

**PEM YAKIT PİLLERİNDE ÇALIŞMA
PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**2019
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Yakup DAŞDEMİRLİ

**PEM YAKIT PİLLERİNDE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN
PERFORMANSA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Yakup DAŞDEMİRLİ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2019

Yakup DAŞDEMİRLİ tarafından hazırlanan “PEM YAKIT PİLLERİNDE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28/06/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof.Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)

Üye : Prof.Dr. Mehmet ÖZKAYMAK(KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ(KBÜ)

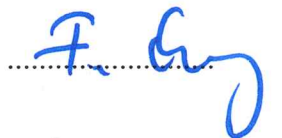


...../...../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.





“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Yakup DAŞDEMİRLİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PEM YAKIT PİLLERİNDE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Yakup DAŞDEMİRLİ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ

Haziran 2019, 50 sayfa

Yakıt hücresi elektrokimyasal bir enerji dönüştürücüsüdür. Çalışması anot ve katot üzerinde aynı anda gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlara dayanır. Yakıt hücresi çeşitlerinden olan Proton Değişim Membranı Yakıt Hücreleri (PEMFC) saf hidrojen ve oksijen (veya hava) ile çalışan ve elektrik, su ve biraz ısı üreten cihazlardır. Bu özellikler PEMFC'yi temiz enerji üretimi için cazip bir seçenek haline getirir. PEMFC'ler düşük sıcaklıkta çalıştıkları için çalıştırılmaları kolay hale gelir. PEMFC'lerin ticari uygulanabilirliğe ulaşmadan önce üstesinden gelinmesi gereken birkaç önemli sınırlamalar vardır. Ticari olarak uygulanabilir hale getirilmesine yönelik aktif araştırma alanları arasında; yakıt hücrelerinin maliyetini, büyüklüğünü ve ağırlığını azaltmak ayrıca dayanıklılıklarını ve performanslarını artırmak yer alır. Bu araştırmaların önemli ve artan bir kısmı yakıt hücrelerinin bilgisayar modellemesini içermektedir.

Bu çalışmada PEMFC anot ve katot gaz akış kanallarına yarıçapı artan boyutlarda yarı silindirik engeller konulup ANSYS-FLUENT programında bulunan PEMFC modülü kullanılarak farklı koşullarda ayrı ayrı incelenerek bir tek hücreden oluşan yakıt hücresi için analizler yapılmıştır. Günümüzde diğer ismi ile polimer elektrot membran yakıt hücreleri olan PEMFC'ler ile ilgili birçok çalışma vardır. PEMFC'de dışarıdan sağlanan hidrojen ve oksijen gazı arasında elektrokimyasal bir reaksiyon meydana gelir ve atık olarak su meydana çıkar. PEMFC anot, katot ve her ikisinin arasında bulunan membrandan oluşmaktadır. Anot ve katot kısımlarının herbiri; gaz kanalı, akım toplama plakası, katalizör tabakası ve gaz difüzyon tabakalarından oluşmaktadır.

Bu çalışmada tasarlanan model anot ve katot gaz kanalları içerisine konulan farklı yarıçapta ($r = 0, 1 - 0, 5$ mm arası yarıçapları 0,05 mm artan ve yarı silindirik engellerin merkezleri arasındaki mesafe 5 mm olan toplamda 9 engel) yarı silindirik engellerden oluşmaktadır. Modelin çözümünde kütle, momentum, enerji, türler ve faz potansiyelinin korunumu dikkate alınmıştır. ANSYS FLUENT PEMFC modülünde yakıt pili içindeki elektrokimyasal eşitlikler, hidrojenin oksidasyonu ve oksijenin indirgenme hızına bağlı olarak çözülmüştür. Düz gaz akış kanalına sahip olan PEMFC modeli geometrisi için farklı çalışma basınçları düşünülerek akım yoğunluğuna etkileri araştırılmıştır. Analizi yapılan durumlar için sıcaklık şartları, anot ve katot gaz kanalı giriş çıkışlarıyla birlikte yakıt pilinin alt ve üst dış yüzeylerinde sabit olarak alınmıştır. Hız, sıcaklık, hidrojen ve oksijenin kütle kesri dağılımları ile ilgili sonuçlar, gaz akış yönünde iki boyutlu olarak çıkarılmıştır. Çalışılan her bir durum için kutuplaşma eğrileri oluşturulmuş ve gaz akış kanallarına konulan engellerin kutuplaşma eğrileri üzerine olan etkileri değerlendirilmiştir.

Tasarladığımız modelimizde gaz akış kanallarında engeller bulunan ve engel bulunmayan yakıt pillerinin akım değerleri kıyaslanmış ve sonuç olarak; gaz akış kanallarında engeller olan modelin engelsiz modele göre yaklaşık %7,2 oranında daha fazla verimli olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler: PEM yakıt pili, modelleme, engelleme, polarizasyon eğrileri.

Bilim Kodu : 914.1.233

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WORKING PARAMETERS ON PERFORMANCE IN PEM FUEL CELLS

Yakup DAŞDEMİRLİ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc.Prof.Dr. Muhammet KAYFECİ

June 2019, 50 pages

The fuel cell is an electrochemical energy converter. Its operation is based on the simultaneous electrochemical reactions on the anode and cathode. Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs), which are one of the fuel cell types, are devices that work with pure hydrogen and oxygen (or air) and produce electricity, water and some heat. These features make PEMFC an attractive option for clean energy production. PEMFCs are easy to operate because they operate at low temperatures. There are several important limitations that must be overcome before commercial applicability of PEMFCs can be achieved. Active research areas for commercialization include; reducing the cost, size and weight of fuel cells, as well as increasing their durability and performance. An important and increasing part of these researches involves computer modeling of fuel cells.

In this study, semi-cylindrical barriers were used to increase the radius of the PEMFC to the anode and cathode gas flow channels, and the PEMFC module in the ANSYS-FLUENT program was analyzed separately and analyzed for a single cell fuel cell. Nowadays there are many studies on PEMFCs. In PEMFC, an electrochemical reaction takes place between the supplied hydrogen and oxygen gas, and water is generated as waste. PEMFC consists of anode, cathode and membrane between both. Each of the anode and cathode portions; gas duct, flow collection plate, catalyst layer and gas diffusion layers.

The model designed in this study consists of semi-cylindrical obstacles in the different radius placed within the anode and cathode gas channels ($r = 0, 1-0, 5$ mm, a total of 9 obstacles with a distance of 5 mm). In the solution of the model, the conservation of mass, momentum, energy, species and phase potential was taken into consideration. In the ANSYS FLUENT PEMFC module, the electrochemical equations in the fuel cell are solved depending on the oxidation of hydrogen and the rate of reduction of oxygen. For the PEMFC model geometry, which has a flat gas flow channel, different working pressures and their effects on current density were investigated. The temperature conditions for the cases analyzed were taken as fixed on the upper and lower outer surfaces of the fuel cell together with the anode and cathode gas channel inlet and outlet.

The results related to the mass fraction distribution of velocity, temperature, hydrogen and oxygen were extracted in two dimensions in the direction of gas flow. For each case, polarization curves were formed, and the effects of obstacles placed on gas flow channels on polarization curves were evaluated.

In our designed model, current values of fuel cells with and without obstacles in gas flow channels were compared and as a result; It was calculated that the model with obstacles in gas flow channels is about 7.2% more efficient than the unimpeded model.

Key Words : PEM fuel cell, modelling, blocker, polarization curves.

Science Code : 914.1.233

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ'ye teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca ANSYS programının kullanımında iş istasyonu masa üstü bilgisayarımı kullanmama imkân sunan sayın hocam Doç. Dr. Engin GEDİK'e teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. ÇALIŞMANIN AMACI	9
BÖLÜM 3	11
YAKIT PİLİ ÇALIŞMA SİSTEMİ VE ÇEŞİTLERİ	11
3.1 YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ.....	12
3.2. PROTON DEĞİŞTİREN MEMBRANLI (PEM) YAKIT PİLLERİ	13
3.3. PEM YAKIT PİLİ BİLEŞENLERİ VE ÖZELLİKLERİ.....	14
3.3.1. Akım Toplayıcı Plakalar.....	15
3.3.2. Gaz Akış Kanalları / Alanları.....	16
3.3.3. Membran.....	16
3.3.4. Gaz Difüzyon Tabakası.....	17
3.3.5. Katalizör Tabakası.....	17
3.4. PEM YAKIT PİLİ TEMEL KİMYA VE TERMODİNAMİĞİ.....	18
3.4.1. Yakıt PİLİNDE GERÇEKLEŞEN TEMEL REAKSİYONLAR.....	18

3.4.1.1. Yakıt Piliinde Sıcaklık ve Basınç.....	21
3.4.2. Yakıt Pili Verimi	21
3.4.3. Yakıt Hücresinde Polarizasyonlar ve Voltaj Kayıpları.....	22
3.4.3.1. Aktivasyon Polarizasyonu.....	23
3.4.3.2. Ohmik Polarizasyonu.....	24
3.4.3.3. Konsantrasyon Polarizasyonu.....	24
3.4.3.4. Toplam Kayıplar.....	24
BÖLÜM 4	26
MODELLEME, SİMÜLASYON VE ÇÖZÜM AŞAMALARI	26
4.1. SİMÜLASYON ADIMLARI.....	26
4.2. MODEL VARSAYIMLARI	27
4.3. ÇÖZÜM YOLU VE GEOMETRİK ÖZELLİKLER	27
4.4. YAKIT PİLİNİN FİZİKSEL YAPISI.....	29
4.5. ENGELSİZ DÜZ AKIŞ KANALLI YAKIT PİLİ MODELİ	30
4.6. AKIŞ KANALLARINDA ENGEL BULUNAN YAKIT PİLİ MODELİ.....	33
4.7. AĞ YAPISI	34
4.8. SINIR ŞARTLARI.....	38
BÖLÜM 5.....	40
ÇALIŞMA KOŞULLARI VE SONUÇLAR.....	40
5.1. ÇALIŞMA PARAMETRELERİ	41
5.1.1. Engel Tipi.....	41
5.1.2. Çalışma Basıncı.....	42
5.1.3. Çalışma Sıcaklığı.....	42
5.1.4. Kütle Kesri Dağılımları.....	43
5.1.5. Akım-Gerilim (Kutuplaşma) Eğrileri	45
BÖLÜM 6.....	46
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ.....	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yakıt pili.....	11
Şekil 3.2. PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi	14
Şekil 3.3. PEM yakıt hücresinin şematik çizimi	15
Şekil 3.4. Düz akış kanallı akım toplayıcı.....	16
Şekil 3.5. Tek hücreli PEM yakıt pili.....	18
Şekil 3.6. Yakıt pilinde ideal ve gerçek voltaj akım karakteristiği	23
Şekil 4.1. SolidWorks'te oluşturulan PEMFC modeli	28
Şekil 4.2. Örnek bir PEM yakıt pilinin görünümü	29
Şekil 4.3. Tasarlanan yakıt hücresi modelinin ölçüleri (yandan görünüm).....	30
Şekil 4.4. Tasarlanan yakıt hücresi modelinin ölçüleri (önden görünüm)	31
Şekil 4.5. Üç boyutlu engelsiz yakıt hücresi modelinin izometrik görünümü	31
Şekil 4.6. Üç boyutlu engelli yakıt hücresi modelinin izometrik görünümü	32
Şekil 4.7. Gaz akış kanallarında dokuz engel bulunan PEM yakıt pili modeli	34
Şekil 4.8. Mesh tipleri.....	35
Şekil 4.9. PEMFC'nin Ansys Fluent'te üç boyutlu izometrik görünümü.....	36
Şekil 4.10. Modelin hücrelere bölünmesi.....	36
Şekil 4.11. PEMFC'de mesh oluşturma (önden görünüm)	37
Şekil 4.12. PEMFC'de mesh oluşturma (yandan görünüm)	37
Şekil 4.13. Engelli PEMFC'de mesh oluşturma (yandan görünüm)	38
Şekil 5.1. Engelli ve engelsiz yakıt pilinin polarizasyon eğrisi (200 kPa, 353 K)....	41
Şekil 5.2. Engelsiz yakıt pilinin farklı basınçlarda polarizasyon eğrisi.....	42
Şekil 5.3. Engelsiz yakıt pilinin farklı sıcaklıklarda polarizasyon eğrisi	43
Şekil 5.4. Hidrojen kütle kesrinin kanal boyunca değişimi.....	44
Şekil 5.5. Oksijen kütle kesrinin kanal boyunca değişimi	44
Şekil 5.6. Engelli akış kanallarındaki gazların hız vektörü olarak görünümü.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Yakıt pillerinin elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırma..	12
Çizelge 3.2 Yakıt pillerinin sıcaklık ve uygulama alanlarına göre sınıflandırma.....	13
Çizelge 4.1.Yakıt pili modelinin geometrik özellikleri	29
Çizelge 4.2. Modelde kullanılan referans elektrokimyasal parametreler	32
Çizelge 4.3. PEMFC tabakaların katı fiziksel özellikleri	33
Çizelge 4.4. Akışkanların fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 4.5. PEMFC'nin sınır koşulları.....	39
Çizelge 5.1. İncelenen denemelere ait parametreler.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- C_p : Özgül ısı (kJ/kgK)
 D : Difüzyon katsayısı (m^2/s)
 E : Hücre voltajı (V)
 E_0 : Hücre açılış voltajı (V)
 e : Coulomb sabiti (1.602×10^{-19} C)
 F : Faraday sabiti (9.6487×10^7 C/kmol)
 ΔG : Gibbs serbest enerji değişimi (kJ/mol)
 i : Akım yoğunluğu (A/m^2)
 J : Transfer akım yoğunluğu (A/m^3)
 k : Isıl iletkenlik (W/mK)
 P : Basınç (Pa)
 R : Evrensel gaz sabiti (8314 J/kmol.K)
 ε : Gözeneklilik (Porosite)
 σ : Elektriksel iletkenlik ($ohm.m$)⁻¹
 j : Hacimsel akım yoğunluğu (A/m^3)
 j^{ref} : Hacimsel referans akım yoğunluğu (A/m^3)
 γ : Konsatrasyon üssü (boyutsuz)
 α : Taşınım katsayısı (boyutsuz)
 η : Yüzey aşırı-potansiyeli
 V_{cell} : Hücre voltajı (V)
 V_{OC} : Açık devre voltajı (V)
 T : Sıcaklık (K)
 u : Hız vektörü (m/s)
 X : Mol kesri
 ρ : Yoğunluk (kg/m³)
 μ : Viskozite (kg/m.s)

KISALTMALAR

C	: Katot
A	: Anot
CC	: Akım toplayıcı
CL	: Katalizör tabakası
GC	: Gaz akış kanalı
GDL	: Gaz difüzyon tabakası
M	: Membran
FC	: Yakıt pili
MEA	: Membran elektrot düzeneği
PEM	: Proton aktaran membran
PEMFC	: Proton aktaran membran yakıt hücresi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bilim dünyasında yakıt hücreleri yenilenebilir bir elektrik kaynağı olmasından dolayı gündemde olan en sıcak konulardan birisidir. Yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının gelecekte büyük enerji krizlerine neden olacağı tahmin edilmiştir. Bu nedenle bilim insanları sera gazı içermeyen yenilenebilir kaynaklar aramanın yollarını araştırmaktadırlar. Yakıt hücreleri sera etkisi olmadan elektrik elde etmek için en iyi seçeneklerden biridir. Yakıt hücresi sistemi, reaktanların kimyasal enerjisini doğrudan elektriğe dönüştüren bir cihazdır. Yakıt pillerinde kullanılan Hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Hidrojen, karbon ve sülfür içermediğinden dolayı yanması sırasında poliaromatik hidrokarbonlar ve SO₂ oluşmaz. Hidrojen kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olup doğadaki en hafif kimyasal element olarak bilinir. Yapılan çalışmalar evrende bol miktarda bulunan hidrojenin, bir yakıt için gerekli özelliklerinin birçoğuna sahip olduğunu göstermektedir. Motor ve araç teknolojisi bakımından alternatif olarak seçilen yakıtın, kullanımı ve depolanması kolay, doğal dengelere olumsuz etkisi olmayan ve fosil yakıt türleri ile rekabet edebilir bir karakteristiğe sahip olması gerekmektedir. Hidrojenin birçok yönü ile ekolojik açıdan üstünlüğü bilinmektedir. Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile (rüzgâr, güneş, biyokütle vb.) elde edilebilmektedir ve geleceğin en önemli enerji taşıyıcısıdır. Ayrıca, hidrojen diğer fosil yakıtlarla birlikte kullanılabilme özelliğine sahiptir [1].

Yakıt pilleri çeşitlerinden olan PEM (polimer elektrot membran) yakıt pillerinin düşük sıcaklıklarda ve yüksek verimde çalışması tercih edilme sebeplerinden biridir. PEMFC bileşenleri (gaz difüzyon tabakası, membran, katalizör tabakası, vb.) PEMFC'nin performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bileşenlerin malzeme, boyut, şekil,

uzunluk ve genişliğindeki değişiklikler, PEMFC'nin genel performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. Bu yüzden dikkatlice seçilmeleri gerekir. Modeller kullanılarak bu değişkenlerin yakıt pilini nasıl etkilediği görülebilir. Literatürde yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı modelleme üzerine yoğunlaşmaktadır. Farklı parametrelerin yakıt pili performansını nasıl etkilediği araştırılabilir. Yakıt pilindeki kayıplar ve kayıplara neden olan fiziksel özellikler incelenebilir. Pil kayıplarını en aza indirecek en uygun çalışma koşulları yapılacak analizler sayesinde bulunabilir.

Bu çalışmada yakıt pilleri ve çalışma sistemleri hakkında literatür araştırması yapıldıktan sonra PEM tipi yakıt hücreleri yapısı ve farklı modelleme örnekleri araştırılmıştır. Çözümün kolay olması için yakıt pili modelinin tek hücreli tam bir yakıt pili olmasına karar verilmiştir. Çalışmada daha sonra, literatürdeki çalışmalar ışığında yakıt hücresindeki gaz akış kanallarının tipi belirlenip yapılacak yakıt pili modellemesinde çözülmesi gereken temel eşitlikler incelenmiştir. Çalışmanın son kısmında yakıt pilinin fiziksel modellenmesi üzerinde durulmuştur.

Fiziksel modellemede önce engelsiz gaz akış kanalına sahip yakıt pili modeli literatürdeki çalışmalardaki verilerden yararlanarak SOLIDWORKS 2016 programında yakıt pilinin her bir parçası tasarlanmış ve yakıt hücresinin montajı hazırlanmıştır. SOLIDWORKS'te hazırlanan modele gerekli ara işlemler uygulanarak ANSYS R19.1 programında FLUENT bölümündeki model kısmına aktarılmıştır.

Çalışmanın ikinci safhasında düz kanallı ve tek hücreden oluşan bir proton değiştiren ya da proton aktaran membran yakıt pili (PEMFC) içerisinde meydana gelen taşınım olaylarının ANSYS analiz programının içinde hali hazırda bulunan PEMFC modülü kullanılarak simüle edilmesine geçilmiştir.

PEMFC'ler anot ve katot tarafında; akım toplayıcı tabaka, gaz kanalı, gaz difüzyon tabakası, katalizör tabaka ve membran dahil toplam dokuz kısımdan meydana gelmektedir. Analiz sonuçları H₂, O₂ tür kütle kesirleri, elektrik potansiyeli-akım yoğunluğu değişimleri ve hız dağılımları yakıt pili kanal geometrisinin orta kesitinde gaz akış kanalı boyunca iki boyutlu olarak çıkarılmıştır. Ayrıca çalışılan yakıt pili

modellerinde farklı çalışma basıncının etkisi incelenmiş ve polarizasyon eğrileri tek tek analizler yapılarak oluşturulmuştur. Polarizasyon eğrilerinin sonuçları literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanmış ve sonuçların literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Çalışmanın devamında daha önceden yine SOLIDWORKS programında hazırlanan, gaz akış kanalı içerisine yarıçapı artan boyutlarda kendi tasarımı olan yarı silindirik bloklar çizilerek engelli yakıt pili geometrisi aynı şekilde modellenip ANSYS FLUENT programında çözdürülmüştür. Anot ve Katot gaz kanallarına konulan bu bloklar sayesinde yakıt pili performansı değerlendirilmiştir.

Belirlemiş olduğumuz yarı silindirik engellerin yarıçapları $r = 0,1$ mm'den başlanarak $r = 0,5$ mm ye kadar ardışık engel yarıçapları $0,05$ mm artacak şekilde ve herbir engel merkezi arası 5 mm olarak muntazam tasarlanmıştır. Engelli modelimiz ANSYS FLUENT programına aktarılarak PEMFC modülünde farklı koşullar altında analizleri çıkarılmıştır. Gaz akış kanalında engeller bulunan ve bulunmayan yakıt pili modellerine ait polarizasyon eğrileri oluşturulmuş, bu eğrilerin birbirleriyle ve literatürdeki benzer çalışmalar ile kıyaslanması aşamasına geçilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yakıt pili çalışmalarında modelleme yapılarak birçok araştırma yapılmıştır. Modellemelerde akış özellikleri, su yönetimi, yakıt pili bileşenleri ile ilgili farklı durumlar çalışılmıştır.

Bıyıkoğlu ve Alpat çalışmalarında düz gaz akış kanallı tek hücreli yakıt pili modelini üç boyutlu koordinat sisteminde incelemiştirlerdir. Çalışma basıncının, anot ve katot gaz akış oranlarının yakıt pili karakteristiğine etkisini parametrik olarak incelemiştirlerdir. Literatürde mevcut bulunan deneysel sonuçlar dikkate alınarak model atmosferik basınçlarda analiz edilmiştir. Akım yoğunluğunun anot gazlarının kütle debisindeki değişikliklere duyarlı olmadığını görülmüştür. Akım kısıtlamalarında suyun daha baskın olduğunu bulmuşlardır [2].

PEM yakıt hücrelerinin performansını arttırmak amacıyla farklı birçok çalışmalar halihazırda yapılmıştır. PEMFC çalışmalarında gaz kanalı tasarımları önemli bir rol oynamaktadır. Çalışılan farklı geometriler tepkimeye giren gazların taşınmasını, su yönetimini ve yakıt hücresinin performansını önemli ölçüde etkileyebilir. PEM yakıt hücrelerinde paralel tipte çoklu kanalların, serpantin şekilli kanalların ve birbirine bağlı kanalların geometrilerinin düzenlenmesi gibi birkaç farklı kanal tipinin verimlilik üzerine etkileri çalışılmıştır.

Yakıt pilini en uygun biçimde modellemek için kesin fiziksel özellikleri bilmek gerekmektedir. Bu özellikler, akım yoğunluğu değişimleri ve birim hacim için katalizör yüzey alanı gibi kinetik değişkenleri, geçirgenlik gibi yapısal bilgiyi ve iyonik iletkenlik ve su difüzyonu gibi polimer özellikleri içerir [3].

Sivertsen ve Djilali yaptıkları çalışmada proton değişim membranı (PEM) yakıt hücreleri için izotermal olmayan üç boyutlu kapsamlı bir hesaplama modeli geliştirmiş ve hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) koduna uygulamışlardır. Model paralel hesaplama izin verip büyük hesaplama alanları için iyi çözülmüş ve simülasyonları yapmayı daha pratik hale getirmiştir. Parametrik analiz ile, akım yoğunluğu ve polarizasyon eğrisinde gözle görülür bir değişiklik olmadan sadece asimetri parametresini değiştirerek büyük ölçüde farklı dağılımların elde edilebileceği anlaşılmıştır [4].

Ju ve Wang çalışmasında üç boyutlu, elektrokimyasal taşınım ile birleştirilmiş modeli, 50 cm²'lik bir proton değişim membranına (PEM) yakıt hücresine uygulayıp deneysel olarak ölçülen akım dağılım verileri ile doğrulamışlardır. Hesaplama süresini azaltmak ve çok fazla düğüm noktasını içeren büyük ölçekli hesaplamaları mümkün kılmak için paralel bir hesaplama metodolojisi kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları, iki katod stokiyometri oranı için tamamen nemlendirilmiş koşullar altında dağılımın mevcut deneysel verilerle doğrulamışlardır. Simülasyonların ve deneylerin karşılaştırılması, ortalama polarizasyon eğrileri ile neredeyse mükemmel bir şekilde eşleşse de mevcut dağılımda uyumsuzluğun olduğu sonucuna varmışlardır [5]. Plakalardaki akış alanı tasarımı proton değişim membranı yakıt hücrelerinde (PEMFC'ler) reaktan kullanımının ve sıvı su tahliyesinin iyileştirilmesi için çok önemlidir.

Kuo ve arkadaşları konveksiyon ile ısı transferini ve gaz akış kanal tasarımıyla hız akış özelliklerini inceleyen sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Anot ve katot gaz akış kanallarına farklı tiplerde engeller koyarak bir geometri oluşturmuşlardır. Yerleştirilen engeller dalga biçiminde (wave-like), yamuk (trapezoid) biçiminde ve basamak (ladder-like) şeklindedir. Sayısal sonuçlar düz gaz akış kanallı PEM yakıt pili geometrileri ile karşılaştırıldığında dalga biçimli, yamuk biçimli ve basamak biçimindeki engelli gaz akış kanallarında ortalama Nusselt sayısı yaklaşık olarak iki katına çıkmaktadır. Periyodik olarak tekrarlanan bu engel geometrileri (dalga biçimli, yamuk biçimli ve basamak biçimli) kanal içindeki gaz akış hızını artırmaktadır. Böylelikle katalizör tabakasındaki reaksiyon performansı artmaktadır [6].

Wang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda tasarım parametrelerinin bipolar plakalardaki etkisini analiz etmek için üç boyutlu bir model kullanılmıştır. Akış kanalı kıvrımlarının sayısı, serpantin akış kanalı sayısı, akış kanalı genişliği oranı ve serpantin akış alanıyla PEMFC'lerin hücre performansı üzerine araştırmalar yapılmıştır [7].

Mevcut yakıt pili (FC) sistemleri arasındaki farklar esas olarak elektrolit tipine ve çalışma koşullarına dayanmaktadır. Proton değişim membranı (PEM) yakıt hücrelerinin önemli özelliklerinden bazıları şunlardır; çalışmaya kolay başlama, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik ve mobil uygulamalarda kullanılabilirliği. PEM yakıt hücresi yaklaşık 6 atm basınca kadar ve 50 °C ile 90 °C arasındaki sıcaklıklarda çalıştırılabilir. Daha yüksek basınçlarda voltaj kazancıyla ilişkili olarak daha yüksek akım yoğunlukları elde edilebilir. PEMFC'ler için işletme parametreleri de önemli bir konudur, bu nedenle yeni bir tasarım veya yeni bir düzenleme için işletme parametreleri dikkatlice incelenmelidir [8].

Bir PEM yakıt hücresinin akış alanı kanalındaki bir engelin varlığının, reaktif gazın kanaldan katalizör katmanına kütle transferini potansiyel olarak artırdığı ve performansını geliştirdiği birçok çalışma ile desteklenmiştir.

Liu vd.'nin 2005 yılında yaptıkları çalışmada reaktif taşınımı arttırmak için bir PEM yakıt hücresine perdeli akış kanalları koyarak hücre performansı araştırılmıştır. Çalışmaları, reaktif gazın lokal taşınımının, yerel akım yoğunluğu oluşumunun ve hücre performansının perdelerin varlığı ile geliştirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte kullanılan model iki boyutta çözülmüş ve hücre içindeki elektrokimyasal reaksiyon ile ısı oluşumu ihmal edilmiştir. Sonuçlar düşük voltaj koşullarında suyun etkisinin önemli olduğunu ve modellemede dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Katod tarafında sınırlanan akım yoğunluğunu daha yüksek bir hava hızında önemli ölçüde yükselterek kütle taşınım kaybının oluşumu geciktirilip hücre performansının arttırılabileceği görülmüştür [9].

Obayopo vd.'nin 2012 yılındaki çalışmalarında gaz kanalına enine yerleştirilmiş pim kanatları ile reaktif gaz dağılımını iyileştirmeyi amaçlayan sayısal bir çalışma

sunmuşlardır. Pim kanat parametrelerinin, akış Reynolds sayısının ve GDL gözenekliliğinin reaktif gaz taşınması ve kanal uzunluğu boyunca basınç düşüşü üzerindeki etkileri incelenmiştir [10].

Kuo vd.'nin 2008 yılındaki çalışmalarında yeni bir dalga benzeri kanalın PEM yakıt hücrelerinin performansına etkilerini araştırmışlardır. Simülasyonları; gaz akış özellikleri, sıcaklık dağılımı, elektrokimyasal reaksiyon verimliliği ve PEMFC'lerin 323 K ila 343 K arasında değişen çalışma sıcaklıklarındaki elektriksel performansına odaklanırlar. Ancak çalışmalarında dalga benzeri engeller gaz kanalı girişine yakın bir yerde konumlandırılmıştır [11].

Bıyıköğlü ve Öztoprak çalışmalarında gaz akış kanallarına bölme blokların yerleştirilmesi ile yakıt hücresi özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bloğun ucu ile gaz akış kanalı duvarı arasındaki boşluğun akım yoğunluğu değerleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Engelli kanalın akım yoğunluğu engelsiz kanala göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu çalışmada, engelin ucu ile gaz akış kanalı sınırı arasındaki optimum boşluk mesafesi gaz kanalı içinde bir engel kullanılarak analiz edilmiştir. Kanal duvarı ve bölme bloğunun ucu arasındaki boşluk, üretilen akım yoğunluğu ve çözümlerin yakınsaması üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Hücreden en yüksek akım yoğunluğunu sağlamak için blokların sayısı ve boyutu belirlenmiştir. Kutuplaşma eğrilerinde dört bloktan fazla ve boşluk oranı 0.3 olan hücreler için anlamlı bir etki gözlenmemiştir. Dört bloklu ve boşluk oranı 0.3 olan hücrelerde giriş gazlarının hızı ve bağıl nemin etkisi araştırılmıştır. Akım yoğunluğu düşük giriş hızları için bağıl neme önemli derecede bağlı olduğu saptanmıştır [12].

Soong vd.'nin 2005 yılında yapmış oldukları çalışmada gaz kanalına enine yerleştirilmiş bölme levhaları ile kısmen tıkanmış yakıt kanalının yeni bir konfigürasyonu önerilmiştir [13].

Ekiz ve arkadaşları çalışmalarında tek hücreli bir polimer elektrolit membranlı yakıt pili Comsol Multiphysics programında akışa paralel kesitte iki boyutlu modelleyip akış kanalına farklı geometrilerde engeller yerleştirilerek daha fazla yakıtın reaksiyona girmesini amaçlamışlardır. İdeal performans değerlerine yakın akım ve güç

yoğunlukları oluşturulup kayıpların en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Sınır koşulları olarak farklı hız değerleri girilip çıkış sınır şartları için farklı basınç değerleri verilerek performansı araştırılmıştır. Giriş hızının ve çıkış basıncının artması, katot tarafındaki sınır şartlarına anoda göre daha fazla oksidant beslenmesi ve engellerin derinliğinin artması ile yakıt hücresi performansı daha iyi sonuç vermiştir [14].

Öztoprak çalışmasında gaz akış kanalı içerisinde tek bir blok ile en uygun blok yüksekliğini araştırmıştır. Belirlenen optimum blok yüksekliğinden sonra (B=4) gaz akış kanalı içerisine konulan engel sayısı artırılarak çalışılmıştır [15].

Han ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bir polimer elektrolit membran yakıt hücresi akış alanlarının tasarımlarına bağlı olarak farklı performans seviyeleri gösterdiğini, akış alanı tasarımlarının gaz difüzyon katmanları boyunca katalizör katmanlarına geçen bir kanaldaki akış olan difüzyon akısını değiştirdiğini görmüşlerdir. Bu nedenle yüksek akım yoğunluğundaki konsantrasyon kaybını önleyebilen akış alanları tasarımları için çalışmışlardır. Çalışmalarında dalga şeklinde engeller tasarlayıp analiz edilmiştir. Önce 25 cm² birim hücre kullanılarak yapılan deneyde kararsız kütle transferinin neden olduğu konsantrasyon kaybı azaltılmış ve yakıt hücresinin performanslarının %5,76 ve daha sonra ise 84 cm² birim hücre kullanılarak yapılan sayısal analizde ise yaklaşık %5,17 oranında arttığını hesaplamışlardır [16].

Yang ve arkadaşları çalışmalarında proton değişim membranı yakıt hücresinde (PEMFC) düzlem yüzey kanalı yerine dalgalı akış kanalı kullanmışlardır. PEMFC'de dalgalı akış kanalıyla hız, konsantrasyon ve elektriksel performans sayısal simülasyonlarla incelenmiştir. Sonuç olarak dalgalı kanalın gözenekli katmandan faydalandığında ve PEMFC'nin performansını arttırdığına varmışlardır. Bunun nedeni olarak da dalgalı akış kanalının zorlanmış konveksiyonu artırması ve gaz difüzyon katmanına (GDL) daha fazla reaktan gaz akışına neden olmasıdır. Geleneksel bir PEMFC ile karşılaştırıldığında dalgalı akış kanalının güç yoğunluğunu yaklaşık %30 oranında artırdığı sonucuna varmışlardır [17].

Hashemi ve arkadaşları çalışmalarında proton değişim membranı (PEM) yakıt hücrelerinin düz ve serpantin akış alanlarına sahip performansını değerlendiren

izotermal olmayan kapsamlı bir üç boyutlu model oluşturulmuştur. Model kütle, ısı ve enerji taşınımı, elektrot kinetiği ve potansiyel alanları içeren bir yakıt hücresindeki ana taşınım olaylarını dikkate almaktadır. Hücre içindeki tüm akışlar için paralel akış ve karşıt akış modeli göz önünde bulundurulmuştur. Oksijen ve hidrojen kütle kesir dağılımları, akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımı tespit edilmiştir. Serpantin akış alanında akım yoğunluğu ve sıcaklığın daha iyi dağıldığı gösterilmiştir [18].

Byun vd'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmalarında yakıt hücresindeki gaz difüzyon katmanlarında (GDL) oksidan iletimini geliştirmek için katot kanallarının yüzeyinde dalga benzeri bir tasarım önermişlerdir. Dalga tümseği arasındaki mesafeleri değiştirerek yakıt hücrelerinin performansını değerlendirip ve akım-gerilim (I-V) ilişkilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma için geleneksel düz yüzeyli oksijen kanallarıyla PEMFC'ler hazırlamışlardır. Bu çalışmada kanalların yüzey tasarımını değiştirerek yakıt hücresi çalışmasını ve sonuç olarak yakıt hücresi performansını en üst seviyeye çıkaracak en iyi katot kanal tasarımını bulmayı hedeflemişlerdir [19].

Heidary ve arkadaşları paralel bir akış alanındaki aşamalı engel konumlarının etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Yakıt hücresi performans sonuçlarını engelsiz temel bir paralel akış alanı ile karşılaştırmışlardır. Her bir paralel kanala kanallar boyunca yanıl olarak bakıldığında birbirleriyle aynı hizaya gelecek şekilde üç blok yerleştirilmiştir. Sonuçlar, kademeli konfigürasyonun hücre performansını %18 oranında artırdığını göstermektedir. Tıkanmalar nedeniyle artan basınç düşüşünün üstesinden gelmek için gereken daha yüksek pompalama gücünün hesaba katılmasından sonra bile performansın iyileştiği görülmüştür [20].

2.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmanın amacı proton değişim membranı yakıt hücresinde (PEMFC) bulunan hidrojen ve oksijen gazlarının dolaştığı düzlem yüzey kanalı yerine yeni bir dalgalı akış kanalı tarzı kullanıp yakıt pili performansına etkisini incelemektir. Yarıçapları artan şekilde yarı silindirik engeller koyarak modelleme yapılmıştır. İlk önce gaz akış kanallarında engel olmayan düz gaz akış kanalı için sayısal analizler yapılmıştır. Ardından gaz akış kanalı içerisinde engel bulunan yakıt pili geometrilerinin sayısal analizleri yapılmış ve önceki model ile karşılaştırılmıştır. Engellerin yarıçapları 0,1

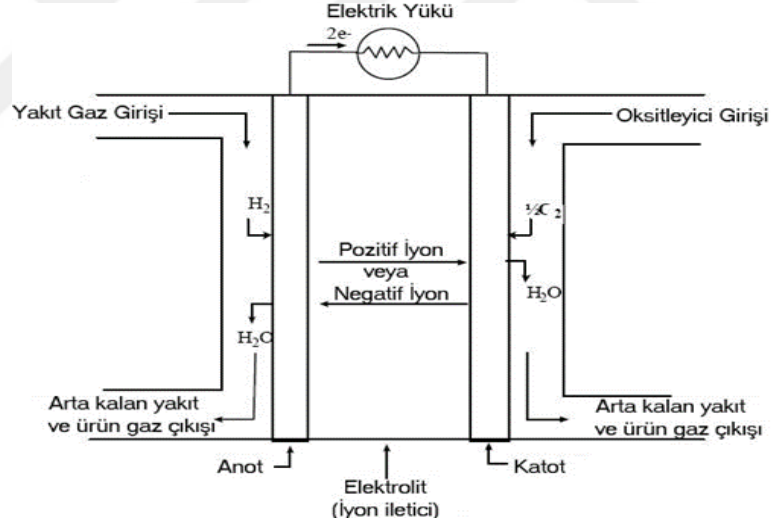
mm'den başlayıp 0,5 mm' ye kadar ardışık olarak 0,05 mm artacak şekilde toplam 9 engel olacak şekilde geometrileri hazırlanmıştır. PEMFC'de dalgalı akış kanalıyla hız, konsantrasyon ve elektriksel performans sayısal simülasyonlarla incelenmiştir. Sonuçların PEMFC'nin performansını arttırdığını göstermektedir. Bunun nedeni, dalgalı akış kanalının zorlanmış konveksiyonu arttırması ve gaz difüzyon katmanına (GDL) daha fazla reaktan gaz akışına neden olmasıdır. Yüksek ve düşük hızlarda zorlanmış taşınma mekanizması zayıfladığı ve reaktan gaz beslemesi yetersiz olduğu için yakıt pili performansı azalır. Farklı çalışma şartları için polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu engellerin etkisi ile gaz akış kanalı içindeki hidrojen ve oksijenin kanal boyunca hızının ve reaksiyona girme oranının artması hedeflenmiştir.



BÖLÜM 3

YAKIT PİLİ ÇALIŞMA SİSTEMİ VE ÇEŞİTLERİ

Yakıt pili, bir yakıt ve oksitleyicinin elektrokimyasal reaksiyonu ile elektrik enerjisi üreten bir cihazdır. Yakıt pilinde yakıtın kimyasal enerjisinden elektrokimyasal olarak doğrudan elektrik üretilir. Yakıt pillerini geleneksel pillerden ayıran en belirgin özellik; şarj edilmelerine gerek olmadan yakıtın beslendiği sürece sürekli olarak enerji üretebilmeleridir [1]. Yakıt pili, Şekil 3.1 'de görüldüğü gibi elektrolit (membran), anot ve katot kısımlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Yakıt pili [21].

Yakıt pilinde anot tarafından genelde hidrojen gazı, katot tarafından da oksitleyici gaz olarak genelde oksijen gazı verilir. Anotta yükseltgenme katotta ise indirgenme reaksiyonları gerçekleşir. Reaksiyon sonucu ürün olarak su ve ısı ortaya çıkar. Meydana çıkan suyun kimyasal potansiyeli hidrojen ve oksijenin kimyasal potansiyellerinin toplamından daha düşük olmasından dolayı toplam kimyasal

potansiyel farkı hidrojen ve oksijende su yönünde itici bir güç meydana getirir. Elektrokimyasal tepkimeler elektrotlarda oluşur ve bir elektrik akımı ortaya çıkar.

3.1. YAKIT PİLİ ÇEŞİTLERİ

Yakıt pillerini sınıflandırırken; yakıt ve oksitleyicinin bileşimine, yakıtın dolaylı veya doğrudan verilmesine, kullanılan elektrot ve elektrolit cinsine ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak ayrı ayrı sınıflandırılabilir [22].

Yakıt pilleri çalışma sıcaklığına göre; düşük sıcaklıkta (25-100 °C) çalışan yakıt pilleri, orta sıcaklıkta (100-500 °C) çalışan yakıt pilleri, yüksek sıcaklıkta (500-1000 °C) yakıt pilleri ve çok yüksek sıcaklıkta (1000 °C üzeri) çalışan yakıt pilleri olmak üzere dört gruba ayrılabilir. Elektrolit çeşidine göre; sıvı elektrolit kullanılan yakıt pilleri, erimiş elektrolit kullanılan yakıt pilleri ve katı elektrolit kullanılan yakıt pilleri olarak üç grupta sınıflandırılabilir. Hidrojenin elde edilmesine göre; direkt sağlanan hidrojeni kullanan yakıt pilleri, dolaylı olarak hidrojen sağlanan yakıt pilleri, biyokimyasal gazlardan elde edilen hidrojeni kullanan yakıt pilleri ve reformer yoluyla elde edilen hidrojeni kullanan yakıt pilleri olmak üzere dört grupta incelenebilir [23]. İçerdikleri elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak Çizelge 3.1' de sınıflandırılmıştır.

Çizelge 3.1. Yakıt pillerinin elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılması [24].

Yakıt Pili Çeşidi	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Alkali yakıt pili (AFC)	KOH	50-90
Proton değiştiren zarlı yakıt pili (PEMFC)	Polimer	0-125
Doğrudan metanol kullanılan yakıt pili (DMFC)	Sülfürik asit veya polimer	50-120
Fosforik asit yakıt pili (PAFC)	Orto fosforik asit	190-210
Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC)	Li / K karbonat karışımı	630-650
Katı oksit yakıt pili (SOFC)	Stabilize zirkonyum	900-1000

Yakıt pillerinin sahip oldukları güç, verim, çalışma sıcaklıkları ve uygulama alanları derlenerek Çizelge 3.2' de verilmiştir [1].

Çizelge 3.2. Yakıt pillerinin sıcaklık, verim, güç ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılması [1].

Yakıt Pili Çeşidi	İşletme Sıcaklığı (°C)	Verim (%)	Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	Uygulama Alanları
Alkali yakıt pili (AFC)	50-90	50-60	100-200	Uzay, sabit güç
Fosforik asit yakıt pili (PAFC)	180-120	55	100	Kojenerasyon, ulaşım, sabit güç
Proton değiştiren zarlı yakıt pili (PEMFC)	50-125	50-60	350	Uzay, ulaşım
Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC)	630-650	60-65	100	Kojenerasyon, sabit güç
Katı oksit yakıt pili (SOFC)	900-1000	55-65	240	Kojenerasyon, sabit güç
Doğrudan metanol yakıt pili (DMFC)	50-120	30-40	40	Ulaşım, PC, mobil telefon

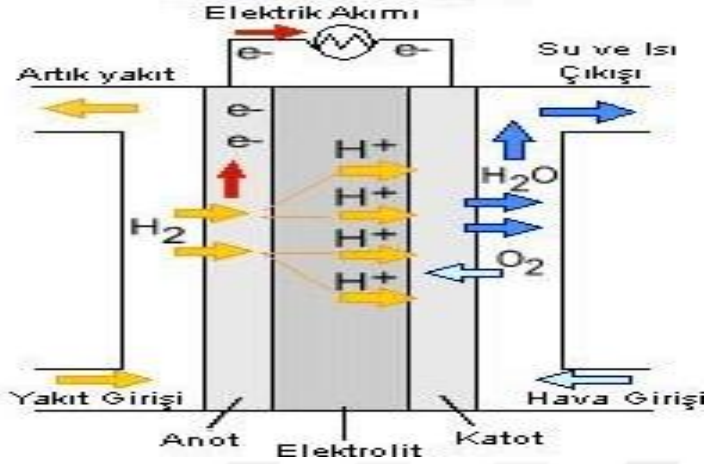
3.2. PROTON DEĞİŞTİREN MEMBRANLI (PEM) YAKIT PİLLERİ

PEM yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları düşük olup, yaklaşık 60 – 80 °C civarındadır. Dolayısıyla, çalışmaya başlaması için geçen süre daha kısadır. Ön yüklenmeleri yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinden daha yüksektir ve cihaz bileşenleri daha az aşınmaya maruz kalır. Hareketli parçası yoktur. Güç yoğunlukları yüksek olup bağlı hızlarına bağlı olarak değişir. Bu pillerin sağladığı en yüksek güç miktarı 50 W ile 75 kW aralığında değişir. Burada belirtilen nedenlerle, PEM yakıt pilleri uygun boyut ve kütlede tasarlanarak, taşıtlar için güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklığının düşük olması nedeniyle, taşınabilir bilgisayarlar, bisiklet, mobil telefon vb. ticari uygulamalarda ve ulaşım sektöründe teknolojik yönden rekabet edebilir bir şekilde kullanılabilir [1].

PEM yakıt pillerinin otomotiv sektöründe kullanımını sağlayan önemli üstünlüklerinden bahsedecek olursak; küçük boyutta uygulanabilirlikleri, düşük sıcaklıkta çalışmalarına rağmen bu sıcaklıklardan kolay bir şekilde yüksek güç üretimine geçebilmeleri, yüksek verimle çalışmaları, %40 – 50 seviyesinde yüksek teorik gerilim üretebilmeleri ve güç ihtiyacındaki değişikliklere hızlı cevap verebilmeleridir [24].

Yakıt pilleri, suyun elektroliz mekanizmasının tam tersi çalışma prensibine sahiptir. Diğer yakıt pilleri gibi, PEM yakıt pilleri de bir membran (elektrolit) tarafından ayrılan

anot ve katottan (elektrot) oluşmaktadır. Şekil 3.2 'de pem yakıt pilinin yapısı gösterilmiştir.



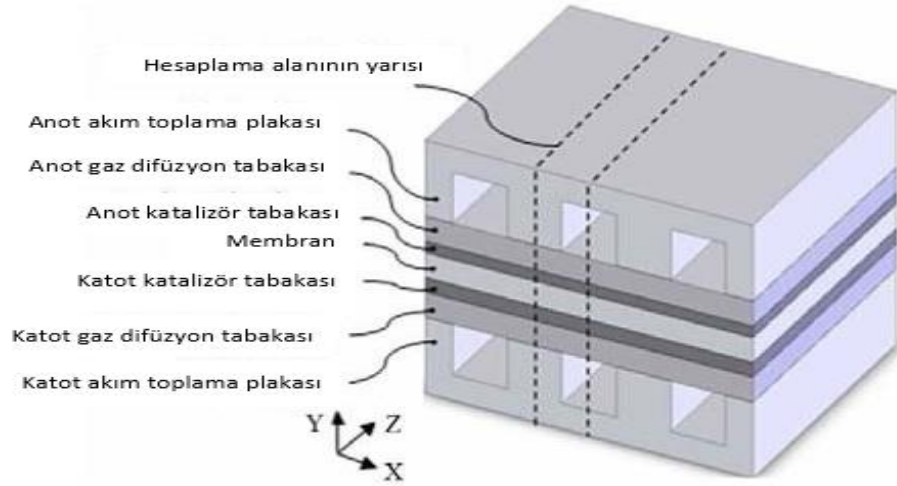
Şekil 3.2. PEM yakıt hüresinin şematik gösterimi [25].

PEM yakıt pillerinde kullanılan membrane diğer ismi ile elektrolit ince polimer yapıdadır. Bu membran, plastik sargılardan oluşan ve kâğıttan daha ince yapıda katı organik bir bileşendir. Bu tabakadan protonlar kolayca diğer tarafa geçebilir fakat elektronların geçişi olmaz. Hidrojen anot üzerine akarken, elektrot yüzeyinde hidrojen iyonlarına (proton) ve elektronlarına ayrılır. Oluşan hidrojen iyonları ince membrandan katoda doğru ilerlerken, geçişi engellenen elektrotlar dış devreden geçerek güç oluşturur. Havadan sağlanan oksijen, katot üzerinde hidrojen iyonları ve dış devreden gelen elektronlar ile birleşerek su oluşmasını sağlar [23].

PEM yakıt pillerinde kullanılan elektrotlar karbon yapılıdır. Gözenekli bir yapıda olup, gazlar her elektrottan difüzyon ile katalizöre ulaşır. Platin ve karbonun her ikisi elektronları iyi iletir. Böylece elektronlar elektrot boyunca serbestçe hareket edebilir.

3.3. PEM YAKIT PİLİ BİLEŞENLERİ VE ÖZELLİKLERİ

PEMFC'nin bileşenleri performansı üzerinde ana etkiye sahiptir. Bileşenin; malzeme, boyut, şekil, uzunluk ve genişliğindeki değişiklikler PEMFC'nin genel performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. Bu yüzden dikkatlice seçilmeleri gerekir. PEM yakıt hüresinin şematik çizimi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

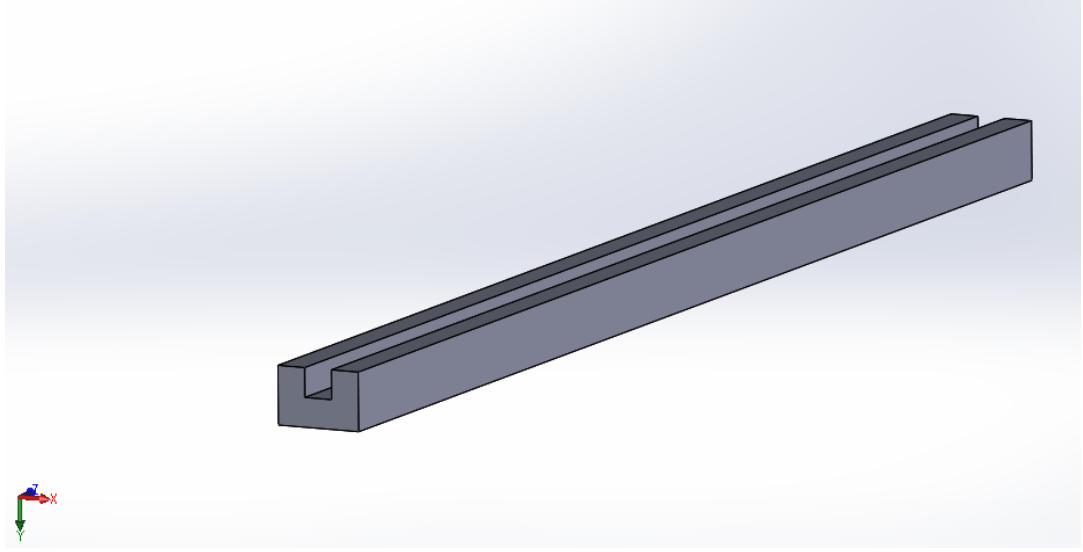


Şekil 3.3. PEM yakıt pilinin şematik çizimi [26].

3.3.1. Akım Toplayıcı Plakalar

Isı iletkenliği iyi olan grafit malzemesinden oluşan akım toplayıcı plakalarda (CC) sadece enerji ve elektrik akımı taşınır. Anot akım toplayıcı ve katot akım toplayıcı olmak üzere iki adet akım toplayıcı yüzey bulunmaktadır.

Akım toplayıcı plaka seçmek için bir dizi faktör dikkate alınmalıdır. Hidrojen ve oksijene karşı inert olmalıdır. Termal olarak kararlı, ekonomik, aşındırıcı olmayan, gaz geçirimsiz, iletken, kimyasal olarak kararlı ve oluşturulması kolay olmalıdır. Çoğunlukla kanallar akım toplayıcının iç tarafına konular veya işlenir. Bu gaz akışının şekli için yol olacaktır. Bu yüzden çok iyi iletken olmalıdır aksi halde çok fazla ohmik kayıp meydana gelir. Plakalar ayrıca hidrojen ve oksijen için pasif olmalıdır aksi takdirde paslanabilir. Kanaldaki sıcaklık ve su miktarı yüksek olursa korozyon hızı artabilir. Bu tabakalar PEMFC'ye mekanik yapı kazandırır bunun için malzemesinin sert ve güçlü olması gerekir. Ticari uygulamalar için uygun hale getirmek için ucuz ve kolay olması gerekir. Şekil 3.3'te SolidWorks programında çizilen düz akış kanallı akım toplayıcı plaka gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Düz akış kanallı akım toplayıcı.

3.3.2. Gaz Akış Kanalları / Alanları

Gaz akış kanalının (GC) büyüklüğü, şekli, uzunluğu, yüksekliği ve genişliği PEMFC'nin genel performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Araştırmacılar tarafından PEMFC'nin performansını optimize etmek için farklı akış alanları kullanılmaktadır. Akış alanları, tepkime gazlarını tepkime yüzeyine dağıtma ve artan basınç düşüşünü önleyerek ürünleri çıkış alanından çıkarma yolu sağlar. Akış alanının ana amacı su yönetimidir. Piyasada farklı avantaj ve dezavantajlara sahip farklı akış alanları vardır. Bunlardan bazıları; düz akış kanalı, serpantin akış kanalı, pim akış kanalı vb.dir. Çalışılan modelde düz akış kanallı yakıt pili seçilmiştir.

3.3.3. Membran

Polimer membranın ana görevi sadece pozitif iyonların (katyonların) içinden geçmesine izin vermesidir. Böylece katotta oksijen indirgenmesi meydana gelir. Membran 100 °C'nin üstünde sıcaklık taşıyabilmelidir ve zar her zaman nemli olmalıdır aksi takdirde iyonik iletim özelliği azalır. Proton değişim membranı yakıt hücresinin (PEMFC) toplam sıcaklığı da 100 °C'yi geçmemelidir. Bu nedenle, membranda optimum performans için az miktarda da olsa su gereklidir. Proton değişim membranında genellikle nafion malzemesi kullanılır. Membran termal ve kimyasal olarak kararlı, elektriksel olarak yalıtkan, güçlü ve gözenekli olmalıdır.

Membran kalınlığı büyük ölçüde hücrenin genel performansına bağlıdır bu nedenle boyutu da en iyi şekilde seçilmelidir. Membran kalınlığı ortalama olarak 50-100 mikron arasındadır.

Su, membrane içerisinde iyonize olması için emilir. Aşırı su yakıt hücresinin kotot tarafında hücre performansını ve güç çıkışını sınırladığından dolayı yakıt hücresi içindeki su yönetimi PEM yakıt hücresi işlemleri için önemlidir [27].

3.3.4 Gaz Difüzyon Tabakası

Gaz difüzyon tabakasının (GDL) ana görevi reaktif gazları katalizör tabakasına eşit şekilde dağıtmak ve hidrofobik (suyu sevmeyen, sudan kaçan) kalitesini kullanarak reaksiyon yüzeyinden suyu çıkarmaktır. GDL çoğunlukla karbon bez ve karbon kâğıdı olarak kullanılır ayrıca hidrofobik özelliğini arttırmak için politetrafloroetilen ile katlanır. GDL kalınlığı ortalama 100-500 mikron arasındadır. Katalizör tabakası ve membran için mekanik bir destek olarak kullanılır. GDL, akım toplayıcı tabaka gibi kimyasal ve elektriksel olarak kararlı olmalıdır. Reaktiflerin içine yayılması ve reaksiyon yüzeyine ulaşması için hidrofobik özelliğinin ve gözenekliliğinin iyi olması gerekmektedir.

3.3.5. Katalizör Tabakası

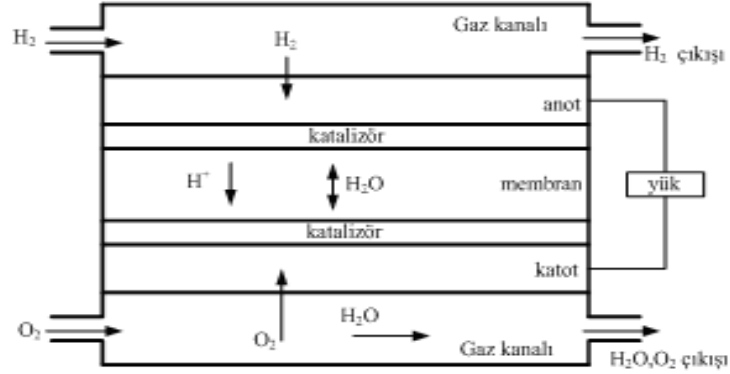
Katalizör kimyasal reaksiyonun hızını artırır ancak reaksiyona katılmaz. Oksijen ve hidrojen gazları düşük sıcaklıkta etkin olmadığı için düşük sıcaklıktaki yakıt hücreleri yüksek oranda aktif katalizörler gerektirir. Bunun için platin kaplı karbon destekli yapı katalizör tabakası olarak kullanılır. Membranın her iki tarafında bulunur. Hidrojen ve oksijenin iyonlara ve elektronlara kırılmasını sağlar. Çok gözeneklidir ve elektriksel olarak iletkenidir. Membran elektrot düzeneği (MEA), anot ve katot tarafındaki membran ve katalizör katmanından oluşur.

3.4. PEM YAKIT PİLİ TEMEL KİMYA VE TERMODİNAMIĞI

Yakıt pili, termodinamik kurallara uygun bir biçimde elektrokimyasal enerji dönüştürücü olup yakıtın kimyasal enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştüğü sistemlerdir [1].

3.4.1. Yakıt Pili Gerçekleşen Temel Reaksiyonlar

PEM yakıt pili anot kısmındaki gaz kanalından hidrojen gazı ve katot kısmından oksijen gazı akmaktadır. Şekil 3.5'te bir tek hücreli PEM yakıt pili şeması görülmektedir.



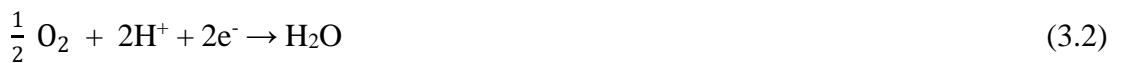
Şekil 3.5. Tek hücreli PEM yakıt pili.

Yakıt pillerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

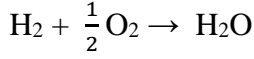
Anot kısmında hidrojenin yükseltgenme reaksiyonu gerçekleşir:



Katot kısmında ise oksijenin indirgenme reaksiyonu gerçekleşir:



Böylece yakıt pili içinde oluşan toplam reaksiyon ise:



Görüldüğü gibi kimyasal reaksiyon sonucunda ürün olarak su oluşur. Su katot tarafından beslenen hava akışıyla hücre dışına atılmaktadır. Bu reaksiyonların net sonucu olarak dış devre aracılığıyla elektron akımı gerçekleşir [28].

Reaktanların oluşturduğu kimyasal enerji tamamen elektrik enerjisine dönüşmediğinden membran elektrot çifti içerisinde ısı da çıkan ürünlerdendir. Bu sebeple gaz difüzyon tabakası ısı iletkeni gibi davranarak ısıyı uzaklaştırır [29].

Yakıt pilinde performans analizlerinden bahsetmek için termodinamiğin temel kanunlarını bilmek gerekmektedir. Öncelikle termodinamiğin enerji korunum ve entropi kanunlarından bahsedilmelidir. Termodinamiğin birinci kanuna enerjinin korunumu kanunu denir. Isı ya da iş formunda olan enerji, sistemin sınırlarından geçerek sistemin toplam enerjisini etkiler. Bu durum denklem halinde aşağıdaki gibidir.

$$\delta Q - \delta W = dE \quad (3.3)$$

Denklemden girdiler için pozitif, çıktılar için negatif işaret kullanılır. Q sisteme giren ısıyı, (-W) sistemde yapılan işi ve E ise sistemin toplam enerjisini belirtir. Isı ve iş için olan terimler denklemden (δ) ile gösterilmiştir. Çünkü değerler yola bağlı olup yol fonksiyonları olarak adlandırılır. Enerji ise nokta fonksiyonu olup yoldan bağımsızdır ve sadece ilk ve nihai durumlara bağlıdır. Denklem 1.1 in integrali alınır

$$\int (\delta Q - \delta W) = \int dE, \quad Q - W = E \quad \text{şeklinde olur.} \quad (3.4)$$

Kapalı bir sistem için enerji değişimi; iç enerji (U), kinetik enerji (KE) ve potansiyel enerjinin (PE) toplamına eşittir.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (3.5)$$

Açık sistemler için toplam enerjiye PV terimi eklenir. P basıncı, V ise akışkanın hacmini belirtir. Bu terim akışkan üzerine yapılan işi belirtir. Entalpi aşağıdaki denklem ile sağlanır.

$$H = U + PxV \quad (3.6)$$

Yatışkın akım şartları altında sabit bir kontrol hacmi için kinetik ve potansiyel enerji değişimi sıfır olur ve zamanla özellikler değişmez. Bu durumda termodinamiğin I. kanuna göre entalpideki değişim yeniden yazılırsa;

$$Q - W = \Delta H \quad \text{şeklinde olur.} \quad (3.7)$$

Termodinamiğin ikinci kanunu entropiden bahseder. Bir sistemdeki düzensizliğin ölçüsüne entropi denir. Sistem entropi oluşturmuyorsa tersinirdir. Termodinamiğin I. kanuna göre tersinir bir işlemde ısı ve iş değişimi olmaz. Tersinmez sistemler kontrol edilemeyen bir genişleme, sürtünmeden dolayı ısı kaybı ve sonlu sıcaklık farklarından dolayı ısı transferi gibi olaylar sebebiyle entropi oluşturur. Entropi tersinir ısı transferine bağlıdır ve denklem olarak;

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{ters} \quad \text{şeklinde gösterilir.} \quad (3.8)$$

Entropideki değişim yalnızca sistemin ilk ve son yapısına bağlıdır. Denklem (1.6) nın integre edilmesi ile entropi bulunur.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{ters} \quad (3.9)$$

Tersinir ısı transferi oluşan bir sistem için (Q_{rev}) sabit sıcaklıkta (T_0) entropi aşağıdaki denklemle açıklanır;

$$\Delta S = \frac{Q_{ters}}{T_0} \quad (3.10)$$

3.4.1.1. Yakıt Pilinde Sıcaklık ve Basınç

Sıcaklık ve basınç değişiminin ideal pil potansiyeline olan etkisi Gibbs serbest enerjisindeki temel değişimlerle analiz edilir.

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_P = \frac{\Delta S}{n \times F} \quad (3.11)$$

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_T = \frac{\Delta H_{acim}}{n \times F} \quad (3.12)$$

Bu denklemlerde S entropiyi, P basıncı, E ideal potansiyeli, F Faraday sabitini, T sıcaklığı ve n ise reaksiyonda üretilen elektron sayısını gösterir.

Su (H₂O) reaksiyonu için entropi değişimi negatiftir. Yakıt pilinin tersinir potansiyeli sıcaklığın artması ile azalır. Bu oran her °C başına 0,84 mV olmaktadır. Aynı reaksiyon için hacim değişimi (-) 'dir. Bundan dolayı tersinir potansiyel basıncın artmasıyla artacaktır.

3.4.2. Yakıt Pili Verimi

Termal verimlilik kullanılan yararlı enerjinin reaksiyon sonucu yakılan yakıttaki kimyasal enerjiye oranı ile belirlenir.

$$\eta = \frac{\text{Yararlı enerji}}{\Delta H} \quad (3.13)$$

Pilin verimi Gibbs serbest enerjisindeki değişimden elde edilir.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.14)$$

Yakıt pilinin çalışması sırasında ideal voltaj yakıt pili kayıpları sebebiyle düşer. Böylece gerçek verim;

$$\eta_g = \frac{-nFV_g}{\Delta H} \quad (3.15)$$

Burada ideal voltaj V_g gerçek değerine düşer. Çalışma voltajının ideal voltaja oranı ise verim ifadesini verir.

$$\eta_v = \frac{V_g}{V} \quad (3.16)$$

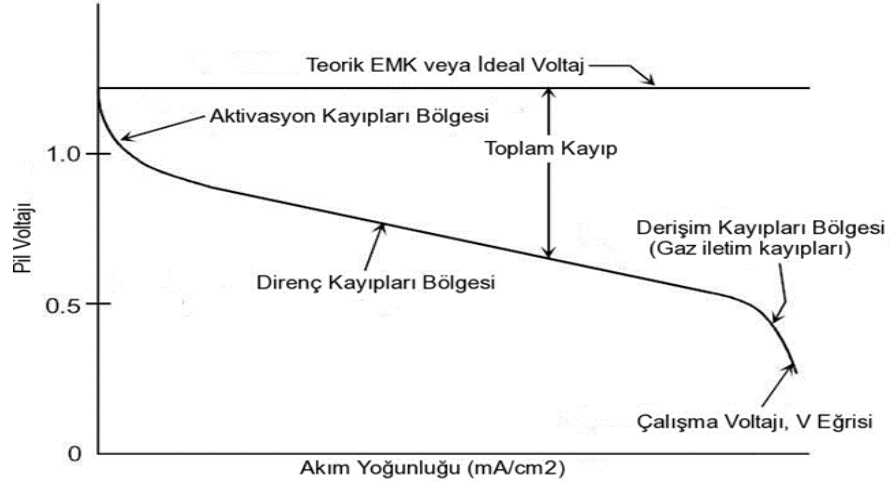
Yakıt pili performansını işletim şartları etkilemektedir. Sıcaklık, basınç ve sistemede kullanılan yakıtın bileşimi işletme şartını etkileyen faktörlerdir.

3.4.3. Yakıt Hücresinde Polarizasyonlar ve Voltaj Kayıpları

Yakıt hücresinden teorik olarak 1,229 V gerilim elde edilir. İdeal voltaj birçok kaynaktan dolayı tersinmez kayıplara neden olur. Böylece bu değer elde edilemez. Tersinmez kayıplara polarizasyon ismi verilir. Aşırı potansiyel veya aşırı voltaj olarak bilinen bu kayıpların üç temel nedeni vardır. Bunlar; aktivasyon kayıpları, ohmik kayıpları ve konsantrasyon kayıplarıdır. Bu kayıplar pilin ideal potansiyelini azaltır. Teorik ideal potansiyelden kayıpların çıkarılması ile pilin gerçek potansiyeli bulunur.

$$V = E - \text{Toplam kayıplar} \quad (3.17)$$

Yakıt hücresinde elektrokimyasal reaksiyonlar sırasında oluşan voltaj farklılıkları aktivasyon kayıplarına (aktivasyon polarizasyonu) sebep olur. Ohmik kayıplar (direnç polarizasyonu), iyonların elektrolitten ve elektronların elektrottan geçişi sırasında oluşan dirençlerden oluşmaktadır. Elektrot yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu tükenen reaktantlar ve yeni gelecek reaktantların yeterince hızlı iletilmemesi sonucu konsantrasyon kayıpları (konsantrasyon polarizasyonu) meydana gelir.



Şekil 3.6. Yakıt pilinde ideal ve gerçek voltaj akım karakteristiği [22].

Teorik olarak elde edilmesi gereken voltaj değeri yakıt hücresindeki kayıplar sebebiyle değişmiştir. Ayrıca polimer elektrot membranda da kayıplar gerçekleşir. Sentezlenen membranın direncinden oluşacak kayıplar düşük olursa ideal voltaj değerinde sabit bir akım yoğunluğu elde edilebilir.

3.4.3.1. Aktivasyon Polarizasyonu

Yavaş elektrot kinetiği ile bir elektrotun yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyon hızı kontrol altında olduğu zaman aktivasyon kayıpları oluşur. Aktivasyon polarizasyonu elektrokimyasal reaksiyonların hızları ile doğrudan ilgilidir. Elektrotlarda reaksiyon oluşumu için belli enerji seviyesine ulaşılması gerekmektedir. Bu işlemler için gereken enerjiler aktivasyon kayıplarını oluşturur. Elektrokimyasal reaksiyon Tafel denklemi ile açıklanmaktadır.

$$\eta_{act} = \left(\frac{R_x T}{n x a x F} \right) \ln \frac{i}{i_0} \quad (3.18)$$

Burada a elektron transfer katsayısını ve i_0 ise dönüşüm akım yoğunluğudur. Her iki elektrotta olan aktivasyon kaybı; anotta katoda göre ihmal edilebilir seviyededir. Sıcaklığın yükseltilmesi, daha etkin katalizör kullanımı, elektrot yüzey alanının artırılması, basıncın artırılması ile i_0 artırılır ve aktivasyon kaybı azaltılabilir.

PEM yakıt pillerinde aktivasyon enerjisinin sebep olduğu kayıpları en aza indirmek için iyi bir katalizör kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple yakıt pillerinde yaygın olarak platin malzemesi kullanılır [30]. PEM yakıt pilinin sıcaklığının, çalışma basıncının, hücre ve reaktantların derişiminin artırılması aktivasyon enerjisinin neden olduğu voltaj kayıplarını azaltır. Eğer yakıt pili 70 °C' den daha düşük sıcaklık koşullarında çalıştırılırsa aktivasyon kayıpları artar [28].

3.4.3.2. Ohmik Polarizasyonu

Elektrolitteki iyonların akışına karşı gösterilen dirençten ve elektrot malzemesi içerisinde geçen elektronun akışına karşı oluşan dirençten meydana gelir. PEM yakıt pilinde direnç kayıpları, hidrojen iyonlarının hareketine karşı membrane ve elektrotlardaki dirençlerden meydana gelir. Membranda iyonik iletkenliğin artırılması ve membran kalınlığının azaltılması gibi durumlar direnç kayıplarını azaltır. Aşağıdaki formül ile bulunur.

$$\eta_{ohm} = i \times R \quad (3.19)$$

Denklemdede; i hücreden geçen akımı, R toplam direnci gösterir.

3.4.3.3. Konsantrasyon Polarizasyonu

Gaz taşınımı durumunda gerçekleşen kayıptır. Reaktant elektrotta elektrokimyasal reaksiyon ile tüketilirken ana akışkanın ilk konsantrasyonunu koruyamadığı için bir potansiyel kayıp oluşur. Elektrot gözenekleri içerisinde gaz fazındaki yavaş difüzyon konsantrasyon kayıplarını artırır.

$$\eta_{kons} = \left(\frac{R_x T}{n x F} \right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_0} \right) \quad (3.20)$$

3.4.3.4. Toplam Kayıplar

Aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları hem anot hem katotta oluşur.

$$\eta_{anot} = \eta_{kons,a} + \eta_{akt,a} \quad (3.21)$$

$$\eta_{katot} = \eta_{kons,k} + \eta_{akt,k} \quad (3.22)$$

Polarizasyon (kayıplar) elektrotun potansiyelini değiştirir.

$$V_{elektrot} = E_{elektrot} \pm |\eta_{elektrot}| \quad (3.23)$$

$$V_{anot} = E_{anot} \pm |\eta_{anot}| \quad (3.24)$$

$$V_{katot} = E_{katot} \pm |\eta_{katot}| \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir.

BÖLÜM 4

MODELLEME, SİMÜLASYON VE ÇÖZÜM AŞAMALARI

PEMFC'nin modellenmesi karmaşık bir süreçtir. PEMFC'nin performansını değerlendirmek için önce belirli şartlar altında yakıt hücresinin doğruluğunu kontrol etmek gerekir. Piyasada bulunan yakıt hücresi tezgâhları da maliyetli ve kullanımı zordur. Yapılacak performans analizleri pahalı olan bu fiziksel kaynakları gerektirir. Bu nedenle yakıt hücresi performansının değerlendirilmesinde kullanılan en iyi yöntemlerden biri olan ANSYS Fluent Yakıt Hücresi Add-on Modülü simülasyon için kullanılmıştır. ANSYS Fluentte bulunan add-on modülü hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) için güçlü bir araçtır. Bu modülü etkinleştirerek: joule ısıtma, reaksiyon ısıtma, elektrokimyasal kaynaklar, Butler-Volmer oranı, membran su taşınımı, çok fazlı işlemler, çok bileşenli difüzyon ve gözenekli elektrotta anizotropik e-iletkenlik modelleri çözülebilir. Bu nedenle, PEMFC modellemesi için ANSYS FLUENT Add-on Modülü seçilmiştir. Bu modeller, hücrenin performansını tahmin etmek için kullanılır. Add-on Modülü ile PEMFC'nin performansını tahmin etmek için basit varsayımlar yapılır. Mevcut simülasyonlarda, ideal olmayan koşullar ve malzeme etkisi göz ardı edilmiştir.

4.1. SİMÜLASYON ADIMLARI

Literatür taramasından sonraki adımlar simülasyon süreci için aşağıdaki gibi ana hatlarıyla değerlendirilmiştir.

1. Seçilen yakıt hücresi modülü (Düz gaz akış kanallı PEMFC)
2. Geometriyi oluşturma (SolidWorks)
3. Ağ yapısı (Meshing) oluşturma (Ansys Fluent)
4. ANSYS'te belirlenen sınır koşullarını tanımlama (Add-on, PEMFC Modülü)
5. Araştırma raporlarında verilen sayısal değerleri kullanma

6. Uygun çözüm yöntemi ile komut ve değerler kullanarak simülasyonu çalıştırma
7. Simülasyondan akım ve gerilim değerleri alarak I-V eğrisini çizilmesi ve kıyaslanması

4.2. MODEL VARSAYIMLARI

1. Akış alanındaki Reynolds sayısı çok küçük olduğundan akış laminardır ve bu varsayım modeli basitleştirmiştir.
2. PEMFC için çalışma basıncı yüksek olmadığından akışkanlar sıkıştırılmaz olarak kabul edilir.
3. Kararlı hal mevcuttur ve zamanla değişmez.
4. Giriş gazları ideal gaz yasasına uyar.
5. Katalizör tabakası, membran ve gaz difüzyon tabakası izotropik malzemelerdir. Membranın hacimsel oranı, katalizör tabakalarındaki Pt / karbon oranı ve gözeneklilik sabit kabul edilir.
6. İzotermal modelleme için sıcaklık sabittir. Membran ve akım toplayıcıların (katı parçalar) yüksek iletkenliklerinden dolayı eşit ve sabit bir sıcaklığa sahip olduğu kabul edilir.
7. İzotermal olmayan ısı akışı sabittir ve sıcaklık homojen değildir.

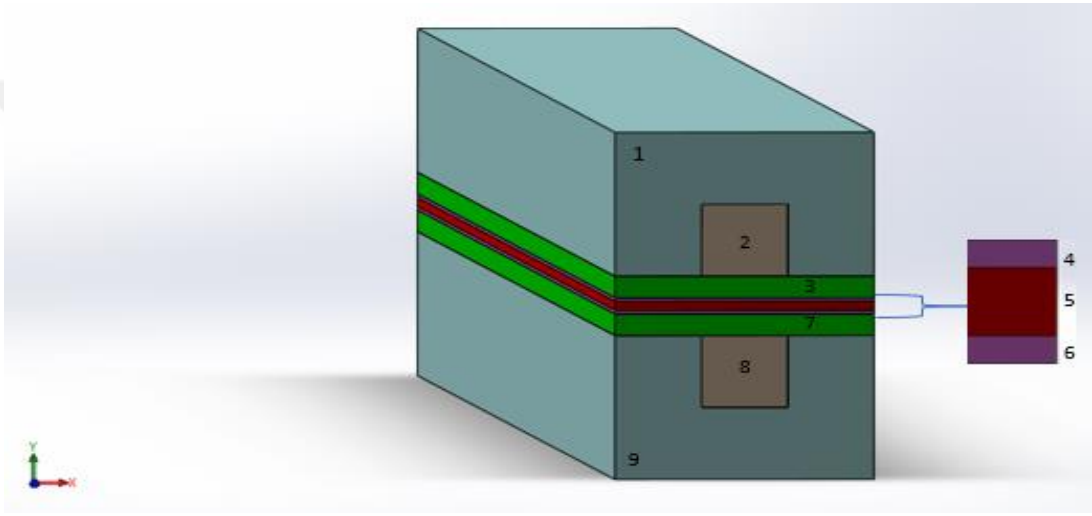
4.3. ÇÖZÜM YOLU VE GEOMETRİK ÖZELLİKLER

Simülasyon için 3 boyutlu tek hücreli PEMFC kullanılmıştır. PEMFC'nin eksiksiz ve iyi simülasyonu için gerekli aşamalardan bahsetmek gerekir. Yakıt hücresi modelleme ve simüle etme işlemi üç temel adımdan oluşur. İlk adım bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımını kullanarak geometriyi oluşturmaktır. Yakıt hücresi geometrisi üretebilen çok sayıda yazılım paketi vardır. PEMFC model geometrisi; SolidWorks, AutoCAD, ANSYS vb. farklı bilgisayar destekli yazılımlar ile oluşturulabilir.

Modeli tasarlamak için Solidworks programında yakıt hücresinin fiziksel boyutları girilerek engelli ve engelsiz yakıt pili geometrileri oluşturmuştur. Çalışmamızda PEMFC'nin geometrisi için SolidWorks 2016 sürüm bilgisayar programı

kullanılmıştır. Analiz ve simülasyon adımları için ANSYS akademik sürüm R19.1 bilgisayar programı kullanılmıştır.

Çalışmada SolidWorks kullanım kolaylığı sebebiyle seçilmiştir. Bu çalışma sırasında üç farklı geometri oluşturuldu. İlk önce basit bir tek hücreli daha sonra da gaz kanallarında yarıçapı artan yarı silindirik engeller olan yakıt hücresi tasarımı hazırlanmıştır. SolidWorks'te hazırlanan PEMFC geometrisi dokuz parçaya bölünmüştür. Şekil 4.1'de bu kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 4.1. SolidWorks'te oluşturulan PEMFC modeli.

1. Anot akımı toplayıcı plakası (ACC)
2. Anot gaz kanalı (AGC)
3. Anot gaz difüzyon tabakası (AGDL)
4. Anot katalizör tabakası (ACL)
5. Membran
6. Katot katalizör tabakası (CCL)
7. Katot gaz difüzyon tabakası (CDL)
8. Katot gaz kanalı (CGC)
9. Katot akım toplayıcı plakası (CCC)

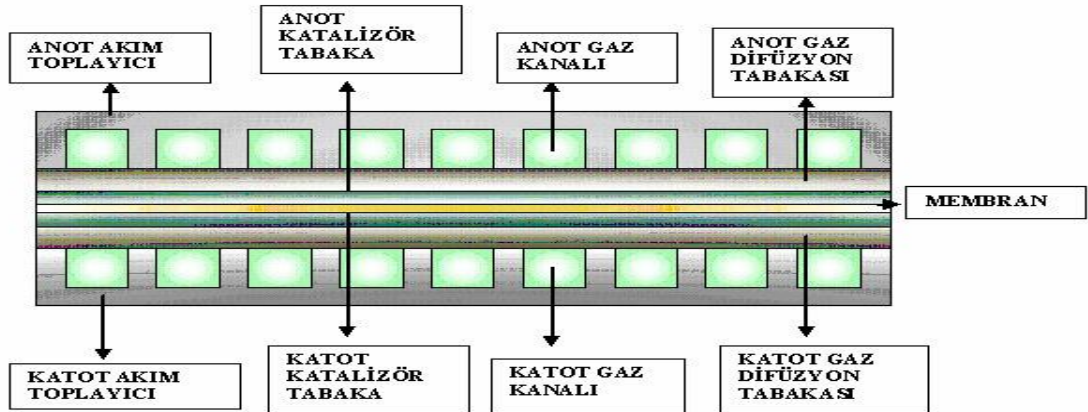
Simülasyon için kullanılan temel geometri aşağıdaki boyutlara sahiptir. PEMFC'nin geometrik özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Yakıt pili modelinin geometrik özellikleri [15].

Geometrik Boyutlar	Engelsiz	Engelli
Gaz kanalı uzunluğu (mm)	50	50
Gaz kanalı yüksekliği (mm)	1	1
Gaz kanalı genişliği (mm)	1	1
Hücrenin genişliği (mm)	3	3
Katalizör tabakasının kalınlığı (mm)	0,05	0,05
Gaz difüzyon tabakasının kalınlığı (mm)	0,3	0,3
Akım kollektörünün kalınlığı (mm)	2	2
Membran kalınlığı (mm)	0,125	0,125
Hücrenin toplam yüksekliği (mm)	4,825	4,825
Yakıt hücresi aktif alanı (cm ²)	1.5	1.5
Kanal sayısı	1	1
Engel sayısı	-	9

4.4. YAKIT PİLİNİN FİZİKSEL YAPISI

Bilindiği üzere PEM yakıt pili anot ve katot kısımlarında ayrı ayrı olmak üzere; katalizör tabakaları, gaz kanalları, gaz difüzyon tabakaları, akım toplama plakası ve membrandan oluşmaktadır. Paralel akış kanallarından oluşan bir PEM yakıt hücresinin farklı bir görünümü şekil 4.2’de gösterilmiştir.



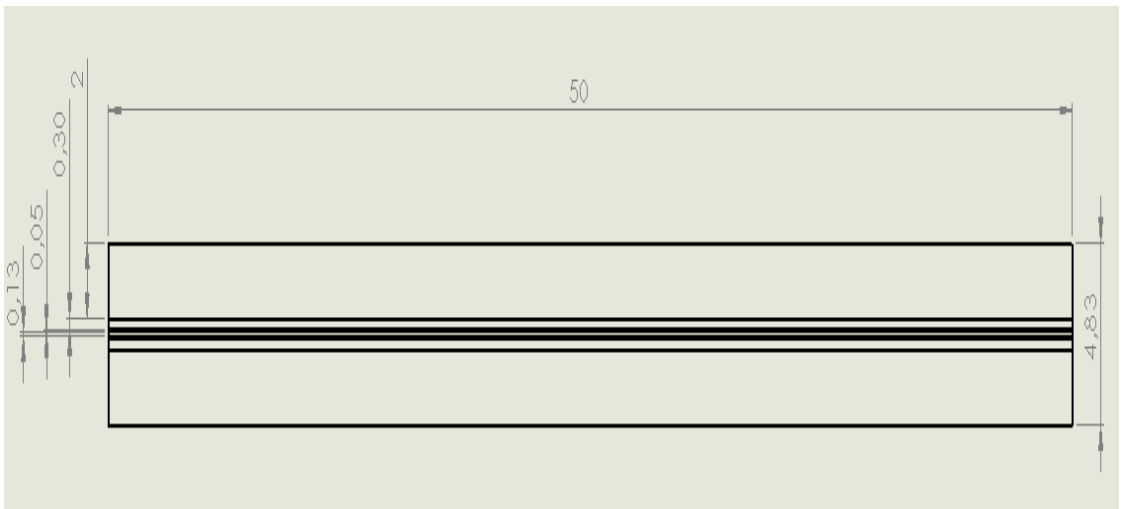
Şekil 4.2. Örnek bir PEM yakıt pilinin görünümü [3].

Bu çalışmaya çözüm alanı tek olacak şekilde önce düz gaz akış kanalı modeli ve daha sonra da kanal içerisinde yarıçapı artan şekilde silindirik engelleri olan yakıt hücresi modeli çizilerek başlanmıştır. Membran elektrot düzeneğinin (MEA) aktif yüzey alanı $1,5 \text{ cm}^2$ 'dir.

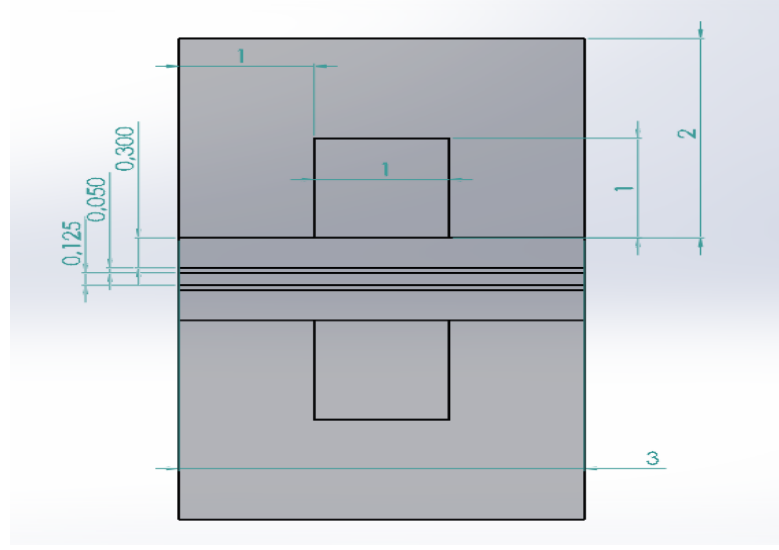
4.5. ENGELSİZ DÜZ GAZ AKIŞ KANALLI YAKIT PİLİ MODELİ

Yakıt pilinde kullanılan akışkanlar (H_2 , O_2) gaz kanallarından yakıt hücresine girerek sistemde dolaşır dışarı çıkarlar. Gaz kanalları; düz, serpantin, spirall v.b farklı yapıda olabilirler. Anot gaz kanalından, hidrojen bakımından zengin yakıt ve katot gaz kanalından ise, oksijen bakımından zengin olan akışkan girer ve sistemden çıkar.

Modelimizde kullandığımız yakıt pilinin gaz akış kanallarının en ve boy ölçüleri $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 'dir. Yakıt pili; membran, anot ve katot gaz difüzyon tabakaları, anot ve katot katalizör tabakalarından oluşup engelli gaz kanallı ve engelsiz gaz kanallı modeller olarak isimlendirilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan faydalanılarak yakıt pili modelimiz belirlenip SolidWorks programında tasarlanmıştır. Çalışmada aynı ölçülerde olacak şekilde yakıt hücresi belirlenmiştir. SolidWorks'te tasarlanan yakıt hücresi modeli teknik resim ölçüleri Şekil 4.3.'de yandan görünüm ve Şekil 4.4'de ise önden görünüm olacak şekilde geometrik ölçüleri milimetre cinsinden sunulmuştur.

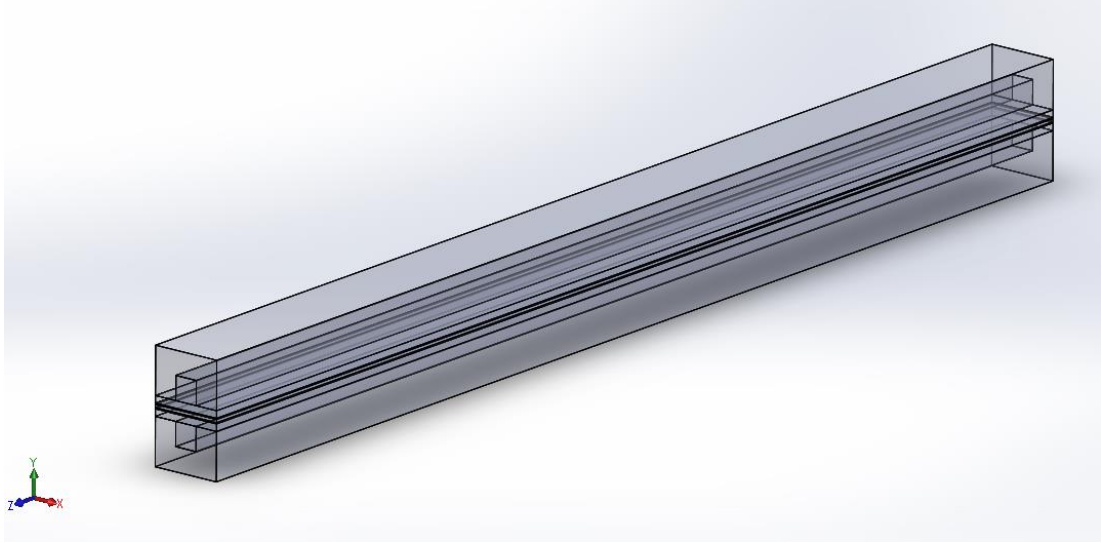


Şekil 4.3. Tasarlanan yakıt hücresi modelinin ölçüleri (yandan görünüm).



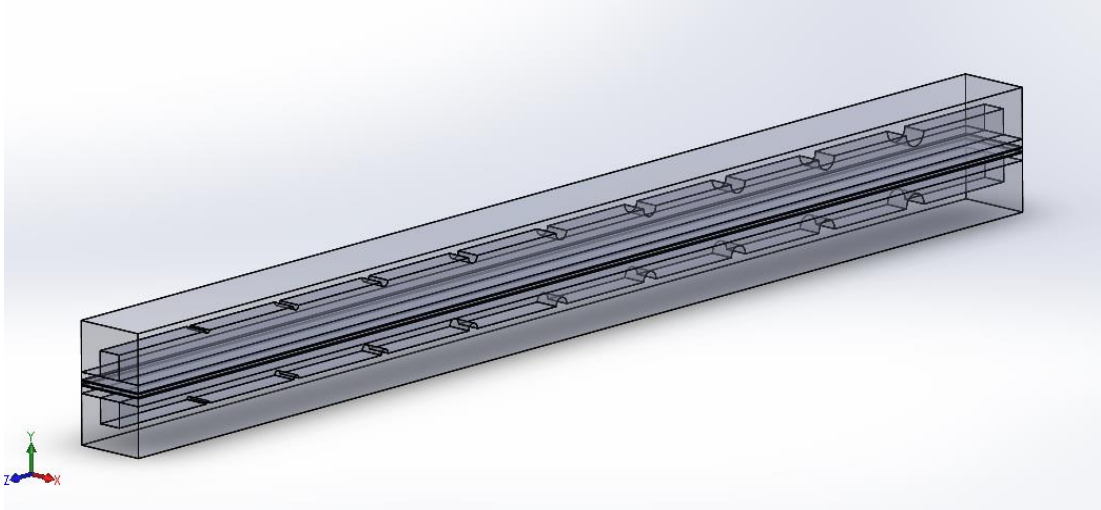
Şekil 4.4. Tasarlanan yakıt hücresi modelinin ölçüleri (önden görünüm).

Engelsiz akış kanalına sahip yakıt pili modeli geometrisinin SolidWorks'te oluşturulan üç boyutlu çizimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Üç boyutlu engelsiz yakıt hücresi modelinin izometrik görünümü.

Engelli akış kanalına sahip yakıt pili modeli geometrisinin SolidWorks'te oluşturulan üç boyutlu çizimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Üç boyutlu engelli yakıt hücresi modelinin izometrik görünümü.

Model tasarımı hazırlanırken dokuz adet hacim tasarlanmış ve montaj işleminden sonra tek parça yakıt pili olarak oluşturulmuştur. Tüm geometrilerin modellemesinde faydalanılan elektrokimyasal parametreler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Modelde kullanılan referans elektrokimyasal parametreler [31].

Parametreler	Değerler
Anot Referans Akım Yoğunluğu ($A.m^{-3}$)	$1,5 \times 10^9$
Anot Referans Mol Konsantrasyonu ($kmol.m^{-3}$)	1
Anot Konsantrasyon Üssü	0,5
Anot Transfer Katsayısı	2
Katot Referans Akım Yoğunluğu ($A.m^{-3}$)	4×10^6
Katot Referans Mol Konsantrasyonu ($kmol.m^{-3}$)	1
Katot Konsantrasyon Üssü	1
Katot Transfer Katsayısı	2
Açık Devre Voltajı (V)	0,95
Hidrojen Referans Diffüzivitesi ($m^2.s^{-1}$)	$9,15 \times 10^{-5}$
Oksijen Referans Diffüzivitesi ($m^2.s^{-1}$)	$2,20 \times 10^{-5}$
Su Referans Diffüzivitesi ($m^2.s^{-1}$)	$2,56 \times 10^{-5}$
Diğer Türlerin Referans Diffüzivitesi ($m^2.s^{-1}$)	3×10^{-5}

Proton aktaran membran diğer ismi ile polimer elektrolit membran (PEMFC) yakıt hücresini oluşturan parçaların fiziksel özellikleri FLUENT (Materials) programında malzeme özellikleri bölümüne Çizelge 4.3’te gösterilen değerler girilmiştir. Bu

değerler akım toplama plakası, katalizör tabakası, gaz-difüzyon tabakası ve membrandan oluşan tabakalar için katı malzemeler kısmından girilmiştir.

Çizelge 4.3. PEMFC tabakaların katı fiziksel özellikleri [31].

Fiziksel Özellik	CC	GDL	CL	M
Yoğunluk (kg m^{-3})	2100	450	1240	2000
Özgül ısı ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	1100	730	500	0,225
Isıl iletkenlik ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	20	1,674	70	0,24
Elektrik iletkenliği (Ohm.m^{-1})	10^4	1250	1250	1×10^{-16}
Gözeneklilik	-	0,5	0,5	-
Viskoz direnç (m^{-2})	-	1×10^{12}	1×10^{12}	-
Yüzey / hacim oranı (1/m)			200000	
Geçirgenlik (m^2)	-	$1,76 \times 10^{-11}$	1×10^{-14}	$1,13 \times 10^{-9}$
Eşdeğer ağırlık (kg kmol^{-1})	-	-	-	1100
Proton iletim katsayısı	-	-	-	1
Proton iletim üssü				1

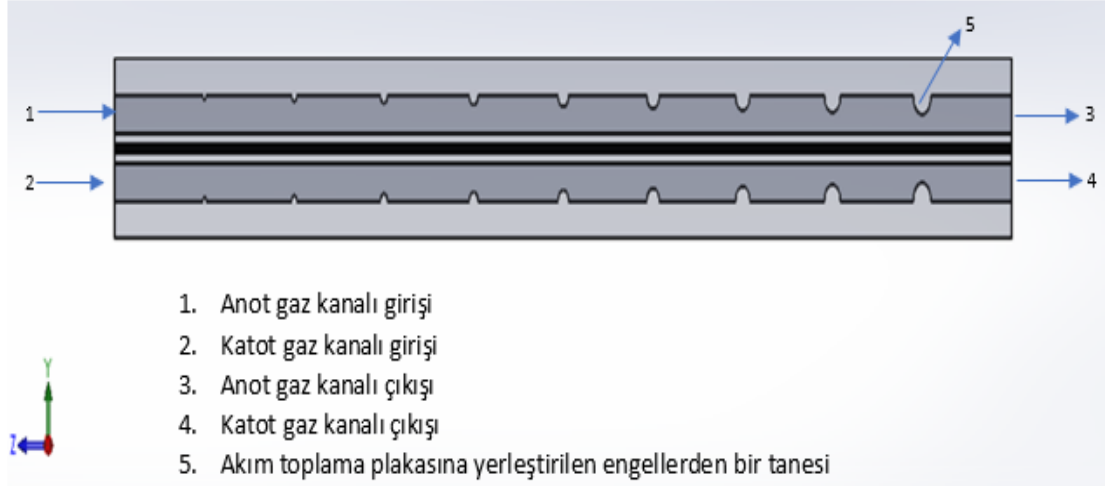
Modeldeki akışkanların fiziksel özellikleri Çizelge 4.4’da gösterilmiştir. Malzeme özellikleri tanımlama kısmından malzeme tipi akışkan belirlenip değerler girilmiştir.

Çizelge 4.4. Akışkanların fiziksel özellikleri [26].

Fiziksel Özellik	H ₂	O ₂	H ₂ O (Su buharı)
Özgül ısı ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	14283	919,31	2014
Isı iletim katsayısı ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0,1672	0,0246	0,0261
Viskozite ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	$8,411 \times 10^{-6}$	$1,919 \times 10^{-5}$	$1,34 \times 10^{-5}$
Molekül ağırlığı (kg kmol^{-1})	2,01594	31,9988	18,01534
Elektrik iletkenliği (Ohm.m^{-1})	1×10^{-16}	1×10^{-16}	1×10^{-16}

4.6. GAZ AKIŞ KANALLARINDA ENGEL BULUNAN YAKIT PİLİ MODELİ

Gaz akış kanallarında engel olmayan model hazırlandıktan sonra engelli model de çizilip çözüm için hazırlanmıştır. Bu engeller yarı çapı artan şekilde yarı silindirik engellerdir. Anot ve katot akım toplama plakaları üzerine yerleştirilmiştir. Akış kanallarında dokuz engel bulunan PEM yakıt pili modeli Şekil 4.7’de görülmektedir. Gaz giriş ve çıkış yönleri oklarla gösterilmiş olup, dokuz adet engel hem anot hemde katot kısımlarında akım plakaları üzerine yerleştirilmiştir. Engeller birbirine 5 mm olacak şekilde eşit mesafededir. Engel yarıçapları sırası ile soldan sağa doğru; $r = 0,1; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45$ ve $0,5$ mm’dir.



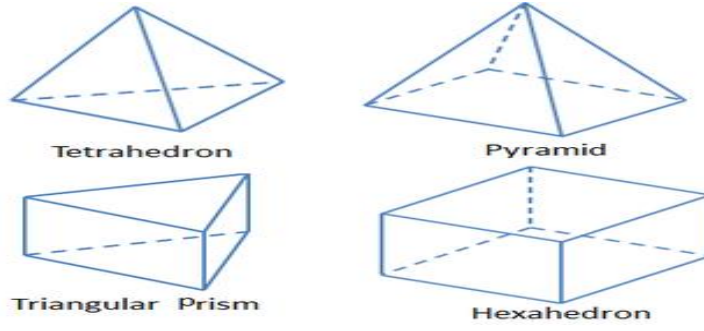
Şekil 4.7. Gaz akış kanallarında dokuz engel bulunan PEM yakıt pili modeli.

4.7. AĞ YAPISI

Yakıt hücresinin tüm boyutlarını doğru şekilde ortaya koyan yüksek kalitede hazırlanacak bir geometri, hesaplama ağının temeli olarak kullanılır. Yakıt hücrelerinin bilgisayar modellemesi, geometrinin daha küçük hacimli elemanlara bölünmesini gerektirir.

Simülasyonu tanımlayan sınır şartları geometrinin yüzeyinde tanımlanmalıdır. Belirli bir denklem grubuna karşılık gelen sayısal bir çözümün, sınır koşullarını sağlayan birden fazla çözüm üretmesi mümkündür. Bulunan çözümün gerçek yakıt hücresi davranışı ile uyumlu olması gerektiği bilinmelidir.

Hesaplamalı ağ oluşturmada (meshing) tüm geometrinin küçük elemanlara bölünmesi gerçekleştirilir. Üç boyutlu ağ, yüzey ve hacim elemanlarından oluşmaktadır. Yüzey elemanları üçgen veya dörtgen yapıdadır. Hacim elemanları ise ya tetrahedron yapılardan (piramitler) ya da heksahedron yapılardan (küpler) oluşur. Kafes ağ yönteminin belirlenmesi tamamen model gereksinime bağlıdır. Şekil 4.8’de ağ (mesh) çeşitleri görülmektedir.

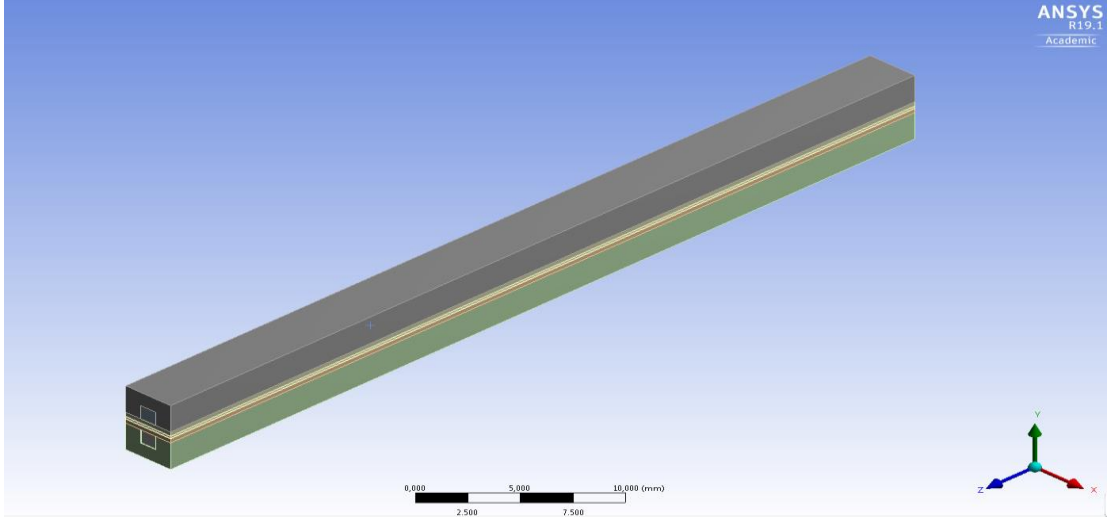


Şekil 4.8. Mesh tipleri [32].

Tetrahedron ve üçgen ağ yapılarının avantajları; çok esnek olmaları ve verilen bir geometriye uyumluluğunun kolay olmasıdır. Bu tür ağlar, nispeten basit mesh algoritmaları kullanarak geometrik karmaşıklığından bağımsız bir ağ oluşturabilirler. Fakat tetrahedronlar altı yüzlü hücrelere (heksahedral) kıyasla hacimleri temsil etmek için daha çok eleman gerektirebilir. Tetrahedral hücreler genellikle yüzey alanına göre çok fazla hacim içermeyen yüzeyler veya çok ince geometriler için kullanılır. Bu tür ağlar, aerodinamik cisimlerin yüzeylerinin analizinde yaygın olarak kullanılır. Heksa-mesh ağ yapısı tek tip ağ örgüsü (mesh) yapar. Çoğu araştırmacı, PEMFC'nin geometrisi düz olduğundan ağ yapısı olarak hekşa-mesh ağ yapısını kullanır.

ANSYS'te oluşturulan ağ (mesh) hücre sayısı, geometrinin detaylarına ve kullanılan simülasyon parametrelerinin türüne bağlıdır. Küçük özgün elemanların varlığı ve çok sayıda toplam eleman sayısı oluşumu uzun hesaplama sürelerini gerektirebilir. Kaba bir ağ kullanmak hesaplama sürelerini azaltabilir ancak yanlış simülasyon sonuçları üretebilir. Bu gibi nedenlerle ağ detayları ile hesaplama süresi arasındaki denge, ağ işlemi sırasında dikkatlice düşünülmelidir.

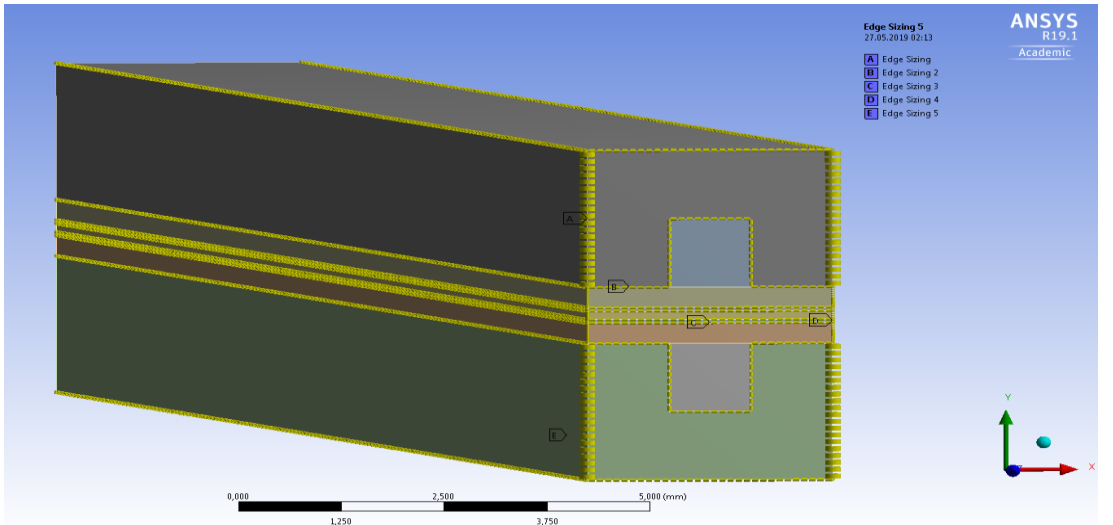
SolidWorks programında tasarlanan modelimiz Ansys Fluent programına aktarılarak çeşitli çözüm teknikleri ile simülasyona hazır hale getirilmiştir. Yakıt pilinin üç boyutlu (3-D) geometrisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. PEMFC'nin Ansys Fluent'te üç boyutlu (3-D) izometrik görünümü.

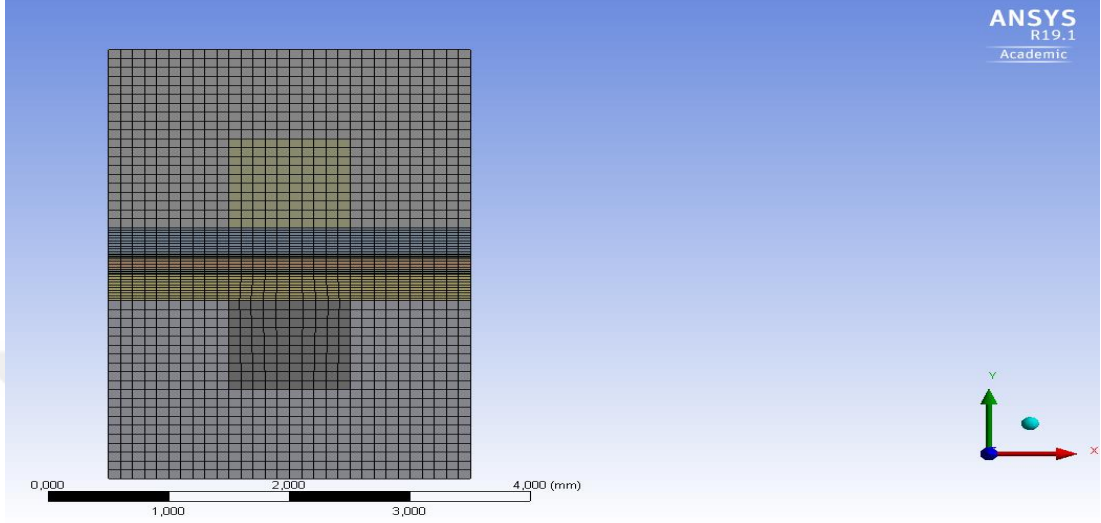
PEMFC'nin oluşturulmasından sonra ağ yapısı için birleştirilerek bir bütün haline getirilir. Anot ve katot akım toplayıcı kısımları hariç diğer tüm parçaların akışkan (fluid) olması gerekmektedir. Diğer tüm parçalar katı (solid) seçilir.

Bir sonraki adım ağ (mesh) örme ve ANSYS el kitabında kullanılan PEMFC'nin farklı yüzeylerini adlandırmadır. PEMFC için bütün parçalar düz olduğundan hekza-mesh tercih edilir. Uygun kenar boyutlandırmalar (edge sizing) belirlenir. Şekil 4.10.'da ise hazırlanan modelin hücelere bölünmesi gösterilmiştir.



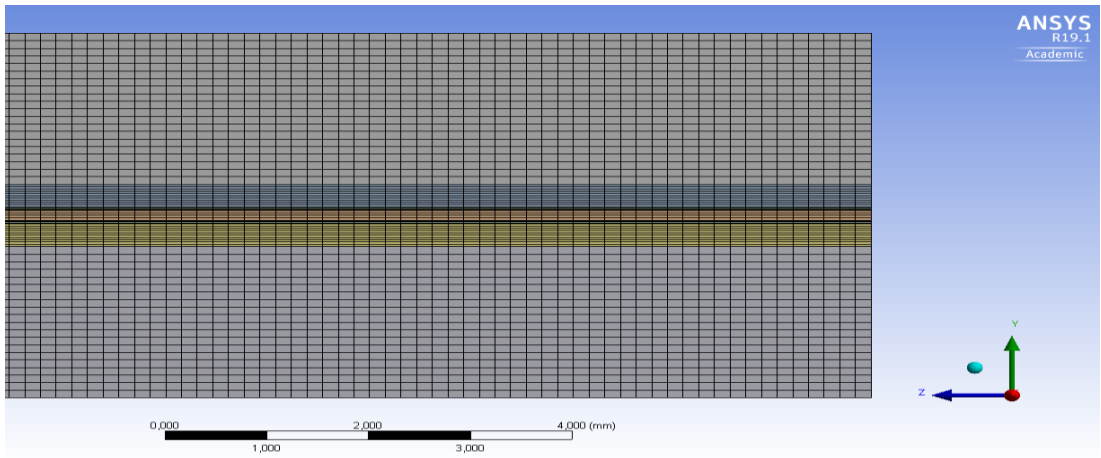
Şekil 4.10. Modelin hücelere bölünmesi.

İyi kalitede mesh oluşturmak için en-boy oranı (aspect ratio) ve ortogonal kalite (orthogonal quality) özellikleri kabul edilebilir aralıkta olmalıdır. Şekil 4.11’de yakıt hücresi için oluşturulan mesh yapısının önden görünümü gösterilmiştir.



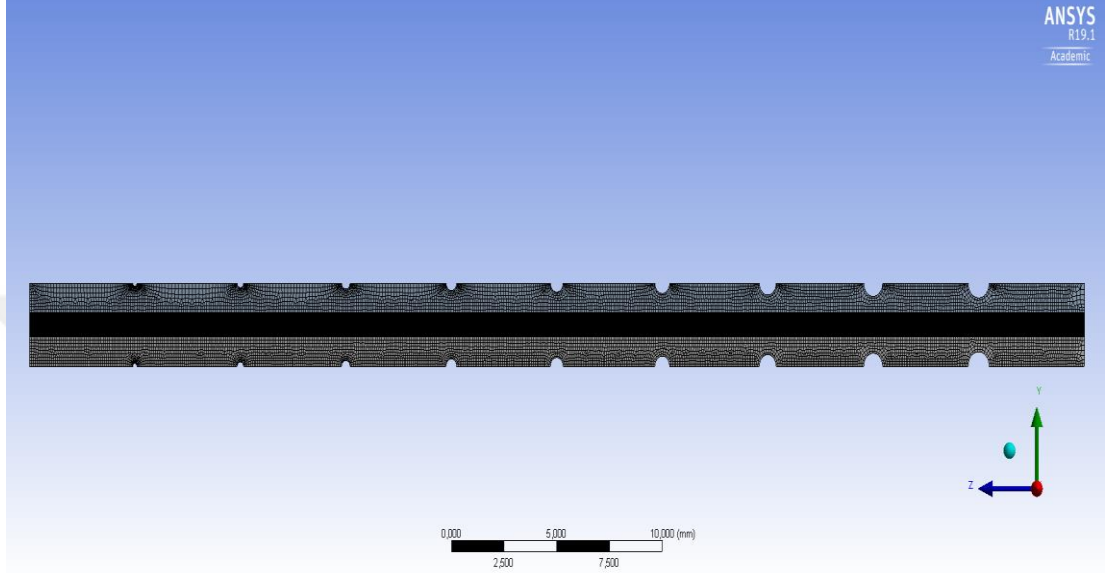
Şekil 4.11. PEMFC'de mesh oluşturma (önden görünüm).

Yakıt hücresinin mesh yapısı düzgün ve orantılı olmalıdır. Mesh elemanlarının şekli ve dağılımı otomatik mesh üretme algoritmaları ile oluşturulur. Uygun özellikte mesh yapısı yapılan çalışmadan daha net sonuç almada önemli etkiye sahiptir. Şekil 4.12’de ise oluşturduğumuz PEM yakıt hücresinin (PEMFC) yandan görünümü gösterilmektedir. Görüldüğü üzere eşit aralıklı muntazam bir görünüme sahiptir.



Şekil 4.12. PEMFC'de mesh oluşturma (yandan görünüm).

Yakıt hücresinde gaz kanalları içerisinde bulunan engeller için mesh düzenini ayarlamak engelsiz yakıt hücresi modeline göre engellerin yarı silindirik şekli nedeniyle daha uğraştırıcı olmuştur. En uygun mesh yapısı bulunana kadar birçok deneme yapılmıştır ve en uygun mesh oranlarına sahip modelimiz Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Engelli PEMFC'de mesh oluşturma (yandan görünüm).

Hazırlanan engelli ve engelsiz geometrilerin ağ yapısı için çözüm alanı farklı sayılarda elemanlara bölünerek bulunmuş ve çözümlere hazır hale getirilmiştir. Eleman sayısı kabul edilebilir en ideal değerler yakalanıncaya kadar denenip bulunmuştur. Engelsiz yakıt hücresi için çözüm alanı 702 000 elemana bölünmüştür. Engelli yakıt hücresi için çözüm alanı 2 275 636 elemana bölünmüştür. Engelli yakıt hücresi geometrisinin farklılığından dolayı çözüm alanı daha fazla elemana bölünmüştür.

4.8. SINIR ŞARTLARI

ANSYS'te modelimizin Mesh kısmında sınır şartlarına ait yüzeyler ve bu yüzeylerin sınır tipleri belirlenmiştir. Belirlenen sınır yüzeyleri ve sınır tiplerine ait değerler FLUENT programında PEMFC modülünde girilerek çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır.

Çalışmada kullanılan PEMFC modeline ait FLUENT programında tanımlanan sınır şartları Çizelge 4.5'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.5. PEMFC'nin sınır koşulları.

Yüzler	Sınır Şartları
Anot kanalının ön yüzü	inlet_a
Anot kanalının arka yüzü	outlet_a
Katot kanalının ön yüzü	inlet_c
Katot kanalının arka yüzü	outlet_c
Akım kollektörünün üst yüzeyi	terminal_a
Akım kollektörünün alt yüzeyi	terminal_c



BÖLÜM 5

ÇALIŞMA KOŞULLARI VE SONUÇLAR

Çalışmada ANSYS FLUENT PEMFC modülü kullanılarak tek hücreli PEM yakıt pili gaz akış kanalları içerisinde engel bulunmayan (engelsiz) ve engel bulunan (engelli) geometriler hazırlanıp bunların çözümleri Çizelge 5.1’de gösterilen farklı denemelerle yapılmıştır. Öncelikle anot ve katot gaz akış kanallarında engel olmayan yakıt pili modeline ait durumlar çözülmüştür. Analiz programında aşağıdaki çizelgede görüldüğü üzere Deneme-1, Deneme-2, Deneme-3 ve Deneme-4 durumları ile çözümlere ulaşılmış ve karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1. İncelenen denemelere ait parametreler.

Deneme	Engel tipi	Çalışma basıncı (kPa)	Çalışma sıcaklığı (K)
1	Engelsiz	200	353
2	Engelli	200	353
3	Engelsiz	200	323
4	Engelsiz	300	353

Standart basınç ve laminer akış düşünülerek çözüme ulaşılmıştır. Sonuçların yakınsaması için relaksasyon parametreleri, momentum için 0,3 ve basınç için 0,7 olarak belirlenmiştir.

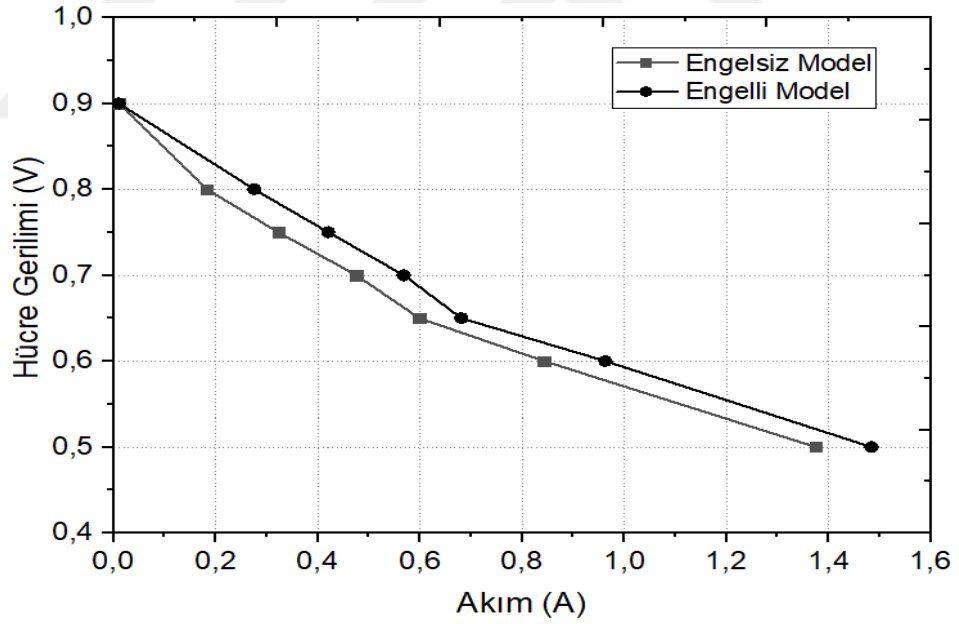
Denemeler farklı potansiyel farklarında çözüm tekrarlanarak akım yoğunluğunun potansiyel farkı ile değişimi ile tekrarlanmıştır. Bu polarizasyon eğrileri için yedi farklı potansiyel fark değeri (0,5; 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,9 V) kullanılmıştır.

5.1. ÇALIŞMA PARAMETRELERİ

5.1.1. Engel Tipi

PEM yakıt pilinin yapılan modellemesinde aşağıdaki çizelgede gösterilen değerler Deneme-1 ve Deneme-2 durumları uygulanarak hesaplanmıştır. Çalışma koşulları 200 kPa basınçta ve 80 °C (353 K) sıcaklıkta olan engelli ve engelsiz modellerin hücre geriliminin akım yoğunluğu ile değişimlerinin analiz sonuçları tek tek hesaplanmıştır.

Yakıt pilinde engel tipine göre çalışma basıncı ve sıcaklığı sabit tutulup farklı hücre voltajlarında elde edilen akımların çözüm sonuçları elde edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde ettiğimiz sayısal değerler ile akım-gerilim grafiği ise Şekil 5.1’de oluşturulmuştur. Elde ettiğimiz grafik literatürde oluşturulan grafiklerle paralellik göstermiştir.

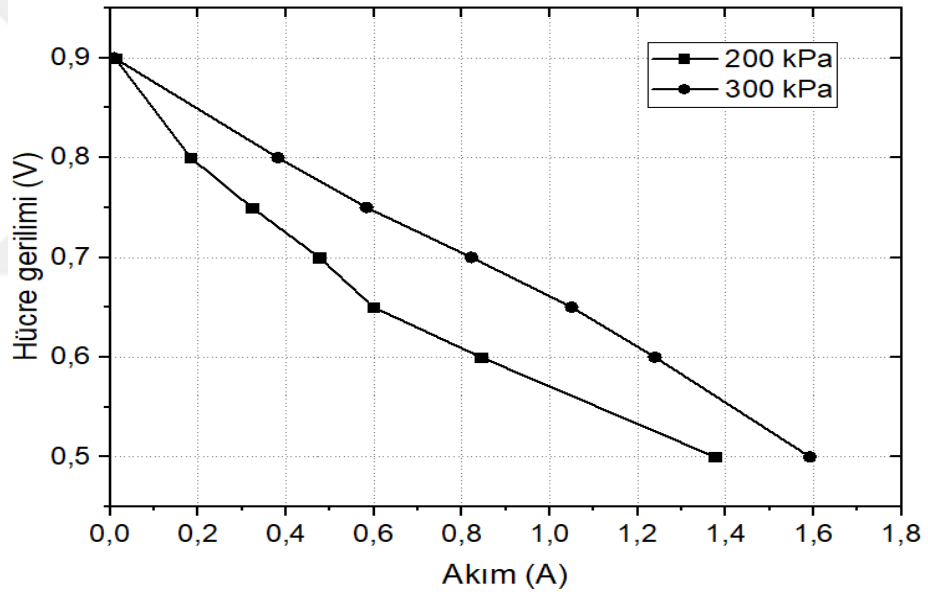


Şekil 5.1 Engelli ve engelsiz yakıt pilinin polarizasyon eğrisi (200 kPa, 353 K).

5.1.2. Çalışma Basıncı

Bu bölümde engelsiz model için çalışma sıcaklığı sabit tutulup basınç değerleri değiştirilerek sonuçlara ulaşılmıştır. PEM yakıt pilinde Deneme-1 ve Deneme-4 durumları uygulanmıştır. Sıcaklık değeri 80 °C'de (353 K) sabit tutulup 200 kPa ve 300 kPa basınç değerleri sırası ile girilerek hücre geriliminin akım yoğunluğu ile değişimlerinin analiz sonuçları hesaplanmıştır.

Akış kanallarında engel bulunmayan yakıt pilinde çalışma sıcaklığı sabit tutulup çalışma basıncı değiştirilerek farklı hücre voltajlarında elde edilen akımların çözüm sonuçlarından elde ettiğimiz akım-gerilim grafiği ise Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

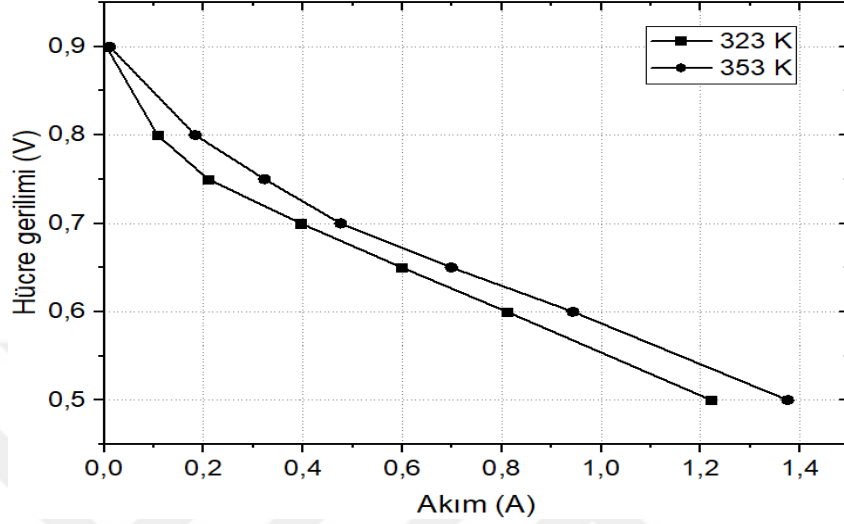


Şekil 5.2 Engelsiz yakıt pilinin 80 °C'de farklı basınçlarda polarizasyon eğrisi

5.1.3. Çalışma Sıcaklığı

Bu bölümde yine engelsiz model için çalışma basıncı sabit tutulup sıcaklık değerleri değiştirilerek sonuçlara ulaşılmıştır. PEM yakıt pilinde Deneme-1 ve Deneme-3 durumları uygulanmıştır. Basınç değeri 200 kPa basıncında sabit tutulup sıcaklık değerleri 50 °C ve 80 °C olarak girilerek hücre geriliminin akım yoğunluğu ile değişimlerinin analiz sonuçları hesaplanmıştır.

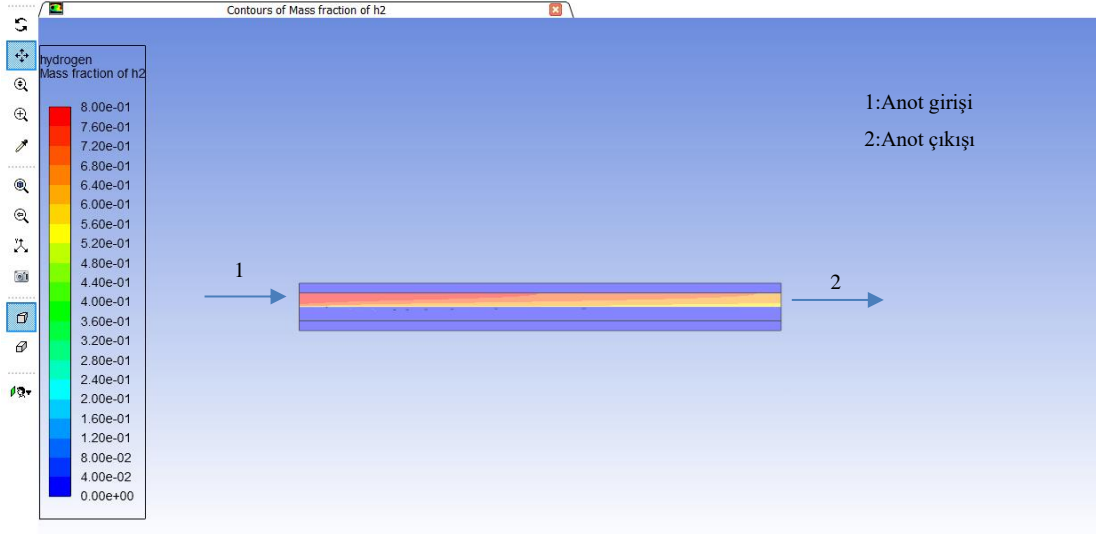
Akış kanallarında engel bulunmayan yakıt pilinde çalışma basıncı sabit tutulup çalışma sıcaklığı değiştirilerek farklı hücre voltajlarında elde edilen akımların çözüm sonuçlarından elde ettiğimiz akım-gerilim grafiği ise Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Engelsiz yakıt pilinin 200 kPa basıncında farklı sıcaklıklarda polarizasyon eğrisi

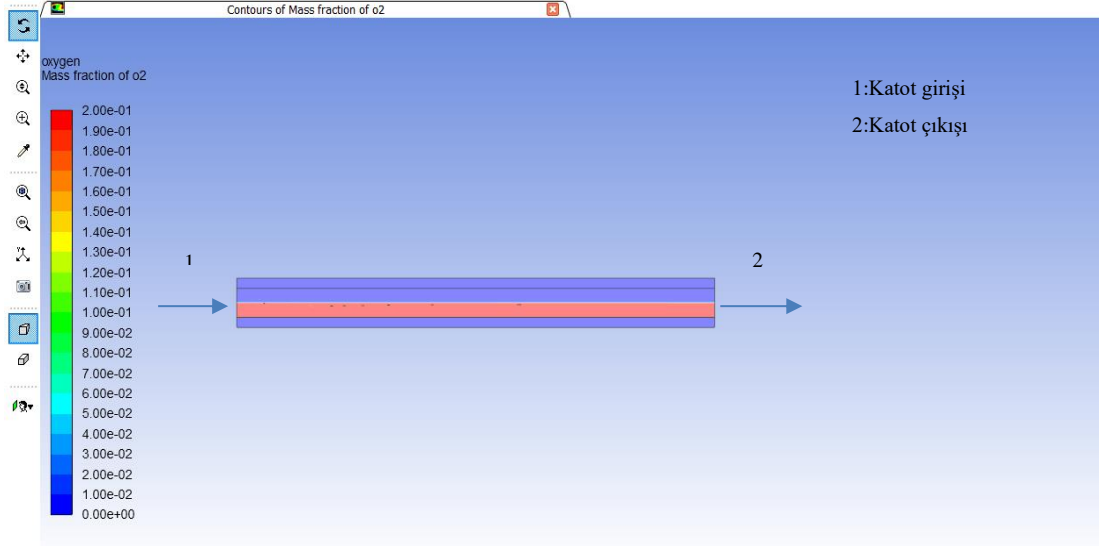
5.1.4. Kütle kesri dağılımları

Akış kanalında engel olmayan yakıt pili içindeki kütle kesirlerini gösteren dağılımlar Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de sunulmuştur. Şekil 5.4’de hidrojen gazının kütle kesri anot gaz akış kanalı boyunca 0,8-0,72 değerleri arasında değişmektedir. Hidrojen kütle kesri anot gaz kanalı girişinde 0,8 iken çıkışta anot gaz difüzyon tabakası civarında 0,72’ye düşmektedir. Hidrojen gazı yakıt pili içerisinde reaksiyona girdikçe konsantrasyonunun gaz akış kanalı çıkışına doğru azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.4. Hidrojen kütle kesrinin kanal boyunca değişimi.

Şekil 5.5’de ise oksijen gazının kütle kesri katot gaz akış kanalı boyunca 0,2 değeri civarında sabit kaldığı görülmüştür. Oksijen kütle kesri katot gaz kanalı girişinde 0,2 iken çıkışta katot gaz difüzyon tabakası civarında 0,19’a düşmektedir. Oksijen gazı yakıt pili içerisinde reaksiyona girdikçe konsantrasyonu gaz akış kanalı çıkışına doğru azaldığı görülmüştür.



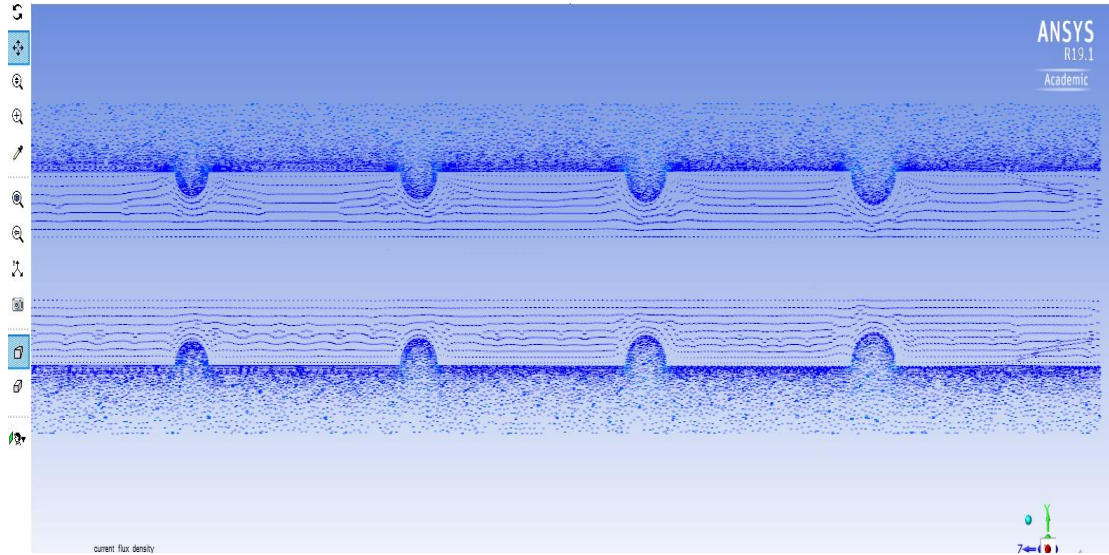
Şekil 5.5. Oksijen kütle kesrinin kanal boyunca değişimi.

5.1.5. Akım-Gerilim (Kutuplaşma) Eğrileri

Akım – Gerilim (I-V) kutuplaşma eğrisini hesaplamak için yakıt hücresi katodunun elektrik potansiyel değeri değiştirilir. Açık devre voltajına yakın bir voltajdan başlayarak ve yavaş yavaş azaltarak değeri her değiştirdiğimizde çözüm birleştirilir ve istenen grafik değerlerine ulaşılır.

Engelsiz ve dokuz engelli yakıt pili modelleriyle yapılan analizler sonucunda elde edilen polarizasyon eğrileri aşağıda çıkarılmıştır. Farklı hücre voltaj değerleri girilerek çözümler yapılmıştır. Hücre voltajı değeri 0,50 V, 0,60 V, 0,65 V, 0,70 V, 0,75 V, 0,80 V ve 0,90 V değerleri sırası ile girilerek çözümler elde edilmiştir. Herbir hücre voltajına karşılık gelen akım yoğunluğu değerleri analizler sonucunda elde edilmiştir.

Şekil 5.6' te ise anot ve katot kısımlarındaki akışın engellere çarpması ile ortaya çıkan simülasyon vektörler halinde gösterilmiştir. Engellerin yarı silindirik ve artan boyutlardaki şeklienden kaynaklanan durumdan dolayı engellere çarpıp akan gazlar sistemin performansını artıracak yönde davranış göstermiştir.



Şekil 5.6. Engelli akış kanallarındaki gazların hız vektörü olarak görünümü.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmamızda ANSYS FLUENT PEMFC modülü kullanılarak çözümler elde edilmiştir. Proton aktaran yakıt pili gaz akış kanallarında engel bulunması durumunda verimlilik analizi hesaplanmıştır. Hazırlanan geometrilerin maksimum akım yoğunluklarındaki değişime bakıldığında dokuz engelli modelin engelsiz modelden daha fazla akım yoğunluğu elde ettiği görülmüştür.

Çalışmamızın ilk aşamasında gaz akış kanallarında engel bulunan yakıt pili modelimizde engel yarıçapları ve dizilimleri özgün olarak belirlenmiştir. Şekil 5.1' de gösterilen modelimizde 200 kPa basınçta 80 °C sıcaklığında 0,5 V gerilim değeri baz alındığında akım değerleri kıyaslanmış ve sonuç olarak; gaz akış kanallarında engeller olan modelin engelsiz modele göre yaklaşık %7,2 oranında daha fazla verimli olduğu hesaplanmıştır. Çalışmamızda farklı basınçlarda (200 kPa ve 300 kPa) elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, basıncın artması ile akım değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı sıcaklıklarda (50 °C, 80 °C) elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında düşük sıcaklıkta akım değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

İleriki zamanlarda yapılacak çalışmalarda yakıt pili gaz akış kanallarına farklı boyut, şekil ve dizilimlerde engeller konulabilir. Yakıt pili performansını artıracak en uygun tipte anot ve katot gaz akış kanalı geometrileri bulunabilir. Yakıt pilinin anot ve katot gaz kanalları dışındaki diğer bileşenlerinin geometrik özellikleri (boyu, eni, uzunluğu vs.) değiştirilerek tasarım farklılıklarının performans üzerine etkileri araştırılabilir. Ayrıca yakıt pili bileşenlerinin malzeme özellikleri değiştirilip analiz programlarında incelemeler yapılarak performansı daha da artıracak en verimli malzeme türleri seçilebilir.

KAYNAKLAR

1. Kaya, D., Öztürk, H. H. ve Kayfeci, M. "Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojisi", Umuttepe Yayınları, İstanbul, VI (2017).
2. Bıyıkoğlu, A., Alpat, Ö.C., "Parametric Study of A Single Cell Proton Exchange Membrane Fuel Cell For A Bundle of Straight Gas Channels", 24 (4): 883–899 (2011).
3. Alpat, Ö. C., "Düz Kanallı Proton Aktaran Membran Yakıt Hücresinin Sayısal Çözümü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs", 1-97, (2007).
4. Dutta, S., Shimpalee, S., Van Zee, J. W., "Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells" , *Journal of Applied Electrochemistry*, 30: 135-146 (2000).
5. Ju, H., Wang, C.Y., "Experimental validation of a PEM fuel cell model by current distribution data", *Journal of The Electrochemical Society*, 151 (11): A1954-A1960 (2004).
6. Kuo, J.K., Yen, T.S., Chen, C.K., "Improvement of performance of gas flow channel in PEM fuel cells", *Energy Conversion and Management*, 49: 2776-2787 (2008).
7. Wang, X.D., Duan, Y.Y., Yan, W.M., Peng, X.F., "Local transport phenomena and cell performance of PEM fuel cells with various serpentine flow field designs", *Journal of Power Sources*, 175: (397-407) (2008).
8. Ziogou, C., Voutetakis, S., Papadopoulou, S., and Georgiadis, M. C., "Modeling, simulation and experimental validation of a PEM fuel cell system", *Computers And Chemical Engineering*, 35 (9): 1886–1900 (2011).
9. Liu, H. C., Yan, W. M., Soong, C. Y., and Chen, F., "Effects of baffle-blocked flow channel on reactant transport and cell performance of a proton exchange membrane fuel cell", *Journal Of Power Sources*, 142 (1–2): 125–133 (2005).
10. Obayopo, S. O. and Meyer, J. P., "Modelling and optimization of reactant gas transport in a PEM fuel cell with a transverse pin fin insert in channel flow", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 37 (13): 10286–10298 (2012).
11. Kuo, J., Yen, T., and Chen, C., "Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels", 177: 96–103 (2008).

12. Biyikoglu, A., "Enhancement of cell characteristics via baffle blocks in a proton exchange membrane fuel cell", 37 (April): 207–222 (2012).
13. Soong, C. Y., Yan, W. M., Tseng, C. Y., Liu, H. C., Chen, F., and Chu, H. S., "Analysis of reactant gas transport in a PEM fuel cell with partially blocked fuel flow channels", 143: 36–47 (2005).
14. Ekiz, A., Camcı, T., Türkmen, G., Sankır, M., Uslu, S., Baker, D.K., Ağar, E., "PEM tipi yakıt pilleri için çift kutuplu akış plakalarının modellenmesi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 26 (3): 591-605 (2011).
15. Öztoprak, H., "Akış kanalı içerisindeki engelleyici blokların proton aktaran membran yakıt hücresi karakteristiklerine etkisi", Y.Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-114 (2007).
16. Han, S. H., Choi, N. H., and Choi, Y. D., "Simulation and experimental analysis on the performance of PEM fuel cell by the wave-like surface design at the cathode channel", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 39 (6): 2628–2638 (2014).
17. Yang, Y., Tsai, K., and Chen, C., "The Effects of the PEM Fuel Cell Performance with the Waved Flow Channels", 2013: (2013).
18. Hashemi, F., Rowshanzamir, S., and Rezakazemi, M., "CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields", *Mathematical And Computer Modelling*, 55 (3–4): 1540–1557 (2012).
19. Byun, S. J., Wang, Z. H., Son, J., Kwak, D. K., and Kwon, Y. C., "Experimental study on improvement of performance by wave form cathode channels in a PEM fuel cell", *Energies*, 11 (2): (2018).
20. Heidary, H., Kermani, M. J., Advani, S. G., and Prasad, A. K., "ScienceDirect Experimental investigation of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells", *International Journal Of Hydrogen Energy*, 41 (16): 6885–6893 (2016).
21. Virginia, W., "Fuel Cell Handbook", (November): (2002).
22. Das, D. and Veziroä, T. N., "Hydrogen production by biological processes : a survey of literature", 26: 13–28 (2001).
23. Şenol, R., Üçgöl, İ. ve Acar, M. "Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlarda Uygulanabilirliğinin İncelenmesi", 563: 37–50 (2012).
24. Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F. "Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pilleri", (2006).
25. Aydın, M., "Pem yakıt pilininin iki boyutlu modellemesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, (2007).

26. Pourmahmoud, N., Rezazadeh, S., Mirzaee, I., and Faed, S. M., "A computational study of a three-dimensional proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with conventional and deflected membrane electrode assembly", *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 26 (9): 2959–2968 (2012).
27. Wu, H., "Mathematical Modeling of Transient Transport Phenomena in PEM Fuel Cells", Doktora Tezi, University of Waterloo, Canada, 3-6(2009).
28. Barbir, F., "PEM fuel cells: theory and practice", Elsevier, USA, 1-16, 33-61 (2005).
29. Hoogers, G., "Fuel Cell Technology Handbook", CRC Press, New York, 13-17, 88-91 (2003).
30. Yiginsu, B., "Modeling and Analysis of Flow and Heat Transfer in A Large PEM Fuel Cell Suitable for Automotive Applications", Master Thesis, Sabanci University, İstanbul, 36 (2015).
31. Bilgili, M., Bosomoiu, M., and Tsotridis, G., " Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions", *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (5): 2303–2311 (2014).
32. İnternet: <http://www.wikipedia.org>, Erişim tarihi: 15.03.2019

ÖZGEÇMİŞ

Yakup DAŞDEMİRLİ 1992 yılında Çorum'da doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Mühendisliği Programı'nda öğrenime başlayıp 2015 yılında mezun oldu. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Beşbinevler Cumhuriyet Mah. 48. Sok. No:17/17 Merkez / KARABÜK

Tel : 0537 218 55 19

E-posta : yakupdasdemirli@gmail.com