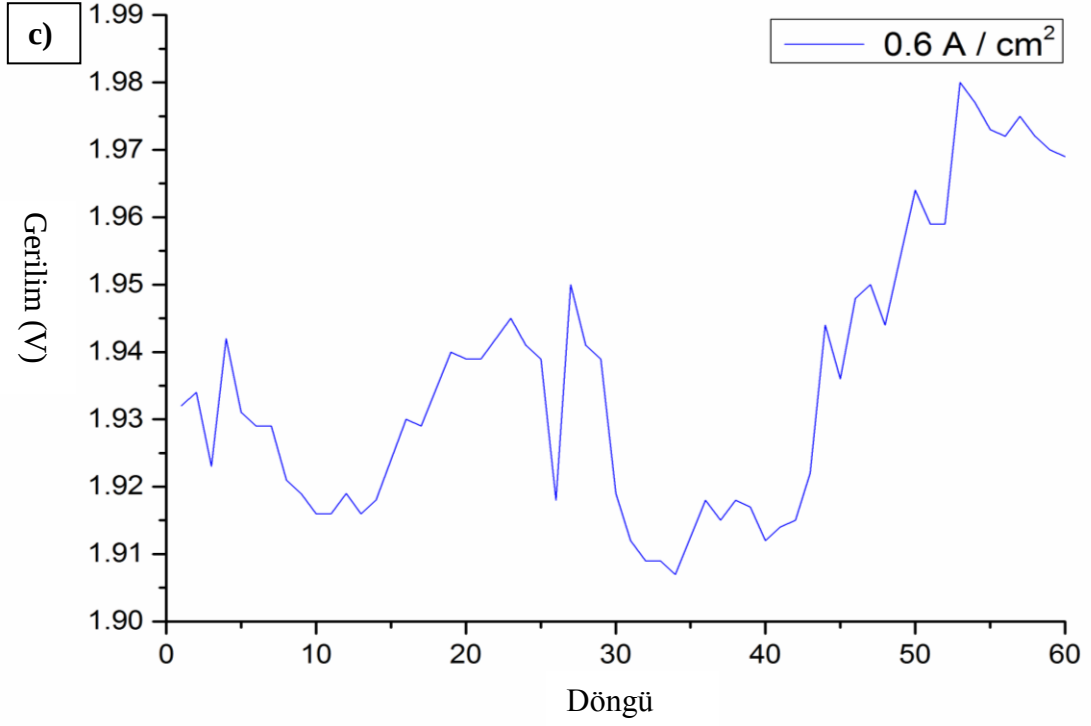


Şekil 4.11. Farklı sıkıştırma basınçları altında kontak direnci ölçümleri

4.4 Hızlandırılmış Performans Ölçümleri ile Ömür Testi Sonuçları

PEM elektrolizör hücresi sırasıyla 0,2-0,4 ve 0,6 A/cm² akım yoğunluklarında 5' er dk süre ile süresiyle çalıştırılmıştır. Bu döngü 55 kere tekrarlanmış ve hem zamanla hem de hücreyi aç/kapa yaptıkça hücre performansında gerçekleşen değişimler incelenmiştir. Şekil 4.13 de ölçüm sonuçlarına ait polarizasyon grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiği zaman şekil 4.13.a da görüldüğü gibi 0,2 A/cm² de ciddi bir performans değişimi görülmemiştir. 40. döngü civarlarında bir miktar performans iyileşmesi görülebilir. Çok ciddi bir değişim değildir. 0,4 A/cm² de ise zamanla performans iyileşmesi görülmesi rağmen şekil 4.13.b de görüldüğü üzere 40. döngü ve sonrasında performans düşüşü görülmüştür. Şekil 4.13.c de 0,6 A/cm² ye ait performans grafiği görülmektedir. Yine 40. döngü ve sonrasında ciddi bir performans düşüşü görülmektedir. Şekil 4.13.d de akım yoğunluklarına karşılık farklı akım yoğunluklarındaki performans grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Bu grafiklerden anlaşıldığı üzere yüksek akım yoğunluklarının hücre ömrü üzerinde ciddi bir etkisi bulunmaktadır.





Şekil 4.12. a) 0,2 A/cm² b) 0,4 A/cm² c) 0,6 A/cm² d) karşılaştırmalı performans bozunum grafikleri

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kontak direnci ve cıvata sıkıştırma torkunun 50cm^2 PEM elektrolizör hücresi performansı üzerindeki etkileri silikon, EPDM ve PTFE sızdırmazlık elemanları kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. 3, 5, 10, 15 ve 20 Nm cıvata sıkıştırma torklarına karşılık kontak direnci ve performans grafikleri elde edilmiştir. Sızdırmazlık elemanı ile akış alanı ve gaz difüzyon grubu kalınlıklarının birbine göre ayarlanması gerektiğine sonucuna varılmış ve deneysel çalışmalar sonucunda verilen kalınlık değerleri için 20 Nm cıvata sıkma tork değerinin gereğinden fazla olduğu anlaşılmıştır. En düşük kontak direncinin 20 Nm' de elde edilmesine rağmen karbon kağıt ve gözenekli titanyum gibi hücre elemanlarında iki fazlı akış ve kütle transferinde problemlere yol açabilecek fiziksel bozulmalar görülmüştür. Diğer bir yandan, uygulanan akım yoğunlukları için en düşük gerilim değerleri silikon sızdırmazlık elemanı için 10 Nm, EPDM ve PTFE sızdırmazlık elemanları için ise 15 Nm' de elde edilmiştir.

MEG üzerine etkiyen basınç değerleri ise basınca duyarlı filmlerin dijital ortama aktarılarak filmlerin üzerindeki izlerin basınç değerlerine dönüştürülerek incelenmesi ile elde edilmiştir. Bir değere kadar artan cıvata sıkıştırma torkunun kontak direncini düşürerek performansı artırmasına rağmen aktif alan üzerindeki basınç dağılımının tam homojen olarak elde edilememesi akış alanının karışık örgü yapısına bağlanmıştır. Daha homojen basınç dağılımlarının elde edilebilmesi için akış alanlarının imalatının iyileştirilmesi üzerine çalışılmalıdır.

Kontak direnci ayrıca PEM elektrolizör hücresinin hassas bir pres içerisinde sıkıştırılması ile ölçülmüştür. Cıvatalar ile sıkıştırılan hücrede sıkıştırma kuvveti kenarlardan merkeze doğru etki ederken, pres içerisinde sıkıştırılan hücre üzerine kuvvet direkt aktif alan üzerine, merkezden, etkimektedir. Elde edilen kontak direnci değişimlerinin cıvata sıkıştırma torku ile yapılan çalışmaların sonuçlarına paralellik gösterdiği, hücre üzerine etkiyen kuvvet arttıkça kontak direncinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Yapılan hızlandırılmış ömür testlerinde ise çeşitli akım yoğunluklarında çalışılmıştır ve PEM elektrolizör hücre performansının yüksek akım yoğunluklarında çalışıldığı zaman daha hızlı düştüğü ve belirli bir performansta çalışma süresinin daha kısa olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

Ahmed, D.H., Sung H.J. and Bae, J., "Effect of GDL permeability on water and thermal management in PEMFCs—II. Clamping force", *Journal of Power Sources* 33, 3786-3800, 2008.

Ahn S.Y., Shin, S.J., Ha H.Y., Hong, S.A., Lee, Y.C., Lim T.W. and Oh, I.H., "Performance and lifetime analysis of the kW-class PEMFC stack" *Journal of Power Sources* 106, 295-303, 2002.

Atrazhev, V., Burlatsky S.F., Cipollini N.E., Condit D.A. and Erikhman, N., "Aspects of PEMFC Degradation", *ECS Transactions* 1 (8), 239-246, 2006.

Bae, S.J., Kim, S.J., Lee, J.H., Song, I., Kim, N.I., Seo, Y., Kim, K.B., Lee, N. and Park, J.Y., "Degradation pattern prediction of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack with series reliability structure via durability data of single cells" *Applied Energy* 131, 48-55, 2014.

Berejnov, V., Martin, Z., West, M., Kundu, S., Bessarabov, D., Stumper J., Susac, D. and Hitchcock A.P., "Probing platinum degradation in polymer electrolyte membrane fuel cells synchrotron X-ray microscopy" *Phys. Chem. Chem. Phys* 14, 4835-4843, 2012.

Cai, M., Ruthosky, M. S., Merzougui, B., Swathirajan, S., Balogh, M.P. and Oh, S.H., "Investigation of thermal and electrochemical degradation of fuel cell catalysts" *Journal of Power Sources* 160, 977-986, 2006.

Carmo, M., Fritz, D.L., Mergel, J. and Stolten, D., "A comprehensive review on PEM water electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 4901-4934, 2013.

Chang, W.R., Hwang, J.J., Weng F.B., Chan S.H., "Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources* 166, 149-154, 2007.

Collier, A., Wang, H., Yuan X.Z., Zhang J., and Wilkinson, D.P., "Degradation of polymer electrolyte membranes". *International Journal of Hydrogen Energy* 31, 1838-1854, 2006.

Gatto, I., Urbani, F., Giaccoppo G., Barbera O. and Passalacqua, E., "Influence of the bolt torque on PEFC performance with different gasket materials", *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 13043-13050, 2011.

Ge, J., Higier, A. and Liu, H., "Effect of gas diffusion layer compression on PEM fuel cell performance", *Journal of Power Sources* 159, 922-927, 2006.

Ismail, M.S., Ingham, D.B., Ma. L. and Pourkashanian, M., "The contact resistance between gas diffusion layers and bipolar plates as they are assembled in proton exchange membrane fuel cells", *Renewable Energy* 52, 40-45, 2013.

Lee, S.J., Hsu, C.D. and Huang, C.H., "Influence of clamping force on the performance of PEMFCs", *Journal of Power Sources* 145, 353-361, 2005.

Lee, W.K., Ho, C.H., Zee, J.W.V. and Murthy, M., "The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell", *Journal of Power Sources* 84, 45-51, 1999.

Lin, J.H., Chen W.H., Su, Y.J. and Ko, T.H., "Effect of gas diffusion layer compression on the performance in a proton exchange membrane fuel cell", *Fuel* 87, 2420-2424, 2008.

Lua, Z., Kim, C., Karlsson, A.M., Cross, III J.C. and Santare, M.H., "Effect of gas diffusion layer modulus and land/groove geometry on membrane stresses in proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources* 196, 4646-4654, 2011.

Luo, Z., Li, D., Tang H., Pan M. and Ruan, R., "Degradation behaviour of membrane-electrode-assembly materials in 10-cell PEMFC stack" *International Journal of Hydrogen Energy* 31, 1831-1837, 2006.

Mamat, M.S., Grigoriev, S.A., Dzhus, K.A., Grant, D.M. and Walker, G.S., "The performance and degradation of Pt electrocatalysts on novel carbon carriers for PEMFC applications", *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 7580-7587, 2010.

Mikkola, M., Tingelöf, T. and Ihonen, J.K., "Modelling compression pressure distribution in fuel cell stacks" *Journal of Power Sources* 193, 269-275, 2009.

Millet, P., Dragoe, D., Grigoriev, S., Fateev, V. and Etievant, C., "GenHyPEM: A research program on PEM water electrolysis supported by the european Commission", *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 4974-4982, 2009.

Millet, P., Ranjbari, Guglielmo, F. de, Grigoriev, S.A. and Aupretre, F., "Cell failure mechanisms in PEM water electrolyzers" *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 17478-17487, 2012.

Mishra, V., Yang, F. and Pitchumani, R., "Measurement and Prediction of Electrical Contact Resistance Between Gas Diffusion Layers and Bipolar Plate for Applications to PEM Fuel Cells", *Journal of Fuel cell Science and Technology* 1, 2-9, 2004.

Module 1: Hydrogen Properties, Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001, College of The Desert

Montanini, R., Squadrito, G. and Giacoppo, G., "Measurement of the clamping pressure distribution in polymer electrolyte fuel cells using piezoresistive sensor arrays and digital image correlation techniques", *Journal of Power Sources* 196, 8484-8493, 2011.

Netwall, C.J., Gould, B.D., Rodgers, J.A., Nasello, N.J. and Lyons, K.E.S., "Decreasing contact resistance in proton-exchange membrane fuel cells with metal bipolar plates", *Journal of Power Sources* 227, 137-144, 2013.

Nitta, I., Himanen, O. and Mikkola, M., "Contact resistance between gas diffusion layer and catalyst layer of PEM fuel cell", *Electrochemistry Communications*, 10, 47-51, 2008.

Oono, Y., Sounai, A. and Hori, M., "Long-term cell degradation mechanism in high-temperature proton exchange membrane fuel cells" *Journal of Power Sources* 210, 366-373, 2012.

Ous, T. and Arcoumanis, C., "Effect of compressive force on the performance of a proton exchange membrane fuel cell", *Journal of Mechanical Engineering Science* 221-C, 1067-1074, 2007.

Pozio A., Silva, R.F., Francesco, M.D. and Giorgi, L., "Nafion degradation in PEFCs from end plate iron contamination" *Electrochimica Acta* 48, 1543-1549, 2003.

Pre-Investigation of Water Electrolysis, PSO-F&U 2006-1-6287.

Radhakrishnan, V. and Haridos, P., "Effect of GDL compression on pressure drop and pressure distribution in PEMFC flow field", *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 14823-14828, 2011.

Rubio, M.A., Urquia, A. and Dormido, S., "Diagnosis of performance degradation phenomena in PEM fuel cells" *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 2586-2590, 2010.

Selamet, O.F., Acar, M.C., Mat, M.D. and Kaplan, Y., "Effects of operating parameters on the performance of a high-pressure proton exchange membrane electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 457-467, 2013.

Smolinka, T., Overview on Water Electrolysis for Hydrogen Production and Storage, 2012.

Song, C., "Overview of Hydrogen Production Options for Hydrogen Energy Development, Fuel-Cell Fuel Processing and Mitigation of CO₂ Emissions", ***Proc. 20th International Pittsburgh Coal Conference***, 40-43, 2003.

Stucki, S. and Scherer, G.G., "PEM water electrolyzers: evidence for membrane failure in 100kW demonstration plants" ***Journal of Applied Electrochemistry*** 28, 1041-1049, 1998.

Su, Z.Y., Liu, C.T., Chang, H.P., Li, C.H., Huang, K.J. and Sui, P.C., " A numerical investigation of the effects of compression force on PEM fuel cell performance", ***Journal of Power Sources*** 183, 182-192, 2008.

Sun, S., Shao, Z., Yu, H., Li, G. and Yi, B., "Investigations on degradation of the long-term proton exchange membrane water electrolysis stack", ***Journal of Power Sources*** 267, 515-520, (2014).

Tan, J., Chao, Y.J., Lee, W.K. and Zee, J.W.V., "Relationship between the applied bolt torque and compression of gasket in a fuel cell assembly" ***Journal of Pressure Equipment and Systems*** 5, 1-7, 2007.

Tan, J., Chao, Y.J., Li, X. and Van Zee, J.W., "Degradation of silicone rubber under compression in a simulated PEM fuel cell environment", ***Journal of Power Sources*** 172, 782-789, 2007.

Taymaz, I. and Benli, M., " Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell", ***Energy*** 35, 2134-2140, 2010.

Tsiplakides, D., PEM Water electrolysis fundamentals, 2012.

Wang, X., Song, Y. and Zhang, B., "Experimental study on clamping pressure distribution in PEM fuel cells", ***Journal of Power Sources*** 176, 305-309, 2008.

Wen, C.Y., Lin, Y.S. and Lu, C.H., "Experimental study of clamping effects on the performances of a single proton exchange membrane fuel cell and a 10-cell stack", *Journal of Power Sources* 192, 475-485, 2009.

Xing, X.Q., Lum, K.W., Poh, H.J. and Wu, Y.L., "Optimization of assembly clamping pressure on performance of proton-exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources* 195, 62-68, 2010.

Yamin, J.A., "Heat losses minimization from hydrogen fueled 4-stroke spark ignition engines", *Journal of the Brazilian society of Mechanical Sciences and Engineering* 29, 109 - 114, 2007.

Yim, S.D., Kim B.J., Sohn Y.J., Yoon Y.G., Park G.G., Lee W.Y., Kim C.S. and Kim Y.C., "The influence of stack clamping pressure on the performance of PEM fuel cell stack", *Current Applied Physics* 10, S59-S61, 2010.

Yuan., X.Z., Li, H., Zhang, S., Martin J. and Wang, H., "A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols" *Journal of Power Sources* 196, 9107-9116, 2011.

Zhang, L., Liu, Y., Song, H., Wang, S., Zhou, Y. and Hu, S.J., "Estimation of contact resistance in proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources* 162, 1165-1171, 2006.

Zhou, P., Lin, P., Wu, C. W. and Li, Z., "Effect of nonuniformity of the contact pressure distribution on the electrical contact resistance in proton exchange membrane fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 6039-6044, 2011.

Zhou, P., Wu, C.W. and Ma, G.J., "Influence of clamping force on the performance of PEMFCs", *Journal of Power Sources* 163, 874-881, 2007.

ÖZ GEÇMİŞ

Muhammed Said ERGÖKTAŞ 03.06.1989 tarihinde Kayseri' de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kayseri' de tamamladı. 2008 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Haziran 2013'de üçüncülükle mezun oldu. 2010-2011 döneminde kazandığı LLP-ERASMUS bursu kapsamında University of West Bohemia' da (Çek Cumhuriyeti) Lisans eğitime devam etti. 2013 yılında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Kasım 2014 tarihinde ise Tübitak 2210-C yüksek lisans tez teşvik bursu almaya hak kazanmış ve çalışmalarına bu kapsamda devam etmiştir.

TEZ ÇALIŞMASINDA ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ile 2 (iki) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Selamet, O.F. , **Ergoktas, M.S.**, "Effects of Bolt Torque and Contact Resistance on the Performance of the Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzers", ***Journal of Power Sources*** 281, 103-113, 2015.

Selamet, O.F., **Ergoktas, M.S.**, " Effect of Bolt Torque on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzers", ***13th International Conference on Clean Energy (ICCE-2014)***, Istanbul/Turkey, s.1907-1912, 8-12 June 2014.

Selamet, O.F., **Ergoktas, M.S.**, “The investigation of Contact Resistance of Diffusion Layers Coated with Plasma Based Physical Vapor Deposition Technique and Its influence On The Performance of A Proton Exchange Membrane Electrolyzer”, ***1st International Plasma Technologies Congress***, Kayseri/TURKEY, 2014.

