



**FARKLI SIKIŖTIRMA YÖNTEMLERİNİN PEM YAKIT HÜCRESİ
PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Arife UZUNDURUKAN

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2019

Arife UZUNDURUKAN tarafından hazırlanan “FARKLI SIKIŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BİLGİLİ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

İkinci Danışman: Doç. Dr. Yılser DEVRİM

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Atılım Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Nuri YÜCEL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Murat K. AKTAŞ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TOBB ETÜ

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

Tez Savunma Tarihi: 29/11/2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

.....

Arife UZUNDURUKAN

29/11/2019

FARKLI SIKIŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Arife UZUNDURUKAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2019

ÖZET

Yakıt hücresi teknolojisi verimli, temiz ve güvenilir bir elektrik üretimi sağlar. Yakıt hücresi tipleri arasında, Proton Elektrolit Membran Yakıt Hücresi (PEMYH), taşınabilir uygulamalarla uyumluluğu ve düşük sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi nedeniyle diğer yakıt hücresi tiplerine kıyasla öne çıkmaktadır. PEMYH'nin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri sıkıştırma kuvveti ve yöntemidir. Bu çalışmada, cıvata ile sıkıştırma ve press altında sıkıştırma yöntemlerinin PEMYH'nin performansına etkisi 0,4 Nm ile 1,9 Nm arasında değişen ve bu yüklere karşılık gelen 1341 N ile 6340 N arasındaki yükler altında incelenmiştir. Toplam deformasyon analizi ANSYS üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda yakıt hücresi test istasyonu kullanılarak paralel serpantin (PIS) akış kanalına ve 25 cm² aktif alana sahip olan tek hücreli PEMYH kullanılmıştır. Deneyler anot tarafından (H₂) ve katot tarafından (hava) beslenerek 60°C sıcaklıkta yapılmıştır. Maksimum güç yoğunluğu cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemleri için sırasıyla 0,458 W/cm² ve 0,480 W/cm² olarak hesaplanmıştır. 0,6 V hücre çalışma voltajında PEMYH'nin güç yoğunluğunun 4389 N değerinde pres altında sıkıştırma yönteminin bu değere karşılık olan 1,3 Nm değerinde cıvata ile sıkıştırma yöntemine göre % 11 arttığı görülmüştür. PEMYH'nin sıkıştırılmasında homojen bir kuvvet dağılımının hücre performansını büyük ölçüde artırdığı belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91408
Anahtar Kelimeler : Sıkıştırma, PEM Yakıt Hücresi, Membran Elektrot Atacı
Sayfa Adedi : 95
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BİLGİLİ
2. Danışman : Doç. Dr. Yılser DEVRİM

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT COMPRESSION METHODS ON PEM FUEL CELL PERFORMANCE

(M. Sc. Thesis)

Arife UZUNDURUKAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2019

ABSTRACT

Fuel cell technology ensures efficient, clean and reliable electricity generation. Among the fuel cell types, Proton Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) stands out compared to other fuel cell types due to its compatibility with portable applications and high performance at low temperatures. One of the most important factors affecting the performance of PEMFC is compression force and method. In this study, the effect of bolt compression and press compression methods on the performance of PEMFC was investigated under loads ranging from 0.4 Nm to 1.9 Nm and corresponding to these loads between 1341 N and 6340 N. Total deformation analysis was performed using ANSYS three-dimensional (3D) finite element analysis (FEA) method. A single cell PEMFC with parallel serpentine (PIS) flow channel and 25 cm² active area was tested in experimental studies using fuel cell test station. The experiments were conducted by anode (H₂) and cathode (air) at 60°C. Maximum power density was calculated as 0.458 W/cm² and 0.480 W/cm² for bolt compression and press compression methods, respectively. At 0.6 V cell operating voltage, the power density of PEMFC increased by 11 % compared to the bolt compression method of 1.3 Nm, which corresponds to 4389 N press compression. It has been found that a homogeneous force distribution in the compression of PEMFC greatly improves cell performance.

Science Code : 91408

Key Words : Compression, PEM Fuel Cell, Membrane Electrode Assembly

Page Number : 95

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Muhittin BİLGİLİ

Co Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yılser DEVRİM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansım ve tez çalışmalarım sürecinde bana verdiği bilgilerin yanı sıra, akademik desteği, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli tecrübelerinden faydalandığım ve doktora çalışmam için bana referans olan sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BİLGİLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki çift ana-dal lisansım, yüksek lisansım, tez çalışmalarımın yanı sıra akademik çalışma hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, yönlendiren ve yüksek lisans ve doktora çalışmam için bana referans olan lisans bitirme tez danışmanım ve yüksek lisans eş danışman hocam Doç. Dr. Yılser DEVRİM'e teşekkür ederim. Ayrıca, profesyonel akademik çalışma hayatımda ve günlük hayatta verdiği tavsiyeler için, yüksek enerjisi ile beni motive edip ve bana liderlik ettiği için kendisine teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarına verdikleri destekten dolayı Atılım Üniversitesi, Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Pilleri Laboratuvarı, Metal Şekillendirme ve Mükemmeliyet Merkezi (MŞMM) ve başta Şirket Genel Müdürü Hüseyin DEVRİM olmak üzere, Yağmur BUDAK ve Ömer ERDEMİR ve tüm TEKSİS İLERİ TEKNOLOJİLER KİM. İM. VE DIŞ TİC. LTD. ŞTİ personeline teşekkürü bir borç bilirim.

Destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve her zaman bana moral veren anneme, babama, kardeşlerime, sevgili eşim Emre UZUNDURUKAN'a ve ailesine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye Cumhuriyeti'ne eğitimim boyunca sağladığı karşılıksız olanaklar için şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	7
2.1. Yakıt Hücresine Giriş	7
2.1.1. Yakıt hücresinin tarihçesi	7
2.1.2. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi	9
2.2. Yakıt Hücresi Potansiyeli ve Kayıpları	10
2.2.1. Aktivasyon kayıpları	11
2.2.2. Ohmik kayıplar	12
2.2.3. Kütle transfer kayıpları	12
2.2.4. Reaktant gazların sızıntısının neden olduğu kayıplar	13
2.3. Elektrolite Göre Yakıt Hücresi Çeşitleri	13
2.3.1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi	14
2.3.2. Alkali yakıt hücresi	14
2.3.3. Fosforik asit yakıt hücresi	15
2.3.4. Katı oksit yakıt hücresi	15

	Sayfa
2.3.5. Erimiş karbonat yakıt hücresi	16
2.3.6. Doğrudan metanol yakıt hücresi	16
2.4. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri	17
2.4.1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi teknolojisi	17
2.4.2. Avantaj ve dezavantajları	20
2.5. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi Bileşenleri	20
2.5.1. Proton Elektrolit Membran	21
2.5.2. Gaz difüzyon tabakası	22
2.5.3. Elektrot	22
2.5.5. MEA	23
2.5.6. Bipolar plaka	23
2.5.7. Conta	24
2.5.8. Akım toplayıcı plaka	24
2.6. Proton Elektrolit Membran Yakıt Hücresi Sıkıştırma Yöntemi ve Önemi	25
2.7. Sıkıştırmadaki Mekanik Özellikler	26
2.7.1. Sıkıştırma yükleri arasındaki bağıntı	27
2.7.2. Gerilim ve gerinim eğrisi ve deformasyonun hesaplanması	30
3. MATERYAL VE METOTLAR	35
3.1. Malzemeler	37
3.2. Sayısal Çalışmalar	37
3.2.1. PEMYH bileşenlerinin özellikleri	40
3.2.2. Mesh uygulama çalışmaları	40
3.2.3. Eleman sayısından bağımsızlık testi	42
3.2.4. Sınır koşullarının ve kuvvetlerin belirlenmesi	44

	Sayfa
3.3. Deneysel Çalışmalar	45
3.3.1. PEMYH birleştirilmesi ve deney düzeneği hazırlığı	45
3.3.2. Kuvvet dönüşüm hesabı	49
4. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLAR	51
4.1. Sayısal Sonuçlar	51
4.1.1. Deformasyon sonuçları	51
4.1.2. Cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması.....	70
4.2. Deneysel Sonuçlar	71
4.2.1. Farklı yöntemler altında sıkıştırılan PEMYH'nin performanına etkisi	71
4.2.2. Pres altında ve cıvata ile sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması	73
4.2.3. Deneysel Hata Analizi	76
5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
EKLER	89
EK-1. İş istasyonu teknik özellikleri	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yakıt hücrelerinin sınıflandırılması.....	13
Çizelge 3.1. PEMYH bileşenlerinin boyutları	39
Çizelge 3.2. PEMYH elemanlarının malzeme özellikleri.....	40
Çizelge 3.3. Mesh kalitesi	42
Çizelge 3.4. Deney koşulları	47
Çizelge 3.5. Farklı torkların yük dönüşümü	50
Çizelge 4.1. Cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerindeki en yüksek güç yoğunluğu	75
Çizelge 4.2. Ölçümler sırasında kullanılan elektronik yük ve hassasiyeti.....	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi.....	8
Şekil 2.2. Gemini’de kullanılan polimer elektrolit membran yakıt hücresi.....	8
Şekil 2.3. Yakıt hücrelerinin tarihi gelişimi.....	9
Şekil 2.4. Yakıt hücrelerinin geleneksel enerji üretim yöntemleri ile karşılaştırılması..	10
Şekil 2.5. Yakıt hücresi kayıpları ve polarizasyon eğrisi.....	11
Şekil 2.6. PEMYH şeması	18
Şekil 2.7. PEMYH bileşenlerinin şematik gösterimi	21
Şekil 2.8. MEA’nın 3 katmanlı (a) GDL ve Membran, (b) GDL ve CCM ve (c) 5 katlı olarak tanımlanması.....	23
Şekil 2.9. PEMYH’nin birleştirmesine bağlı kütle transfer kayıpları.....	26
Şekil 2.10. Cıvata üstündeki uygulanan kuvvetler.....	28
Şekil 2.11. Uygulanan kuvvetlerinin serbest cisim diyagramında şematik gösterimi	28
Şekil 2.12. Gerilim-gerinim grafiği	32
Şekil 3.1. Tez çalışmasında uygulanan metotların şematik gösterimi	36
Şekil 3.2. Sıkıştırılmaya hazır PEMYH’nin (a) cıvata ile sıkıştırma (b) pres altında sıkıştırma yöntemi.....	38
Şekil 3.3. BPP PIS gaz akış kanalları (CATIA V5R19).....	39
Şekil 3.4. Mesh görüntüleri (a) cıvatalı geometri için ve (b) cıvatasız geometri için....	41
Şekil 3.5. Eleman sayısından bağımsızlık testi sonuçları (a) pres altındaki sıkıştırma için ve (b) cıvatalı geometri için	43
Şekil 3.6. Sayısal analiz için (a) cıvata ile sıkıştırma ve (b) pres altında sıkıştırma yöntemleri için belirlenen sınır koşulları	44
Şekil 3.7. Performans testleri için yakıt hücresinin elemanlarının (a) BPP ve conta (b) MEA hazırlanması	46
Şekil 3.8. PEMYH’nin (a) cıvata ile sıkıştırılması ve (b) pres altında sıkıştırılması.....	47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.9. PEMYH test istasyonu.....	48
Şekil 3.10. PEMYH test istasyonu.....	49
Şekil 3.11. 8 Adet cıvatalı PEMYH BPP görüntüsü.....	50
Şekil 4.1. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,4 Nm Tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	52
Şekil 4.2. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,6 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	53
Şekil 4.3. Cıvata ile sıkıştırma sıkıştırma yöntemiyle 0,7 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü.....	54
Şekil 4.4. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,9 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	55
Şekil 4.5. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,1 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	56
Şekil 4.6. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,3 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	57
Şekil 4.7. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,5 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	58
Şekil 4.8. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,7 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	59
Şekil 4.9. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,9 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	60
Şekil 4.10. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 1341 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	61
Şekil 4.11. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 1951 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	62
Şekil 4.12. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 2439 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	63
Şekil 4.13. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 3048 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 3658 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	65
Şekil 4.15. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 4389 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	66
Şekil 4.16. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 4999 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	67
Şekil 4.17. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 5637 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	68
Şekil 4.18. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 6340 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü	69
Şekil 4.19. Toplam maksimum deformasyon analizinin cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.20. Cıvata ile sıkıştırma yönteminde farklı torklarda sıkıştırılan PEMYH'nin karakteristik eğrisi	71
Şekil 4.21. Pres altında sıkıştırma yönteminde farklı kuvvetlerde sıkıştırılan PEMYH'nin karakteristik eğrisi	72
Şekil 4.22. Farklı sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması	74
Şekil 4.23. Deneysel çalışma sırasında kullanılan elektronik yük	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Malzeme özelliklerine dayalı sabit
CH₃OH	Metanol
CO₂	Karbondioksit
CO	Karbon monoksit
CO₂	Karbondioksit
D₁	Cıvata dış çapı
D₀	Cıvata iç çapı
L	Dönme noktasına olan uzaklık
d	Nominal çap
d_{eş}	Eş değer uzaklık
E	Elastik modül
F	Faraday sabiti
{F}	Kuvvet vektörü
F	Cıvataya gelen dik kuvvet
F_{sık}	Sıkıştırma kuvveti
F₁	Yataydaki kuvvet
F₂	Düşeydeki kuvvet
H₂	Hidrojen gazı
[K]	Evrensel sertlik matrisi
K	Potasyum
l₀	Malzemenin ilk boyu
Li	Lityum
Na	Sodyum
O₂	Oksijen Gazı
Pt	Platin
R	Ölçülmesi gereken büyüklük
T	Sıcaklık

Simgeler**Açıklamalar**

T	Toplam uygulanan tork değeri
T₁	Cıvata parçalarının uyguladığı tork
T₂	Somunun yüzeye uyguladığı tork
TiN/TiAlN	Titanyum Nitrür/Titanyum Alüminyum Nitrür
P	Cıvata diş adım uzaklığı
R	İdeal gaz sabiti
SiC	Silisyum Karbür
w_n	Her bir ölçümdeki hata oranı
w_R	R değerindeki hata oranı
{x}	Uzama vektörü
x	Termal ve gerilim deformasyonları arasındaki fark
x_n	Dağımsız değişkenler
ΔT	Sıcaklık değişimi
α	Değişen yük katsayısı
σ	Gerilim
β	Dikey kesitte diş açısının yarısı
δ_T	Termal gerilimden kaynaklanan deformasyon
δ_{Toplam}	Toplam deformasyon
δσ	Gerilimden kaynaklanan deformasyon
θ	Sürtünme açısı
μ	Sürtünme katsayısı
φ	Cıvata diş açısı
ν	Poisson oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AYH	Alkali yakıt hücresi
BPP	Bipolar tabaka (Bipolar plate)
CCP	Akım toplayıcılar (Current collector plate)
CL	Katalizör katmanı (Catalyst layer)
EKYH	Erimiş karbonat yakıt hücresi
FAYH	Fosforik asit yakıt hücresi

Kısaltmalar**Açıklamalar****FEA**

Sonlu elemanlar analizi (Finite element analysis)

GDL

Gaz difüzyon tabakası (Gas diffusion layer)

GE

General Elektrik

HT-PEMYH

Yüksek sıcaklık polimer elektrolit membran yakıt hücresi

KOYH

Katı oksit yakıt hücresi

LT-PEMYH

Düşük sıcaklık polimer elektrolit membran yakıt hücresi

MEA

Membran elektrot atacı

OCV

Açık devre voltajı (Open circuit voltage)

PEM

Polimer elektrolit membran

PEMYH

Polimer elektrolit membran yakıt hücresi

PFSA

Perfo sulfonik asit

PTFE

Politetrafloroetilen

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış, teknolojinin ilerlemesi, sanayileşme ve ülkelerin gelişme ihtiyacıyla birlikte enerji tüketimi hızla artmaktadır. Günümüzde bu enerji ihtiyacının büyük bir kısmı kömür, petrol ve doğalgaz gibi geleneksel fosil yakıt kaynaklı termik santrallerden karşılanmaktadır. Ancak, ilerleyen yıllarda bu enerji kaynaklarının tükenmesi ön görüşü ve salınan sera gazlarının hayati derecede zararlı olması sebebiyle fosil yakıtlara olan talep yerini gün geçtikçe alternatif enerji kaynaklarına bırakmaktadır [1,2]. Ayrıca, ilk petrol krizinden beri dünyada enerji perspektifi değişmiş ve birincil enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ile petrole bağımlılığın azaltılması hedeflenmiştir.

Alternatif enerji kaynakları teknolojisi benimsenip verimli bir şekilde kullanılabildiğinde dünya giderek daha temiz, sağlıklı ve ekonomik enerji üretiminin sağlanacağı öngörülmektedir. Bu sebeple alternatif enerji kaynaklarına olan talep ve bu alandaki çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır [3,4].

Günümüzde kullanılan alternatif enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, okyanus akıntılarının enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen (H_2) enerjisi, biokütle enerjisidir. Bu enerji kaynaklarından H_2 enerjisi, H_2 'nin doğada en çok bulunan element olması, yüksek enerji yoğunluğu, su kullanılarak kolaylıkla üretilmesi vb. özellikleri ile diğer alternatif enerji kaynaklarının önüne geçmektedir [5–7].

H_2 'i direkt yakıt olarak kullanabilen yakıt hücreleri geniş kullanım alanları, çevre dostu teknolojiye sahip olmaları, sessiz çalışmaları, hızlı açılıp kapanma ve yüksek verimlilikleri göz önüne alındığında oldukça avantajlıdır [8]. Bu avantajlarından dolayı, yakıt hücreleri üzerinde yapılan bilimsel araştırmalar gün geçtikçe artmakta ve bu teknolojinin gelecekte daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir [9].

Yakıt hücrelerinin geliştirilmesinde ve uygulanmasında en büyük faktör, fosil yakıt kullanımının elektrik üretmek ve taşıtların sevk edilmesinin çevresel sonuçlarıdır [10]. Yakıt hücreleri, reaktantların kimyasal enerjisini, herhangi bir ara basamak veya yanma işlemi olmadan elektrik enerjisine ve ısıya dönüştüren sistemler oldukları için fosil yakıtlara göre oldukça avantajlılardır.

İlk defa 1839 yılında Sir William Grove tarafından [11] geliştirilen yakıt hücreleri son 20 yıldır, yüksek verimliliği ve çevre dostu olmaları nedeni ile içten yanmalı motorların yerine alternatif olmakta ve hem sabit hem de taşınabilir güç uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [12].

Elektrik enerjisi üretiminde % 40'dan fazla verimliliğe ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasının yanı sıra yakıt hücrelerinden açığa çıkan ısı da kullanılabilir. Böylelikle, birleşik ısı güç sistemlerinde ısı geri dönüşümünü sağlamaya uygundur.

Yakıt hücreleri yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonlarıyla oksitleyicinin elektrokimyasal reaksiyonu sonucu elektrik akımı üretir. Anot tarafından yakıt (H_2 ve H_2 içeren yakıtlar) ve katot tarafından oksitleyici (Hava, O_2 , H_2O_2 vb.) kullanılarak, ürün olarak dışarıya su, ısı ve elektrik enerjisi verir.

Geçmişten günümüze kadar birçok yakıt hücre tipi geliştirilmiştir. Hücrede kullanılan elektrolit tipine göre; Alkali Yakıt Hücresi (AYH), Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH), Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH), Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMYH), Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH) ve Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH) olarak sınıflandırılabilir [13].

Bu sınıflandırmada en yaygın kullanıma sahip olan PEMYH sisteminde hücrede kullanılan ince polimerik bir membran elektrotlar arasındaki yük taşınımını sağlar. Diğer yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında PEMYH aynı hacim ya da ağırlıktakilerden çok daha fazla elektrik enerjisi üretebilmesi ve yüksek verimli olması sebebiyle gelecekteki birçok taşınabilir uygulamalar için avantajlı olacaktır [14].

PEMYH'nin temel bileşenleri katalizör tabakası (CL), gaz difüzyon tabakası (GDL), membran, bipolar plaka (BPP), Conta ve akım toplama plakaları (CCP)'den oluşmaktadır. PEMYH'nin tam ortasında bulunan membran proton geçişine izin verirken elektronların geçişine izin vermez. Elektrokimyasal reaksiyonlar CL'da meydana gelir. Gözenekli yapıda olan GDL, anot ve katot tarafından BPP gaz akış kanallarından gelen gazların membrana geçişini sağlar. PEMYH'de kullanılan contalar gaz kaçağının önlenip hücrenin tam gaz yoğunluğunda çalışabilmesini sağlar. BPP ve CCP'nin akım toplanmasında yardımcı

elemanlar olduğu için yüksek elektrik iletkenliğine sahip olan malzemelerden üretilmiş olması gerekmektedir [15] .

PEMYH, çalışma sıcaklığı aralığına göre iki kategoriye ayrılır. Bunlar sırasıyla, Yüksek sıcaklık PEMYH (HT-PEMYH) 120-200°C'ye kadar ve düşük sıcaklık PEMYH (LT-PEMYH) yaklaşık 60-80°C'ye kadar [16] olarak sınıflandırılır. PEMYH düşük sıcaklıklarda çalışabildiği için açılıp kapanma süresi oldukça kısadır.

PEMYH'de anot tarafında H_2 elektron vererek yükseltgenirken katot tarafında oksijen elektron alarak indirgenir. Reaktant gazlar sisteme beslendikleri sürece, PEMYH kilowatlara varan geniş bir güç yelpazesıyla otobüs, tekne, tren, uçak, scooter, bisiklet vb. birçok uygulama alanına sahiplerdir ve bu uygulama alanı gün geçtikçe artmaktadır.

Ancak, yakıt hücreleri ticarileşmeden ve içten yanmalı motorların yerini almadan önce çözülmesi gereken teknik zorluklar bulunmaktadır. Yaygın olarak görülen ana sınırlamalar ve üzerinde çalışması gereken bazı konular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Yakıt hücresi ile çalışan bir sistemin maliyetinin düşürölüp malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.
2. Güvenilirlik ve dayanıklılık sağlanmalıdır.
3. Yakıt hücresi sistemlerinin otomobillere güç vermede kullanabilmesi için, yakıt hücresi yüksek dayanıklılıkta performans göstermelidir.
4. Uygun güç yoğunluğu ve yüksek enerji çıkışı sağlanmalıdır.
5. Yakıt depolama, üretim ve iletim teknolojisi güvenliği sağlanmalıdır.
6. H_2 saf olarak kullanılıyorsa, bu durum bazı sınırlamalar getirir.
7. Yakıt hücreleri için çevrimiçi kontrol sistemleri gereklidir [17].

Sıcaklık, basınç, ortam koşulları, yakıt besleme hızı veya yakıt tipi gibi bir çalışma koşulunu değiştirmek, PEMYH için iyileştirmelerle sonuçlanacağı gibi farklı sorunlara da neden olabilir. Bu sebeple, PEMYH'nin modellenmesi, etkilerini önceden tahmininin sağlanabilmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır.

Yakıt hücresinin performansına etki eden birçok etken vardır. Bu etkenlerin en önemlilerinden ve literatürde en çok çalışan konulardan biri de çalışma koşulları ve

parametreleridir. Yakıt hücresi ile deneysel olarak çalışmadan önce birçok parametrenin incelenip modellenerek sayısal olarak çalışılması gerekir. Bu şekilde deney sayısı azaltılabilir ve deneyler sırasında zaman ve malzeme tasarrufu sağlanır. Modelleme sayesinde her bir parçanın ayrı ayrı araştırma imkânı bulunabilir. Modelleme çalışmaları ve aynı koşullar altında deneysel olarak incelenen PEMYH'lerin birbirleriyle karşılaştırılarak doğrulama yapılması gerekmektedir.

PEMYH montaj işlemi, katman hizalama, sızdırmazlık ve hücre sıkıştırma açısından doğrudan PEMYH performansına etki eder. PEMYH bileşenlerinin doğru yerleştirilmemesi aşırı mekanik gerilmeye, gaz kaçağına ve sızıntıya neden olur, sızdırmazlık sağlanamadığında ise reaktant gazlar sızıntı yaparak yanmaya sebep olabilir ve hücre zarar görebilir.

Sıkıştırma aynı zamanda elektrokimyasal reaksiyon kinetiği, bileşenlerin birbirine bağlanması sonucu oluşan PEMYH omik kayıpları, konsantrasyon kayıpları ve aktivasyon kayıpları ile ilişkilidir. Yeterli sıkıştırmanın olmaması tabakalar arasındaki temas direncini artırırken aşırı sıkıştırma ise mekanik bozulmaya neden olur. Bu nedenle, sıkıştırma tipi ve yük miktarı PEMYH performansı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Cıvata ve somun kullanımı literatürde sıklıkla tercih edilen geleneksel bir yöntemdir ancak bu yöntem PEMYH'de homojen olmayan bir basınç dağılımına ve beraberinde birçok mekanik probleme sebep olmaktadır. Yakıt hücresi sıkıştırma basıncı ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır ancak bu çalışmalar arasında cıvata ile sıkıştırma ve press altında sıkıştırma yöntemleriyle farklı yükler altında deneysel ve sayısal olarak karşılaştırma çalışmalarının literatürde örneği yoktur. Geleneksel ve en çok kullanılan cıvata yöntemi ile sıkıştırılan yakıt hücresinin en önemli sorunlarından bir tanesi olan homojen olmayan sıkıştırma sağlamasıdır. Bu durum yakıt hücresi aktif alanı üzerinde homojen sıkıştırmanın sağlanamamasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak da aşırı deformasyon, yakıt hücresi orta kısmında şişkin yapı oluşmaktadır ve sonrasında ise hücre bileşenlerinde yıpranmalar oluşmaktadır [18,19].

Bu çalışmada 25 cm² aktif alana sahip paralel serpantin (PIS) akış kanallı ve tek hücreli bir PEMYH'nin yapısal statik analizi ANSYS R18.1 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi (3D FEA) programı kullanılarak yapılmıştır. Homojen olmayan ve homojen olan farklı yük

dağılımı altındaki PEMYH ve MEA üzerindeki deformasyonlar gözlenmiştir. Deneysel çalışmalarda ise H₂ ve hava ile beslenen PEMYH üzerine sayısal çalışmalarda kullanılan homojen ve homojen olmayan farklı yükler altında hücrenin performans çalışmaları yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalar, sayısal çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Böylece en uygun sıkıştırma yöntemi ve sıkıştırma kuvveti bulunarak hücrenin daha yüksek performansta çalıştığı koşullar belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yakıt Hücresine Giriş

Son yıllarda fosil yakıtlı enerji kaynaklarının zaman içerisinde tükenmesi ve aynı zamanda çevre kirliliğine sebep olması göz önünde bulundurularak alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Alternatif enerji kaynaklarından H_2 enerjisi, yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, H_2 'nin doğada en çok bulunan element olması ve birçok enerji kaynağından üretilabiliyor olması sebebiyle ön plana çıkmaktadır. H_2 enerjisinin kullanıldığı yakıt hücresi güç sistemleri birçok taşınabilir ve sabit güç üretimi uygulama için kullanıma uygundur.

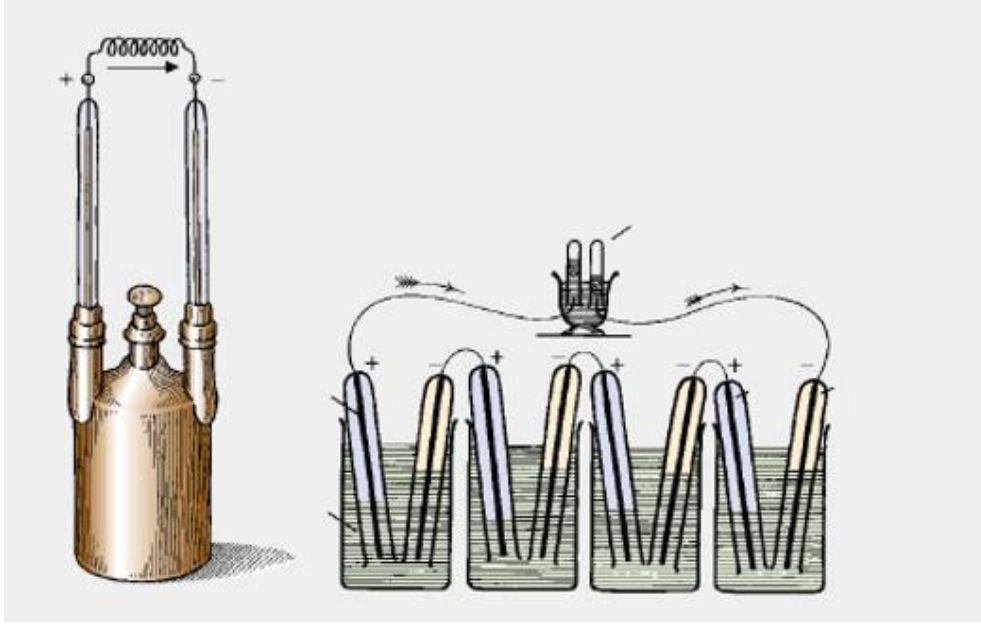
Yakıt hücresi kimyasal enerjiyi direk elektrik enerjine indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarıyla çevirir. Sonucunda doğru akım (DC) üretir ve yan ürün olarak su ve ısı açığa çıkar. PEMYH yüksek güç yoğunluğu, sessiz çalışabilme, hızlı cevap verme ve düşük sıcaklıklarda dahi yüksek verimde çalışabilme gibi avantajlarından dolayı gelecek vaat eden teknolojiler arasındadır [14,20].

2.1.1. Yakıt hücresinin tarihçesi

19. Yüzyılın sonunda geliştirilen yakıt hücreleri günümüze kadar süren ve hala devam eden bir gelişim içerisinde.

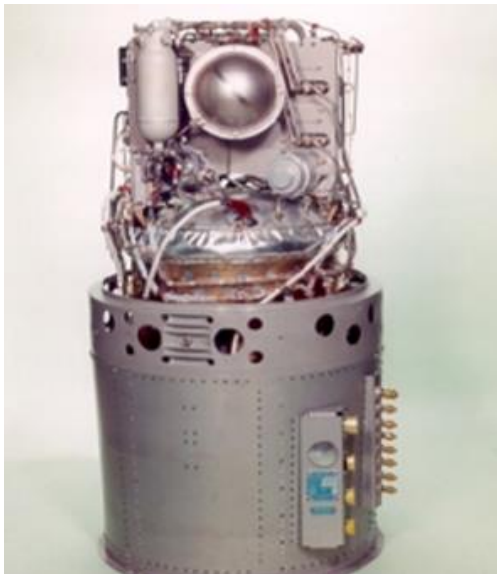
1839 yılında Sir William Grove seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşmuş bir sistemde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır. Daha sonraki yıllarda Grove, önceki çalışmasında kullandığı sistemden elli tanesini birleştirerek oluşturduğu bir sistemde daha fazla elektrik akımı üretmeyi başarmıştır [11]. Sir William Grove tarafından geliştirilen bu yakıt hücresinin şematik gösterimi Şekil 2.1'de verildiği gibidir.

Yakıt hücresi terimi ilk olarak 1889'da Ludwing Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak ortaya konmuştur. Mond ve Longer oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1.5 Watt güç üreten ve % 50 çalışma verimine sahip bir yakıt hücresi geliştirmişlerdir.



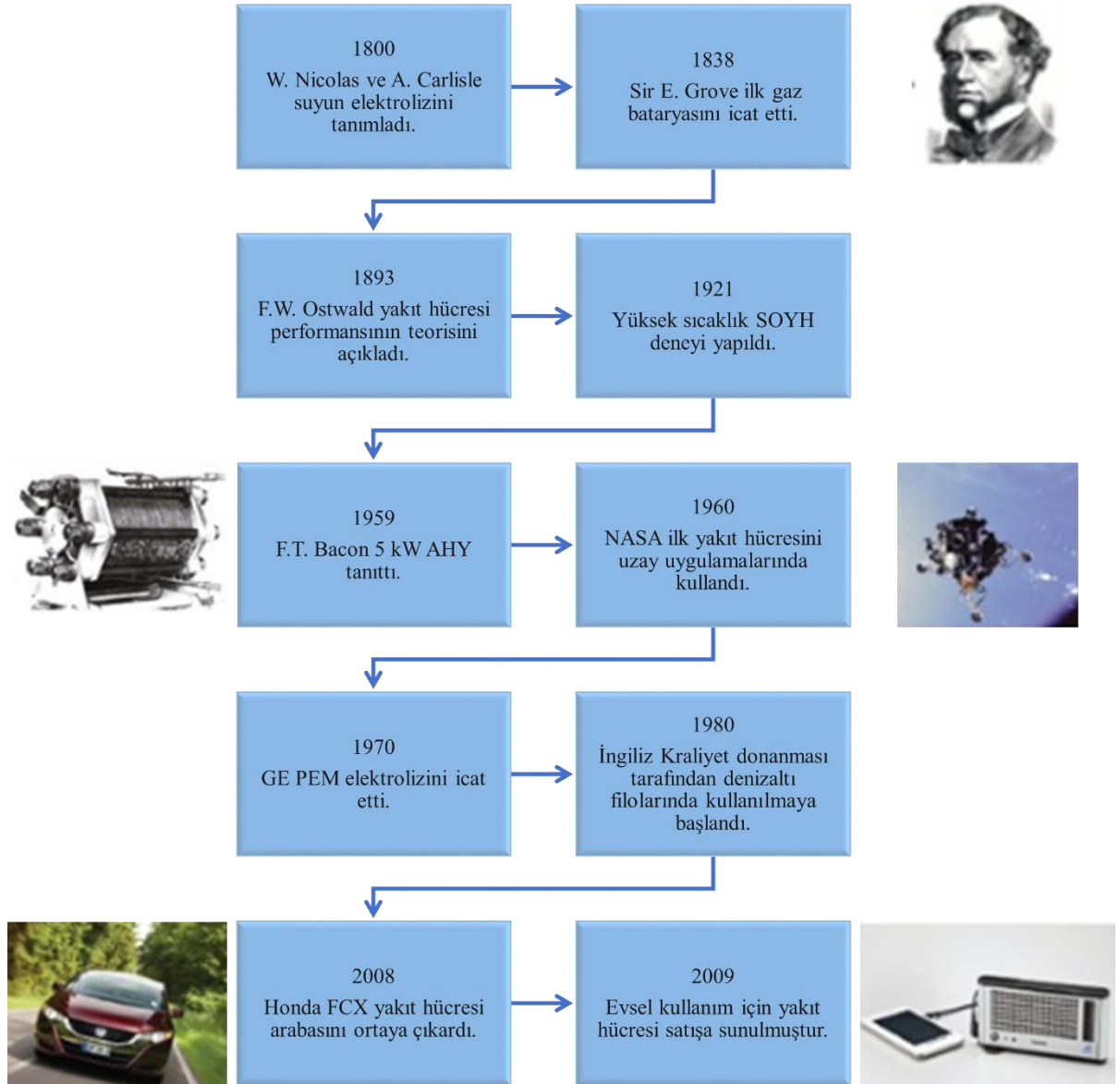
Şekil 2.1 Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi

1960 yılında NASA yakıt hücresi alanındaki çalışmalarını ilerleterek uzay alanında kullanılması için 200'e yakın çalışma yapmıştır. İlk pratik yakıt hücreleri Apollo uzay programı için 1960'larda geliştirilmiştir, günümüzde de hala uzay projelerinde yakıt hücrelerinin kullanımı devam etmektedir [2]. Yakıt hücresinin yüksek verime, sessiz çalışma prensibine ve hareketsiz parçalara sahip olması sebebiyle günümüzde de uzay programlarında kullanımı devam etmektedir. İlk olarak 1970 yılında Gemin uzay aracında GE (General Elektrik) tarafından üretilen PEMYH (Şekil 2.2) kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Gemini'de kullanılan polimer elektrolit membran yakıt hücresi.

Günümüzde yakıt hücresi ile çalışan arabalar ve evsel uygulama çalışmaları çokça görülmektedir. Bu alandaki çalışmalar günümüzde geliştirilerek ticari olarak kullanımına başlanmıştır. Yakıt hücrelerinin kısa tarihçesi Şekil 2.3’de gösterilmiştir.

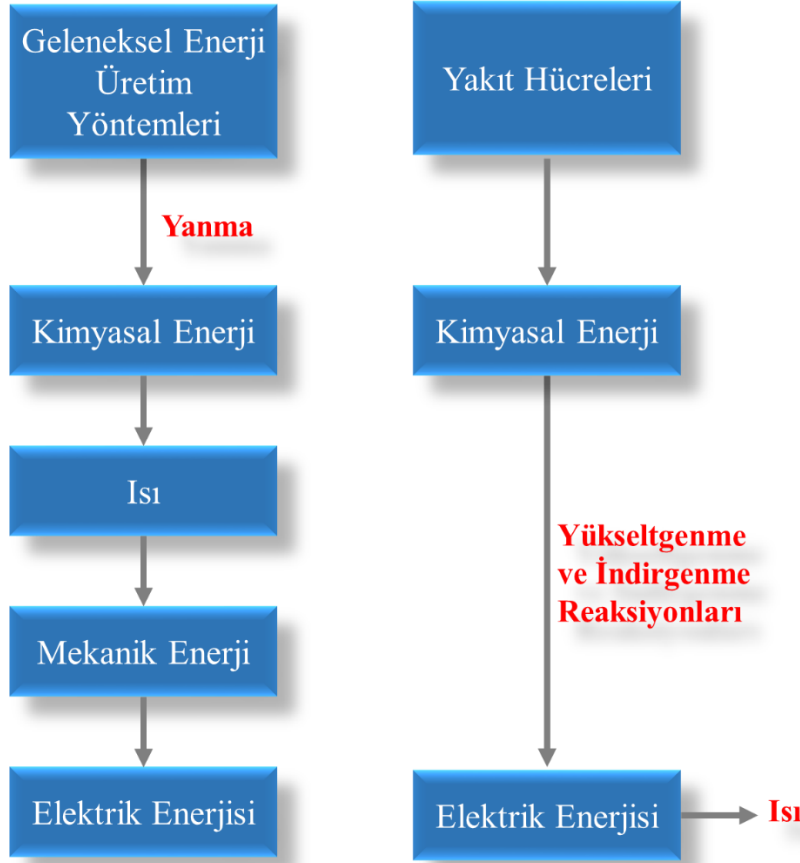


Şekil 2.3. Yakıt hücrelerinin tarihi gelişimi [21]

2.1.2. Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi

Yakıt hücreleri, reaktantların kimyasal enerjisini herhangi ara basamak ve yanma işlemi olmaksızın direkt elektrik enerjisine çevirirler ve ürün olarak ısı ve su açığa çıkar. Bu yönüyle geleneksel enerji üretim yöntemlerinde olan yakma ile kimyasal enerji elde edimi ve bu enerjinin ısı, mekanik ve elektrik enerjisine çevrilmesinin karşılaştırılması Şekil

2.4.'de gösterilmiştir. Yakıt hücreleri ısı makinalarına göre çok daha verimlidir, herhangi hareketli bir parça bulundurmadıkları ve daha basit bir yapıda oldukları için güvenilir ve uzun ömürlü sistemlerdir.



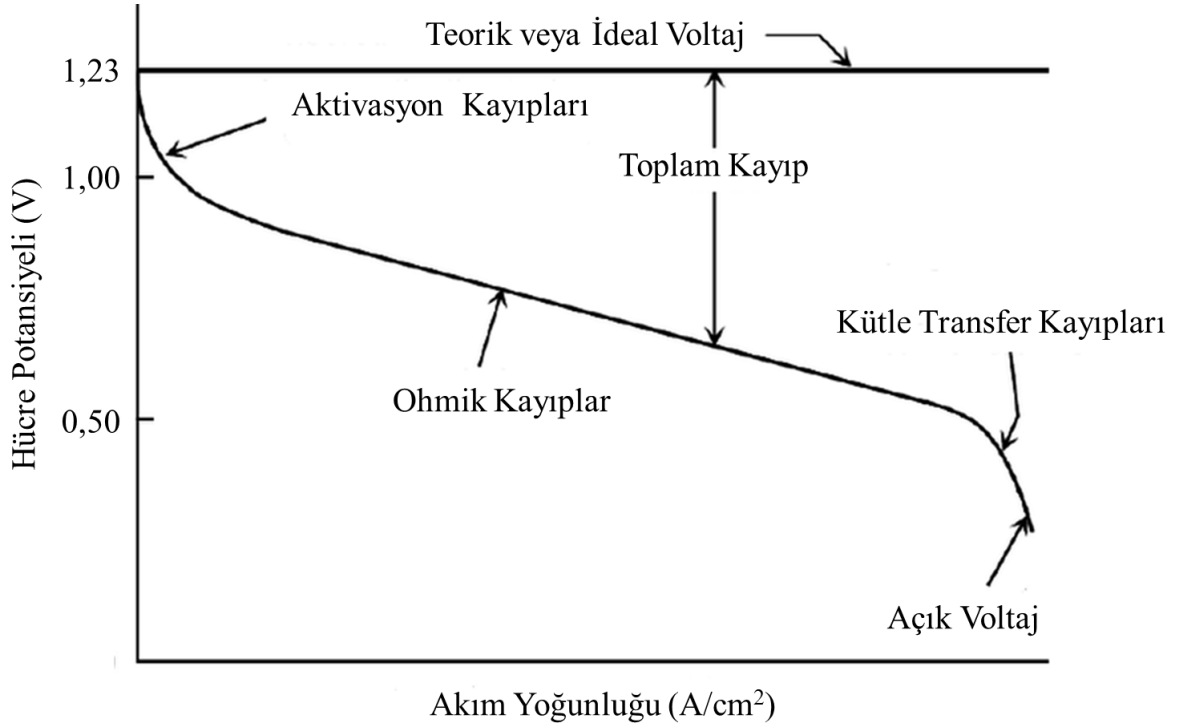
Şekil 2.4. Yakıt hücrelerinin geleneksel enerji üretim yöntemleri ile karşılaştırılması

2.2. Yakıt Hücresi Potansiyeli ve Kayıpları

Yakıt hücresi polarizasyon eğrisi belirlenen çalışma koşulları (sıcaklık, basınç, nemlendirme ve gaz stokiyometrisi gibi) altındaki yakıt hücresinin performans kayıplarını göstermektedir [22]. Yakıt hücrelerindeki kayıpları aktivasyon kayıpları (aktivasyon polarizasyonu), omik kayıplar (ohm kutuplaşması) ve kütle transfer kayıplarıdır (derişim polarizasyonu) [23]. Bu kayıplar Şekil 2.5.'de gösterildiği gibi yakıt hücresinin karakteristik eğrisini etkilemektedir.

$$V_{hücre} = E_{Nerst} - \eta_{akt} - \eta_{ohmik} - \eta_{kons} \quad (2.1)$$

Burada; $V_{hücre}$ hücre voltajı, E_{Nerst} termodinamik potansiyel; η_{akt} anot ve katotta meydana gelen aktivasyon kayıpları; η_{ohmik} hücre iç direnci üzerinden geçen akımın oluşturduğu kayıpları ve η_{kons} konsantrasyon kayıplarını göstermektedir. Bu kayıpların yakıt hücresi karakteristik eğrisine olan etkisi Şekil 2.5’de verildiği gibidir.



Şekil 2.5. Yakıt hücresi kayıpları ve polarizasyon eğrisi

Teorik olarak PEMYH'nin ideal voltaj değeri 1,23 V'dur. Ancak çalışma koşullarına ve H_2 geçişine bağlı olarak gerçek çalışma koşullarında hücre potansiyeli ideal voltaj değerinden daha düşüktür. Bu potansiyel açık devre voltajı (OCV) olarak tanımlanır. PEMYH'de OCV değeri hücrenin çalışma sıcaklığı, nemlendirilmesi, hücreye beslenen gazların kısmi basıncı ve katalizör yüzeyi ile ilişkilendirilir [14].

2.2.1. Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon enerjisi elektronların hareket ettirilmesi, kimyasal bağların koparılması ya da yeni bağ oluşturulması için gerekli olan enerjidir. Reaksiyona girenler tarafından aşılması gereken bu enerji hem anotta hem de katotta aktivasyon enerjisi kaybını ortaya çıkarmaktadır. Aktivasyon enerjisini en aza indirmek için Platin (Pt) gibi güçlü bir katalizör

kullanılması gerekmektedir. Buna ek olarak, yakıt hücresi çalışma sıcaklığı 70°C'nin altında ise aktivasyon kayıplarına (η_{akt}) sebep olabilir [14].

$$\eta_{akt} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.2)$$

Burada,

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.3)$$

A malzeme özelliklerine dayalı sabit, T sıcaklık (K), R ideal gaz sabiti, α 0,1 ile 0,5 arasında değişen yük katsayısı, i akım yoğunluğu (A/cm²), i_0 denge anındaki akım yoğunluğu (A/cm²) ve F Faraday sabitidir.

2.2.2. Ohmik kayıplar

Yakıt hücresinde elektronun dış devreye akışına ve protonların membran boyunca anottan katoda doğru taşınmasına karşı direnç vardır. Bu dirençten kaynaklanan kayba ohmik kayıp denir. Bu kayıp membranın nemliliğine ve yakıt hücresinin çalışma sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Direnç kayıpları (η_{ohmik}) aşağıdaki Eş. 2.4 ile hesaplanır.

$$\eta_{ohmik} = IR_{hücre} \quad (2.4)$$

Burada, I akım değeri (A) ve $R_{hücre}$ hücredeki dirençlerin (ohm) toplamıdır.

2.2.3. Kütle transfer kayıpları

Reaktantların reaksiyon sırasında tükenmeleri ve buna bağlı olarak konsantrasyonundaki düşüş ya da tükenmeleri sonucu kütle transfer kaybı oluşur. Ayrıca, elektrottaki gözeneklerden gazların yavaş yayılması ya da anot ve/veya katottaki gazların elektrotta reaksiyona hiç girmeden direkt karşıya geçişleri de bu kayba sebep olduğu bilinmektedir. Konsantrasyon (η_{kt}) kayıpları Eş 2.5'de verilen Tafels eşitliği ile hesaplanır.

$$\eta_{kt} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.5)$$

Burada, i_L reaktant konsantrasyonları 0'a ulaştığındaki limitleyen akım yoğunluğudur (A/cm^2).

2.2.4. Reaktant gazların sızıntısının neden olduğu kayıplar

PEMYH'de H_2 'nin anot tarafından reaksiyona girmeden direkt katot tarafına geçtiğinde proton ve elektronlarına ayrılamaz ve dış devreden elektron akımı gerçekleşmez. Bu sebeple performansta reaktant gazların sızıntısından kaynaklanan yakıt kaybı ($\eta_{yakıt}$) oluşur.

$$\eta_{yakıt} = -A \ln \left(\frac{i+i_0}{i_0} \right) \quad (2.6)$$

2.3. Elektrolite Göre Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücreleri, yakıt ve oksitleyicinin bileşimine, kullanılan elektrolite göre, yakıtın doğrudan ya da dolaylı olarak beslenmesine ve çalışma sıcaklığı gibi etkenlere göre sınıflandırılır.

Çizelge 2.1. Yakıt hücrelerinin sınıflandırılması

Özellikler	PEMYH	AYH	FAYH	KOYH	EKYH	DMYH
Çalışma sıcaklığı [°C]	40–80	65–220	205	600–1000	650	50–120
Elektrolit	Perflorosül fonik asit	Potasyum hidroksiti n sulu çözeltisi	Fosforik asit çözeltisi	Seramik	Lityum, sodyum ve potasyum karbonat çözeltisi	Perflorosül fonik asit
İyon taşıyıcısı	H^+	OH^-	H^+	O^-	CO_3^+	H^+

Bu sınıflandırmalardan en yaygın olanı ise elektrolit tipine göre olan sınıflandırmadaki AYH, FAYH, EKYH, KOYH ve PEMYH'nin genel özellikleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir [14].

2.3.1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi

Yakıt hücrelerinin çalışmasında ilk olarak kanallardan akan reaktif gazlar gözenekli ortam ve katalizör katmanından yayılır ve burada elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleşir. Protonlar proton iletken polimer elektrolit membran ile taşınır ve proton iletirken malzemeden geçemeyen elektronlar, elektriksel olarak iletken hücre bileşenleri vasıtasıyla katot tarafına iletilir. Su ise, önce katalizör katmanından sonra da gaz difüzyon katmanlarından taşınır. Su damlacıkları ise onları taşıyan aşırı reaktif gazlar (iki fazlı akış) nedeniyle hücreyi terk eder. Çalışma sıcaklığı genellikle 80°C'nin altındadır. Kimyasal tepkimeleri anot ve katot tarafları için aşağıdaki gibidir.

Anot:



Katot:



Toplam hücre reaksiyonu:



2.3.2. Alkali yakıt hücresi

Bu yakıt hücresi 1960'lardan beri uzay sistemlerinde kullanılmaktadır [11]. Alkali hücrelerinin çalışma sıcaklığı 150°C ile 200°C civarındadır. AYH'de bir alkalın elektrolit kullanır ve saf hidrojen ve oksijen ile beslenir.

AYH'nin elektriksel verimliliği yaklaşık olarak % 50 civarındadır ancak üretilen ısı da kullanıldığında bu verim % 80'lere kadar çıkabilmektedir [24]. Kimyasal tepkimeleri anot ve katot tarafları için aşağıdaki gibidir.

Anot:



Katot:



2.3.3. Fosforik asit yakıt hücresi

PAFC’de elektro-katalizör olarak anot ve katotta platin kullanılır. [25]. Çalışma sıcaklıkları genellikle 150°C ile 220°C arasındadır. Bu çalışma sıcaklığı, değerli metal katalizör gereksiniminin üstesinden gelebilecek kadar yüksek bir sıcaklık değildir [26]. Kimyasal tepkimeleri anot ve katot tarafları için aşağıdaki gibidir.

Anot:



Katot:



2.3.4. Katı oksit yakıt hücresi

KOYH, katı bir seramik elektrolit kullanır. Bu hücrelerin çalışma sıcaklıkları 800°C ile 1000°C aralığındadır. Daha küçük üniteler, taşınabilir güç ve yardımcı güç için kullanılmaktadır. Ancak, bu yakıt hücreleri, sabit güç üretimi için henüz deneme aşamasındadır [27]. Verimleri yaklaşık olarak % 70’lerdedir ve yüksek güç üretimi oldukça uygundur [28]. Kimyasal tepkimeleri anot ve katot tarafları için aşağıdaki gibidir.

Anot:



Katot:



2.3.5. Erimiş karbonat yakıt hücresi

EKYH'nin çalışma sıcaklığı yaklaşık olarak 600°C ile 700°C arasındadır. EKYH lityum, sodyum ve potasyum (Li, Na, K) alkali karbonatların birleşiminden oluşan elektrotla sahiptir. Bu hücredeki karbonat iyonları iyonik iletkenlik sağlayarak son derece iletken erimiş tuz oluşturur [17]. En büyük dezavantajlarından bir tanesi çok aşındırıcı ve erimiş bir elektrolit kullanılmasıdır [29]. Kimyasal tepkimeleri anot ve katot tarafları için aşağıdaki gibidir.

Anot:



Katot:



2.3.6. Doğrudan metanol yakıt hücresi

DMYH yaklaşık 50°C ile 120°C sıcaklık aralığında çalışırlar. DMYH elektrolit olarak bir polimer membran kullanır. Yakıt hücresinin anot kısmındaki platin-rutenyum (Pt-Ru) katalizörü ile sıvı metanol, su ile oksitlenir. Oksitlenmesi sonucunda doğrudan sıvı metanol (CH₃OH) içerisindeki H₂'yi kullanır. DMYH'de ürün olarak karbondioksit (CO₂), hidrojen iyonu (H⁺) ve elektronlar üretilir [30]. Üretilen elektronlar CCP yardımı ile dış devreye çekilerek elektrik üretimi sağlanır. Kimyasal tepkimeleri anot ve katot tarafları için aşağıdaki gibidir.

Anot:



Katot:



2.4. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri

Yakıt hücresi türleri içinde PEMYH taşınabilir uygulamalara olan uyumluluğu, modüler yapıda olması ve düşük sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi sebebiyle diğer yakıt hücresi çeşitlerine göre öne çıkmaktadır. Ayrıca, PEMYH diğer yakıt hücrelerine kıyasla daha düşük bakım maliyetine sahiptir.

2.4.1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi teknolojisi

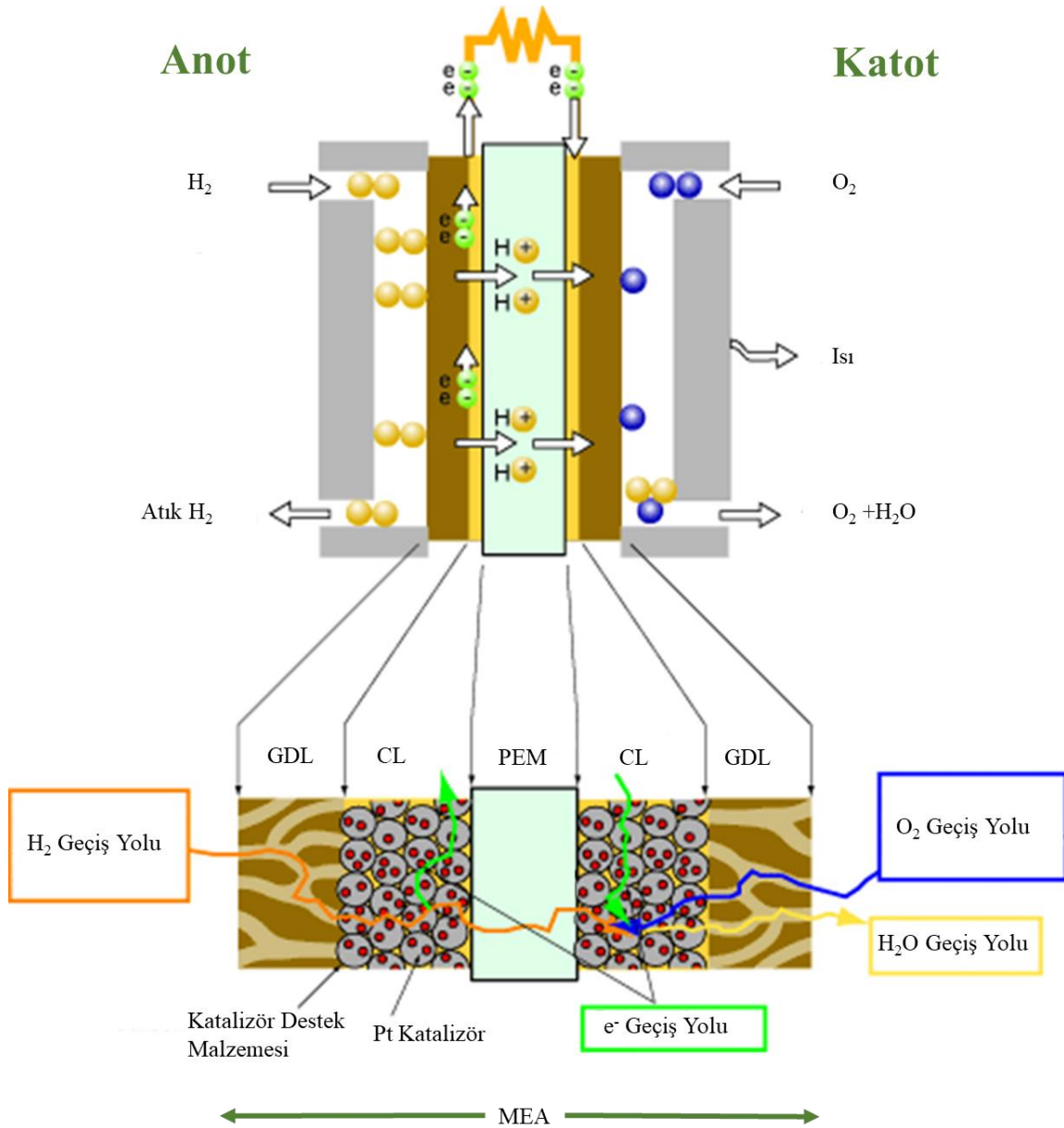
NASA için PEMYH 1959'da GE tarafından icat edilen yakıt hücresi günümüzde avantajlarından dolayı sıkça güç üretim elemanı olarak tercih edilmektedir. PEMYH'lerinin çalışma sıcaklığı elektrolit çeşidine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Düşük sıcaklıkta çalışabiliyor olmaları sayesinde, hızlı başlatma süresi ve çok az atık ısı sağlar. Diğer yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında PEMYH aynı hacim ya da ağırlıktakilerden çok daha fazla elektrik enerjisi üretebilmesi ve yüksek verimli olması sebebiyle gelecekteki birçok taşınabilir uygulamalar için avantajlı olacaktır [10,31].

Şekil 2.6'da gösterildiği gibi PEMYH anot tarafından yakıt olarak H₂ katot tarafından ise oksitleyici olarak genellikle O₂ beslenir. Sadece protonların geçişin izin veren PEM sayesinde H⁺ iyonları katot tarafına geçerler ve O₂ ile birleşerek burada suyu oluştururlar [14,32-33]. Elektronlar ise harici devre vasıtasıyla taşınır, böylece bir kapalı devre oluşur ve elektrik üretimi sağlanır.

PEMYH'nin çalışma sıcaklığı uygulanacak olan yakıt hücresi çeşitlerine göre belirlenir. PEMYH, çalışma sıcaklığı aralığına göre iki kategoriye ayrılabilir. Bunlar sırasıyla, HT-PEMYH 120°C'nin üstünde 200°C'ye kadar ve LT-PEMYH yaklaşık 60-80°C'ye kadar [16] olarak sınıflandırılır.

Farklı alanlarda kullanılan ve farklı özelliklere sahip olan yakıt hücreleri ile ilgili çalışmalar ve üreticiler günümüzde giderek artmaktadır [34]. Örneğin, otomotiv sektöründe doğrudan

uygulamalı yakıt hücrelerinin birçok kullanımı vardır. En yaygın kullanımı uçaklarda, gemilerde, trenlerde, otobüslerde, arabalarda, motosikletlerde, kamyonlarda ve forkliftlerde bulunabilir [34,35]. Ayrıca otomat, elektrikli süpürge makineleri ve yakıt hücresi ile çalışan trafik işaretlerinin de örnekleri dünyada birçok ülkede kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. PEMYH şeması

Günlük hayatta, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve taşınabilir elektrikli cihazlar için yakıt hücreleri için günden güne büyüyen bir pazar vardır. Daha büyük ölçekte ise, tesislerinde elektrik enerjisi üretmek için sabit uygulamaların kullanıldığı hastaneler,

karakollar ve yakıt hücresi sistemine sahip bankalar vardır [36]. Su arıtma tesisleri ve atık dökümü, elektrik üretimi için üretilen metan gazını dönüştürme işlemini gerçekleştirmek için yakıt hücrelerini kullanmaya başlıyor. Bu sebeplerle yakıt hücrelerinin hem taşınabilir hem de sabit birçok uygulama alanı için uygun olduğu söylenebilir.

Ulaşım sektörü

PEMYH'nin birçok uygulama alanı olmasına rağmen bunlardan en yaygın olarak görüleni ulaşım sektörüdür [34]. İlk maliyet hariç doğrudan dönüşümlü yakıt işlemcisi sayesinde geleneksel olan ulaşım sektöründeki araçlarla yarışabilecek seviyededir [35]. Özellikle PEMYH daha küçük boyutlu ve hızlı başlama ve durma gibi özellikleri sayesinde ulaşım sektörü için oldukça uygundur.

Ulaşım sektöründe yakıt hücrelerinin kullanılması yaygınlaştırılabilmesi için hidrojenin güvenli ve verimli bir depolama sistemine sahip olması ve ilk maliyetin düşürülmesi gerekmektedir.

Sabit uygulamalar

Sabit yakıt hücresi sistemleri, birkaç on yıl boyunca geliştirilme aşamasındaydı ancak son birkaç yıldır Asya, Avrupa ve Kuzey Amerika'da örnekleri günden güne çoğalmaktadır. Bu sistemlerin ticarileştirilmesi şimdi dünya çapında küçük ve büyük ölçekli sistemlerin kurulmasıyla ivmelenerek hızlanıyor [36].

Düşük emisyon, aynı miktarda yakıt kullanarak daha fazla güç ve ısı üretebilmesi gibi avantajları ile PEMYH sabit uygulamalarda da aranan güç elemanlarından biridir. PEMYH, evsel ve Kombine Isı ve Güç (CHP) uygulamalar için kullanımına uygundur. 1 kWe ve hatta daha küçük boyutlardaki ticari ve endüstriyel CHP uygulamaları için idealdir. Yüzlerce kWe ile MWe boyutlu üniteler için kullanılabilir [37].

Taşınabilir uygulamalar

Dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları ve askeri alanlardaki telsizler gibi çağımızın en çok kullanılan taşınabilir ürünleri için yüksek performansla sahip olması sebebiyle güç üretim

pazarındaki başlıca itici güçlerden biridir [36,38]. Taşınabilir yakıt hücreleri, operasyon sırasında tüketici pazarının ortaya çıkmasında katalizör olduğu kanıtlanan askeri uygulamalarda bir zorunluluktur [39,40]. PEMYH'leri enerji yoğunluğu, dayanıklılık, basit tasarım ve düşük maliyet açısından iyi potansiyele sahip olmaları nedeniyle özellikle taşınabilir güç sistemleri olarak uygundur. PEMYH'nin yanı sıra SOYH, MCYH, AYH ve PAYH 'de taşınabilir uygulamalar için uygundur [41].

2.4.2. Avantaj ve dezavantajları

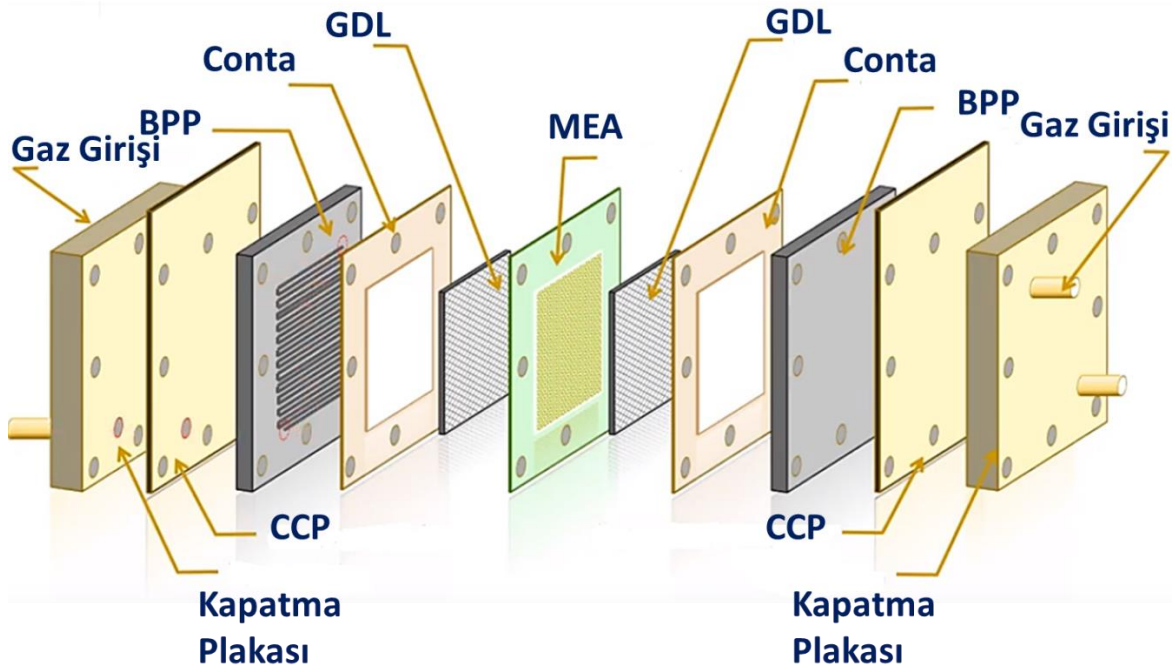
Kullanımı gün geçtikçe artmakta olan PEMYH'nin birçok avantajı olmasına rağmen dezavantajlarının da yüksek olduğu bilinmektedir. Katı bir elektrolite sahip olan PEMYH'de sıvı elektrolite sahip olan yakıt hücresi çeşitlerindeki gibi problemler görülmez. Elektrolit yapısı diğer yakıt hücreli ile karşılaştırıldığında daha güvenilirdir. Hareketsiz parçalar içermektedir ve sessiz çalışma prensibine sahiptir.

Basit ve dayanıklı bir tasarımla yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Düşük sıcaklıkta çalışabilmesi ve hızlı başlama ve durma süresi ile birçok uygulama için büyük avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, çevre dostu olan bu teknoloji yüksek verimlerde çalışabildiği için birçok uygulamada ön plana çıkmaktadır. Taşınabilir, evsel ve diğer durağan uygulamalara olan uyumluluğu ile bilinmektedir.

PEMYH'nin sağladığı birçok avantajın olmasına rağmen yüksek saflıkta hidrojen ve bunun depolanması ve tedariki gibi dezavantajlara sahiptir. Karbon monoksit (CO) karşı toleransları yoktur. Su yönetimi sıkıntısı Nafion membranının hidrasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkar. Operasyonda bir artış 80°C ila 100°C arasındaki sıcaklık su buharı basıncının artmasına neden olur ve bu durum membranı kurutur ve bu durum hücrenin çalışmasında kayıplara sebep olarak hücrenin performansını düşürür.

2.5. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi Bileşenleri

Yakıt hücresi içerdiği farklı bileşenlerden dolayı üzerine uygulanacak kuvvetler seçilirken içindeki her bir malzemenin yapısı göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi PEMYH bileşenleri MEA, GDL, BPP, conta ve CL'den oluşmaktadır. Bu bileşenlerden her biri yakıt hücresi performansı üzerinde direkt rol oynamaktadır.



Şekil 2.7. PEMYH bileşenlerinin şematik gösterimi

Kullanılan malzemelerin özellikleri, bileşenlerin tasarımı ve çalışma parametreleri, yakıt hücresinin çalışması sırasında performansına büyük ölçüde etki eder. Bu sebeple, tüm hücre bileşenleri çalışma sıcaklığına göre seçilmeli ve PEMYH tasarımında kimyasalların aşındırıcı yapısı da dikkate alınmalıdır. Yakıt hücresinde karmaşık elektrokimyasal reaksiyonların aynı anda gerçekleşir. Böylece, bileşenlerin öneminin doğru anlaşılıp kullanılması, PEMYH'nin performansını artırır ve böylelikle daha doğru bir kullanım imkânı sağlar.

2.5.1. Proton Elektrolit Membran

Membran, PEMYH'nin en kritik parçasıdır ve geliştirilmesi üzerine literatürde birçok çalışma yapılmıştır [42–44]. Bu membranlar proton geçirgen özellikte olması, gaz geçirgenliğinin az olması ve mekanik dayanımının yüksek olması (uzun süreli kullanımda) olması bakımından oldukça avantajlılardır. Günümüzde ticari olarak kullanılan membranların çeşitliliğinin az ve fiyatlarının yüksek olması sebebiyle alternatif membranların geliştirilmesi ile ilgili çalışmalara sıklıkla rastlanılmaktadır [45].

PEMYH teknolojisinde, termal kararlılığının sınırlı olmasına rağmen perflorosülfonik asit (PFSA) polimer membranlar yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kapasitesi ve yüksek proton

geçirgenliği sebebiyle literatürde en çok kullanılan membranlardır [46]. Literatürde PFSA polimer membranla ilgili birçok araştırma yapılmıştır ve bu membranlar yeni nesil en yeni yakıt hücresi membranları olarak nitelendirilmektedir. PEMYH performansını ve dayanıklılığını arttırarak maliyeti düşürmek için PFSA polimer membranlar oldukça sık kullanılmaktadır [47,48].

2.5.2. Gaz difüzyon tabakası

GDL kalınlığı 300–400µm arasında değişmektedir ve bu tabaka gözenekleri arasında su birikintilerinin oluşmasını önlemek için hidrofobik malzeme içermektedir. Gaz difüzyon tabakaları yakıt hücresinde BPP ile CL arasındaki elektriksel iletkenliği sağlamaktadır. Su birikintisinin oluşması katalizör alanı ile kurulan teması düşürmektedir.

Karmaşık ve gözenekli yapıya sahip olan GDL direkt yakıt hücresi performansına etki ettiği için çeşitli taşıma özellikleri bakımından son yıllarda oldukça popüler bir araştırma konusu olmuştur. Literatürde gözenekli yapısı [49], yayılımı [50], geçirgenlik [51], termal iletkenlik [52] gibi birçok araştırma konuları mevcuttur. PEMYH sıkıştırılması gaz difüzyon tabakası geometrisi göz önüne alınarak yapılmalıdır aksi halde kalıcı hasarlara yol açabilir ve daha fazla kayba yol açarak düşük performansa sebep olabilir.

2.5.3. Elektrot

PEMYH’de anotta yükseltgenme ve kattota indirgenme reaksiyonları katalizör yüzeyleri üzerinde gerçekleşir. Katalizör katmanları polimer elektrolit membranı ile ayrılır ve bu katalizör katmanlarının diğer tarafında bulunan GDL’ler ile temas halindedir.

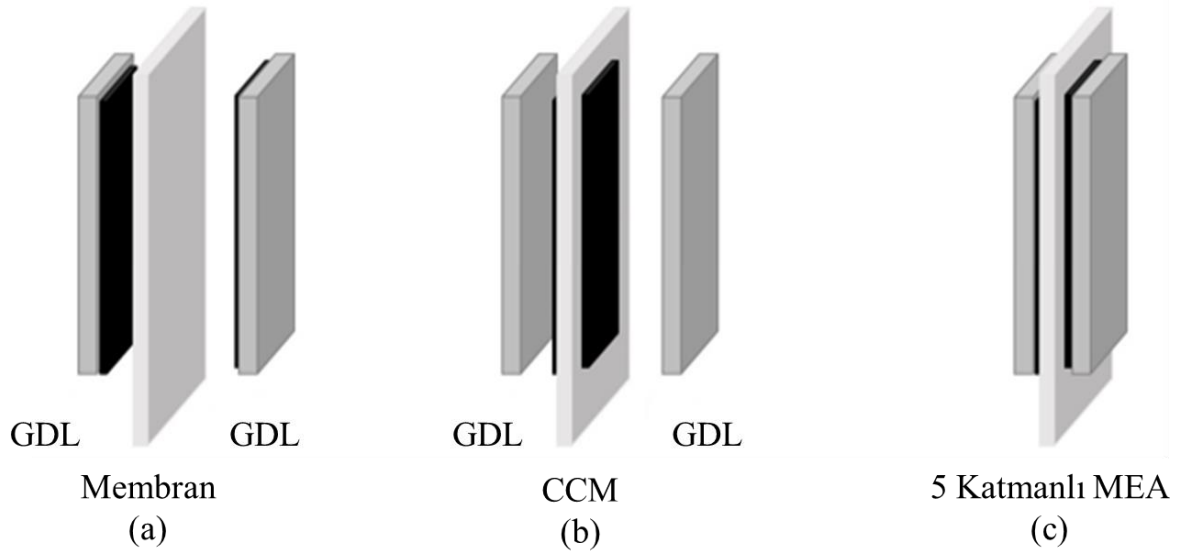
Literatürde birçok katalizör çeşidi PEMYH için denenmiştir ama bunlardan en yaygın kullanılan metal, yüksek elektro-katalitik aktivitesi, korozyon ve oksidasyona karşı olan yüksek direnci sebebiyle platindir (Pt) [53]. Pt’nin yüksek performansına rağmen, maliyeti oldukça yüksektir. Bu sebeple literatürdeki birçok araştırma Pt yükleme miktarını azaltmanın alternatif yollarına odaklanılmıştır [54].

Anot ve katot tarafında bulunan gözenekli yapıya sahip olan elektrotlar, yüzey alanını arttırarak reaksiyonu hızlandırırlar. Membranın her iki tarafında da bulunan elektrotu

oluşturan katalizör ve karbon madde gaz ve su geçişini sağlar. Bu sebeple çok ince olması istenir [55,56]. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi gaz iletimini sağlamak için Pt partiküllerinin tutunduğu karbon tanecikleri aralarında boşluk bulunan bir yapıdan oluşmaktadır.

2.5.5. MEA

PEMYH’nin çalışma performansı üzerinde büyük rol oynayan MEA’lerin Şekil 2.8’de gösterildiği gibi 3 farklı hazırlanma yöntemi vardır. Şekil 2.8a ve Şekil 2.8b’de gösterildiği gibi sırasıyla 3 katmanlı MEA’ler bir membran ve her iki yanında katalizör kaplı GDL’ler ve katalizör kaplı membran (CCM) ve her iki tarafında bulunan GDL’lerden oluşur. Şekil 2.8c’de gösterildiği gibi 5 katmanlı MEA’lerin hazırlanması ise her iki yanında CL’ler olan membran, 2 adet GDL’lerden oluşur.



Şekil 2.8. MEA’nın 3 katmanlı (a) GDL ve Membran, (b) GDL ve CCM ve (c) 5 katmanlı olarak tanımlanması [22]

2.5.6. Bipolar plaka

BPP yapıldığı malzemelerin seçiminde, iyi elektrik ve ısı iletimi, gaz geçirgenliği, yeterli, mekanik dayanım ve kimyasal denge, yüksek hacimli imalat yöntemlerinde uygun ve ucuz, korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi parametreler önemlidir [57]. Yakıt hücresinde BPP’larda bulunan da gaz akış kanalları yardımıyla hücreye H_2 ve hava/ O_2 reaktant gazları

iletilmektedir. Ayrıca yakıt pili yığınlarında hücreler arasındaki elektrik bağlantısının sağlanması da bipolar plakalar vasıtası ile olmaktadır.

BPP malzemeleri gözeneksiz grafit, kaplanmış metalik levhalar, direkt metal malzemeler, alüminyum ve polimer kompozitler olabilir [58,59]. BPP yakıtın ve oksidantın aktif alanlara eşit bir şekilde dağılmasını, aktif alanlardan ısının atılmasını ve hücreden hücreye akımın iletilmesini sağladıkları için yüksek korozyon direnci, düşük yüzey temas direnci ve yüksek mekanik dayanım, reaktif gazlara geçirgenliği sağlamalıdır [60]. Ayrıca, BPP'lar PEMYH'deki asitli ve koroziv ortam şartları nedeni ile yüksek kimyasal kararlılığa sahip olmaları gerekmektedir.

Literatürde en çok kullanılan malzeme ise yüksek elektriksel iletkenlikleri, gaz bloklama özelliği ve su geçirgenliği özelliği sebebiyle grafitir. BPP'lerdeki gaz akış kanallarının geometrileri literatürde oldukça araştırılmıştır. Kıvrımlı akış alanında, akış yolu çok uzunluğu sebebiyle oluşan kayıplara rağmen reaktant elektrotun tüm alana yayılmaya zorladığı için diğer akış alanlarında görülen birçok problemlerin de önüne geçilmektedir [59–62].

2.5.7. Conta

PEMYH'de, reaktant gazların sızmasını önlemek için kullanılan contalar yakıt hücresinin kritik bileşenlerinden biri olarak kullanılmaktadır. Conta deformasyona uğrarsa, reaktant gazlar (O_2 ve H_2) dış ortama sızabilir veya birbirleriyle karışabilir. Bu durum PEMYH'nin genel çalışmasını ve performansını olumsuz yönde etkiler. Bu hücrede kullanılan contalar, asidik bir ortama, nemli havaya ve hidrojene, sıcaklığa ve mekanik sıkıştırmaya dayanıklı olmalıdır. Bu nedenle, PEMYH düzeneklerinde contaların uzun vadeli kararlılığı kritik önem taşır [29]. Literatürde en çok kullanılan conta malzemesi silikon ve politetrafloroetilen'dir (PTFE) [63].

2.5.8. Akım toplayıcı plaka

PEMYH'de tekli hücre ya da yığının her iki ucuna akım toplama plakaları yerleştirilir. CCP'lerin PEMYH'deki görevi hücreden elde edilen akımın toplanıp iletilmesidir İyi bir akım toplayıcı plakanın hafif, korozyona karşı dayanıklı, yüksek elektrik iletkenliği ve

iyileştirilmiş mekanik özelliklerinin olması istenir [64]. Akım toplama plakasının altın ya da Titanyum, Nitrür/Titanyum, Alüminyum Nitrür (TiN/TiAlN) ve Altın ile kaplanarak korozyonu azaltmak mümkündür [65].

Bu malzemeler arasında korozyonu önlemesinin yanı sıra, yüksek elektrik iletim katsayısından dolayı altın kaplama ön plana çıkmaktadır. Literatürde en çok kullanılan levha yüksek elektrik iletimi ve hafifliği sebebiyle bakır levhadır [66]. Bu sebeple deneylerde kullanılmak üzere altın kaplama bakır levhalar kullanılmıştır.

2.6. Proton Elektrolit Membran Yakıt Hücresi Sıkıştırma Yöntemi ve Önemi

Uygun sıkıştırma yöntemi ve sıkıştırma kuvvetinin PEMYH performansı üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Literatürde PEMYH modellenmesinde çeşitli sıkıştırma ve sıkıştırma kuvveti ölçme ve belirleme yöntemleri denemiştir.

Bu yöntemlerden en yaygın olanları sırasıyla; cıvata ve basınç gösterici filmler [67], cıvata ve torktan hesaplama [68], cıvata ve yük hücresi [69], sıkıştırma plakaları ve yük hücresi [70], hücre sıkıştırma birimi (pragma) ve yük hücresi [71], tensometre ve yük hücresi [72] ve hidrolik baskı makinası ve basınç ölçerdir [73].

Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı cıvata ile sıkıştırma yöntemidir. Ancak, PEMYH aktif alanı cıvata ile sıkıştırma yönteminde homojen olarak sıkıştırılamamakta ve buna bağlı olarak PEMYH aktif alanı üzerinde zamanla şişkin bir yapı oluşmaktadır.

Bu oluşan şişkin yapıya ek olarak literatürde cıvata ile sıkıştırılan birleştirilmiş PEMYH yığını üzerinde başka problemlerle de karşılaşmıştır [70-73]. Lee ve diğerleri (2005) tarafından akış kanallarında büyük hasar olduğu tespit edilmiştir, Wen ve diğerleri (2009) tarafından sıkıştırma arttıkça zarar görebileceği belirtilmiştir [18,74]. Ayrıca, Bates ve diğerleri (2013) tarafından MEA ve BPP'ler arasında yüksek gerilim olduğu belirtilmiştir ve Liu ve diğerleri (2016) tarafından yığında yapısal hasar olduğu görülmüştür [19,75].

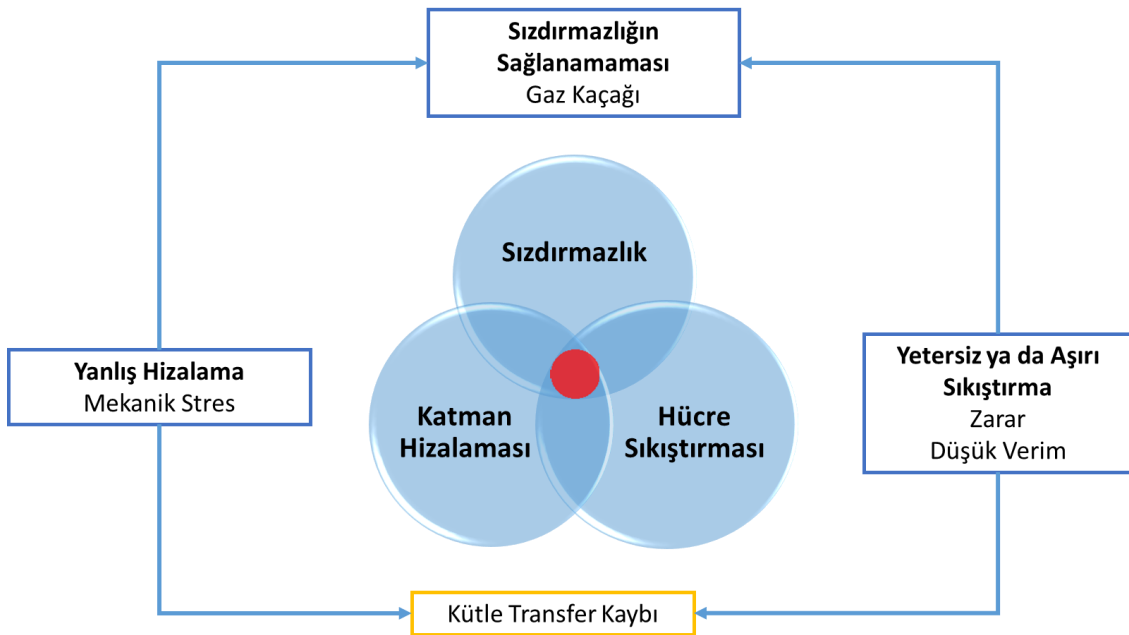
PEMFC yığını üzerindeki çalışmalar ek olarak yüksek sıkıştırma kuvvetinin MEA üzerinde deformasyona sebep olabileceği belirtilmiştir [74-77]. Kusoglu ve diğerlerinin (2007) çalışmalarında çatlaklara sebep olma ihtimalinin yüksek olduğu görülmüştür, Alizadeh ve

diğerleri (2017) tarafından maksimum stresin köşelerde olduğu bulunmuştur [76,77]. Ayrıca, Sassin ve diğerleri (2016) tarafından GDL'deki gözenekli yapının bozulduğu ve çökme olduğu görülmüştür ve Cruz ve diğerleri (2016) tarafından tasarım parametrelerinin gerilim üzerinde büyük etkilenin olduğu belirtilmiştir [78-79].

Cıvata ile sıkıştırma yönteminde altında aktif alan üzerinde oluşan bu şişkin bir yapı oluşarak deforme olur. PEMYH içerisinde farklı malzemeye bağlı yapılar zamanla deforme olarak PEMYH performansında ciddi bir düşüş görülür. Pres makinası yardımıyla sıkıştırılan yakıt hücrelerinde aktif alan üzerinde homojen basınç dağılımı sağlanarak bu problemlerin önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

2.7. Sıkıştırmadaki Mekanik Özellikler

PEMYH'nin sıkıştırılmasında malzemelerin geometrisi ve yapısal özelliklerinin yanı sıra hücre elemanlarının doğru bir şekilde hizalanması, sızdırmazlığın sağlanması ve hücre sıkıştırmasının dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde Şekil 2.9.'da gösterildiği gibi büyük kayıplara yol açarak PEMYH'nin düşük performansta çalışmasına sebep olur.



Şekil 2.9. PEMYH'nin birleştirmesine bağlı kütle transfer kayıpları

PEMYH’de yanlış hizalama hücre bileşenlerinin köşe kısımlarında aşırı strese ve özellikle CL’de büyük deformasyonlara sebep olur [80]. Yetersiz sızdırmazlık gaz kaçağına sebep olur ve tam gaz yoğunluğunda çalışamayan hücre yüksek akım ve güç yoğunluğuna ulaşamaz. Yetersiz sıkıştırma kuvveti gaz kaçağına ve malzemelerin birbirine yeterince temas etmemesine sebep olurken aşırı sıkıştırma ise hücreye mekanik olarak zarar vermektedir. Bu durumlar PEMYH’nin çalışmasında kayba ve düşük performansta çalışmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.9.’da gösterilen kırmızı ile işaretli bölgede ise PEMYH’nin çalışma sürecinde kayba sebep olan üç büyük sebebin aynı anda olması durumunda PEMYH büyük zarar görmekte ve düşük performans ile çalışmaktadır.

Karmaşık yapıya sahip olan yakıt hücrelerinde 3D FEA güvenilir olması bakımından çokça tercih edilen en verimli yöntemlerden biridir [81]. Aşırı sıkıştırma sebebiyle malzemeler üzerinde oluşacak mekanik bozunma ya da yetersiz sıkıştırmalar ANSYS 3D FEA analiz ile önceden öngörülebilir ancak deneysel olarak da doğrulanması gerekmektedir.

2.7.1. Sıkıştırma yükleri arasındaki bağıntı

Cıvata ve somun kullanımından baskı altındaki yüklemeye geçilirken Robert Hooke tarafından ortaya konulan ismini alan Hooke yasası kullanılır. Hooke yasasının yanı sıra uygulanan kuvveti tork olarak ifade edip vidalara yayabilmek için gerekli olan hesaplamalar yapılır [82].

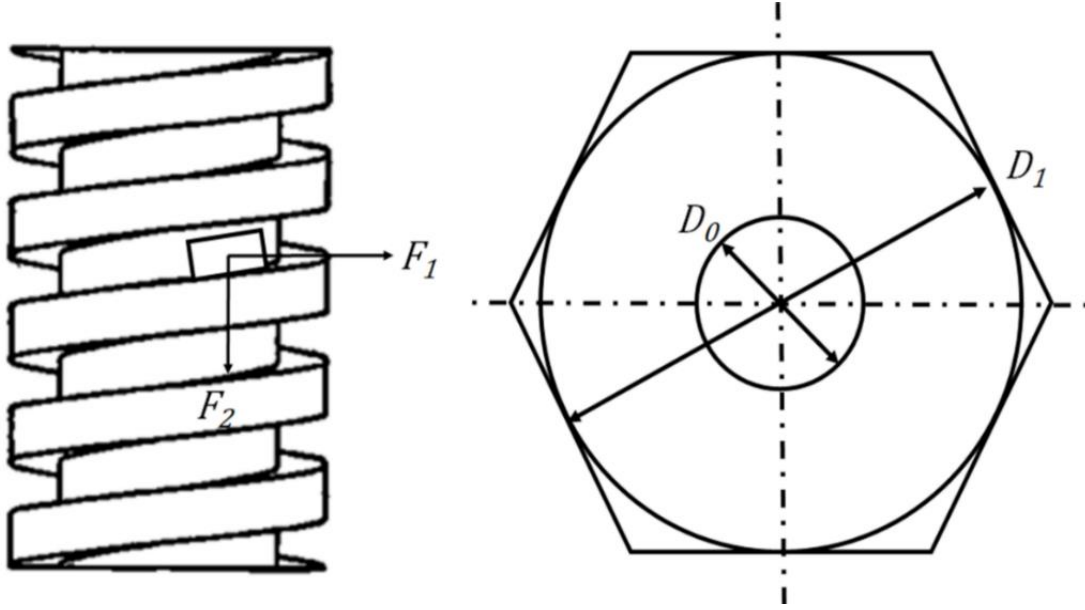
Tork değeri (T) Eş. 2.23’ da gösterildiği gibi cıvataya gelen dik kuvvetin (F) dönme noktasına olan uzaklığıyla (L) çarpımı ile bulunur.

$$T = F \times L \quad (2.23)$$

Cıvata ile sıkıştırmada toplam uygulanan tork değeri Eş. 2.24’de gösterildiği gibi cıvata parçalarının (T_1) ve somunun yüzeye uyguladığı torkun (T_2) toplamına eşittir.

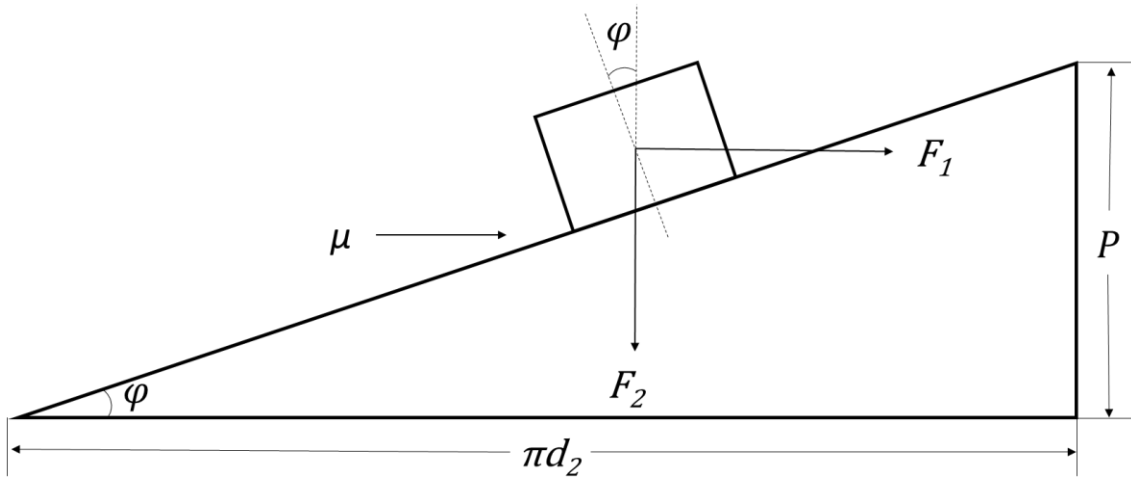
$$T = T_1 + T_2 \quad (2.24)$$

Köşegen cıvata dişi için Şekil 2.10’de cıvata üstündeki uygulanan kuvvetler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Cıvata üstündeki uygulanan kuvvetler

Şekil 2.10’da, F_1 yataydaki kuvveti (N), F_2 düşeydeki kuvveti (N), D_0 iç çapı (m), D_1 dış çapı (m) göstermektedir. Cıvataya uygulanan kuvvetleri serbest cisim diyagramında göstermek istersek aşağıdaki gibi olur;



Şekil 2.11. Uygulanan kuvvetlerinin serbest cisim diyagramında şematik gösterimi

Şekil 2.11’de, d nominal çap (m), μ sürtünme katsayısı, P cıvata diş adım uzaklığı (m) ve φ cıvata diş açısını ($^\circ$) göstermektedir. F_1 ve F_2 kuvvetleri Eş. 2.24’de yerine konulduğunda;

$$F_1 \cos \varphi - F_2 \sin \varphi - \mu (F_1 \sin \varphi + F_2 \cos \varphi) = 0 \quad (2.25)$$

Elde edilir ve sürtünme açısına θ dersek normale etkileyen sürtünme katsayısı (μ) Eş. 2.26'deki gibi olur.

$$\mu = \tan\theta \quad (2.26)$$

μ_n , F_1 kuvveti F_2 kuvveti cinsinden Eş. 2.27'deki gibi yazılır.

$$F_1 = F_2 \tan(\varphi + \theta) \quad (2.27)$$

Eş. 2.27, Eş. 2.23'de yerine konulursa T_1 Eş. 2.28'de gösterildiği gibi olur.

$$T_1 = \frac{F_1 d}{2} = \frac{F_2 d \tan(\varphi + \theta)}{2} \quad (2.28)$$

Somun ve yüzey arasındaki T_2 Eş. 2.29'de ifade edildiği gibi olur.

$$T_2 = \frac{\mu_n}{\pi(D_1^2 - D_0^2)} \int_{D_0}^{D_1} \pi D^2 dD = \frac{\mu_n F_2 (D_1^3 - D_0^3)}{3(D_1^2 - D_0^2)} \quad (2.29)$$

T_1 ve T_2 Eş. 2.24'de yerine konulduğunda Eş. 2.30 elde edilir.

$$T = T_1 + T_2 = F_2 \left[\frac{d \tan(\varphi + \theta)}{2} + \frac{\mu_n (D_1^3 - D_0^3)}{3(D_1^2 - D_0^2)} \right] \quad (2.30)$$

φ ve θ açıları oldukça küçük olduğu için ihmal edilebilir ve Eş. 2.31'deki gibi yazılabilir.

$$\tan(\varphi + \theta) \approx \tan(\varphi) + \tan(\theta) \quad (2.31)$$

Cıvata adımı Eş. 2.32'da gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$P = \pi d \tan \varphi \quad (2.32)$$

Eş. 2.32 ve Eş. 2.30'de yerine konulduğunda toplam tork bulunur.

$$T \approx F_2 \left[\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu d}{2 \cos \beta} + \frac{\mu_n (D_1^3 - D_0^3)}{3(D_1^2 - D_0^2)} \right] \quad (2.33)$$

Burada, β dış açısının yarısıdır ($^{\circ}$). Eş. 2.33 sadeleştirmek için köşeli parantez içine $d_{eş}$ denilirse;

$$d_{eş} = \frac{P}{2\pi} + \frac{\mu d}{2 \cos \beta} + \frac{\mu_n(D_1^3 - D_0^3)}{3(D_1^2 - D_0^2)} \quad (2.34)$$

ve $d_{eş}$ Eş. 2.33'de yerine konulduğunda;

$$T \approx \frac{F_{sık} d_{eş}}{C} \quad (2.35)$$

elde edilir. Burada $F_{sık}$ sıkıştırma kuvveti (N) ve C toplamda kullanılan cıvata sayısını göstermektedir.

2.7.2. Gerilim ve gerinim eğrisi ve deformasyonun hesaplanması

17. Yüzyılda yaşamış olan fizik bilim adamı Robert Hooke ortaya çıkardığı Hooke yasasıyla gerilim ve gerinim arasındaki bağıntıyı buldu. Gerilimi dış bir kuvvetin sonucu olarak malzemede içindeki birim alandaki kuvvet olarak ve gerinim stresinin meydana getirdiği deformasyon olarak tanımlayan Hooke küçük gerilimlerin gerinimle doğru orantılı olduğunu ortaya koydu [84].

Gerilim gerinim eğrisi Hook kanunu ile Eş. 2.36 ve 2.37'deki gibi ifade edilir.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.36)$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.37)$$

Burada, σ gerilim (Pa); E Elastik modülü (Pa); ε gerinimi (mm/mm) ifade etmektedir. Eş. 2.36'deki gerinim Eş. 2.37'de yalnız bırakılırsa Eş. 2.38 elde edilir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \times E} \quad (2.38)$$

Gerinim aynı zamanda Eş. 2.39'de olduğu gibi malzeme üzerinde gerilimden dolayı oluşan deformasyonun (δ_{σ}) malzemenin ilk boyuna oranı olarak (l_0) olarak da ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\sigma}}{l_0} \quad (2.39)$$

Burada, δ_{σ} çekilir ve Eş. 2.38'deki ε değeri yerine konulursa Eş. 2.40 elde edilir.

$$\delta_{\sigma} = \frac{F \times l_0}{A \times E} \quad (2.40)$$

$$\delta_T = \alpha \times l_0 \times \Delta T \quad (2.41)$$

Termal gerilim ise Eş. 2.41'de gösterildiği gibi sıcaklık genleşme katsayısı (α), malzemenin ilk boyu (l_0) ve sıcaklık değişimi (ΔT) ile doğru orantılıdır.

Burada,

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \times t} \quad (2.42)$$

δ_{σ} ve δ_T arasındaki ilişki Eş. 2.43'de gösterildiği gibidir.

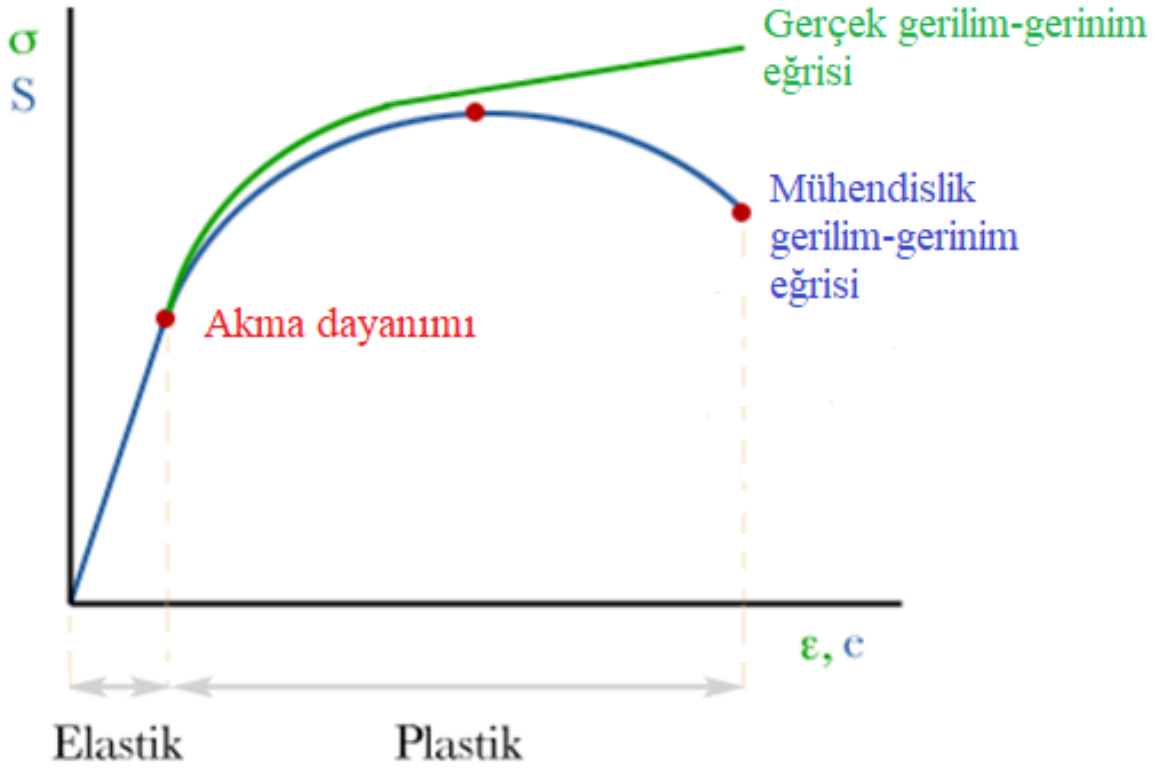
$$\delta_T = x + \delta_{\sigma} \quad (2.43)$$

Burada, x (mm) değerleri termal ve gerilimden kaynaklanan deformasyon arasındaki farkı göstermektedir.

Eş. 2.44'de gösterildiği gibi toplam deformasyon (δ_{Toplam}) değeri δ_T ve δ_{σ} değerlerinin toplamına eşittir.

$$\delta_{Toplam} = \delta_T + \delta_{\sigma} \quad (2.44)$$

Malzemenin gerilim altındaki davranışları çekme ya da basma testleriyle incelenmektedir.



Şekil 2.12. Gerilim-gerinim grafiği

Şekil 2.12’de gösterildiği gibi elastik deformasyon boyunca gerçek gerilim-gerinim ve mühendislik gerilim-gerinim eğrisinde birbirleriyle doğru orantılıdır. Bu grafik uygulanan kademeli kuvvetin miktarını ve uzamasını göstermektedir.

Her iki eğri arasındaki fark gerçek gerilim-gerinim eğrisi çizilirken kesit alanında meydana gelen anlık daralmaların dikkate alınmasıyla oluşmaktadır. Kalıcı deformasyon oluşmaması için malzemede akma dayanımı altında çalışılması gerekmektedir. Ancak, malzemelerin boyuna göre grafik değiştiği için bu grafik malzemelerin mekanik davranışlarının analiz edebilmek için direkt olarak kullanılmamaktadır.

PEMYH’ne uygulanan bir kuvvetin etkisiyle PEMYH şeklinde değişiklik olmasına plastik deformasyon denir ve bu şekil değişimi elastik veya plastik olabilir. Elastik şekil değişimi kalıcı olmayan şekil değişimidir ve yük kaldırıldığında malzeme tekrar eski haline döner. Bir malzemeye kuvvet uygulandığında malzeme belli bir kalıcı şekil değişiminden sonra kırılır. Sünek veya çok az ya da hiç kalıcı şekil değişimi göstermeden kırılır ve buna da gevrek kırılma denir.

PEMYH sıkıştırılmasında gerilim-gerinim grafiğine göre elastik bölge içerisinde olmak gerekmektedir. Aksi takdirde PEMYH bileşenlerinde kalıcı deformasyon oluşabilir ve bu durum hücrenin çalışma performansında düşüşe sebep olabilir.

3D FEA ile çözülen yapısal analizde ANSYS hooke yasası aşağıdaki Eş. 2.45'daki gibi gösterilmektedir.

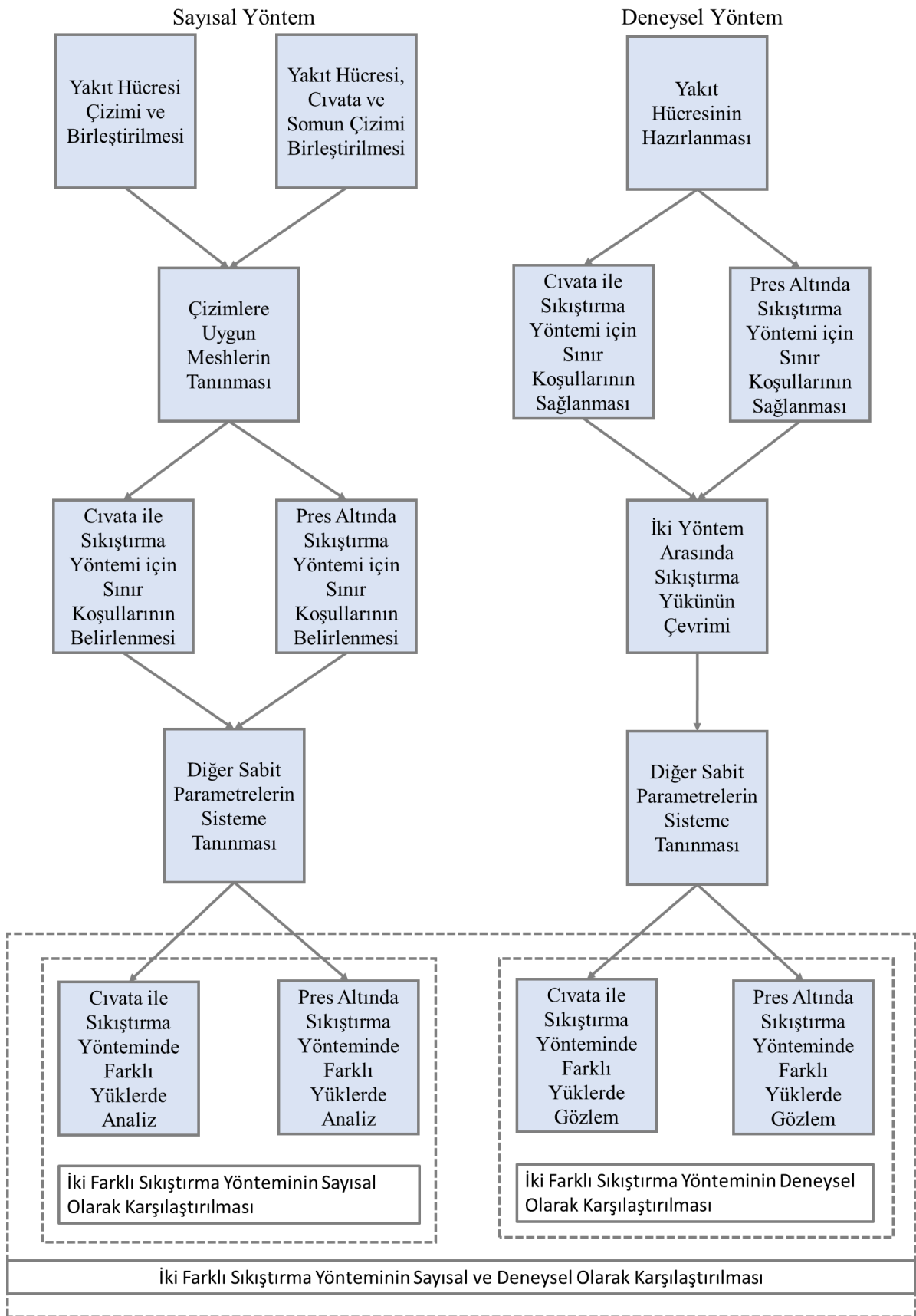
$$[K]\{x\} = \{F\} \quad (2.45)$$

Burada, K evrensel sertlik matrisi, x uzama vektörü ve kuvvet vektörü F uygulanan kuvvettir.

3. MATERYAL VE METOTLAR

Literatürde sıklıkla kullanılan cıvata ile sıkıştırma yönteminde PEMYH aktif alanı üzerinde homojen olmayan sıkışma nedeni ile hücre bileşenlerinin zarar görmesine sebep olur. Bu çalışmada, pres altında sıkıştırma yöntemiyle homojen sıkışma sağlanarak PEMYH'nin daha az kayıpla daha yüksek performansta çalışmasının sağlanması hedeflenmiştir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi çalışmanın ana amacı doğrultusunda izlenecek yöntemler aşağıda verildiği gibidir.

1. 3D FEA ile PEMYH'nin Sayısal Olarak İncelenmesi (Modellenmesi) ve Analizi: Sayısal analiz içeren bu bölümde PEMYH üzerine uygulanan çeşitli yükler altında cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemleri altında dağılımı sonucunda oluşan deformasyonları bulunmuştur. Oluşan deformasyonlar analiz edilerek hücrenin aktif alanı üzerindeki sıkıştırma şekilleri yorumlanmıştır.
2. Homojen Basınç Dağılımı Sağlanması ve Deneysel Çalışmalar: PEMYH çalışır durumdayken aktif alan üzerinde homojen baskı ve sıcaklık sağlanmasını ve bu koşullarda artan cıvata torkunun ve pres altındaki yükün altında yapılacak deneyleri kapsamaktadır. Ayrıca, yapılacak deneyler sırasında gaz kaçağının önlenerek oluşan kayıpların azalması böylelikle de daha yüksek güç yoğunluğundaki PEMYH'nin her iki sıkıştırma yönteminde ve farklı yükler altında çalışması incelenmiştir.
3. Teorik ve Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması: Bu bölümde her bir yöntem için farklı yüklerde sıkıştırma sonuçları ve en iyi çıkan sonuçların farklı sıkıştırma yöntemleri altında karşılaştırılması hem deneysel hem sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel ve sayısal çalışmaların birbirleriyle karşılaştırılması sonucu birbirlerini destekledikleri görülmüştür.



Şekil 3.1. Tez çalışmasında uygulanan metotların şematik gösterimi

3.1. Malzemeler

PEMYH'nin analizine ve deneysel performans testlerine başlanmadan önce kullanılacak yakıt hücresinin bileşenleri için uygun malzemeler seçilmiştir. Bu malzemelerin seçiminde, istenen elektrik ve ısı iletimi, gaz geçirgenliği, yeterli, mekanik dayanım ve kimyasal denge, yüksek hacimli imalat yöntemlerinde uygun ve ucuz, korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi parametreler önemlidir [57].

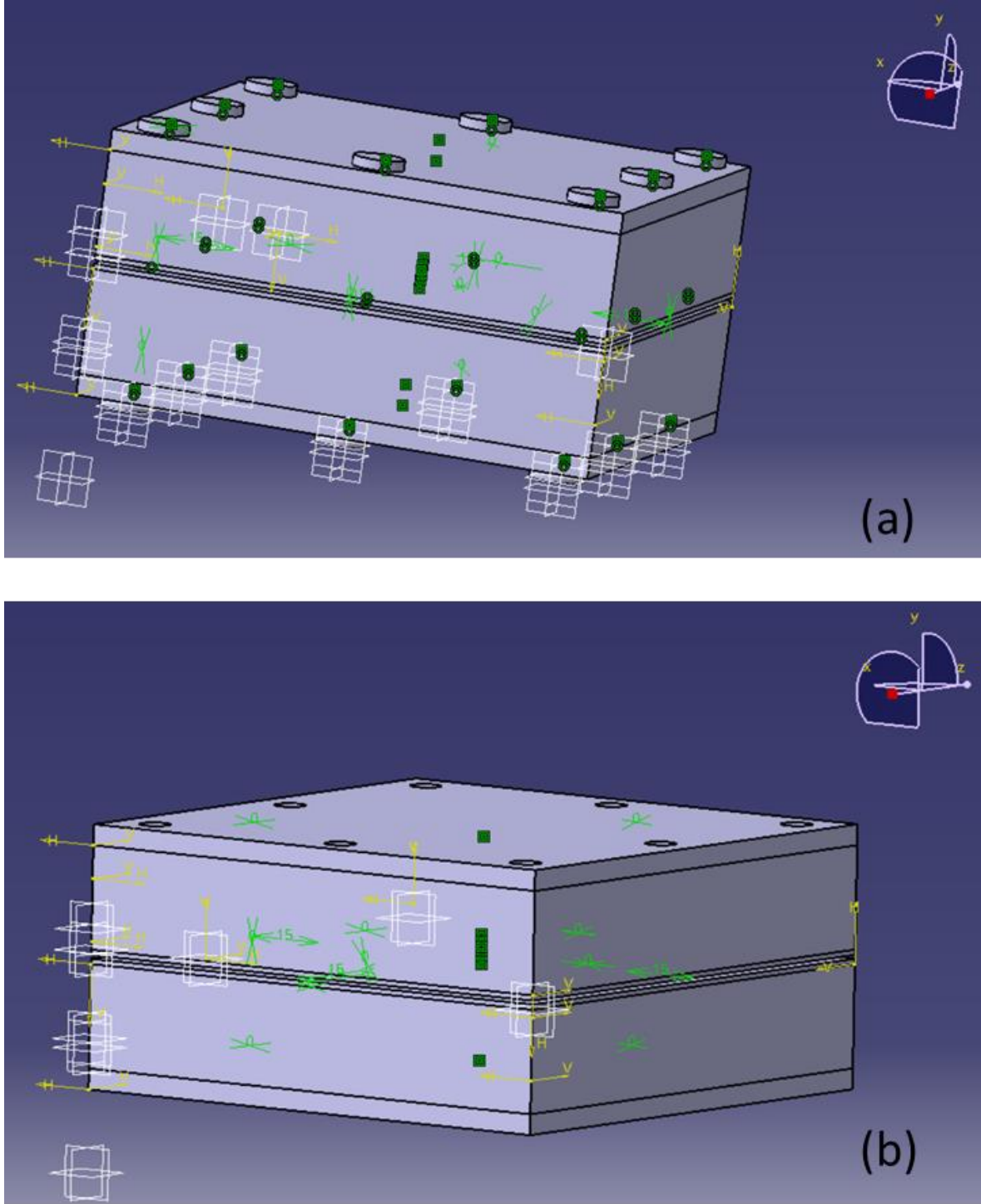
Bu çalışmanın deneysel kısmında grafit BPP, Freudenberg H23C23 GDL, PTFE conta, 3 tabakalı PFSA bazlı MEA (3M) kullanılmıştır. Analiz kısmında ise kullanılan bu malzemelerin sıkıştırmasına etki eden fiziksel özellikleri programa tanımlanmıştır.

3.2. Sayısal Çalışmalar

PEMYH çalışmalarında ANSYS 3D FEA kullanılarak yapılan birçok araştırma vardır. Civatalanarak ve pres altında sıkıştırılan PEMYH'nin ANSYS Workbench ile PEMYH'nin Statik Analizi sırasında ANSYS ortamında malzemelerde oluşan deformasyon analizi yapılmıştır.

Sayısal çalışmalarda yapılan deformasyon analizleri PEMYH'ye uygulanacak olan sıkıştırma torku ve yük miktarının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Hücre bileşenlerinin deneyler sırasında zarar görmemesi ve hücrenin aktif alanı üzerindeki yük dağılımı hakkında ön bilgi vermesi açısından gereklidir.

PEMYH bileşenlerinin geometrik ve malzeme özellikleri sıkıştırma kuvvetinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Her bir eleman Catia V5R19 programında gerçek geometriye en uygun şekilde çizilerek birleştirilmiştir. Çizilen PIS BPP akış kanalları Şekil 3.3'de gösterildiği gibidir. Cıvata ile sıkıştırma yönteminde hücrenin cıvata altında analizinin yapılabilmesi için pres altında sıkıştırmaya ek olarak cıvata ve somun kısımları da çizilerek Şekil 3.2a ve Şekil 3.2b'deki gibi hücrenin birleştirilmesi yapılmıştır.

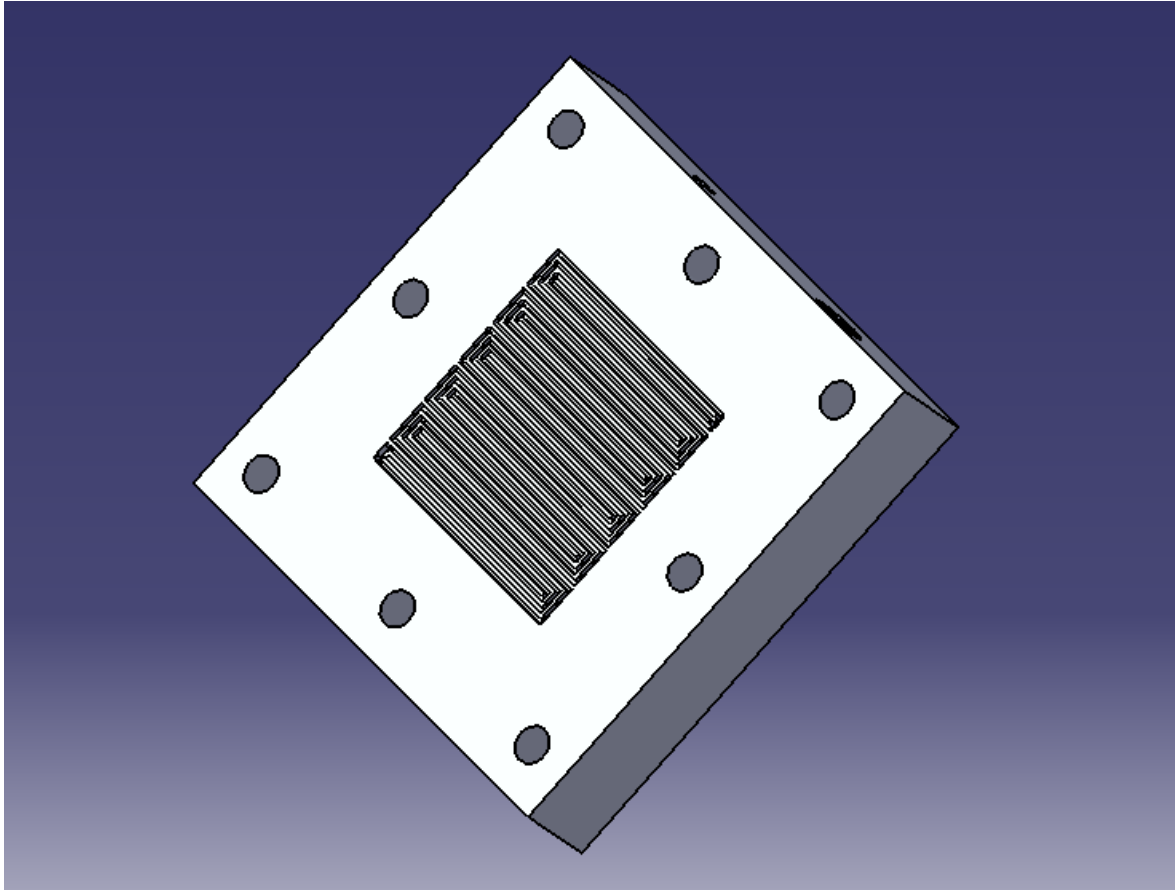


Şekil 3.2. Sıkıştırılmaya hazır PEMYH'nin (a) cıvata ile sıkıştırma (b) pres altında sıkıştırma yöntemi

Analizi yapılan PEMYH'nin bileşenleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Çizelge 3.1'de verildiği gibi bu bileşenlerin gerçek boyutları dikkate alınarak CATIA V5R19 programı kullanılarak çizim yapılmıştır. Çizilen geometrilere ANSYS workbench ortamında malzeme özellikleri analize tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1. PEMYH bileşenlerinin boyutları

PEMFC Bileşenleri	Boyutlar (mmxmmxmm)
BPP	100x100x20
Akış Kanalları	0,75x0,75x50
Conta	70x55x1
MEA	70x55x0,73
Civata	M5x1,25x54
CCP	100x100x2



Şekil 3.3. BPP PIS gaz akış kanalları (CATIA V5R19)

Her iki çizilen geometri 3D Yapısal FEA ile incelenmek için ANSYS Workbench'e ayrı ayrı aktarılmıştır. Catia V5R19 programında yapılan PEMYH elemanlarının bağlantıları ANSYS programında direkt olarak çekilmiş ve kontrolleri yapılmıştır. Analizlere başlamadan önce bazı kabuller yapılmıştır.

Sayısal çalışmalarda yapılan kabuller:

1. Genel olarak doğrusal malzeme davranışı olduğu kabul edildi.
2. Küçük deformasyon yasası kullanıldı.
3. Zamanla kuvvette değişim olmadığı varsayıldı.
4. Herhangi başka bir dış etki olmadığı kabul edildi.
5. Sıcaklığın homojen olarak dağıldığı kabul edildi.
6. Sıcaklığı zamanla değişmediği kabul edildi.

3.2.1. PEMYH bileşenlerinin özellikleri

PEMYH bileşenlerinin malzeme özellikleri sıkıştırma kuvvetinin belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Bu malzemelerin en önemli özellikleri elastik modül (E), Poisson oranı (ν), özgül ısı (C_p), ısı iletim katsayısı (k), özkütle (ρ) ve termal genleşme katsayısı (α) Çizelge 3.2. de verilmiştir.

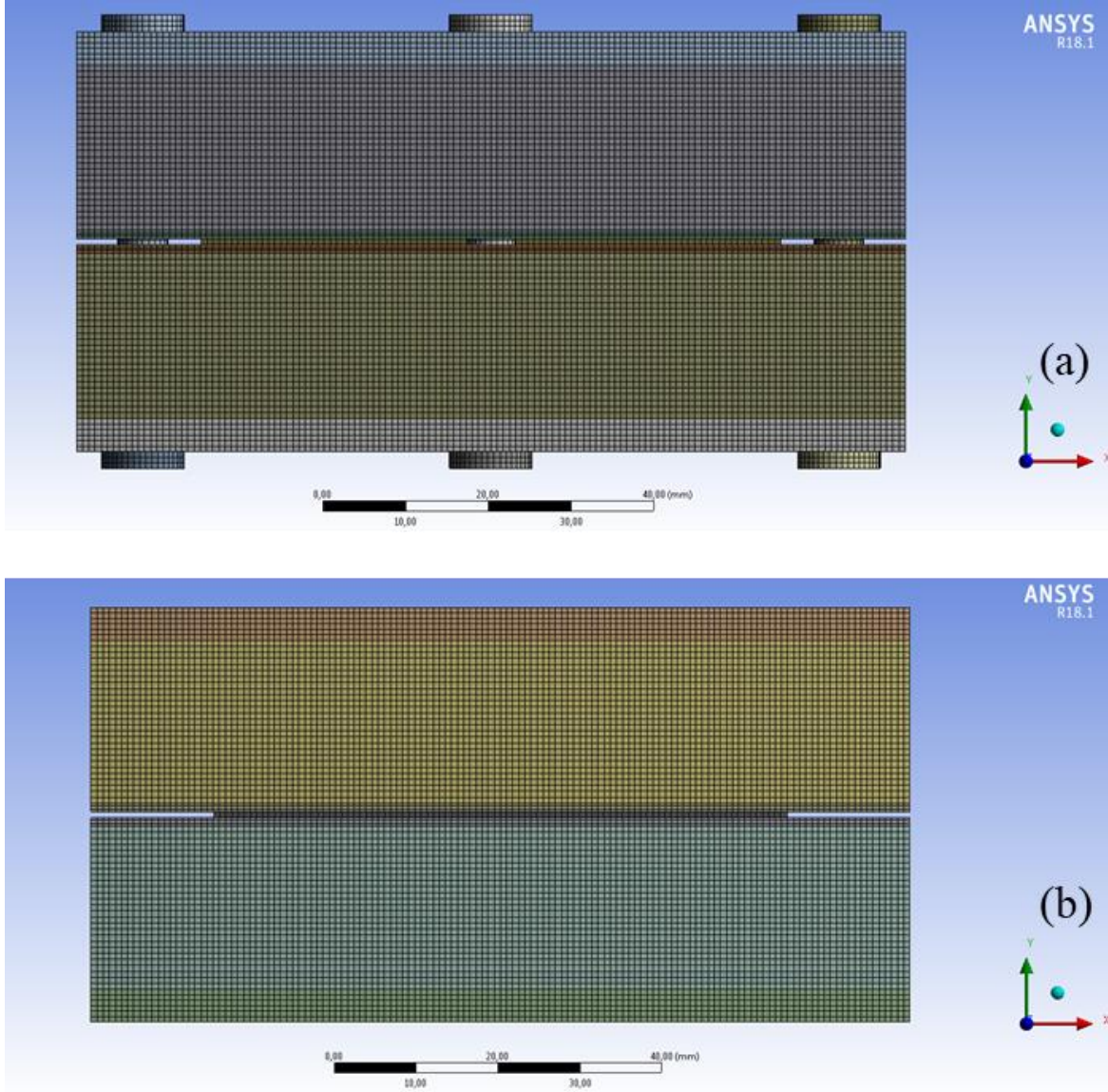
Çizelge 3.2. PEMYH elemanlarının malzeme özellikleri

PEMYH Elemanları	E (GPa)	ν	C_p (kJ/kg.K)	k (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (1/°C)
BPP	15,56	0,25	685	25	2660	23,8
Conta	21	0,48	100	0,25	1780	12,2
MEA	0,249	0,25	685	0,18	2150	140
Cıvata ve Somun	19,3	0,31	461	14	1070	170
CCP	110	0,35	385	400	8700	17

3.2.2. Mesh uygulama çalışmaları

Pres altında ve cıvata ile sıkıştırma yöntemleri için çizilen her iki 3D katı model için de aynı ölçülerde ve aynı metodlar kullanılarak meshler verilmiştir.

İstatistik sonucuna göre homojen sıkıştırma için modellenen PEMYH 4.536.593 düğüm ve 1.038.252 elemandan meydana gelmektedir. Homojen olmayan sıkıştırma için modellenen PEMYH ise 6.316.395 düğüm ve 1.398.670 elemandan meydana gelmektedir. Yapılan mesh çalışmaları sonucunda cıvatalı geometriye ve cıvatasız geometriye atılan mesh görselleri Şekil 3.4a ve Şekil 3.4b’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Mesh görüntüleri (a) cıvatalı geometri için ve (b) cıvatasız geometri için

Mesh işlemi sırasında, her iki geometri için yüksek kaliteli mesh elde etmek için aşağıda sırasıyla belirtilen gelişmiş mesh belirleme yöntemleri her iki 3D geometri için de ayrı ayrı kullanılmıştır.

1. Kenar Boyutlandırma,
2. Heksagonal Baskın Yöntemi,
3. MultiZone,
4. Süpürme Yöntemi
5. Yüzey Mesh

Çizelge 3.3’de verildiği gibi geometrilerin mesh kalitesini belirleyen ortalama orthogonal kalitesi ve skewness değeri MEA ve BPP için mükemmel bölgededir ve en kötü parça bile iyi bölgededir.

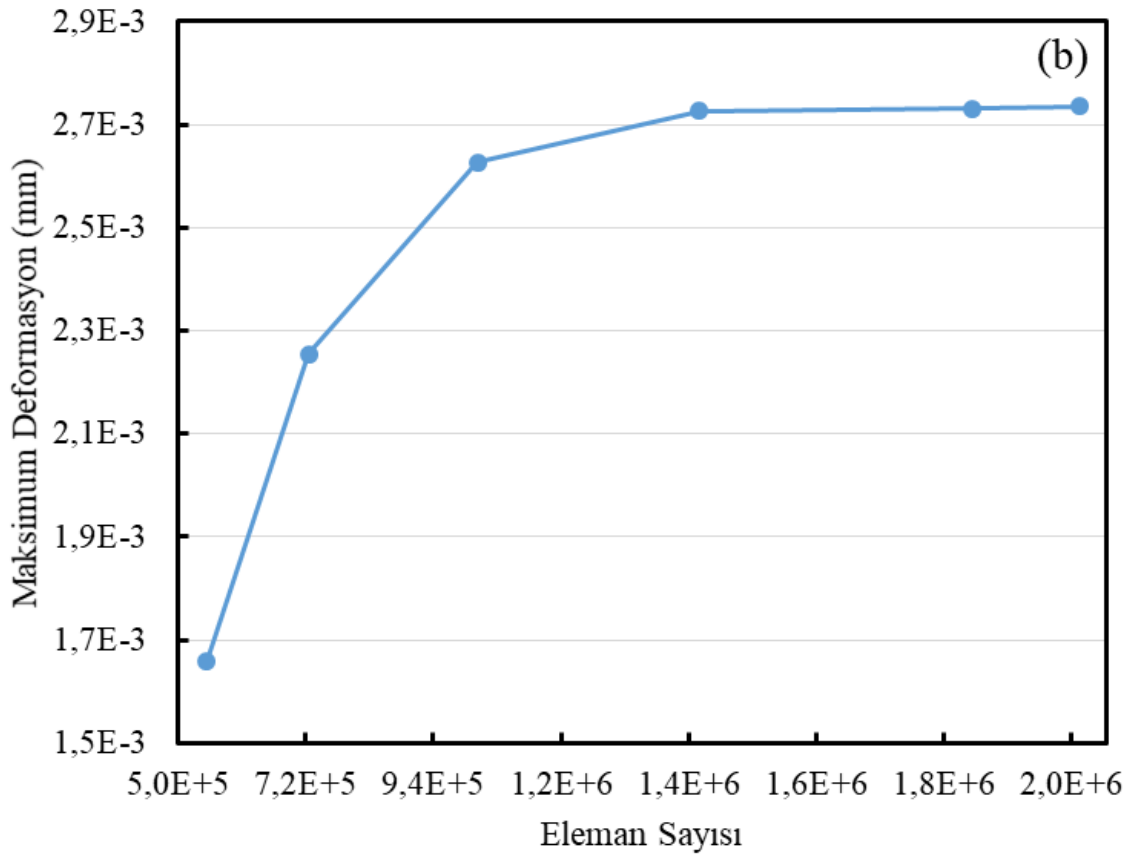
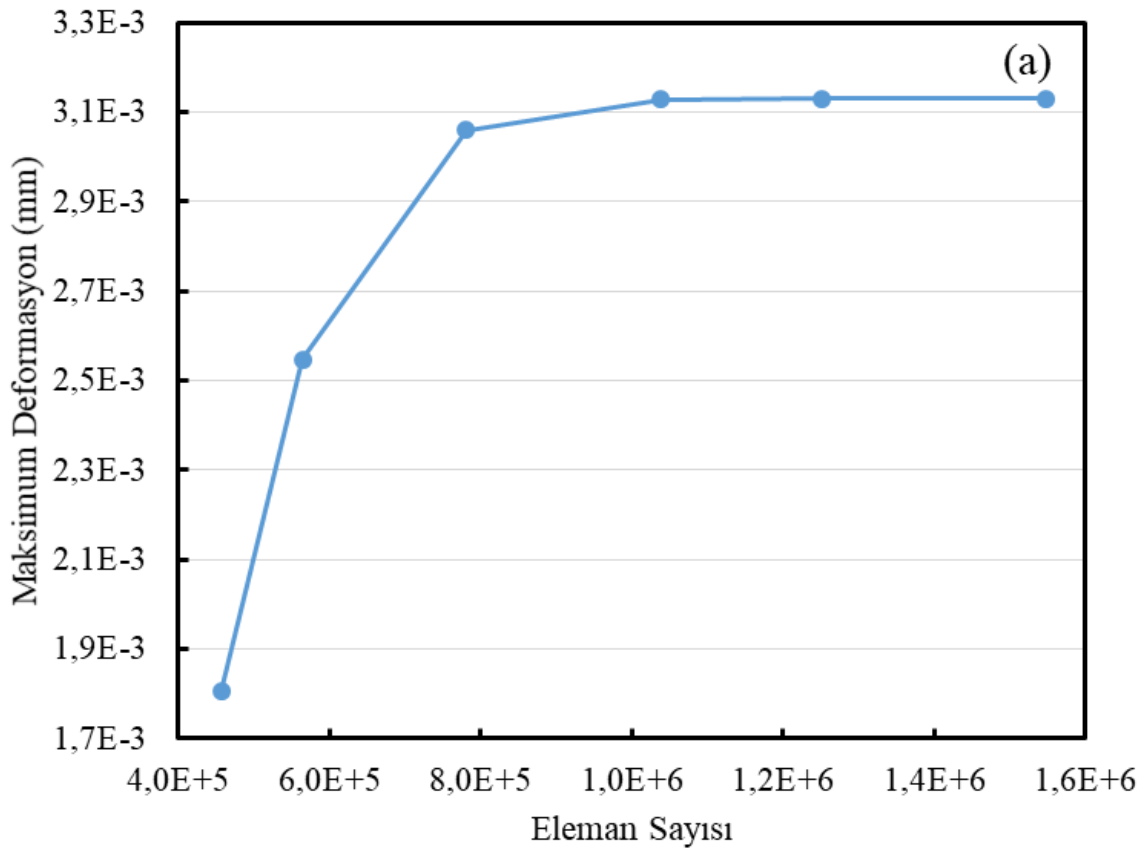
Çizelge 3.3. Mesh kalitesi

Kalite	Minimum	Maksimum	Ortalama
Orthogonal kalite	0,446	1	0,993
Skewness	1,306e-01	0,762	4,944e-02

3.2.3. Eleman sayısından bağımsızlık testi

Sayısal analize başlamadan önce eleman sayısından bağımsızlığı göstermek için eleman sayısından bağımsızlık testi pres altında ve cıvata ile sıkıştırılmak için çizilen her iki geometri için de yapılmıştır.

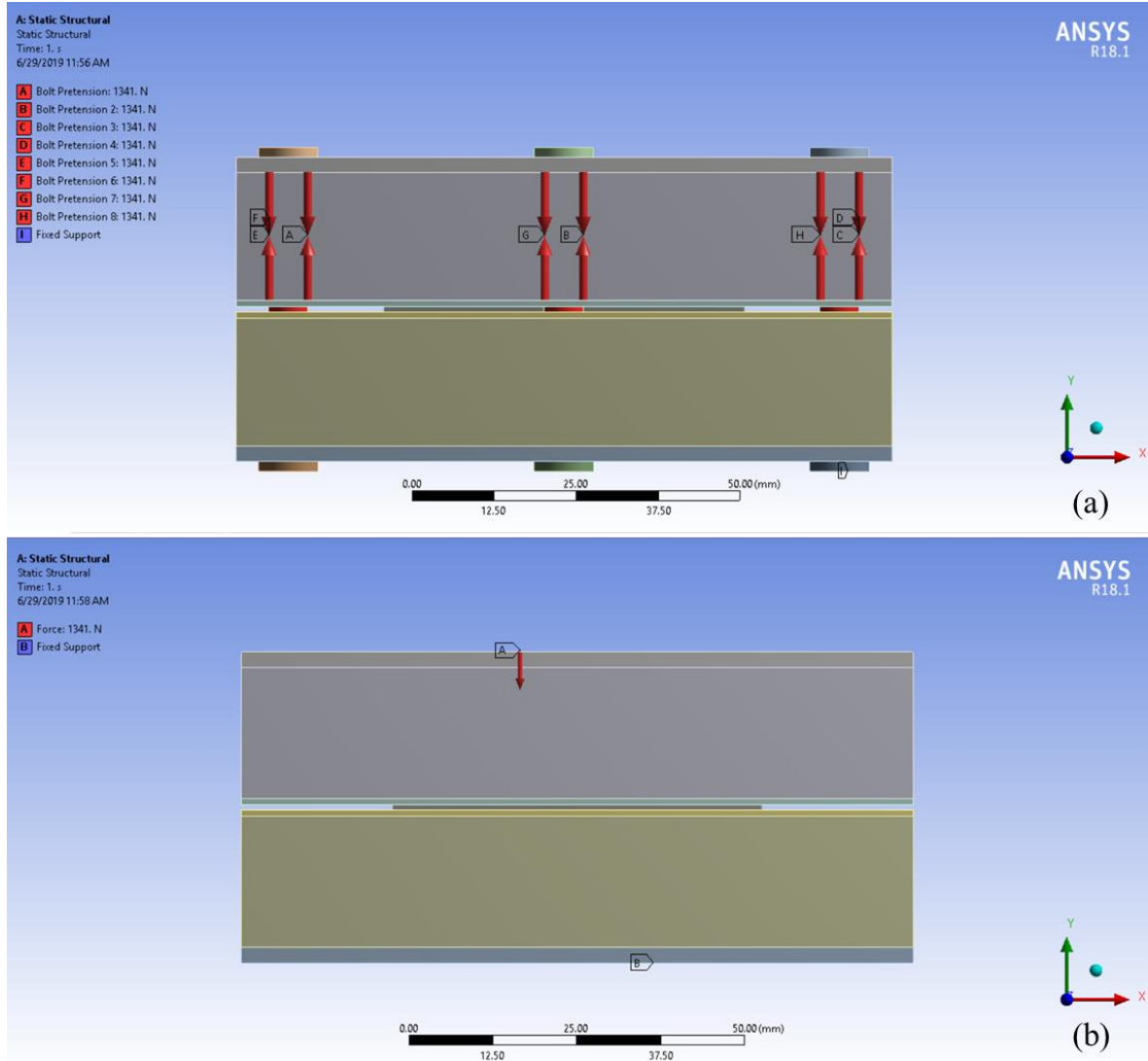
Test sonuçları cıvatalı ve pres altında sıkıştırma için çizilen her iki geometri için sırasıyla Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b’de verilmiştir. Yapılan eleman sayısından bağımsızlık testine göre maksimum deformasyonun ve yapılan analizin eleman sayısından bağımsız olduğu son 3 denemede elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda pres altında sıkıştırma için 1.038.252 ve cıvata ile sıkıştırma için 1.398.670 eleman seçilerek farklı yükler altında analizlere devam edilmiştir.



Şekil 3.5. Eleman sayısından bağımsızlık testi sonuçları (a) pres altındaki sıkıştırma için ve (b) cıvatalı geometri için

3.2.4. Sınır koşullarının ve kuvvetlerin belirlenmesi

ANSYS 3D FEA’de PEMYH’nin toplam deformasyonlarının çözümü için farklı sıkıştırma yöntemleri altında deneysel çalışmalar göz önünde bulundurularak sınır koşulları belirlendi. Cıvata ile sıkıştırma yönteminde, Şekil 3.6a’da gösterildiği gibi 8 adet cıvata (A, B, C, D, E, F, G, H) ile gösterilmiştir ve somunların (I) yüzeyleri altına sabit olarak kabul edilmiştir. Pres altında sıkıştırma yönteminde ise, katot tarafındaki (A) CCP üst yüzeyinden yüklenmiş ve anot tarafındaki (B) CCP yüzeyinin alt kısmı ve Şekil 3.6b’de gösterildiği gibi sabit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.6. Sayısal analiz için (a) cıvata ile sıkıştırma ve (b) pres altında sıkıştırma yöntemleri için belirlenen sınır koşulları

3.3. Deneysel Çalışmalar

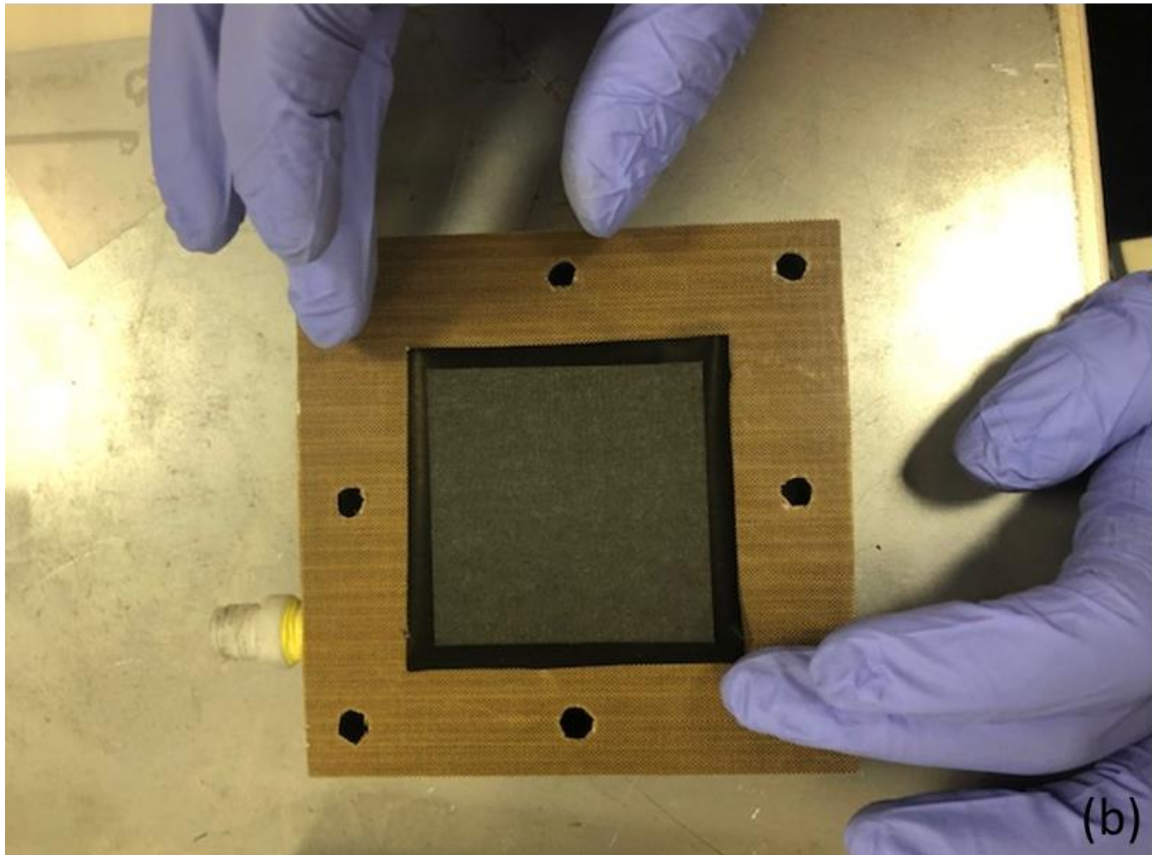
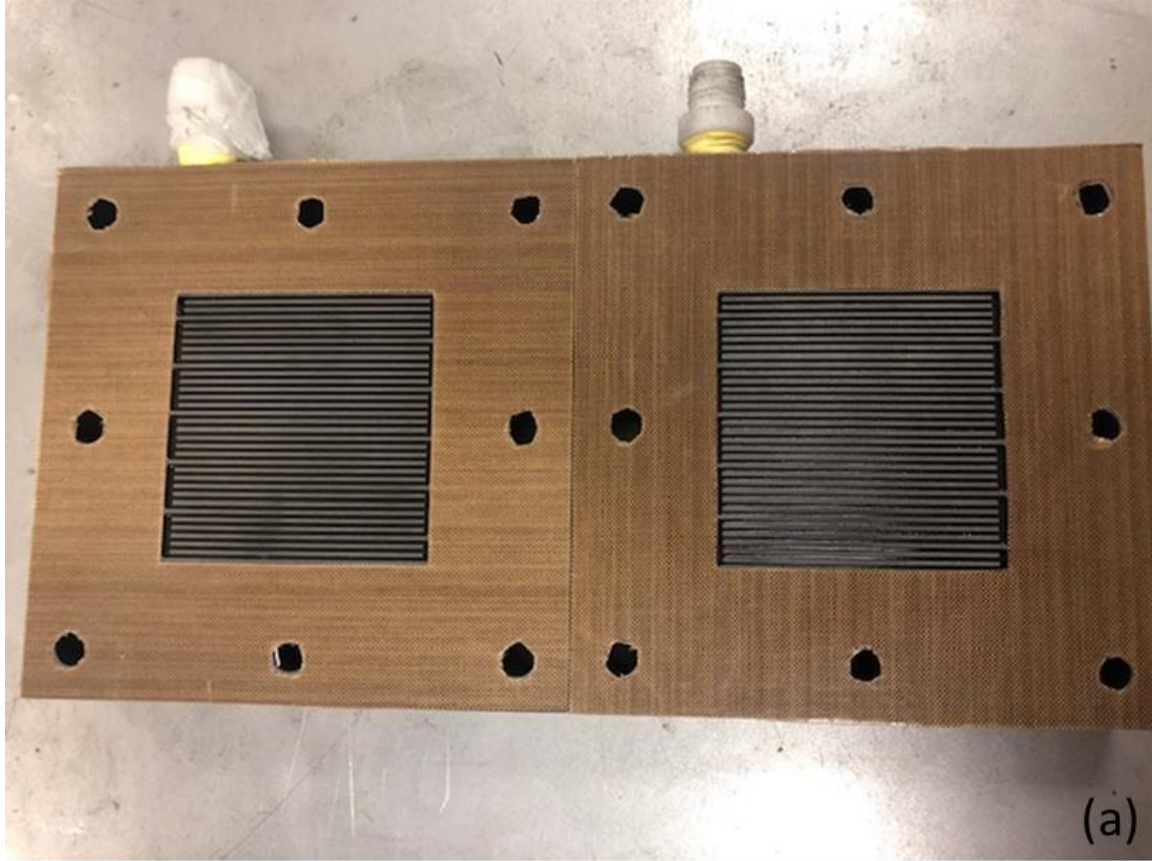
PEMYH test istasyonu kullanılarak, her iki sıkıştırma yönteminde farklı sıkıştırma kuvvet ve tork değerleri altında yapılan deneyler bu bölümde detaylı olarak verilmiştir.

Deneysel çalışmalar sırasında, farklı sıkıştırma yöntemleri cıvata ile sıkıştırılarak ve press altında sıkıştırılarak sağlanmıştır. PEMYH test istasyonu altında H₂ ve hava beslenerek 60°C çalışma sıcaklığında incelenmiştir.

3.3.1. PEMYH birleştirilmesi ve deney düzeneği hazırlığı

Deney düzeneğinin hazırlanırken ilk olarak PEMYH'nin bileşenleri PEMYH'nin aktif alanına uygun bir geometride hazırlanarak doğru bir şekilde hizalanarak laboratuvar ortamında birleştirilmiştir. PEMYH'nin bileşenleri hazırlanırken izlenen basamaklar sırasıyla Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b'de verilmiştir.

Şekil 3.7a'da görüldüğü gibi PTFE contalar PEMYH'nin BPP akış kanallarından başlamak üzere BPP'in üzerini tam kaplayacak şekilde kesilerek üzerine yapıştırıldı. GDL'ler yakıt hücresinin aktif alanı boyutunda kesildi. CCM ise yakıt hücresinin aktif alanının 4 bir köşesinden 5'er mm dışına taşacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 3.6b'de gösterildiği gibi PEMYH orta kısımda CCM ve her iki tarafında birer adet GDL yerleştirilmiş, daha sonra sızdırmazlığı sağlamak için sırası ile PTFE contalar yerleştirilmiştir. BPP'lar ve en dış kısımda akım toplamak için 2 adet CCP olacak şekilde hazırlanarak hizalanma yapılmıştır. Böylelikle, laboratuvar ortamında yakıt hücresi her iki sıkıştırma yöntemi için de uygun hale getirilmiştir.

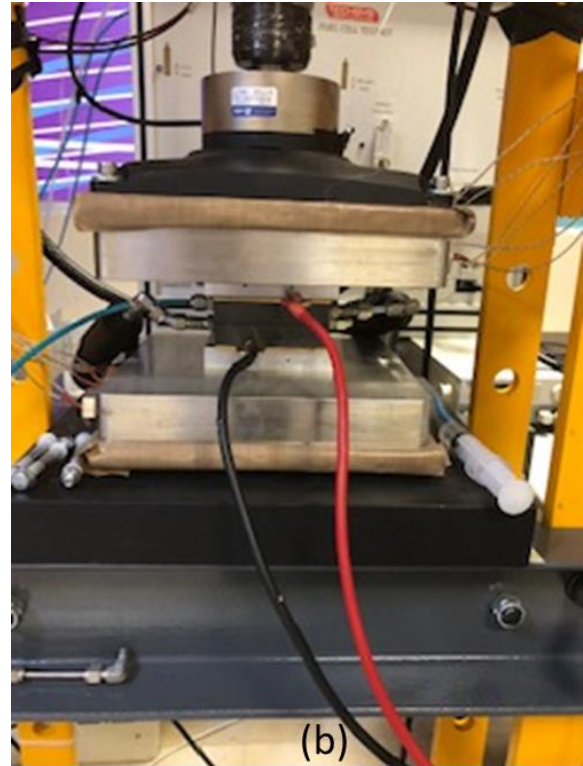
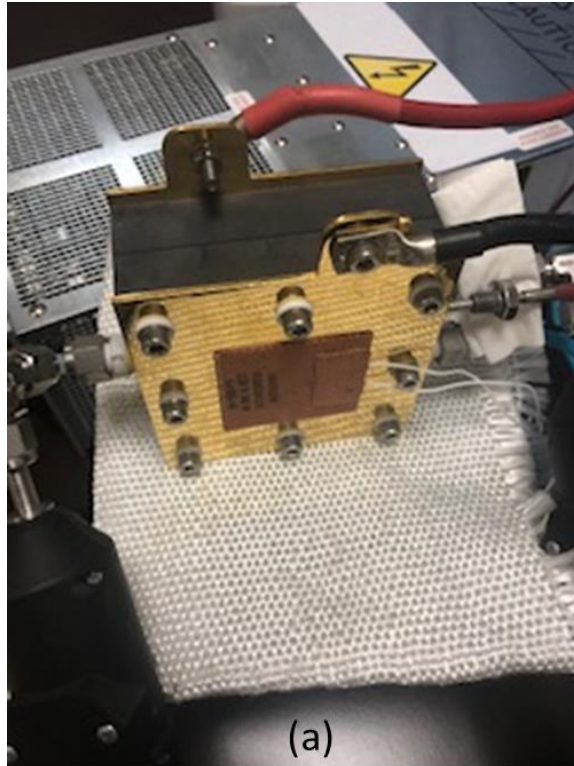


Şekil 3.7. Performans testleri için yakıt hücresinin elemanlarının (a) BPP ve conta (b) MEA hazırlanması

Çizelge 3.4.'de verilen deney koşulları altında cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerinde denenen farklı sıkıştırma kuvvetleri altında 25 cm² aktif alana sahip olan PEMYH'nin testleri yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Deney koşulları

Aktif Alan	25 cm ²
Akış Kanal Tipi	PIS
Hücre Çalışma Sıcaklığı	60°C
Anot Besleme Sıcaklığı	60°C
Katot Besleme Sıcaklığı	60°C
Bağıl Nem	0
Anot Besleme	H ₂
Katot Besleme	Hava
$\dot{m}_{H_2}$	0,5 l/dk
$\dot{m}_{Hava}$	1,5 l/dk



Şekil 3.8. PEMYH'nin (a) cıvata ile sıkıştırılması ve (b) pres altında sıkıştırılması.

Hazırlanan PEMYH cıvata ile sıkıştırılması ve pres altında sıkıştırılması yöntemlerinin test edilmesi için sırasıyla Şekil 3.8a ve Şekil 3.8b’de görüldüğü gibi cıvata ve pres altında farklı kuvvetler altında incelenmiştir. Pres altında yük hücresi yardımıyla ve bu kuvvetlere denk gelen tork değerleri altında cıvatalarla torkmetre yardımıyla sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan hücre, performans testleri için yakıt hücresi test istasyonuna bağlanmıştır (Şekil 3.9).

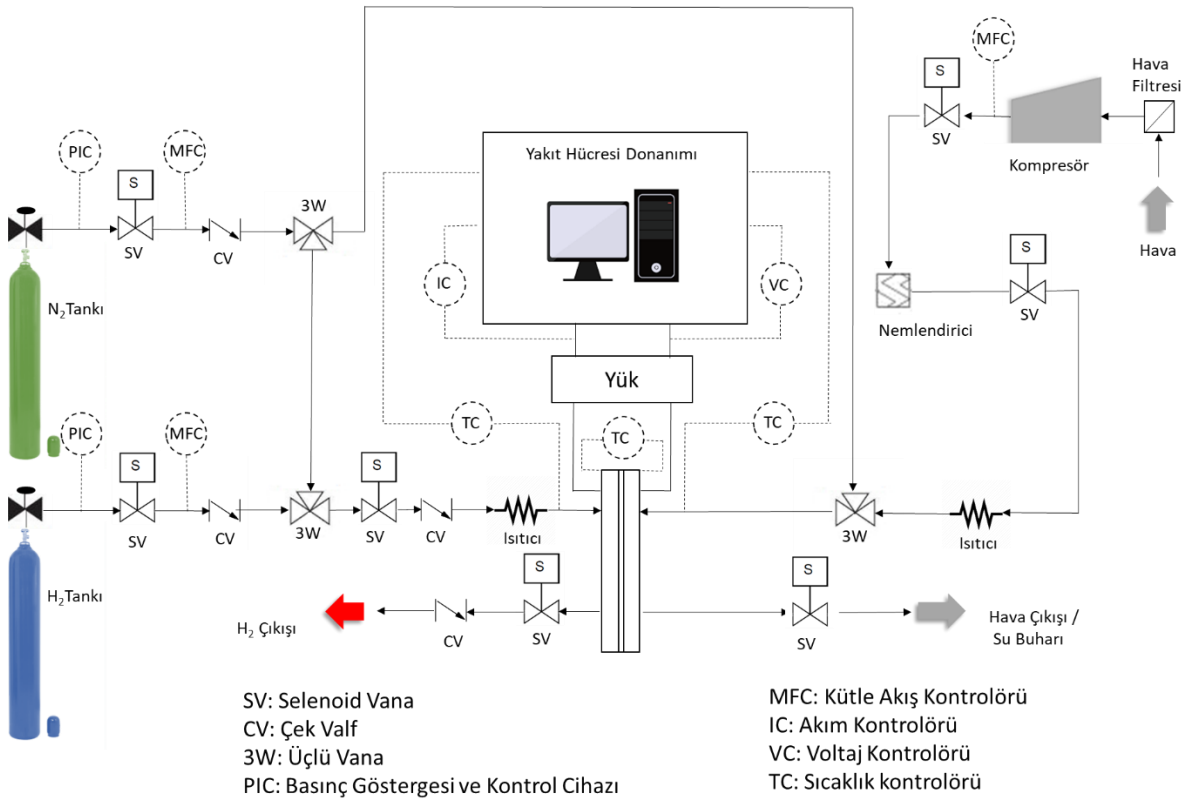


Şekil 3.9. PEMYH test istasyonu

Şekil 3.10’da gösterildiği gibi PEMYH test istasyonu, test istasyonu PEMYH donanımı, elektronik yük, gaz besleme üniteleri ve kontrol cihazlarından oluşur. Hücrenin voltaj ve akım değerleri bilgisayar destekli PEMYH test istasyonu ile ölçülmüştür.

Anot tarafında, H_2 ve N_2 gaz kütle akış kontrolörleri, basınçölçerler kullanılmış ve hücre ve gaz hattı sıcaklıkları PEMYH test istasyonu ile kontrol edilmiştir. Katot tarafında ise, hava, kütle akış kontrolünün test istasyonu tarafından bir kompresör yardımıyla sisteme alınmış ve havanın kütleli akış hızı, basınç ve sıcaklığı PEMYH test istasyonu ile kontrol edilmiştir.

Performans deneylerinde ilk olarak yakıt hücresinin sıcaklığı ve gaz hatları hücre çalışma sıcaklığına getirilmiştir. Hücre istenilen sıcaklığa geldiğinde 0,6 V çalışma voltajında 15 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Daha sonra elektronik yük yardımıyla 1-0,4 V aralığında 0,05 V aralıklar ile hücrenin akım değerleri belirlenmiştir. Performans testleri sonunda hücre ve ısıtmalı hat sıcaklıkları düşürülmüş ve hatlardan N₂ geçirilerek temizlenmiştir. Hücre oda sıcaklığına geldiğinde sistem kapatılmıştır.

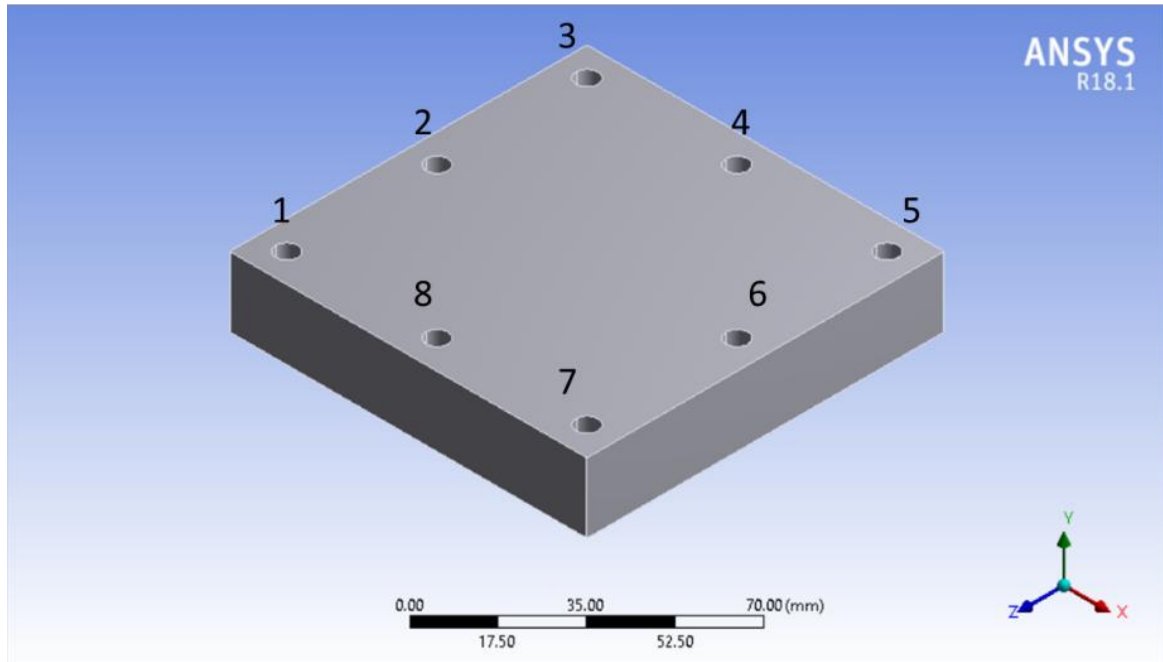


Şekil 3.10. PEMYH test istasyonu

3.3.2. Kuvvet dönüşüm hesabı

Cıvata ile ve pres altında sıkıştırma yöntemlerini birbiriyle karşılaştırılmak için, her iki yöntemde uygulanan yük miktarı aynı tutularak metotlar arasında kuvvet dönüşüm hesabı yapılmıştır. Kuvvet dönüşüm hesabı yapılırken Eş. 2.33 8 Adet cıvatalı PEMYH (Şekil 3.11) için kullanılmıştır [82].

$$T \approx \frac{F_{sık} d_{es}}{c} \quad (2.33)$$



Şekil 3.11. 8 Adet cıvatalı PEMYH BPP görüntüsü

Çizelge 3.5.'de verildiği gibi tork, kuvvet ve yük dönüşümü yapılmıştır. Deneylerde PEMYH sırasıyla 0,4 Nm, 0,6 Nm, 0,7 Nm, 0,9 Nm, 1,0 Nm, 1,3 Nm, 1,5 Nm, 1,7 Nm ve 1,9 Nm tork değerlerinde cıvata ile torkmetre kullanılarak sıkıştırılmıştır. Homojen olmayan ve bu değerlere denk gelen sırasıyla 1341 N, 1951 N, 2439 N, 3048 N, 3658 N, 4389 N, 4999 N, 5657 N, ve 6340 N yükte pres altında yakıt hücresi yük hücresi kullanılarak sıkıştırılmıştır. Pres altındaki hücre için yük dönüşümünün sağlanabilmesi için bu yüklerin kg olarak değerlerinin hesabı yapılmıştır.

Çizelge 3.5. Farklı torkların yük dönüşümü

Tork (Nm)	Kuvvet (N)	Yük (kg)
0,4	1341	137
0,6	1951	199
0,7	2439	249
0,9	3048	311
1,1	3658	373
1,3	4389	448
1,5	4999	510
1,7	5657	577
1,9	6340	647

4. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLAR

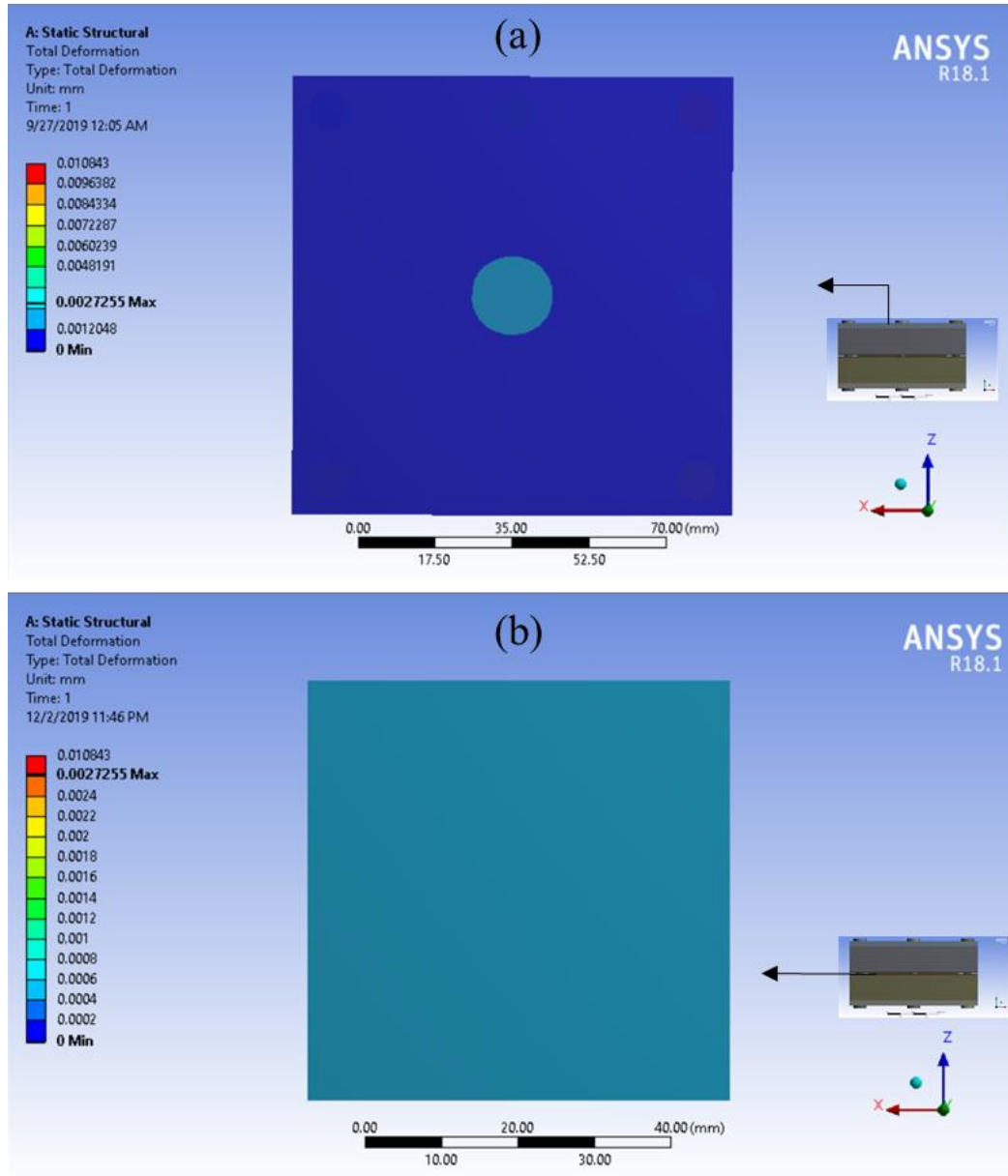
4.1. Sayısal Sonuçlar

PEMYH çalışırken ortaya çıkan karmaşık ve fiziksel olayların çoğu deneysel analizler ile tahmin edilemez ya da doğrudan görülmez. Bu sebeple sayısal analiz PEMYH çalışmalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada PEMYH farklı sıkıştırma yöntemlerinde ANSYS 3D FEA ile toplam deformasyonu analiz edilmiştir.

4.1.1. Deformasyon sonuçları

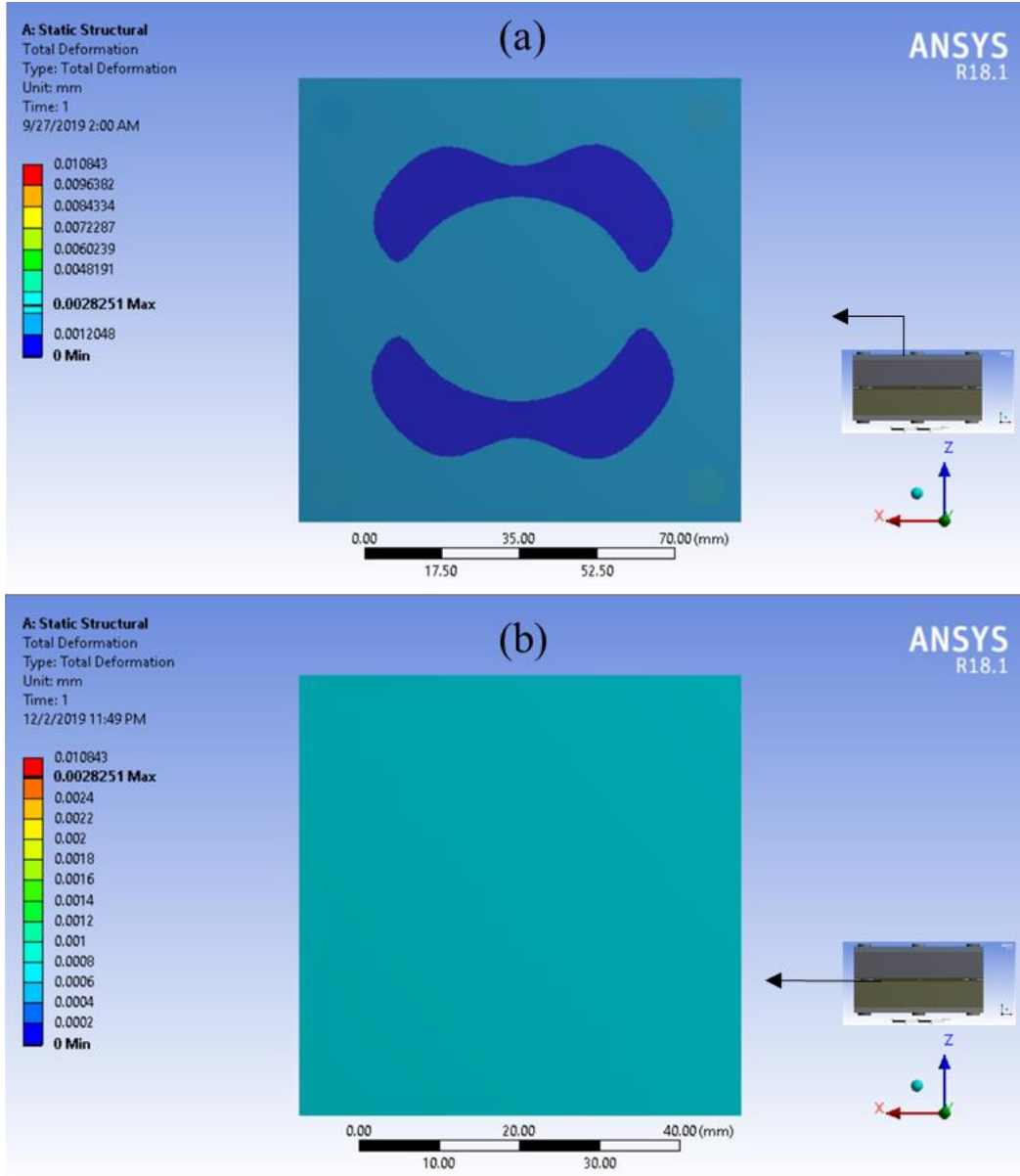
PEMYH'nin sıkıştırılmasında en yaygın olarak kullanılan yöntem cıvata ile sıkıştırmadır. Ancak, yakıt hücresinin aktif alanı cıvata ile sıkıştırma yönteminde homojen olarak sıkışmamakta ve buna bağlı olarak PEMYH aktif alanı üzerinde zamanla şişkin bir yapı oluşmaktadır. Yapılan toplam deformasyon sonuçları ile birlikte hücrenin aktif alanı üzerindeki sıkıştırma analiz edilmiştir. Deneylere başlamadan önce uygulanacak farklı yük ve sıkıştırma yöntemleri altında yakıt hücresinin analiz edilebilmesi doğru çalışma parametrelerinin belirlenip riske girilmemesi açısından bu çalışma için büyük önem taşımaktadır.

Sayısal analiz sonuçları cıvata ile sıkıştırma yönteminde 0,4 Nm, 0,6 Nm, 0,7 Nm, 0,9 Nm, 1,0 Nm, 1,3 Nm, 1,5 Nm, 1,7 Nm ve 1,9 Nm altındaki tork değerleriyle analizi sırasıyla, Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Pres altında sıkıştırma yönteminde ise bu tork değerlerine sırasıyla denk olan 1341 N, 1951 N, 2439 N, 3048 N, 3658 N, 4389 N, 4999 N, 5657 N ve 6340 N kuvvetleri altında sıkıştırılarak analizi yapılmıştır. Bu kuvvetler altında analizi yapılan yakıt hücresi sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Kuvvet dönüşümlerinde Eş. 2.33 kullanılmıştır. Total maksimum deformasyon hesaplanarak ANSYS 3D FEA yapısal analizi ile analiz sonuçları artan yüklerde ve her iki sıkıştırma yöntemi altında karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Yorumlamalar sırasında MEA'nın farklı yükler altında karşılaştırmasının yapılmasında renk yelpazesi arttırılmış ve renk yelpazesi aralık değerleri daha iyi görsel karşılaştırma yapılabilmesi için azaltılmıştır.



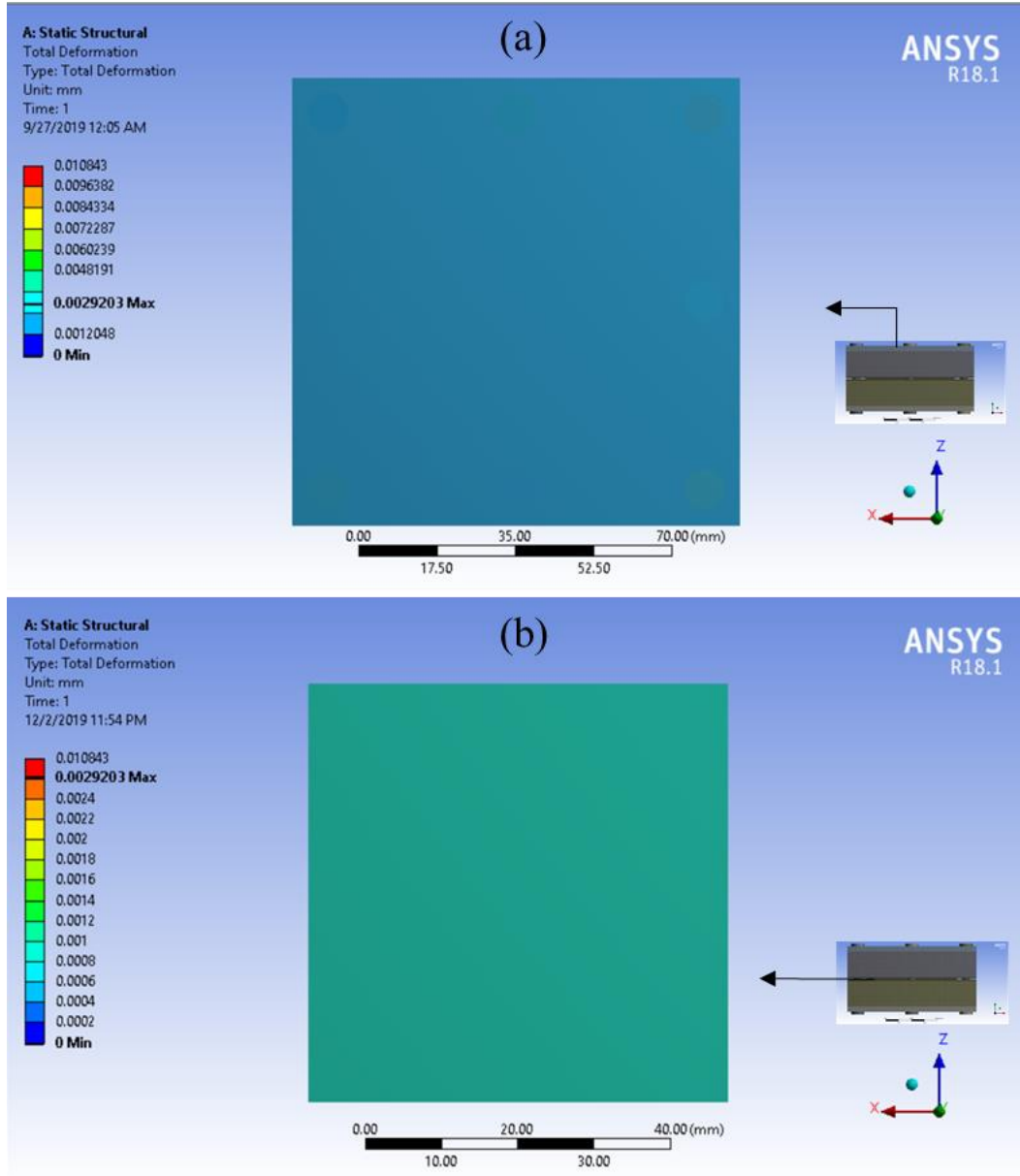
Şekil 4.1. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,4 Nm Tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

0,4 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH'de yeterince sıkıştırma olmadığı belirlenmiştir. Toplam maksimum deformasyon 2,726 μm 'dir. Şekil 4.1a'da PEMYH'ne ve Şekil 4.1b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir.



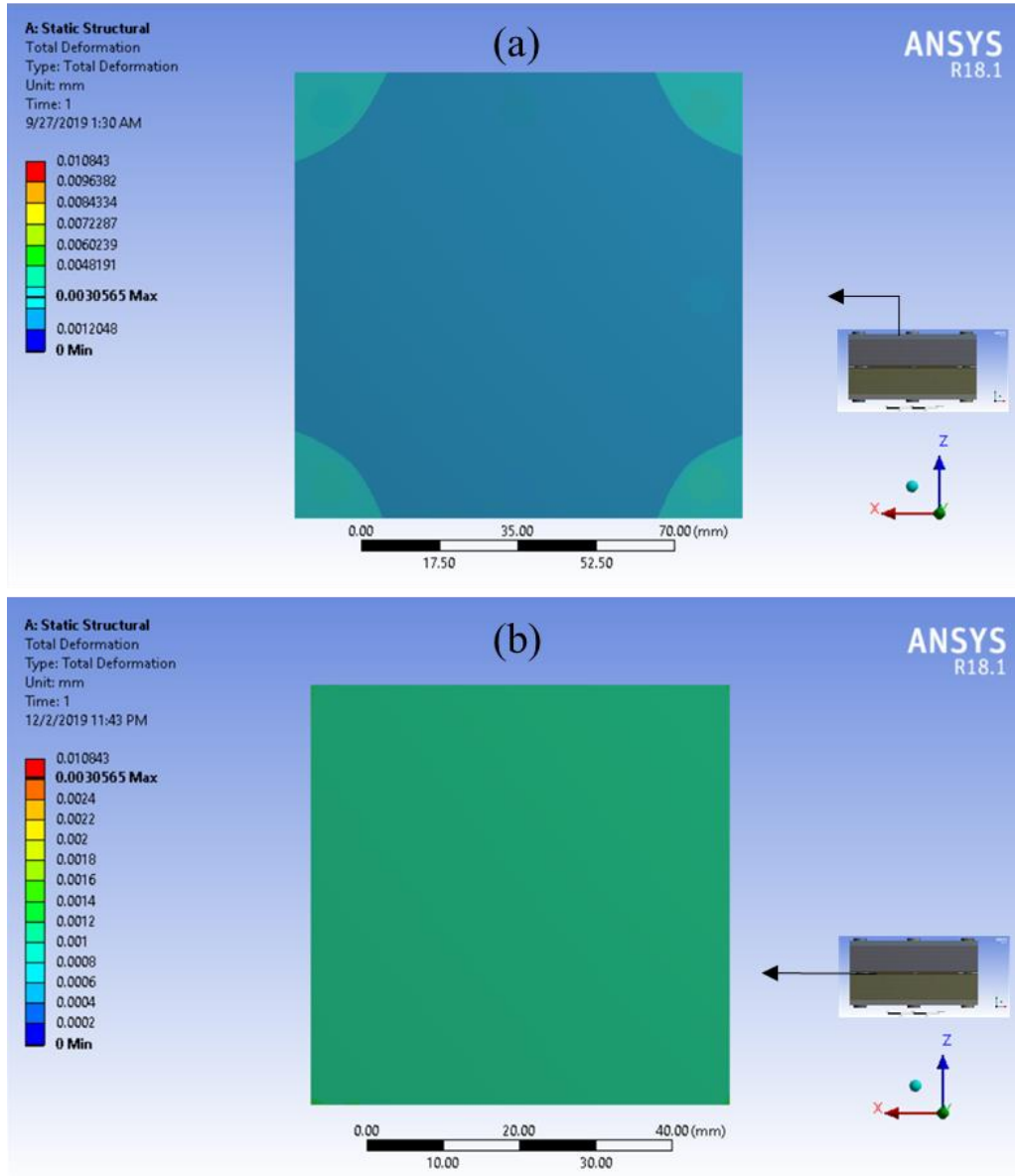
Şekil 4.2. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,6 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

0,6 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 0,4 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Artan sıkıştırma torku ile birlikte gaz kaçağının daha fazla önlendiği deneysel çalışmalarda gözlemlenen akım ve güç yoğunluğunun artışı ile desteklenmiştir. Toplam maksimum deformasyon 2,825 μm 'dir. Şekil 4.2a'da PEMYH'ne ve Şekil 4.2b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerindeki sıkıştırmanın arttığı ancak yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir.



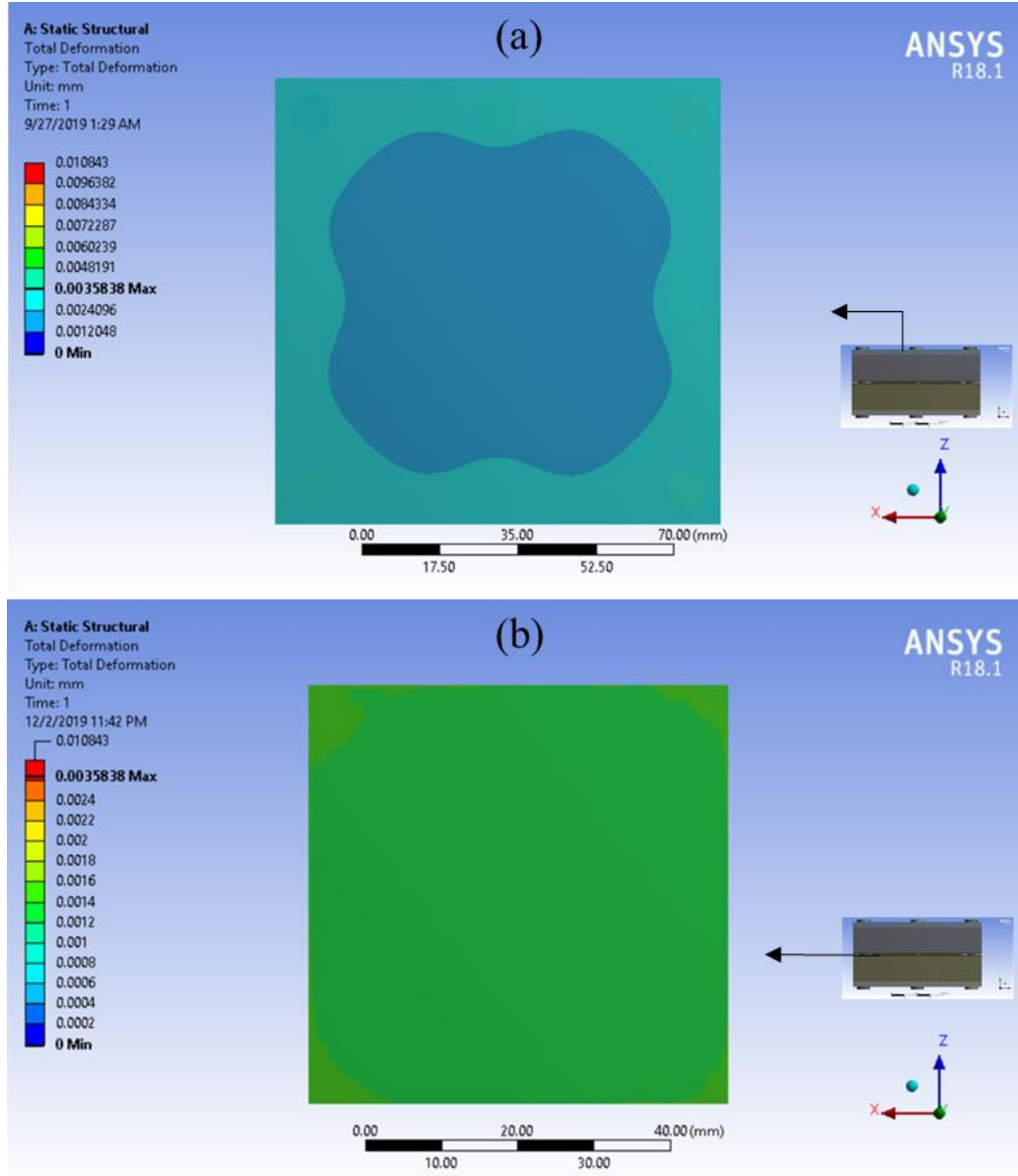
Şekil 4.3. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,7 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

0,7 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 0,6 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Deneysel çalışmada artan sıkıştırma torku ile birlikte maksimum akım ve güç yoğunluğunun da artması bir önceki çalışmada yeterince gaz kaçağının önelenemediğini göstermektedir. Toplam maksimum deformasyon 2,920 μm 'dir. Şekil 4.3a'da PEMYH'ne ve Şekil 4.3b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir.



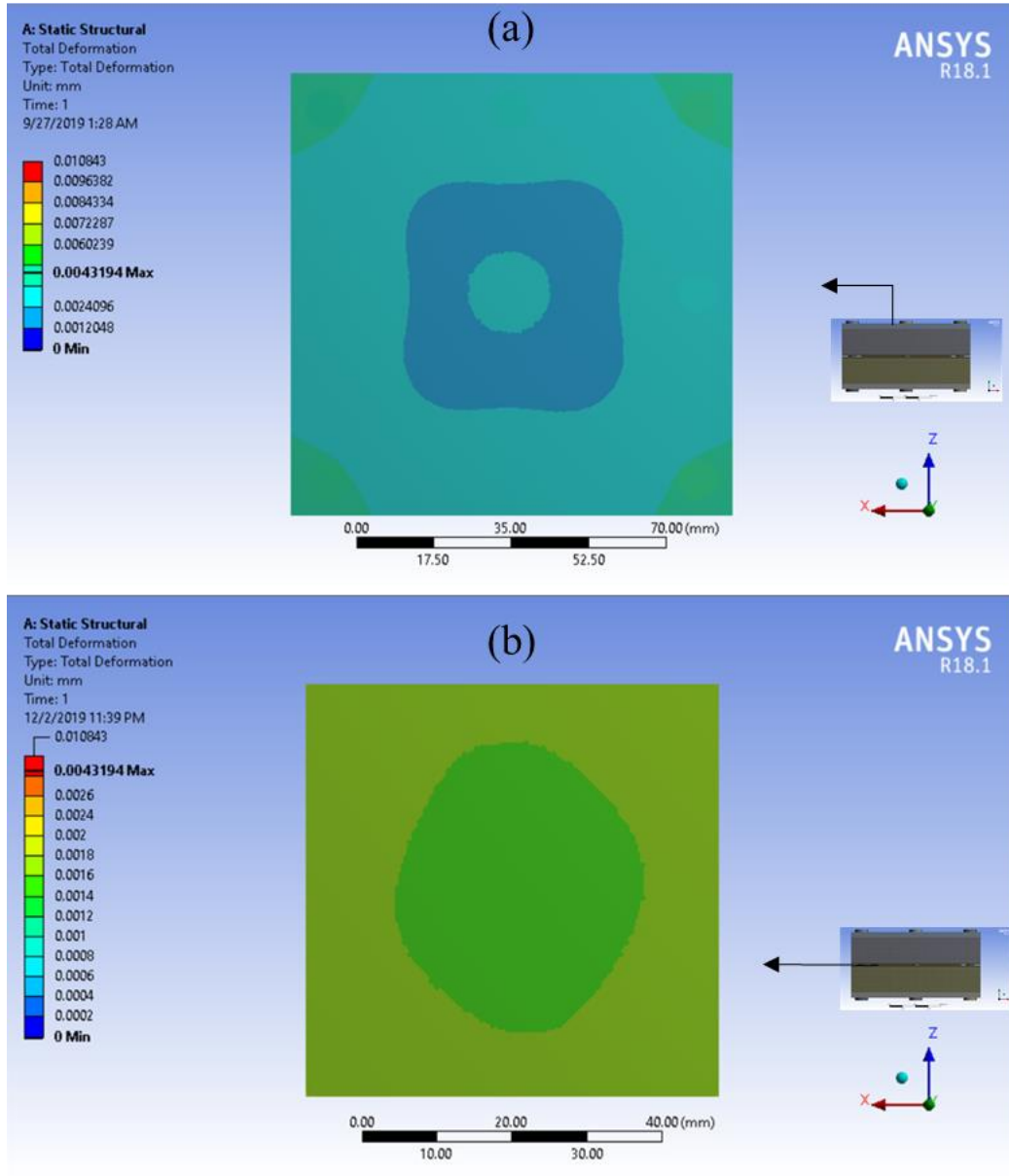
Şekil 4.4. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 0,9 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

0,9 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 0,7 Nm'ye kıyasla sıkıştırma kuvvetinin arttığını göstermektedir. Toplam maksimum deformasyon 3,057 μm 'dir. Şekil 4.4a'da PEMYH'ne ve Şekil 4.4b'de MEA'nın üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir. Buna ek olarak, Şekil 4.4'dan anlaşılacağı gibi homojen olmayan sıkıştırmada hücre sıkışmaya köşe kısımlardan başlar. Ancak MEA üzerinde yeterince sıkıştırma sağlanamadığı deneysel çalışmalarla desteklenmiştir ve cıvata ile sıkıştırma yönteminde tork artışına devam edilmiştir.



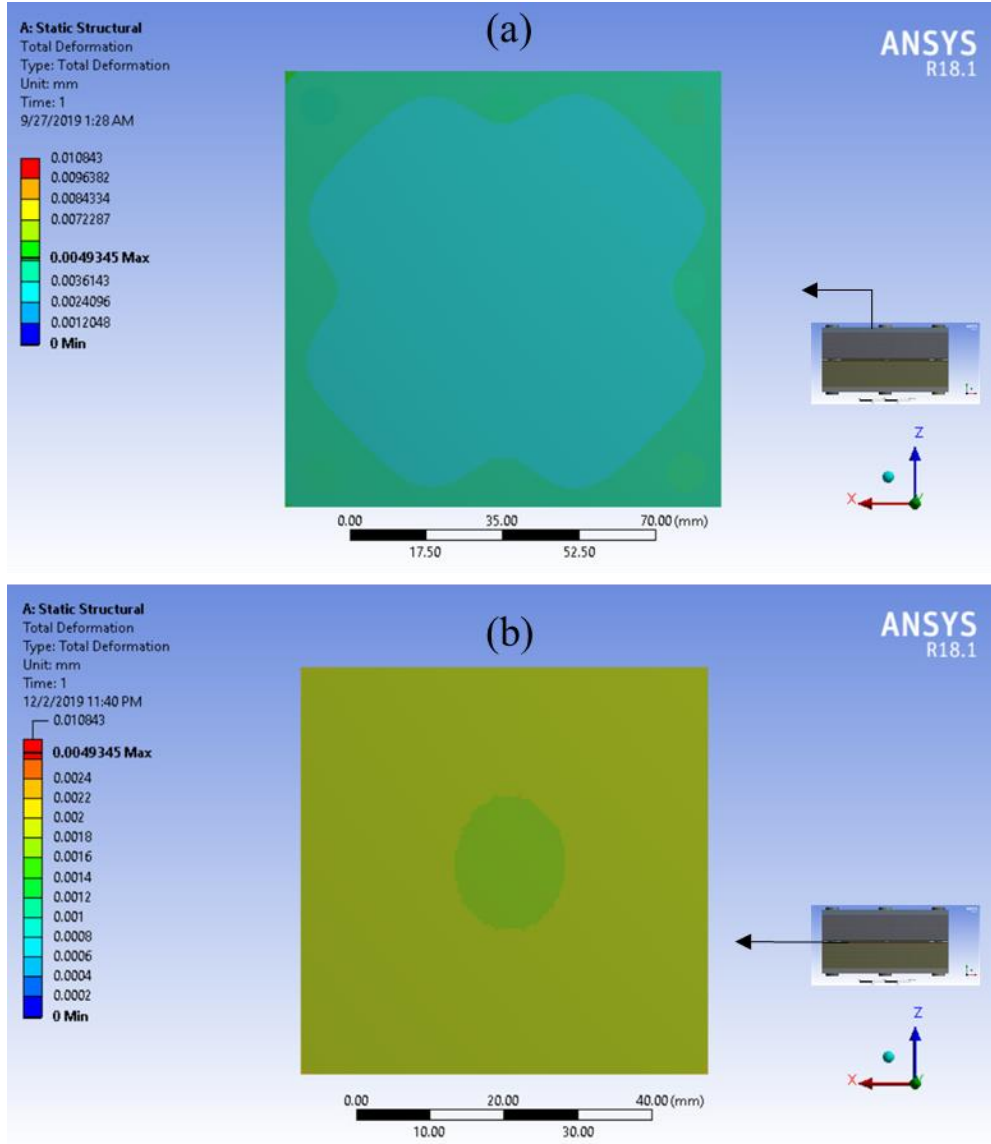
Şekil 4.5. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,1 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1,1 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 0,9 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin artarak gaz kaçağının önlendiği deneysel çalışmalarda maksimum akım ve güç yoğunluğunun değerindeki artıştan anlaşılmaktadır. Ayrıca, sıkıştırma torkundaki artış ile birlikte yakıt hücresinin bileşenlerinin birbirleriyle olan teması da artmaktadır. Toplam maksimum deformasyon 3,584 μm 'dir. Şekil 4.5a'da PEMYH'ne ve Şekil 4.5b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir.



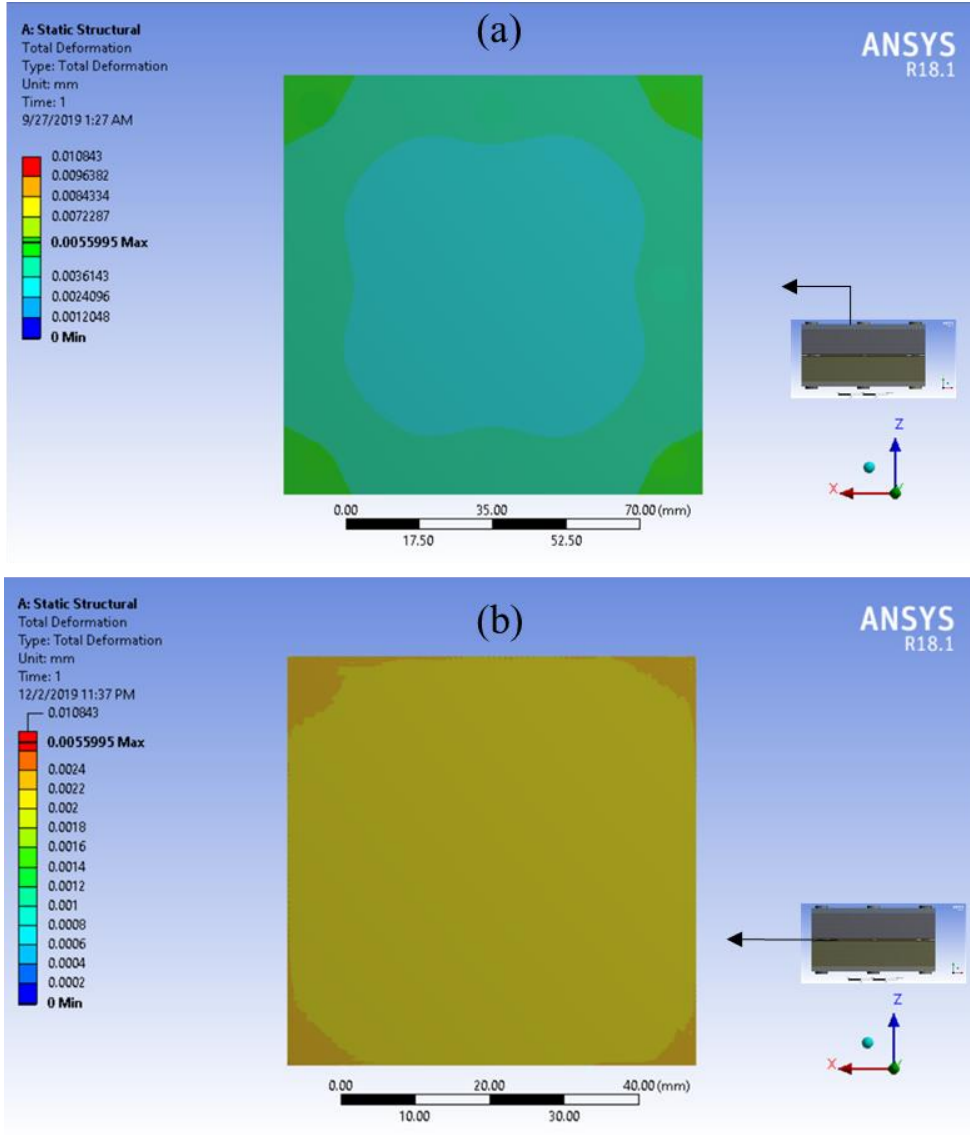
Şekil 4.6. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,3 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1,3 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 1,1 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 4,319 μm 'dir. Artan kuvvet ve deformasyona rağmen Şekil 4.6b'de verilen MEA'nin üstten görünüşünde aktif alan üzerinde yeterince bir sıkışma sağlanamamışken kenar kısımlarda daha çok sıkışma sağladığı görülmektedir. Bu sebeple cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle homojen bir dağılım sağlanamadığı açıkça görülmektedir.



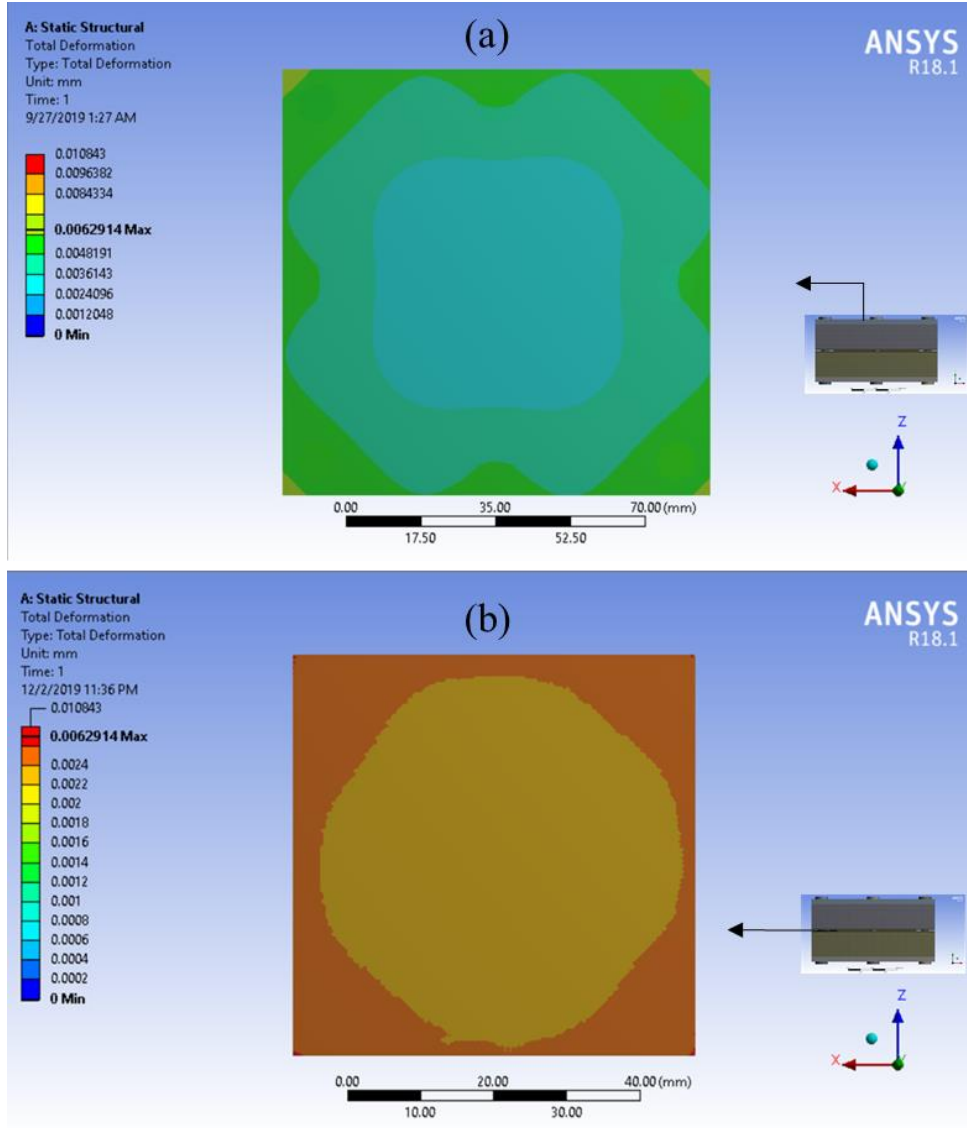
Şekil 4.7. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,5 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1,5 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 1,3 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 4,935 μm 'dir. Artan kuvvet ve aşırı deformasyona rağmen Şekil 4.7b'de MEA'nin üstten görünüşünde aktif alan üzerinde sıkışmanın artmasına rağmen hala yeterince bir sıkışma sağlanamamışken kenar kısımlarda aşırı sıkışma olduğu görülmektedir. Deneyisel çalışmalardaki maksimum gücün düşmesi aktif alanda henüz yeterince sıkışma sağlanamamışken kenar kısımlardaki aşırı sıkışma GDL tabakasının akış kanallarının içine girerek burada gaz geçişini blokladığı düşünülmektedir.



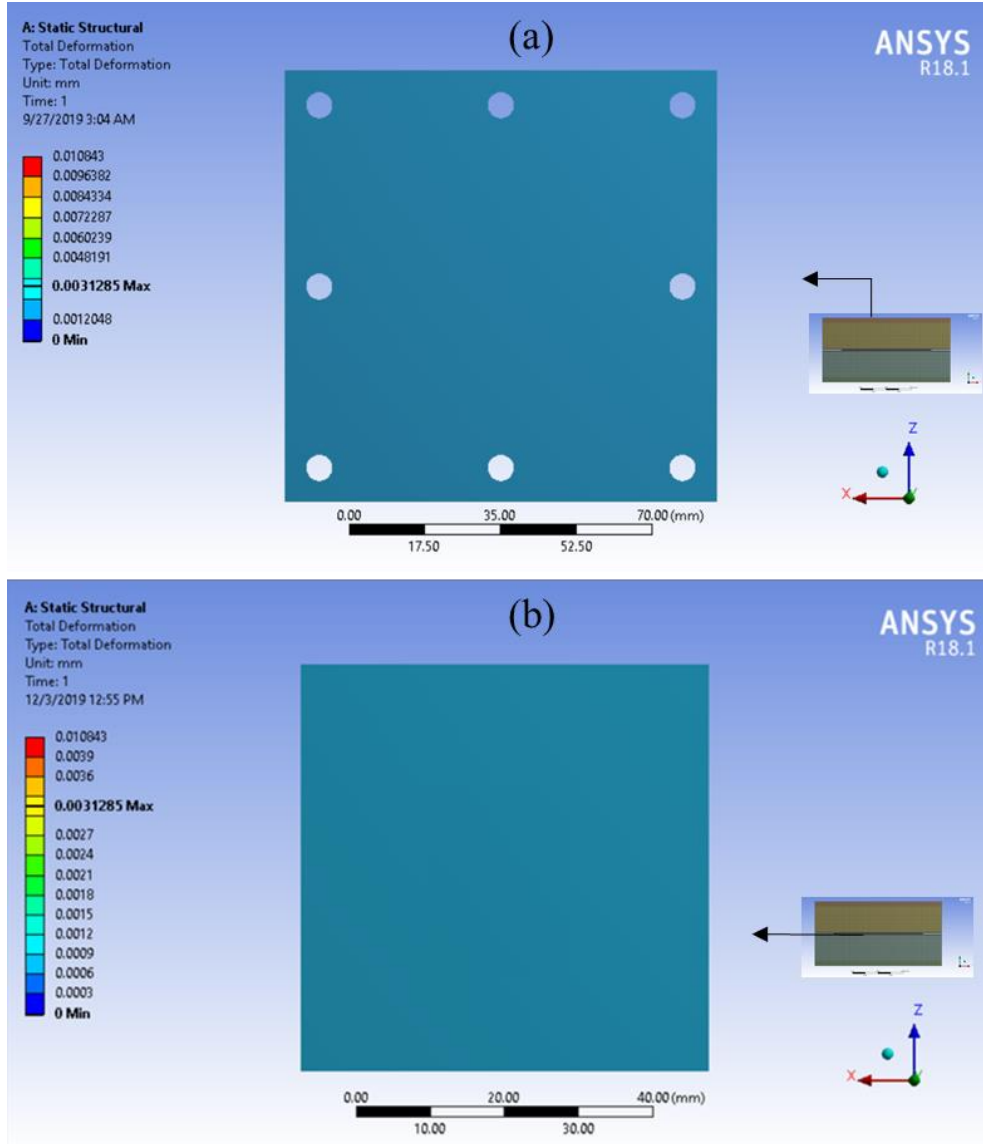
Şekil 4.8. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,7 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1,7 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 1,5 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 5,560 μm 'dir. Deneysel çalışmalarda 1,3 Nm'den 1,5 Nm'ye artan tork değerinde maksimum akım ve güç yoğunluğunda düşüş görülmüştür. Ancak, deneylere sayısal çalışmalara sonucun kesinliğini vurgulamak için devam edilmiştir. Şekil 4.8a'da görüldüğü gibi aktif alan üzerinde homojen bir dağılım sağlanamamıştır ve deneysel çalışma ile birlikte yorumlandığında aktif alan üzerinde yeterince sıkışmanın sağlanamadığı anlaşılmaktadır. Kenarlarda aşırı deformasyona bağlı maksimum akım ve güç yoğunluğunda düşüş gözlenmiştir.



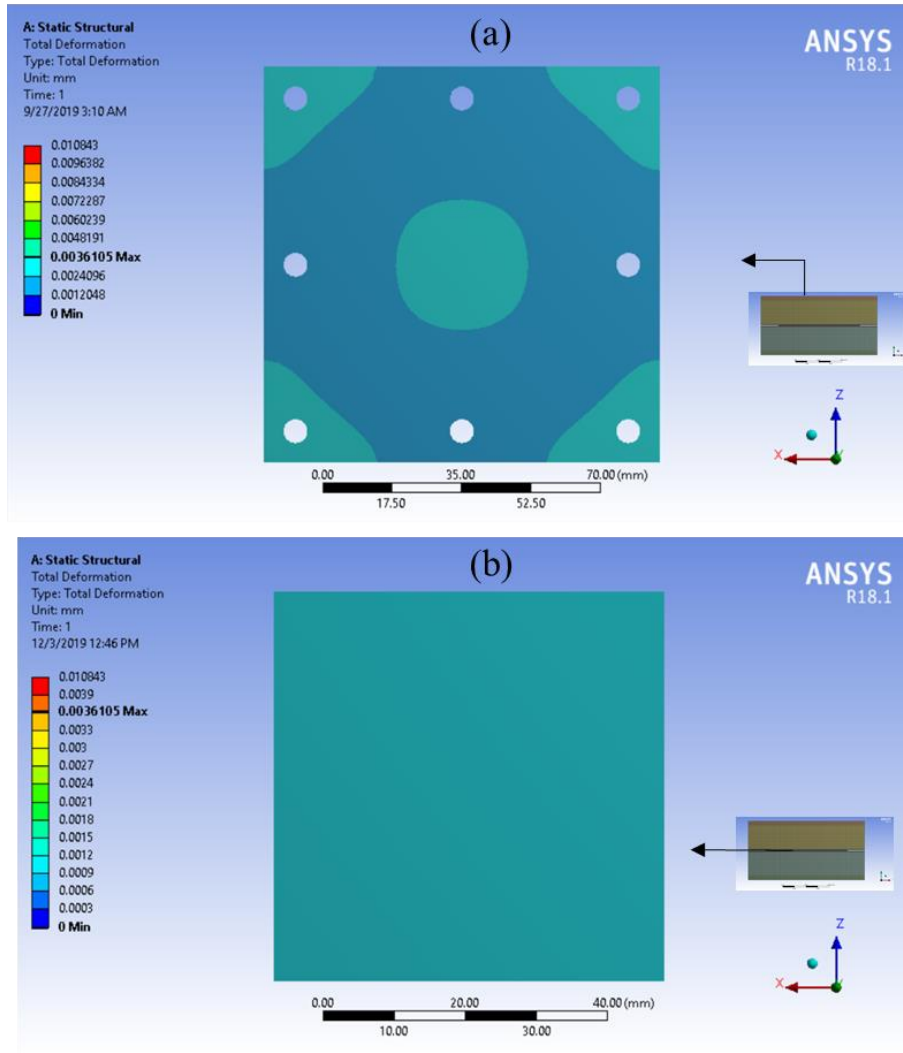
Şekil 4.9. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle 1,9 Nm tork altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1,9 Nm tork altında cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 1,7 Nm'ye kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı ancak akım ve güç yoğunluğunda düşüş görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 6,291 μm 'dir. Deneysel çalışmalarda 1,3 Nm'den 1,7 Nm'ye artan tork değerinde güç yoğunluğunda düşüş görülmüştür. Ancak, deneylere sayısal çalışmalara sonucun kesinliğini vurgulamak 3. defa denemeye devam edilmiştir. Şekil 4.9b'de görüldüğü gibi cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle MEA üzerindeki sıkıştırma kenarlardan başlar. Sıkıştırmanın kenar kısımlardan başlaması, hücrenin uzun süre çalışması durumunda PEMYH aktif alanı üzerinde şişkin bir yapıya sebep olarak akış kanalları ile teması bulunan GDL ile arasının açılarak hücrenin performansında düşüş meydana geleceği de öngörülmektedir.



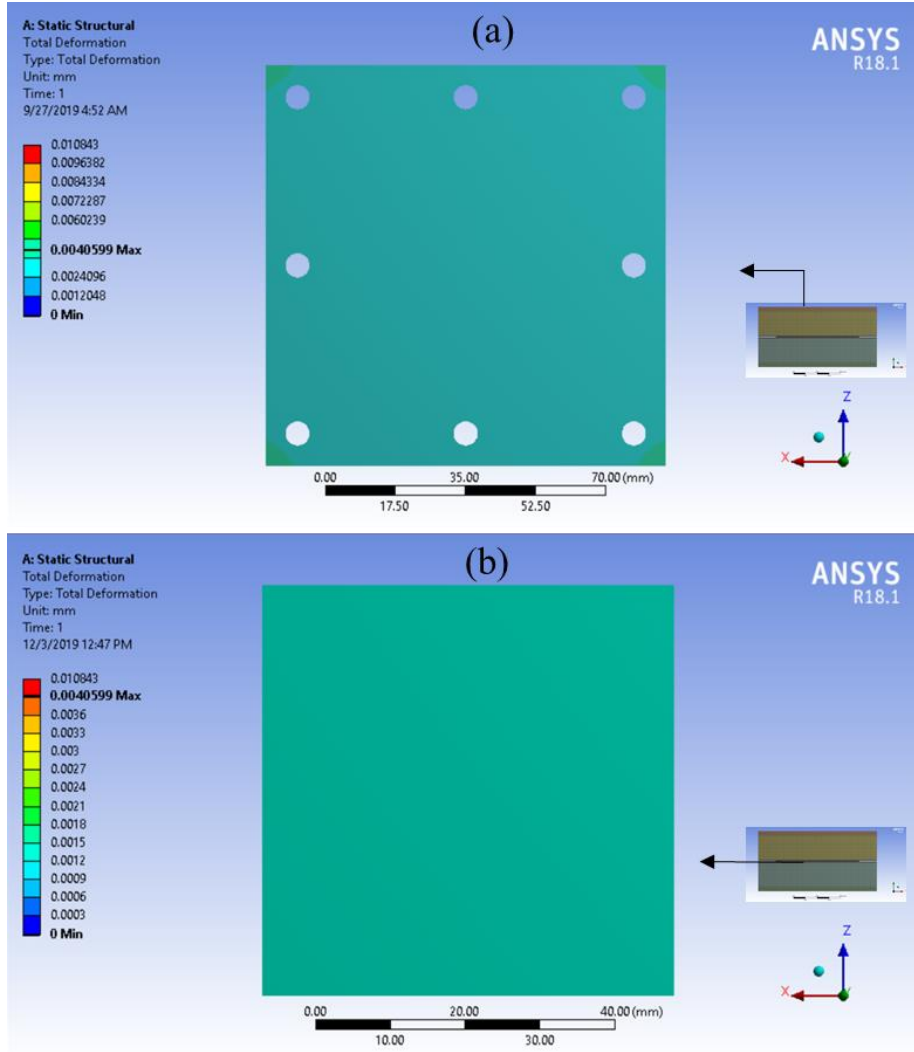
Şekil 4.10. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 1341 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1341 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH'nin ve MEA üstten görüşünde anlaşıldığı gibi aktif alan üzerinde yeterince sıkıştırma olmamıştır. Toplam maksimum deformasyon 3,129 μm 'dir. Şekil 4.10a'da PEMYH ve Şekil 4.10b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir.



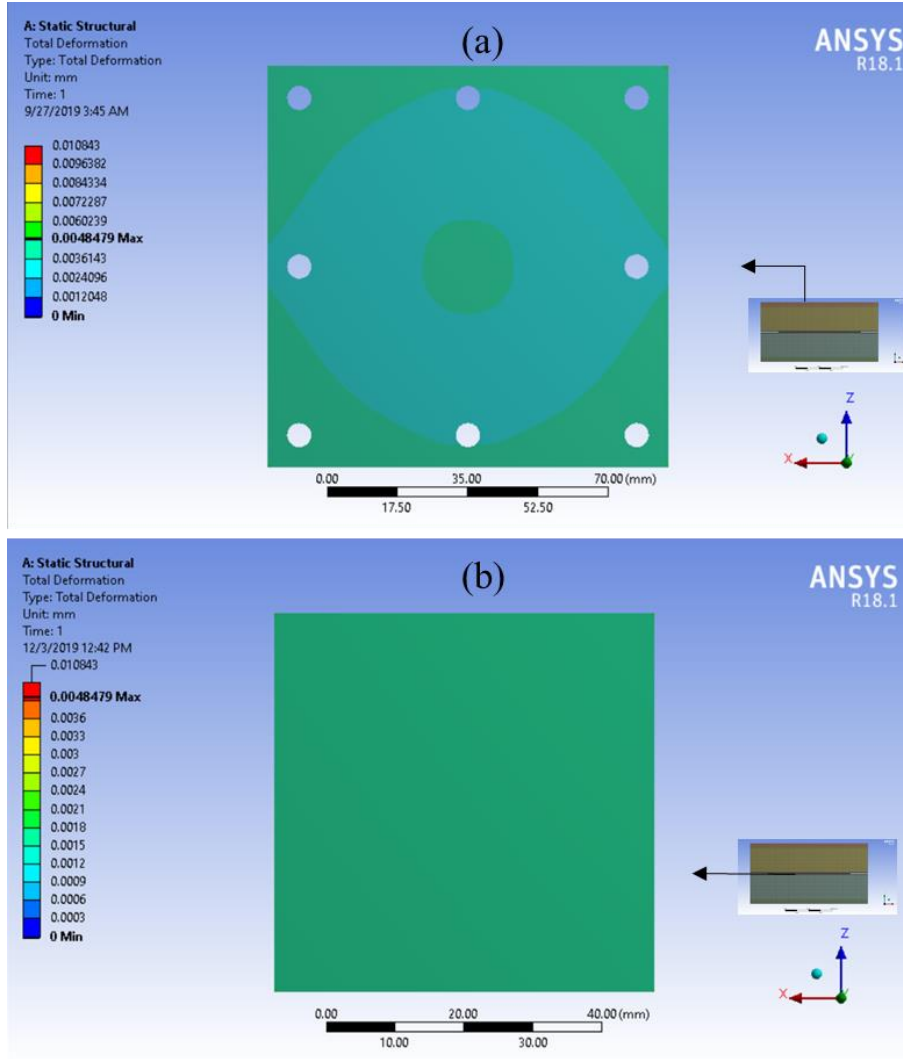
Şekil 4.11. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 1951 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

1951 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 1341 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 3,611 μm 'dir. Şekil 4.11a'da PEMYH ve Şekil 4.11b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanmadığı görülmektedir. Artan sıkıştırma yüküyle birlikte gaz kaçağının daha çok önlenilebileceği öngörülmektedir ve deneysel çalışmadaki bir önceki yüke göre olan maksimum güç yoğunluğu artışı ile desteklenmektedir.



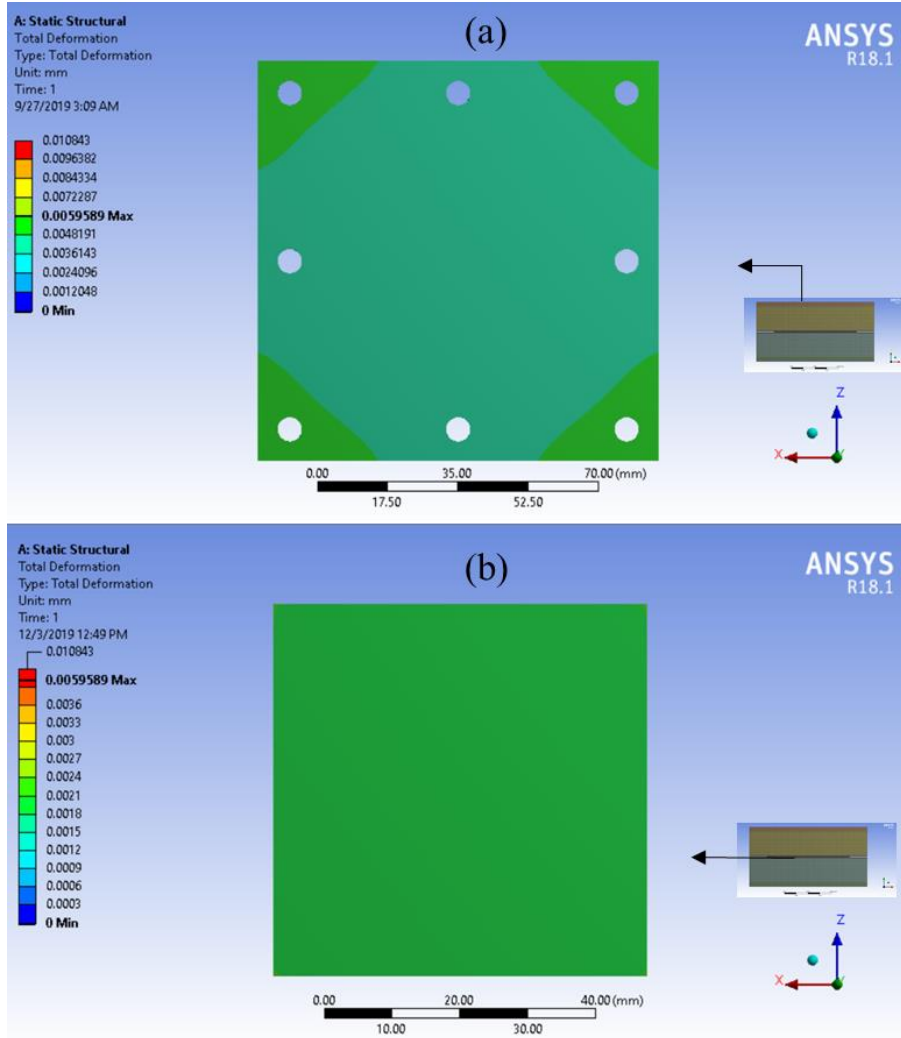
Şekil 4.12. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 2439 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

2439 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 1951 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon $4,060 \mu\text{m}$ 'dir. Deneysel çalışmada artan sıkıştırma yükü ile birlikte maksimum güç yoğunluğunun da artması bir önceki çalışmada yeterince gaz kaçağının önlenemediğini göstermektedir. Bu sebeple pres altındaki hücrenin sıkıştırma kuvvetinin arttırılmasına devam edilmiştir. Şekil 4.12a'da PEMYH ve Şekil 4.12b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamamasına rağmen homojen bir dağılımın sağlandığı görülmektedir.



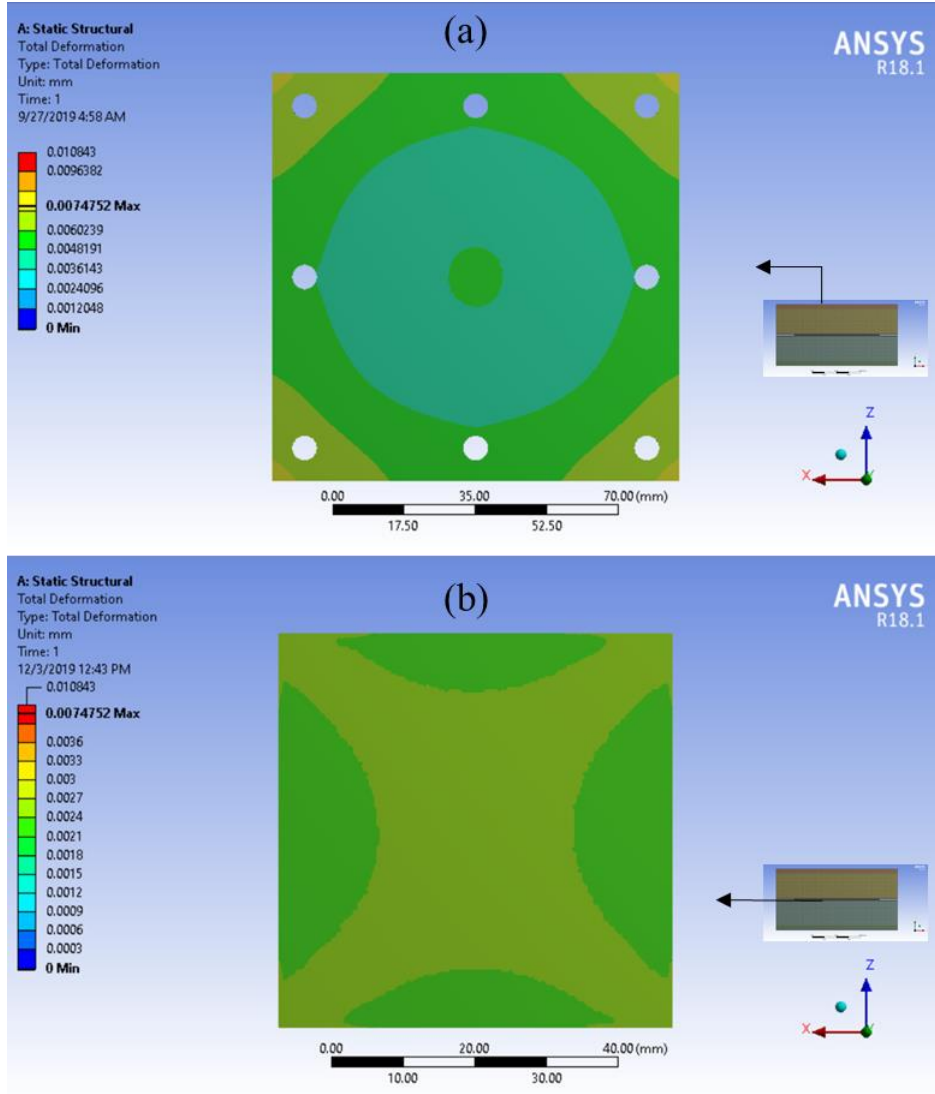
Şekil 4.13. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 3048 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

3048 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 2439 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 4,848 μm 'dir. Şekil 4.13a'da PEMYH ve Şekil 4.13b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamadığı görülmektedir. Ancak homojen olmayan sıkıştırma yöntemiyle karşılaştırıldığında, PEMYH'nin aktif alanı üzerindeki sıkıştırma orta kısımdan başlamaktadır. Ayrıca, artan sıkıştırma kuvveti ile birlikte PEMYH bileşenlerinin birbirlerine olan teması giderek artarak gaz kaçağının daha çok önlenemediği deneysel çalışmalarda güç yoğunluğunun artışı ile desteklenmiştir.



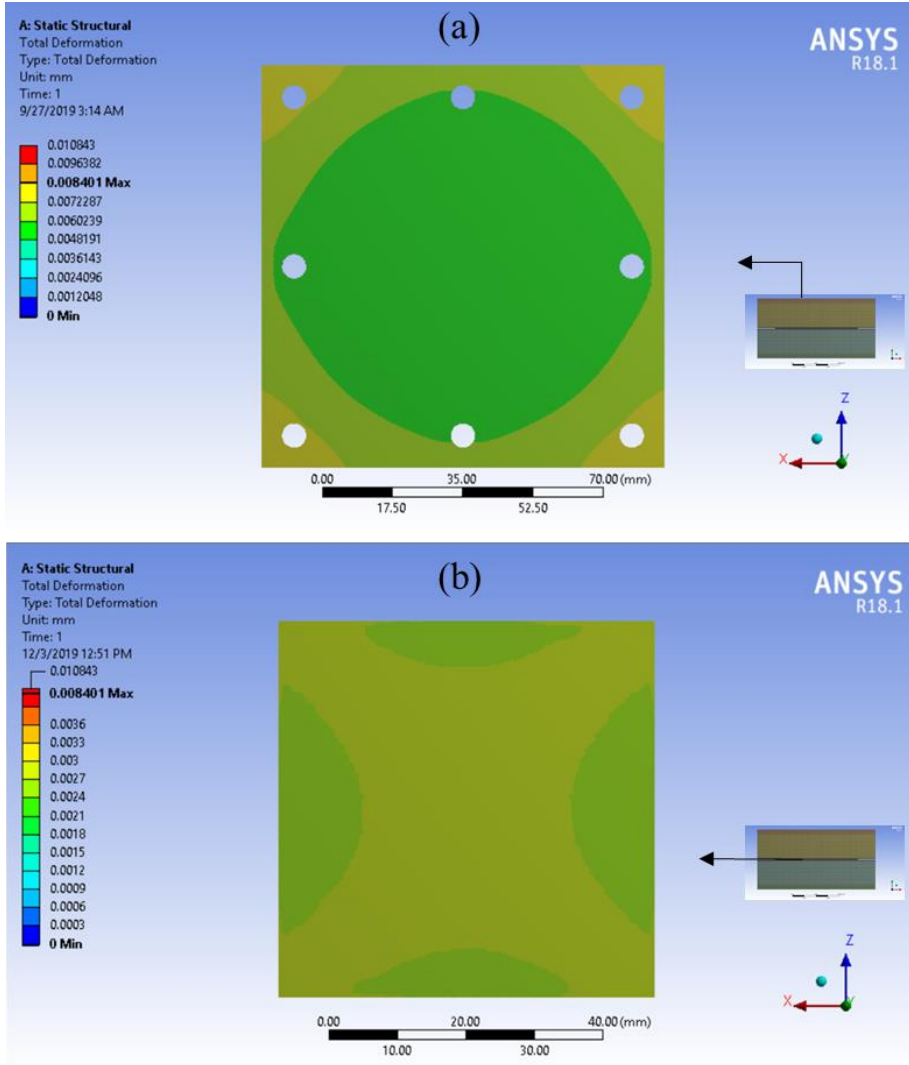
Şekil 4.14. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 3658 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

3658 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 3048 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 5,959 μm 'dir. Şekil 4.14a'da PEMYH ve Şekil 4.14b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma sağlanamamasına rağmen homojen bir dağılımın sağlandığı görülmektedir. Deneysel çalışmada artan sıkıştırma yükü ile birlikte maksimum güç yoğunluğunun da artması bir önceki çalışmada yeterince gaz kaçağının önlenemediğini göstermektedir.



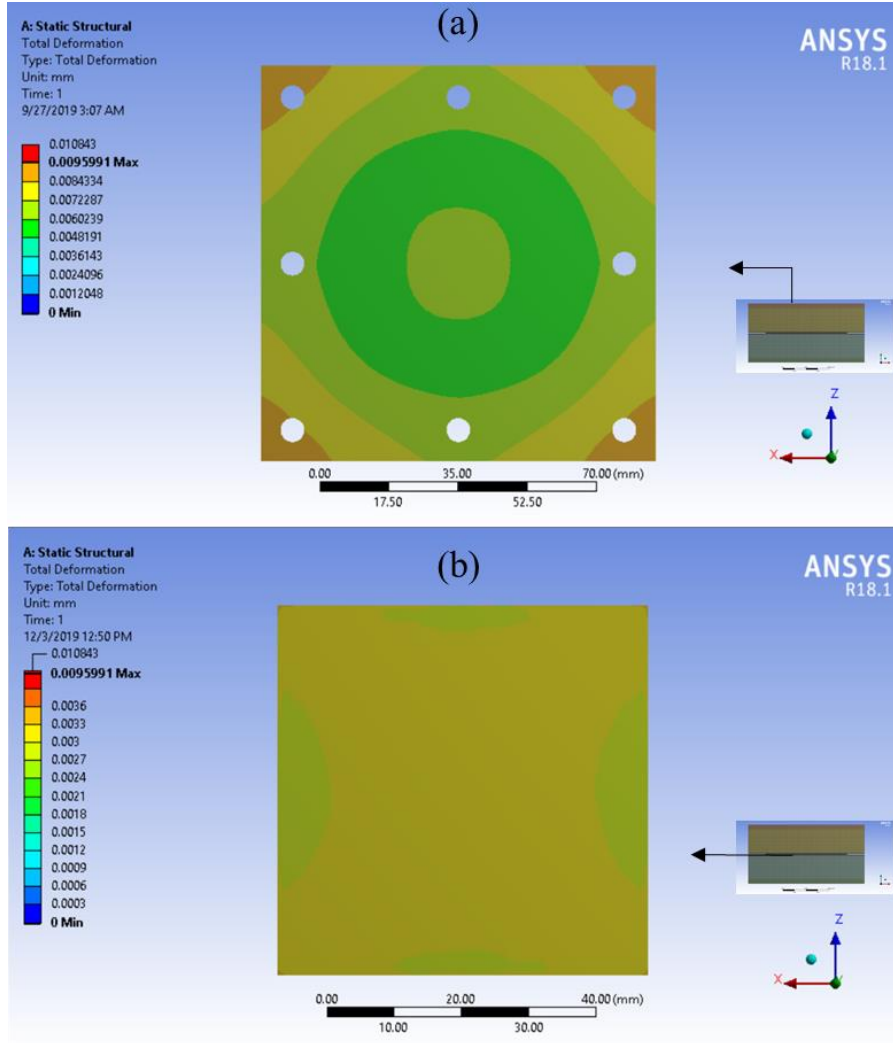
Şekil 4.15. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 4389 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

4389 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 3658 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 7,475 μm 'dir. Şekil 4.15a'da PEMYH ve Şekil 4.15b'de MEA üstten görüntüsüne bakılıp deneysel sonuçlarla birlikte yorumlandığında aktif alan üzerinde yeterli bir sıkıştırma olduğu görülmektedir. Pres altındaki sıkıştırma yönteminde 4389 N'a kadar olan sıkıştırmalarda akım ve güç yoğunluğunda artış görülmüştür. 4389 N değerinden sonra kuvvetin artışı ile birlikte akım ve güç yoğunluğunda düşüş görülmektedir. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle karşılaştırıldığında, PEMYH'nin aktif alanı üzerindeki sıkışma orta kısımdan başlamaktadır. Böylelikle, hücrenin uzun süre çalışması durumunda PEMYH aktif alanı üzerinde meydana gelen homojen olmayan yapının önüne geçileceği düşünülmektedir.



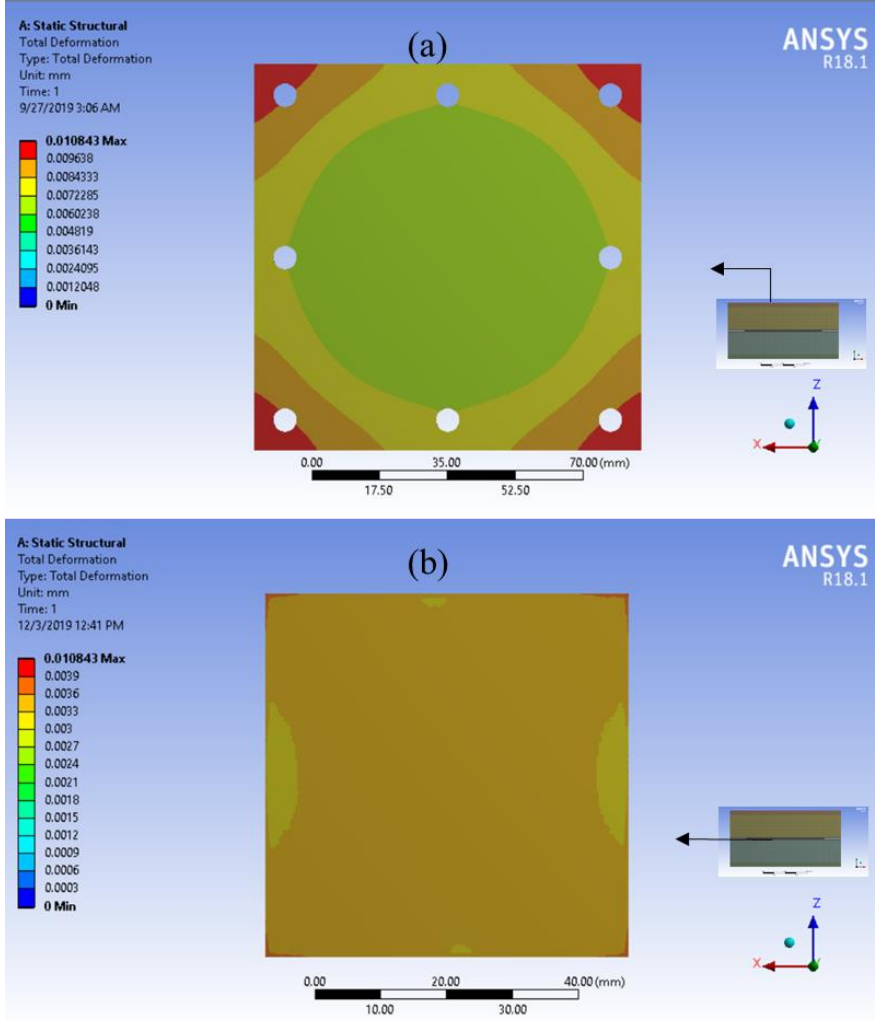
Şekil 4.16. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 4999 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

4999 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 4389 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 8,401 μm 'dir. Şekil 4.16a'da PEMYH ve Şekil 4.16b'de MEA üstten görüntüsüne bakıldığında homojen bir dağılımın sağlandığı ancak deneylerle birlikte yorumlandığında aşırı sıkıştırmadan dolayı 4389 N altında sıkıştırılmasına kıyasla PEMYH'nin düşük akım ve güç yoğunluğunda çalıştığı görülmektedir. Yakıt hücresi üzerinde oluşan aşırı sıkıştırmadan dolayı GDL'nin deformasyona uğrayarak akış kanallarının içerisine geçerek bu alanda gaz geçişine engel olduğu öngörülmektedir.



Şekil 4.17. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 5637 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

5637 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 4999 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 9,599 μm 'dir. Şekil 4.17a'da PEMYH ve Şekil 4.17b'de MEA üstten görüntüsüne bakılıp deneylerle birlikte yorumlandığında aktif alan üzerinde aşırı bir sıkıştırma olduğu görülmektedir. Deneylerin ve analizlerin kesinliğini vurgulamak için kuvvet arttırımına devam edilmiştir. Cıvata ile sıkıştırma yöntemiyle karşılaştırıldığında, PEMYH'nin aktif alanı üzerindeki sıkıştırma orta kısımdan başlamaktadır.

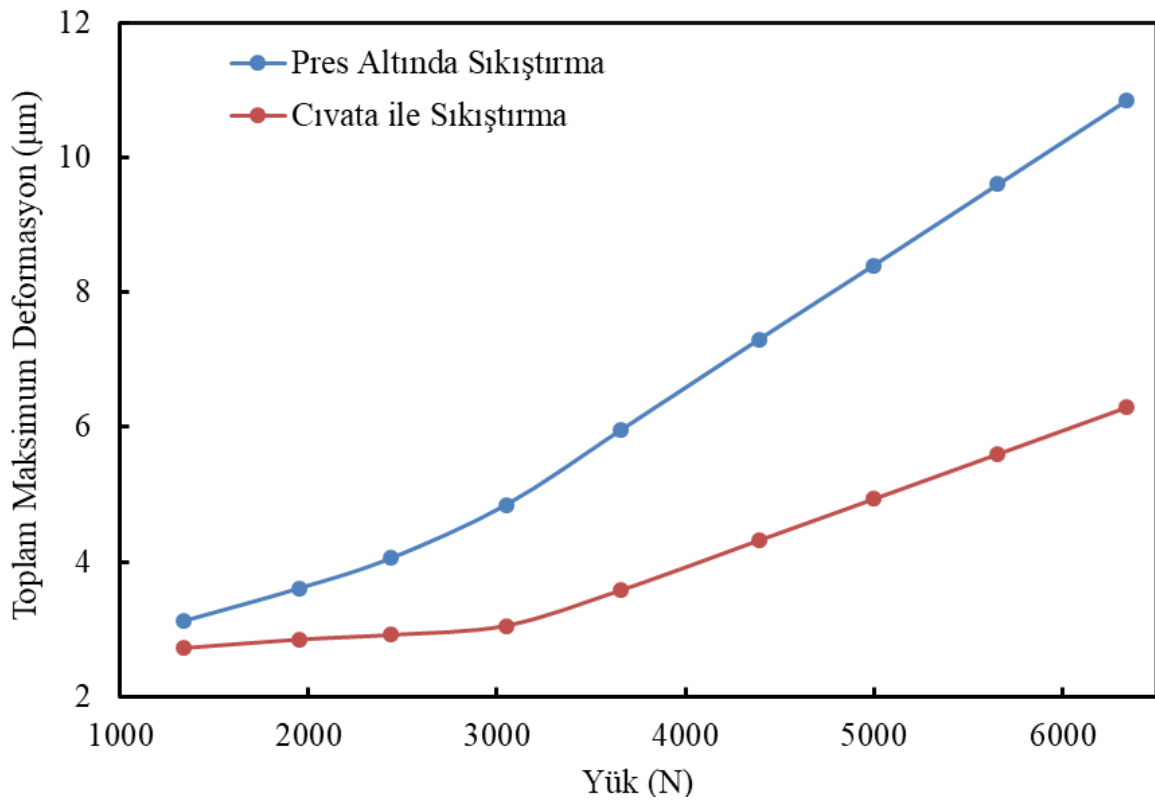


Şekil 4.18. Pres altında sıkıştırma yöntemiyle 6340 N kuvvet altında sıkıştırılan PEMYH'nin (a) üstten görüntüsü ve (b) MEA üstten görüntüsü

6340 N ile pres altında sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılan PEMYH 5637 N'a kıyasla aktif alan üzerindeki sıkıştırma kuvvetinin arttığı görülmektedir. Toplam maksimum deformasyon 10,843 μm 'dir. Şekil 4.18a'da PEMYH ve Şekil 4.18b'de MEA üstten görüntüsüne bakılıp deneylerle birlikte yorumlandığında aktif alan üzerinde aşırı sıkıştırmanın daha da arttığı görülmektedir. Deneylerdeki maksimum güç yoğunluğunda olan düşüş ile de desteklenmektedir. Deneylerin ve analizlerin kesinliğini vurgulamak için kuvvet arttırımına 3. kez devam edilmiştir. Böylelikle aşırı sıkıştırmada PEMFC gaz geçişine engel olacak kadar ve malzemelerin zarar göreceği kadar sıkıştırma olduğu anlaşılmaktadır.

4.1.2. Cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.19'da artan yüklemeye göre, hem homojen olmayan hem de homojen sıkıştırma için aynı kuvvet açısından toplam maksimum deformasyon gösterilmektedir. Homojen sıkıştırmanın homojen olmayandan daha fazla deformasyona neden olduğu açıkça görülmektedir. PEMYH'nin sayısal analizi ve maksimum güç yoğunluğu ile birlikte yorumlandığında, aynı yükler altında hücrenin aktif alanında cıvata ile sıkıştırma yöntemi yerine pres altında sıkıştırılan hücrede daha iyi bir sıkıştırma sağlandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.19. Toplam maksimum deformasyon analizinin cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Cıvata ile sıkıştırılan hücrede toplam maksimum deformasyon değeri 2,726 µm ve 6,291 µm aralığında değişirken pres altında sıkıştırılan hücreye oluşan maksimum deformasyon değeri 3,129 µm ve 10,843 µm aralığında değişmektedir. Deformasyonun daha çok olduğu homojen sıkıştırma kuvveti altında olan hücrenin aynı yük ile daha iyi bir şekilde sıkıştırıldığını göstermektedir. Ayrıca, cıvata ile sıkıştırma yönteminde PEMYH homojen olarak sıkışmamakta ve buna bağlı olarak hücre aktif alanı üzerinde zamanla şişkin bir yapı önlenerek tam gaz yoğunluğunda çalışarak daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir.

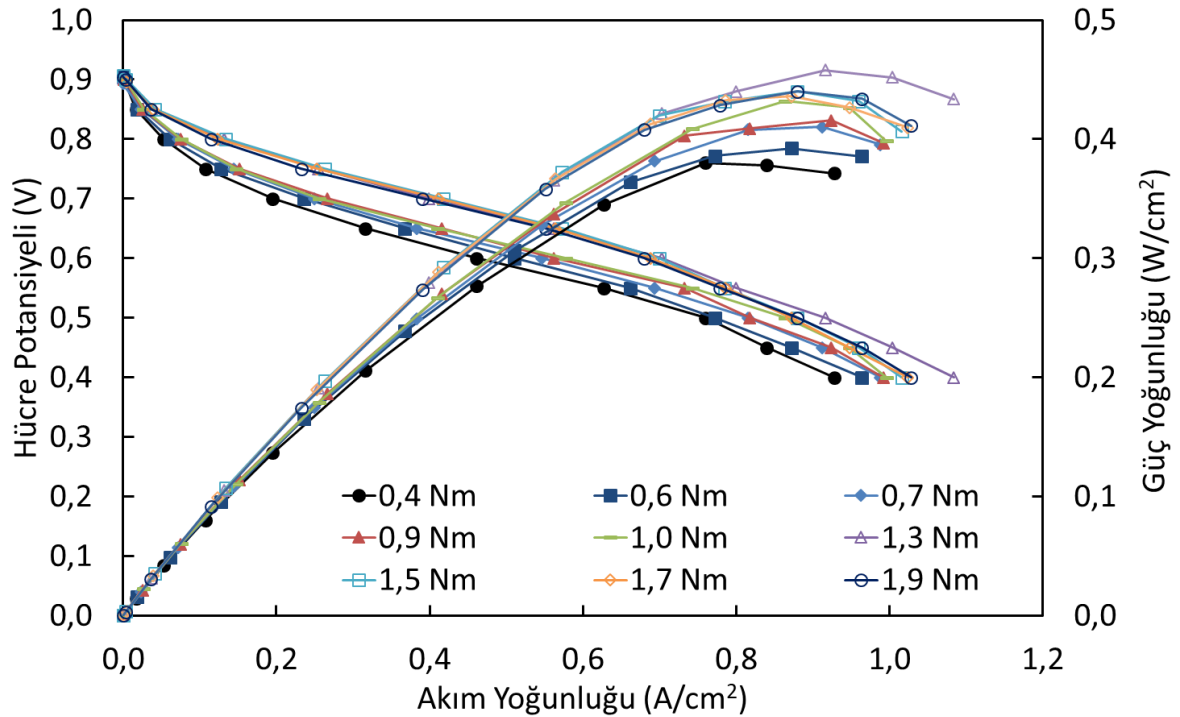
4.2. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalar sırasında, homojen olmayan yöntemi gösterebilmek için sıkıştırma cıvatalar yardımıyla ve homojen sıkıştırma özel tasarlanmış hassas olan pres altında sağlanmıştır. PEMYH test istasyonu altında H_2 ve hava beslemeleri ile $60^\circ C$ çalışma sıcaklığında incelenmiştir.

4.2.1. Farklı yöntemler altında sıkıştırılan PEMYH'nin performansına etkisi

Yakıt hücresi karakteristik eğrisi belirlenen çalışma koşulları altındaki yakıt hücresinin performans kayıplarını göstermektedir. Pres altında ve cıvata ile sıkıştırılan PEMYH'nin değişen yükler altında karakterizasyon eğrisi çizilerek, maksimum güç yoğunlukları karşılaştırılmıştır.

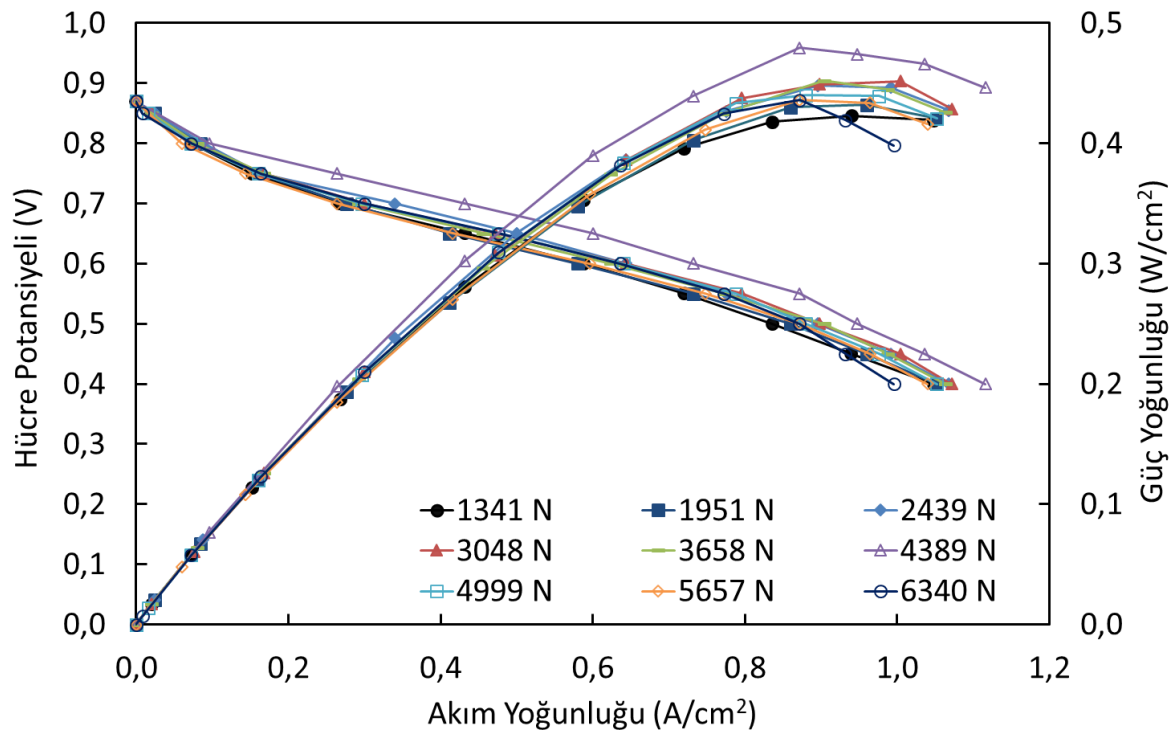
Cıvata ve somun kullanılarak, homojen olmayan sıkıştırma yöntemi 0,4 Nm, 0,6 Nm, 0,7 Nm, 0,9 Nm, 1,0 Nm, 1,3 Nm, 1,5 Nm, 1,7 Nm ve 1,9 Nm gibi çeşitli yükler altında denenmiştir.



Şekil 4.20. Cıvata ile sıkıştırma yönteminde farklı torklarda sıkıştırılan PEMYH'nin karakteristik eğrisi

0,4 Nm'den 1,9 Nm'ye kadar olan torklarda sıkıştırılarak incelenen PEMYH'nin cıvata ile sıkıştırılması sonucunda karakteristik eğriler Şekil 4.20'deki gibidir. Bu yöntemle sıkıştırılan hücrenin maksimum güç yoğunluğu $0,380 \text{ W/cm}^2$ ile $0,458 \text{ W/cm}^2$ aralığında değişmektedir. Artan sıkıştırma torqu ile birlikte literatürde belli bir değere kadar güç yoğunluğunda artış daha sonrasında ise azalış görülmektedir [84-85]. En yüksek güç yoğunluğu 1,3 Nm altında ve $0,458 \text{ W/cm}^2$ 'dir. Bu çalışmada, 0,4 Nm'den 1,0 Nm değerine kadar maksimum güç yoğunluğu hücre bileşenleri arasındaki temasın artarak gaz kaçağının önlenmesi sebebiyle giderek artmıştır. 1,3 Nm değerinde ise yakıt hücresinin maksimum güç yoğunluğunda yüksek miktarda artış olduğu görülmüştür. 1,3 Nm tork sıkıştırma değerinden sonra PEMYH maksimum güç yoğunluğunda hafif bir dalgalanmaya rağmen genel olarak düşüş görülmüştür. Artan sıkıştırma ile birlikte GDL tabakasının aşırı sıkışarak gaz akış kanalları içerisine geçtiği görülmektedir. Ayrıca, güç yoğunluğundaki bu düşüş yakıt hücresinin daha fazla sıkıştırma altında bileşenlerinin deforme olabileceğini de göstermektedir.

Cıvata ile sıkıştırma yönteminde 0,4 Nm sıkıştırma değerinden 1,9 Nm sıkıştırma değerine kadar olan torklarda incelenen PEMYH'nin OCV değeri 0,91-0,90 V aralığında değişmektedir.



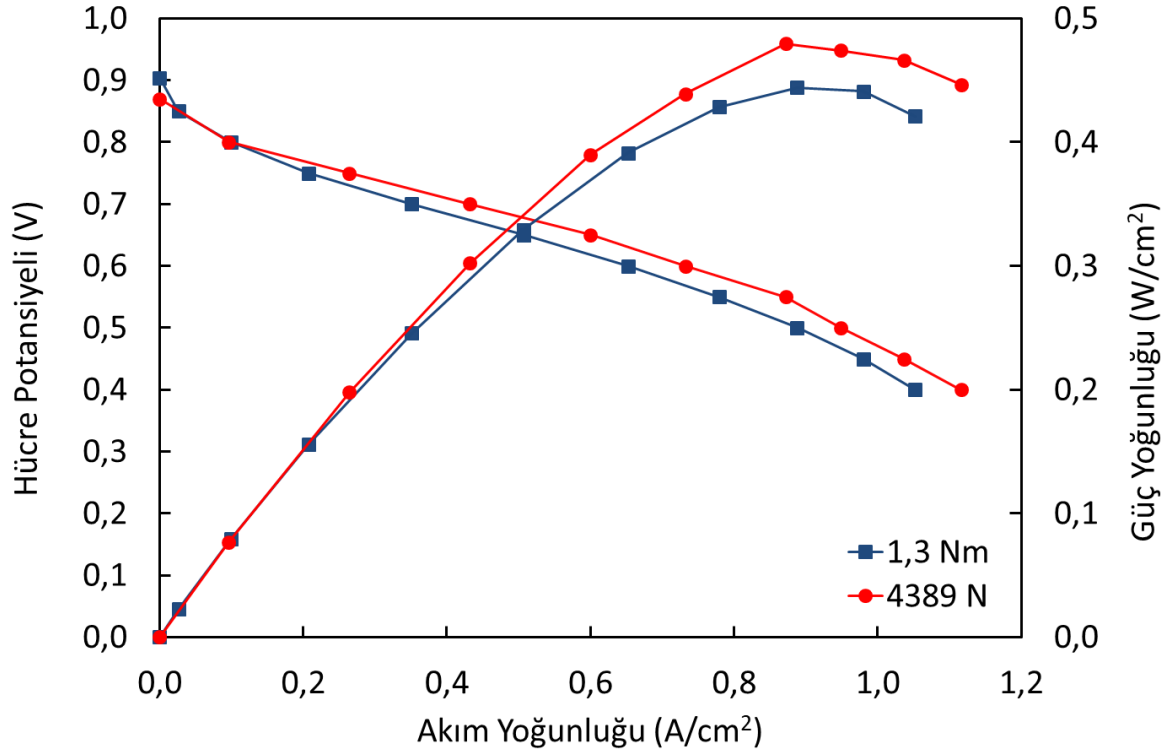
Şekil 4.21. Pres altında sıkıştırma yönteminde farklı kuvvetlerde sıkıştırılan PEMYH'nin karakteristik eğrisi

PEMYH pres altında sıkıştırılarak tork değerlerine karşılık gelen 1341 N, 1951 N, 2439 N, 3048 N, 3658 N, 4389 N, 4999 N, 5657 N ve 6340 N yükler altında sıkıştırılması sonucu karakteristik eğrisi Şekil 4.21’de verilmiştir. Bu yöntemle sıkıştırılan hücrenin maksimum güç yoğunluğu $0,423 \text{ W/cm}^2$ ile $0,480 \text{ W/cm}^2$ aralığında değişmektedir. En yüksek güç yoğunluğu 4389 Nm altında $0,458 \text{ W/cm}^2$ olarak elde edilmiştir. 1341 N sıkıştırma kuvvetinden 4389 N kuvvetine kadar artan kuvvetler altında hücre bileşenlerinin birbirlerine olan teması giderek artmıştır. Bu durum gaz kaçağının önlenmesini sağlayarak güç yoğunluğunda artış görülmüştür. 4389 N sıkıştırma kuvvetinden 6340 N kuvvetine kadar hücreye olan aşırı sıkıştırma kuvveti GDL’nin deformasyona uğramasına ve akış kanallarının içerisine geçtiği düşünülmektedir. Bu sebeple, gaz akış kanallarında gaz geçişine engel olarak hücrenin tam gaz yoğunluğunda çalışmamasına ve böylelikle düşük akım ve güç yoğunluğuna çalışmasına sebep olmaktadır. Buna ek olarak 4389 N’un üzerindeki sıkıştırma yüklerinde ise MEA gibi PEMYH bileşenleri tahrip olabilir. Hem az hem de daha fazla yükün ikisi de düşük performansla sonuçlandı.

Pres altında sıkıştırma yönteminde 1341 N sıkıştırma değerinden 6340 N sıkıştırma değerine kadar olan sıkıştırma kuvvetleri altında incelenen PEMYH’nin OCV değeri 0,87-0,86 V aralığında değişmektedir.

4.2.2. Pres altında ve cıvata ile sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Karşılaştırma için, cıvata ile sıkıştırma yöntemi ve pres altında sıkıştırma yönteminin en iyi karakteristik eğrisi aynı yük altında aynı Şekil 4.22’de verilmiştir. Pres altında sıkıştırma yönteminin cıvata ile sıkıştırma yöntemine göre daha yüksek akım ve güç yoğunluğuna ulaşılmıştır. Cıvata ile sıkıştırma yönteminde 0,6 V, $0,652 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğu ve $0,391 \text{ W/cm}^2$ güç yoğunluğu ve pres altında sıkıştırma yönteminde 0,6 V’da $0,732 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğu ve $0,439 \text{ W/cm}^2$ güç yoğunluğuna ulaşıldı.



Şekil 4.22. Farklı sıkıştırma yöntemlerinin karşılaştırılması

Literatürde PEMYH'nin OCV değeri hücrenin çalışma sıcaklığı, nemlendirilmesi, hücreye beslenen gazların kısmi basıncı ve katalizör yüzeyi ile ilişkilendirilir [14,86]. Bu çalışmadaki tüm deneylerde hücrenin çalışma sıcaklığı sabit tutulmuştur, nemlendirme yapılmadan, hücreye beslenen gazların kısmi basıncı sabit tutularak ve aynı CCM kullanılarak yapılmıştır. Ancak, cıvata ile sıkıştırma yönteminde ve pres altında sıkıştırma yönteminde yapılan deneylerde sırasıyla 0,91-0,90 V ve 0,87-0,86 aralığında OCV değerleri değişmektedir. Cıvata ile sıkıştırma yönteminde, pres altında sıkıştırma yöntemine göre aktif alan henüz yeterince sıkışmamışken kenar kısımların aşırı sıkıştığı deforme olduğunu görülmüştür. Bu sebeple hücrenin aktif alanı üzerinde homojen olmayan bir basınç dağılımı elde edilmiştir. Hücreye beslenen gazların kısmi basıncının sabit tutulmasına rağmen aktif alan üzerinde homojen bir basınç dağılımı sağlanamadığı için gaz akış kanalları içerisindeki kısmi basınç dağılımında farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu sebeple OCV değerleri karşılaştırıldığında cıvata ile sıkıştırılan hücrenin akış kanalları içerisindeki gazların kısmi basıncının kenar kısımlarda çok daha az iken merkez kısımda daha fazla olması sebebiyle OCV değeri daha yüksektir.

Maksimum güç yoğunlukları, çeşitli yükler altında her iki sıkıştırma yöntemi için de Çizelge

4.1'de verilmiştir. Aynı yük altındaki her iki sıkıştırma yöntemi karşılaştırıldığında, pres altında sıkıştırma yönteminin cıvata ile sıkıştırma yöntemine göre daha yüksek maksimum güç yoğunluğuna sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, deneylerdeki en yüksek maksimum güç yoğunluğu değeri cıvata ile sıkıştırma yönteminde maksimum güç yoğunluğu $0,458 \text{ W/cm}^2$ iken, maksimum güç yoğunluğu pres altında sıkıştırma yöntemi için $0,480 \text{ W/cm}^2$ iken 4389 N yükün altında ulaşılmıştır.

Çizelge 4.1. Cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerindeki en yüksek güç yoğunluğu

Yük (N)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (W/cm^2)	
	Cıvata ile Sıkıştırma	Press Altında Sıkıştırma
1341	0,380	0,423
1951	0,392	0,432
2439	0,410	0,448
3048	0,416	0,449
3658	0,432	0,452
4389	0,458	0,480
4999	0,422	0,440
5657	0,426	0,436
6340	0,410	0,436

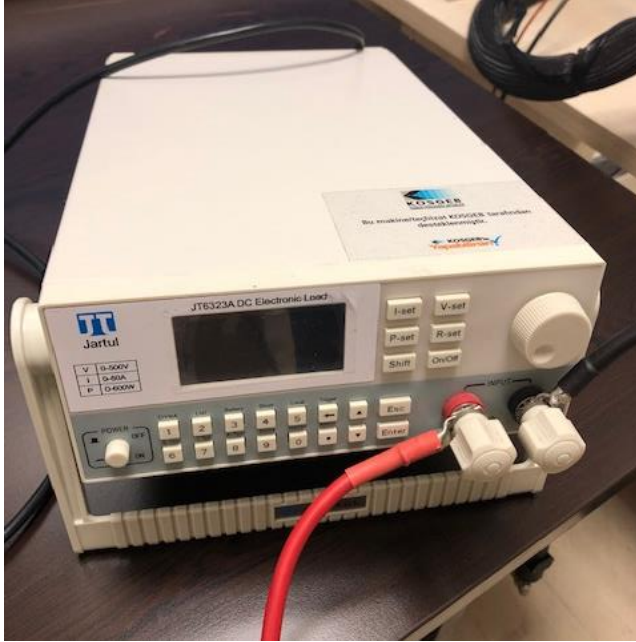
Yüklenme arttıkça 4389 N sıkıştırma yükünden sonra, maksimum güç değeri belirli bir noktadan sonra düşer ve homojen sıkıştırmada sabit kalır. Bununla birlikte, homojen olmayan sıkıştırma işleminde, küçük dalgalanmalar hariç, maksimum güç değeri azalır. Sayısal ve deneysel çalışmaların birlikte yorumlanmasına göre, 4389 N yükün ardından, maksimum toplam deformasyon aşırı artar ve yüklerde daha fazla artış daha fazla deformasyona neden olur. Bu nedenle, hem homojen hem de homojen olmayan yöntemlerde maksimum güç yoğunluğunda azalmaya neden olur.

Yapılan çalışmanın sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldı. Sayısal ve deneysel sonuçların yorumlanmasına göre, Liu ve diğerleri (2016) tarafından da bulunduğu gibi aşırı yükleme nedeniyle yüksek yüklerde yakıt hücresinin zarar görebileceğine dikkat çekildi [19]. Ayrıca, Alizadeh ve diğerleri (2017) tarafından da bulunduğu gibi en yüksek

hasarın köşelerde olduğu görüldü [76]. Hu ve diğerleri (2018) tarafından ANSYS FEA kullanılarak yapılan deformasyon sonuçlarında olduğu gibi homojen olmayan sıkıştırmada hücrenin merkezi (aktif alanı) üzerindeki deformasyonun kenarlardan çok daha az olduğu görüldü [85].

4.2.3. Deneysel Hata Analizi

Deneyler sırasında yakıt hücresi test istasyonu ile kontrol edilen PEMYH'nin akım ölçümlerinde Şekil 4.23'de gösterilen elektronik yük kullanılmıştır.



Şekil 4.23. Deneysel çalışma sırasında kullanılan elektronik yük

Hata analizi:

Deneysel çalışmalar daha doğru ve keskin bilgiler vermeleri bakımından her zaman sayısal çalışmaların önünde yer almıştır. Ancak, deneysel çalışmalarda ölçü aletlerine, okuyucunun tecrübesine ve deney şartlarına göre oluşabilecek bir hata miktarı vardır. Bu hata miktarını azaltabilmek için uygun ölçü aletlerini kullanmak gerekir. Deneysel çalışmalar sırasında parametrelerin ölçümünde müsaade edilebilir hata oranını tespit etmek gerekir.

Bu çalışmada yapılan deneylere ait hata oranlarının tespiti için belirsizlik analizi kullanılmıştır [88]. Belirsizlik analizi bize sonuçların hassasiyeti hakkında yöntemsel bir yaklaşım sunar.

Çizelge 4.2. Ölçümler sırasında kullanılan elektronik yük ve hassasiyeti

Ölçü Aleti	Çalışma Aralığı	Hassasiyet
Elektronik Yük	0-500 V 0-60 A 0-600 W	Volt için 0,03 R için 0,1

Bu yöntemi kullanırken sistemdeki ölçülmesi gereken büyüklüğe R ve bu büyüklüğün hata oranına w_R denilmiştir. Bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken olduğu düşünülürse, bu değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olarak tanımlanır. Tanımlanan her bir değişkene ait hata oranları ise $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ olarak gösterilebilir. Böylece, Eş. 4.1 kullanılarak w_R değeri hesaplanır.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

Akım ölçümü sırasında kullanılan Eş. 4.2, Eş. 4.1’de yerine yazıldığında yapılan deneysel hata belirsizlik analizine göre Eş. 4.3’deki gibi yapılabilir.

$$I = \frac{V}{R} \quad (4.2)$$

$$w_I = \left[\left(\frac{\partial I}{\partial V} w_V \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R} w_R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Burada R değeri yük hücresi içerisindeki değişken dirençtir (Ω). Her bir kısmi diferansiyel denkleminin çözümü yapılırsa;

$$\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{1}{R} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -\frac{v}{R^2} \quad (4.5)$$

Eş. 4.4 ve Eş. 4.5 değerleri Eş. 4.3’de yerine yazılıp işlemlere devam edilirse;

$$w_I = \left[\left(\frac{1}{R} w_V \right)^2 + \left(-\frac{v}{R^2} w_R \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

$$w_I = \left[\left(\frac{1}{3,147} 0,030 \right)^2 + \left(-\frac{0,600}{3,147^2} 0,1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

$$w_I = \left[\left(\frac{1}{3,147} 0,030 \right)^2 + \left(-\frac{0,600}{3,147^2} 0,1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

$$w_I = [(9,533 \times 10^{-3})^2 + (-6,058 \times 10^{-3})^2]^{1/2} \quad (4.9)$$

İşlemler hesaplandığında $w_I = 0,011$ değeri bulunur. Hataların büyük kısmı Volt değerinden kaynaklanmaktadır.

5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, PEMYH'nin cıvata ile sıkıştırma yöntemi ve pres altında sıkıştırma yöntemi kullanılarak hücrenin aktif alanı üzerinde homojen ve homojen olmayan sıkıştırılmanın deneysel ve sayısal olarak incelenmesi yapılmıştır. Sayısal çalışmalar kısmında, PEMYH'nin yapısal statik analizi ANSYS R18.1 3D FEA programı kullanılarak homojen olmayan ve homojen olan farklı yük dağılımı altındaki PEMYH'nin aktif alan üzerindeki deformasyon gözlemlenmiştir. Sayısal analiz cıvata ile sıkıştırma yönteminde 0,4 Nm, 0,6 Nm, 0,7 Nm, 0,9 Nm, 1,0 Nm, 1,3 Nm, 1,5 Nm, 1,7 Nm ve 1,9 Nm altındaki tork değerleriyle yapılmıştır. Pres altında sıkıştırma yönteminde ise bu tork değerlerine sırasıyla denk olan 1341 N, 1951 N, 2439 N, 3048 N, 3658 N, 4389 N, 4999 N, 5657 N ve 6340 N kuvvetleri altında sıkıştırılarak toplam deformasyon analizi yapılarak aktif alan üzerindeki sıkıştırma gözlemlenmiştir. Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı cıvata ile sıkıştırma yöntemidir. Ancak yapılan analiz sonuçlarına göre hücre sıkışmaya köşe kısımlardan başlamakta ve homojen olarak sıkışmadığı görülmektedir. Bu duruma bağlı olarak PEMYH aktif alanı üzerinde zamanla şişkin bir yapı oluşmaktadır. Pres altındaki sıkıştırmada ise yakıt hücresinin sıkışmaya orta kısımdan başladığı ve aktif alan homojen sıkıştırıldığı gözlemlenmiştir.

Cıvata ile sıkıştırma yönteminde yakıt hücresinde toplam maksimum deformasyon değeri 2,726 μm ve 6,291 μm aralığında değişirken, homojen sıkıştırma sırasında oluşan maksimum deformasyon değeri 3,129 μm ve 10,843 μm aralığında değişmektedir. Deformasyonun daha çok olduğu pres altında sıkıştırma yöntemi ile hücrenin aynı yük ile daha iyi bir şekilde sıkıştırıldığını göstermektedir.

Deneysel çalışmalarda ise, sayısal çalışmalarda kullanılan cıvata ile sıkıştırma ve pres altında sıkıştırma yöntemlerinde farklı yük dağılımı ve diğer sabit parametreler altında incelenen PEMYH'nin karakteristik eğrisi oluşturularak sayısal çalışmalar ile birlikte yorumlanmıştır.

Cıvata ile sıkıştırma yönteminde, en yüksek güç yoğunluğu 1,3 Nm altında ve 0,458 W/cm^2 'dir. 0,4 Nm'den 1,3 Nm değerine kadar maksimum güç yoğunluğu giderek artmıştır ve 1,3 Nm tork sıkıştırma değerinden sonra PEMYH maksimum güç yoğunluğunda hafif bir dalgalanmaya rağmen genel olarak düşüş görülmüştür. Pres altında sıkıştırma yönteminde

ise tork değerlerine (0,4-1,9 Nm) karşılık gelen sıkıştırma kuvvetleri (1341-6340 N) bulunarak deneyler yapılmıştır. En yüksek güç yoğunluğu 4389 Nm altında 0,458 W/cm² olarak elde edilmiştir. 1341 N'dan 4389 N değerine kadar maksimum güç yoğunluğu giderek artmıştır 4389 N'dan sonra ise güç ve akım yoğunluğunda düşüş gözlemlenmiştir. 4389 N değerine kadar artan yüklerde hücrenin bileşenlerinin birbirleri ile teması giderek artmakta ve böylelikle gaz kaçağı önlenerek hücrenin giderek artan gaz yoğunluğunda çalışması sağlanmıştır. 4389 N değerinden sonra ise hücredeki yüksek bir sıkıştırma sebebiyle GDL'nin deformasyona uğrayarak akış kanallarının içerisine geçerek bu alanda gaz geçişine engel olduğu öngörülmektedir. Ayrıca, cıvata ile sıkıştırma yönteminde, pres altında sıkıştırma yöntemine göre aktif alan henüz yeterince sıkışmamışken kenar kısımların aşırı sıkıştığı ve deforme olduğunu görülmüştür. Bu sebeple hücrenin aktif alanı üzerinde homojen olmayan bir basınç dağılımı elde edilmiştir.

Pres altında sıkıştırma yönteminin, 0,6 V hücre voltajında cıvata ile sıkıştırma yöntemine kıyasla PEMYH'nin güç yoğunluğunu % 11 arttırdığı deneysel olarak bulunmuştur. En yüksek güç yoğunluğuna 4389 N altında homojen sıkıştırma yöntemiyle ulaşılmıştır. OCV değerleri karşılaştırıldığında cıvata ile sıkıştırılan hücrenin akış kanalları içerisindeki gazların kısmi basıncının kenar kısımlarda çok daha az iken merkez kısımda daha fazla olması sebebiyle cıvata ile sıkıştırılan hücrenin OCV değeri (0,91 V) pres altında sıkıştırılan hücrenin OCV değerinden (0,87) daha yüksektir.

Pres kullanılarak yapılan homojen sıkıştırma kuvveti sağlanan hücre performansındaki bu artışın yine çeşitli yükler altında anot ve katot tarafından her iki yönlü olarak tek yay ve çoklu yay sistemi ile sıkıştırılması önerilmektedir. Bu yöntemle hücrenin aktif alanı üzerinde homojen bir dağılım sağlanması ile birlikte daha portatif bir kullanım sağlayabileceği de düşünülmektedir. Kullanılacak olan çift yönlü tek yay ve çoklu yayların konumlarının PEMYH aktif alanı üzerinde sağlayacağı sıkıştırmanın da hücre performansına olumlu yönde katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kamat, P. V. (2007). *Meeting the clean energy demand: nanostructure architectures for solar energy conversion*. The Journal of Physical Chemistry C, 111(7), 2834-2860.
2. Langston, C. (2008). *Sustainable practices in the built environment*. Routledge.
3. IRENA. (2013). Renewable power generation costs in 2012: An Overview. United Arab Emirates. 70-78.
4. International Energy Agency. (2009). World Energy Outlook 2009. 161-164.
5. Dincer, I. (2018). *Comprehensive energy systems*. Elsevier. 568-600.
6. Uzundurukan, A., & Devrim, Y. (2019). Hydrogen generation from sodium borohydride hydrolysis by multi-walled carbon nanotube supported platinum catalyst: A kinetic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17586-17594.
7. Uzundurukan, A., & Devrim, Y. (2019). Carbon nanotube-graphene hybrid supported platinum as an effective catalyst for hydrogen generation from hydrolysis of ammonia borane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(49), 26773-26782.
8. Mazloomi, K., & Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024-3033.
9. Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen—opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 615-627.
10. Carrette, L., Friedrich, K. A., & Stimming, U. (2001). Fuel cells—fundamentals and applications. *Fuel cells*, 1(1), 5-39.
11. Perry, M. L., & Fuller, T. F. (2002). A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century. *Journal of the Electrochemical Society*, 149(7), S59-S67.
12. Andújar, J. M., & Segura, F. (2009). Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2309-2322.
13. Zaidi, S. J., & Rauf, M. A. (2009). Fuel cell fundamentals. In *Polymer Membranes for Fuel Cells* (pp. 1-6). Springer, Boston, MA.
14. Barbir, F. (2013). PEM fuel cells. In *Fuel Cell Technology* (Second edition). London: Springer, 27-51.
15. Pukrushpan, J. T. (2003). *Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors* Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan, 477.
16. Rosli, R. E., Sulong, A. B., Daud, W. R. W., Zulkifley, M. A., Husaini, T., Rosli, M. I., & Haque, M. A. (2017). A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9293-

9314.

17. Mench, M. M. (2008). *Fuel cell engines*. John Wiley & Sons. 9-17.
18. Wen, C. Y., Lin, Y. S., & Lu, C. H. (2009). 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(2), 475-485.
19. Liu, B., Wei, M. Y., Zhang, W., & Wu, C. W. (2016). Effect of impact acceleration on clamping force design of fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 303, 118-125.
20. Kolar, J. L. (2000). Alternative energy technologies. *Environmental Quality Management*, 10(2), 45-54.
21. Grimes, P. (2000, January). Historical pathways for fuel cells. The new electric century. In *Fifteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances IEEE*. 41-45.
22. Zhang, J. (Ed.). (2008). *PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media. 53-78.
23. Gomes, R. S., De Souza, M. M., & De Bortoli, A. L. (2018). Modeling and simulation of a direct ethanol fuel cell considering overpotential losses and variation of principal species concentration. *Chemical Engineering Research and Design*, 136, 371-384.
24. Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981-989.
25. Sammes, N., Bove, R., & Stahl, K. (2004). Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. *Current Opinion in Solid state and Materials Science*, 8(5), 372-378.
26. Ellis, M. W., Von Spakovsky, M. R., & Nelson, D. J. (2001). Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century. *Proceedings of the IEEE*, 89(12), 1808-1818.
27. Hotza, D., & Da Costa, J. D. (2008). Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(19), 4915-4935.
28. Stambouli, A. B., & Traversa, E. (2002). Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(5), 433-455.
29. Tan, J., Chao, Y. J., Van Zee, J. W., & Lee, W. K. (2007). Degradation of elastomeric gasket materials in PEM fuel cells. *Materials Science and Engineering: A*, 445, 669-675.
30. Li, X., & Faghri, A. (2013). Review and advances of direct methanol fuel cells (DMFCs) part I: Design, fabrication, and testing with high concentration methanol solutions. *Journal of Power Sources*, 226, 223-240.

31. Peighambardoust, S. J., Rowshanzamir, S., & Amjadi, M. (2010). Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17), 9349-9384.
32. Spiegel, C. (2011). *PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB*. Elsevier, 1-12.
33. Shao, Y., Yin, G., Wang, Z., & Gao, Y. (2007). Proton exchange membrane fuel cell from low temperature to high temperature: material challenges. *Journal of Power Sources*, 167(2), 235-242.
34. Wee, J. H. (2007). Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1720-1738.
35. McNicol, B. D., Rand, D. A. J., & Williams, K. R. (2001). Fuel cells for road transportation purposes—yes or no?. *Journal of Power Sources*, 100(1-2), 47-59.
36. Cottrell, C. A., Grasman, S. E., Thomas, M., Martin, K. B., & Sheffield, J. W. (2011). Strategies for stationary and portable fuel cell markets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7969-7975.
37. Lewis, J. (2014). Stationary fuel cells—Insights into commercialisation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36), 21896-21901.
38. Wilberforce, T., Alaswad, A., Palumbo, A., Dassisti, M., & Olabi, A. G. (2016). Advances in stationary and portable fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37), 16509-16522.
39. Agnolucci, P. (2007). Economics and market prospects of portable fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), 4319-4328.
40. Kamarudin, S. K., Achmad, F., & Daud, W. R. W. (2009). Overview on the application of direct methanol fuel cell (DMFC) for portable electronic devices. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16), 6902-6916.
41. Spiegel, C. (2007). *Designing and building fuel cells* (Vol. 87). New York: Mcgraw-hill, 3-12.
42. Üregen, N., Pehlivanoğlu, K., Özdemir, Y., & Devrim, Y. (2017). Development of polybenzimidazole/graphene oxide composite membranes for high temperature PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2636-2647.
43. Özdemir, Y., Özkan, N., & Devrim, Y. (2017). Fabrication and characterization of cross-linked polybenzimidazole based membranes for high temperature PEM fuel cells. *Electrochimica Acta*, 245, 1-13.
44. Devrim, Y., Albostan, A., & Devrim, H. (2018). Experimental investigation of CO tolerance in high temperature PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(40), 18672-18681.

45. Devrim, Y. (2006). *Alternatif Yöntemler Kullanılarak Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri için Yeni Membranların Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 60-77.
46. Des Roches, T. V., & Omiya, M. (2015, February). Calculating the essential work of fracture of proton exchange membranes using a finite element analysis. In *Recent Advances in Structural Integrity Analysis-Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014):(APCFS/SIF 2014)* (p. 17). Woodhead Publishing.
47. Subianto, S., Pica, M., Casciola, M., Cojocaru, P., Merlo, L., Hards, G., & Jones, D. J. (2013). Physical and chemical modification routes leading to improved mechanical properties of perfluorosulfonic acid membranes for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 233, 216-230.
48. Gittleman, C. S., Coms, F. D., & Lai, Y. H. (2012). Membrane durability: physical and chemical degradation. *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation*, 15-88.
49. Hasanpour, S., Hoorfar, M., & Phillion, A. B. (2015). Different methods for determining porosity of gas diffusion layer using X-ray microtomography. *Electrochimica Acta*, 185, 34-39.
50. Mangal, P., Pant, L. M., Carrigy, N., Dumontier, M., Zingan, V., Mitra, S., & Secanell, M. (2015). Experimental study of mass transport in PEMFCs: through plane permeability and molecular diffusivity in GDLs. *Electrochimica Acta*, 167, 160-171.
51. Belkhiri, Z., Moussa, H. B., Haddad, D., & Oulmi, K. (2015). Effect of permeability on the dynamic field in the PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), 13789-13798.
52. Yablecki, J., & Bazylak, A. (2012). Determining the effective thermal conductivity of compressed PEMFC GDLs through thermal resistance modelling. *Journal of Power Sources*, 217, 470-478.
53. Devrim, Y., & Arica, E. D. (2019). Multi-walled carbon nanotubes decorated by platinum catalyst for high temperature PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(34), 18951-18966.
54. Jörissen, L., Gogel, V., Kerres, J., & Garche, J. (2002). New membranes for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 105(2), 267-273.
55. Goswami, D. Y., & Kreith, F. (2017). *Energy conversion* (Second Edition). New York: CRC Press, 1034-1082.
56. Berg, P., Novruzi, A., & Promislow, K. (2006). Analysis of a cathode catalyst layer model for a polymer electrolyte fuel cell. *Chemical Engineering Science*, 61(13), 4316-4331.
57. Hermann, A., Chaudhuri, T., & Spagnol, P. (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(12), 1297-1302.

58. Tawfik, H., Hung, Y., & Mahajan, D. (2007). Metal bipolar plates for PEM fuel cell—a review. *Journal of Power Sources*, 163(2), 755-767.
59. Alegre, C., Álvarez-Manuel, L., Mustata, R., Valiño, L., Lozano, A., & Barreras, F. (2019). Assessment of the durability of low-cost Al bipolar plates for High Temperature PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(25), 12748-12759.
60. Hashemi, F., Rowshanzamir, S., & Rezakazemi, M. (2012). CFD simulation of PEM fuel cell performance: effect of straight and serpentine flow fields. *Mathematical and Computer Modelling*, 55(3-4), 1540-1557.
61. Millichamp, J., Mason, T. J., Neville, T. P., Rajalakshmi, N., Jervis, R., Shearing, P. R., & Brett, D. J. (2015). Mechanisms and effects of mechanical compression and dimensional change in polymer electrolyte fuel cells—a review. *Journal of Power Sources*, 284, 305-320.
62. Bilgili, M., Bosomoiu, M., & Tsotridis, G. (2015). Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2303-2311.
63. Bhosale, A. C., Mahajan, M. A., & Ghosh, P. C. (2019). Optimization of contact resistance with better gasketing for a unitized regenerative fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(37), 20953-20962.
64. Kuan, Y. D., Lyu, J. L., Ke, T. R., Sung, M. F., & Do, J. S. (2019). Planar current collector design and fabrication for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 10071-10081.
65. Yuan, W., Zhang, X., Zhang, S., Hu, J., Li, Z., & Tang, Y. (2015). Lightweight current collector based on printed-circuit-board technology and its structural effects on the passive air-breathing direct methanol fuel cell. *Renewable Energy*, 81, 664-670.
66. Daniels, F. A., Attingre, C., Kucernak, A. R., & Brett, D. J. L. (2014). Current collector design for closed-plenum polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 249, 247-262.
67. Bazylak, A., Sinton, D., Liu, Z. S., & Djilali, N. (2007). Effect of compression on liquid water transport and microstructure of PEMFC gas diffusion layers. *Journal of Power Sources*, 163(2), 784-792.
68. Kandlikar, S. G., Lu, Z., Lin, T. Y., Cooke, D., & Daino, M. (2009). Uneven gas diffusion layer intrusion in gas channel arrays of proton exchange membrane fuel cell and its effects on flow distribution. *Journal of Power Sources*, 194(1), 328-337.
69. Radhakrishnan, V., & Haridoss, P. (2010). Effect of cyclic compression on structure and properties of a Gas Diffusion Layer used in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11107-11118.
70. Chang, W. R., Hwang, J. J., Weng, F. B., & Chan, S. H. (2007). Effect of clamping pressure on the performance of a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 166(1), 149-154.

71. Mason, T. J., Millichamp, J., Shearing, P. R., & Brett, D. J. (2013). A study of the effect of compression on the performance of polymer electrolyte fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy and dimensional change analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(18), 7414-7422.
72. Escribano, S., Blachot, J. F., Ethève, J., Morin, A., & Mosdale, R. (2006). Characterization of PEMFCs gas diffusion layers properties. *Journal of Power Sources*, 156(1), 8-13.
73. Feser, J. P., Prasad, A. K., & Advani, S. G. (2006). Experimental characterization of in-plane permeability of gas diffusion layers. *Journal of Power Sources*, 162(2), 1226-1231.
74. Lee, S. J., Hsu, C. D., & Huang, C. H. (2005). Analyses of the fuel cell stack assembly pressure. *Journal of Power Sources*, 145(2), 353-361.
75. Bates, A., Mukherjee, S., Hwang, S., Lee, S. C., Kwon, O., Choi, G. H., & Park, S. (2013). Simulation and experimental analysis of the clamping pressure distribution in a PEM fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(15), 6481-6493.
76. Alizadeh, M., Merovci, F., & Hamedani, G. G. (2017). Generalized transmuted family of distributions: properties and applications. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 46(4), 645-667.
77. Kusoglu, A., Karlsson, A. M., Santare, M. H., Cleghorn, S., & Johnson, W. B. (2007). Mechanical behavior of fuel cell membranes under humidity cycles and effect of swelling anisotropy on the fatigue stresses. *Journal of Power Sources*, 170(2), 345-358.
78. Sassin, M. B., Garsany, Y., Gould, B. D., & Swider-Lyons, K. (2016). Impact of compressive stress on MEA pore structure and its consequence on PEMFC performance. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(8), F808-F815.
79. de la Cruz, J., Cano, U., & Romero, T. (2016). Simulation and in situ measurement of stress distribution in a polymer electrolyte membrane fuel cell stack. *Journal of Power Sources*, 329, 273-280.
80. El-Kharouf, A., Chandan, A., Hattenberger, M., & Pollet, B. G. (2012). Proton exchange membrane fuel cell degradation and testing. *Journal of the Energy Institute*, 85(4), 188-200.
81. Mikkola, M., Tingelöf, T., & Ihonen, J. K. (2009). Modelling compression pressure distribution in fuel cell stacks. *Journal of Power Sources*, 193(1), 269-275.
82. Lin, P., Zhou, P., & Wu, C. W. (2010). A high efficient assembly technique for large proton exchange membrane fuel cell stacks: Part II. Applications. *Journal of Power Sources*, 195(5), 1383-1392.
83. Cowin, S. C. (2001). *Bone mechanics handbook (Second Edition)*. Boca Raton: CRC press, 168-191.
84. Chen, C. Y., & Su, S. C. (2018). Effects of assembly torque on a proton exchange

membrane fuel cell with stamped metallic bipolar plates. *Energy*, 159, 440-447.

85. Rao, S. S. L., Shaija, A., & Jayaraj, S. (2018). Performance analysis of a transparent PEM fuel cell at the optimized clamping pressure applied on its bolts. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 58-65.
86. Zhang, J., Tang, Y., Song, C., Zhang, J., & Wang, H. (2006). PEM fuel cell open circuit voltage (OCV) in the temperature range of 23 C to 120 C. *Journal of Power Sources*, 163(1), 532-537.
87. Hu, G., Wu, X., Suo, Y., Xia, Y., Xu, Y., & Zhang, Z. (2018). Finite element analysis of PEMFC assembling based on ANSYS. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(2), 2080-2089.
88. Genceli, O. F. (2000). *Ölçme tekniği*. Birsen Yayınevi, 23-29.

EKLER

EK-1. İş istasyonu teknik özellikleri

İşletim Sistemi	Windows 10 Pro	
İşlemci	Model	Intel Xeon E5-2640 v3
	Çekirdek Sayısı	8
	Hızı	2.6 GHz
	Önbellek	20 MB
Ekran Kartı	Model	Nvidia Quadro K620
	Çekirdek Sayısı	384
	Hafıza	2 GB
Hafıza	Tipi	DDR4
	Kapasite	32 GB
	Hızı	2133 MHz
Sabit Disk	Kapasite	1 TB
	Bağlantı Tipi	SATA
	Aktarım Hızı	6 Gb/s
	Disk Hızı	7200 rpm
	Boyut	3.5"
Genişleme Yuvası	3 adet PCIe 3.0 x16	
	1 adet PCIe 3.0 x8	
	1 adet PCIe 2.0 x4	
	1 adet PCI	
Bağlantı Noktaları	4 adet USB 3.0 (ön panel)	
	4 adet USB 3.0 (arka panel)	

EK-1. (devam) İş istasyonu teknik özellikleri

Bağlantı Noktaları	4 adet USB 2.0 (arka panel)	
Bağlantı	Ethernet	Gigabit Ethernet 10/100/1000
	Kablosuz	ThinkStation AC Wi-Fi Solution Intel 7260
Güç Kaynağı	Kapasite	850 W
	Verim	92 %
Diğer Özellikler	Kart Okuyucu	9-in-1 SD kart okuyucu
	Optic Sürücü	ThinkCentre and Lenovo DVD-ROM Drive
	Klavye	LOGITECH K375S Wireless Keyboard
	Fare	LOGITECH M220 Slient (Sessiz) Mouse

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UZUNDURUKAN, Arife
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 11.11.1992, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 586 88 91
 Fax : 0 (312) 586 87 88
 Telefon : 0 (554) 970 99 03
 e-mail : arifeuzundurukan@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / MAKİNA Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Atılım Üniversitesi / ENERJİ SİSTEMLERİ Mühendisliği (ÇAP)	2016
Lisans	Atılım Üniversitesi / MAKİNA Mühendisliği	2016
Lise	Mobil Anadolu Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Atılım Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2015-2016	Atılım Üniversitesi	Öğrenci Asistanı
2014-2015	Çalık Enerji	Stajyer
2013-2014	Atılım Üniversitesi MŞMM	Stajyer

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Uzundurukan, A., Devrim, Y. (2019). Hydrogen generation from sodium borohydride hydrolysis by multi-walled carbon nanotube supported platinum catalyst: A kinetic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17586-17594.
2. Uzundurukan, A., Devrim, Y. (2019). Carbon nanotube-graphene hybrid supported platinum as an effective catalyst for hydrogen generation from hydrolysis of ammonia borane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(49), 26773-26782.
3. Uzundurukan, A., Budak, Y., Devrim, Y. (Eylül, 2019), *Experimental and Numerical Investigation of a Single PEMFC Under Non-Homogeneous and Homogenous Compression Conditions by Using Ansys FEA*, ULIBTK, 22nd Thermal Science and Technology Congresses, Kocaeli, Turkey.
4. Uzundurukan A., Akça E.S., Devrim, Y. (Eylül, 2019), *Doğrudan Sodyum Borhidrür ve Hidrojen Peroksit Beslemeli Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi Katot Elektrokatalizörünün NaBH₄ İndirgenme Yöntemiyle Sentezi ve Karakterizasyonu*, 31. Ulusal Kimya Kongresi, İstanbul, Türkiye, Poster Sunumu, 86.
5. Uzundurukan A., Akça E.S., Devrim, Y. (Eylül, 2019), *Mikroalga Yardımıyla Sodyum Borhidrür Beslemeli Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi için Pd/CNT-G Hibrit Destekli Katalizör Sentezi ve Karakterizasyonu*, 31. Ulusal Kimya Kongresi, İstanbul, Türkiye, Sözlü Sunum, 287.
6. Uzundurukan A., Bilgili M., Devrim, Y. (June, 2019), *Investigation of Compression Pressure Distribution of Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, 4th International Hydrogen Technologies Congress, Edirne, Turkey, Oral presentation, 48-51.
7. Uzundurukan A., Akça E.S., Devrim, Y. (June, 2019), *Development of the Liquid Fuel Based Fuel Cell for Air-Independent Propulsion Systems*, 4th International Hydrogen Technologies Congress, , Edirne, Turkey, Oral presentation, 200-202.
8. Uzundurukan A., Devrim, Y. (Kasım, 2018), *Karbon nanotüp üzerine desteklenmiş platin katalizörü ile sodyum bor hidrürden hidrojen üretiminin incelenmesi*, 30. Ulusal Kimya Kongresi, Magosa, KKTC, Sözlü Sunum, 83.
9. Uzundurukan A., Devrim, Y. (Kasım, 2018), *Çok Duvarlı Karbon Nanotüp-Grafen Hibrit Destek Malzemesi Üzerine Desteklenmiş Platin Katalizörün Amonyum Borandan Hidrojen Üretimine Etkisinin İncelenmesi*, 30. Ulusal Kimya Kongresi, Magosa, KKTC, Sözlü Sunum, 2018, 97.

10. Uzundurukan A., Arıca E.D., Devrim, Y. (Mart, 2018), *Investigation of Hydrogen Generation from Sodium Borohydride Hydrolysis Reaction with Different Catalyst*, 3rd International Hydrogen Technologies Congress, Alanya, Turkey, Oral presentation, 304-307.

Hobiler

Yoga, Keman, Klasik Müzik



GAZİ GELECEKTİR...