

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE TASARIM VE
İŞLETME PARAMETRELERİNİN HÜCRE
PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pelin MERAL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İmdat TAYMAZ

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE TASARIM VE
İŞLETME PARAMETRELERİNİN HÜCRE
PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

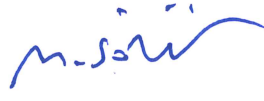
Pelin MERAL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 27.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr.
İmdat TAYMAZ
Jüri Başkanı**



**Prof. Dr.
Nedim SÖZBİR
Üye**



**Prof. Dr.
Cenk ÇELİK
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Pelin MERAL
27.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. İmdat TAYMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında özellikle analizlerim ve literatür çalışmalarımda benden akademik desteğini esirgemeyen her zaman bana inanan değerli hocam Dr. Elif EKER KAHVECİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük katkısı olan, eğitim hayatım boyunca hem öğretmenim hem babam olmuş merhum dedem öğretmen İbrahim Hakkı MERAL'e, maddi, manevi her türlü desteğini esirgememiş ve sabırla tezimi bitirmemi bekleyen çok kıymetli annem Şükran MERAL ve babam Oktay MERAL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	4
BÖLÜM 3.	
YAKIT HÜCRELERİ	9
3.1. Yakıt Hücresi Nedir?	9
3.2. Yakıt Hücresinin Tarihçesi	10
3.3. Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi.....	13
3.4. Yakıt Hücresi Çeşitleri	15
3.4.1. Fosforik asit yakıt hücresi (FAYH)	16
3.4.2. Katı oksitli yakıt hücresi (KOYH)	16
3.4.3. Erimiş karbonat yakıt hücresi (EKYH).....	17
3.4.4. Alkali yakıt hücresi (AYH).....	19
3.4.5. Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH).....	20
3.4.6. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi (PEMYH)	20

3.5. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMYH).....	21
3.5.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt pilinin bileşenleri	21
3.5.1.1. Polimer elektrolit membran	22
3.5.1.2. Katalizör tabakası	23
3.5.1.3. Gaz difüzyon tabakası.....	24
3.5.1.4. Bipolar plakalar	25
3.5.1.5. Akım toplayıcı plaka.....	26
3.5.1.6. Son plaka	26
3.5.2. PEM yakıt hücresinin avantajları ve dezavantajları.....	27
3.5.3. PEM yakıt hücresinin temel kimyası ve termodinamiği	28
3.5.3.1. Temel reaksiyonlar.....	28
3.5.3.2. Reaksiyon ısısı	28
3.5.3.3. Teorik elektriksel iş.....	29
3.5.3.4. Teorik yakıt pili potansiyeli	30
3.5.3.5. Sıcaklığın etkisi	31
3.5.3.6. Basıncın etkisi.....	31
3.5.3.7. Teorik yakıt hücresi verimi	32
3.5.3.8. Yakıt hücresinde kayıplar.....	33
 BÖLÜM 4.	
BİPOLAR PLAKALAR	35
4.1. Bipolar Plakaların Üretildiği Malzemeler.....	36
4.2. Bipolar Plakaların Akış Alan Tipleri.....	39
4.3. Bipolar Plakalar Üretim Yöntemleri	41
 BÖLÜM 5.	
SAYISAL ÇALIŞMA	45
5.1. Tez Çalışmasının Adımları.....	45
5.2. Yakıt Hücresinin Fiziksel ve İşletme Parametreleri.....	46
5.3. Yakıt hücresinin Ağ Yapısı	49
5.4. Yakıt Hücresi Sınır Şartları	51

BÖLÜM 6.

TARTIŞMA VE SONUÇLAR	54
6.1. İterasyon Sayısı Bağımsızlık Çalışması.....	54
6.2. Polarizasyon Eğrileri.....	56
6.3. Çalışma Basıncının Etkisi	57
6.4. Çalışma Sıcaklığının Etkisi	58
6.5. Anot Nemliliğinin Etkisi.....	59
6.6. Basınç Dağılımı	64
6.7. Sıcaklık Dağılımı	65
6.8. Akım Yoğunluğu Dağılımı.....	65
6.9. Hız Dağılımları	66
6.10.H ₂ ve O ₂ Dağılımı.....	67
6.11. Su Tutma Kapasitesi.....	68
6.12. İki Kanalında Engel Bulunan Model ile Karşılaştırma.....	69

BÖLÜM 7.

SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKÇA	75
ÖZGEÇMİŞ	80

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AYH	: Alkali yakıt hücresi
BCGSTAB	: Eşlenik gradyan stabilize yöntemi (bi-conjugate gradient stabilized method)
C_B	: Reaktan bulk konsantrasyonu
C_S	: Katalizör yüzeyinde reaktan konsantrasyonu
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DMYH	: Doğrudan metanol yakıt hücresi
E	: Potansiyel
EKYH	: Erimiş karbonat yakıt hücresi
F	: Faraday Sabiti
FAYH	: Fosforik asit yakıt hücresi
h_f	: Sıvı Oluşum Isısı
i_o	: değişim akım yoğunluğu
KOYH	: Katı oksitli yakıt hücresi
MEM	: Membran Elektrot Montajı
n	: Molekülde bulunan elektronların sayısı
N_{Avg}	: her moldeki moleküllerin sayısı
PEM	: Polimer Elektrolit Membran
PEMYH	: Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi
Ppm	: Milyonda bir çözelti derişimi
R_i	: toplam hücre iç direnci
$R_{i,c}$	: temas direnci
$R_{i,e}$	: elektronik direnç

$R_{i,i}$	: iyonik direnç
s_f	: Sıvı değerdeki entropi
T	: Sıcaklık
V_m	: molar hacim
W_{el}	: Elektriksel iş
q	: Yük
q_{el}	: bir elektron yükü
ΔG	: Gibbs serbest enerji değişimi
ΔH	: Entalpi Değişimi
ΔS	: Entropi Değişimi
$\propto$	: reaksiyon alanı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yakıt hücresinin genel konsepti.....	2
Şekil 3.1. Yakıt hücresinin tek adımda yakıttan DC akımı üretmesi	9
Şekil 3.2. W. Grove' un ürettiği yakıt pili [35]	10
Şekil 3.3. Francis Bacon' un icat ettiği alkali yakıt hücresi: [1].....	11
Şekil 3.4. Apollo yakıt hücresi [1]	11
Şekil 3.5. PC1401 - PEM yakıt hücrelerinin kullanıldığı denizaltı [1].....	12
Şekil 3.6. Yakıt hücresiyle çalıştırılan ticari arabalar (a)Mercedes F-Cell (2005) (b)Honda FCX Clarity (2007)	12
Şekil 3.7. Yakıt hücresi yapısı	13
Şekil 3.8. Fosforik asit yakıt hücresi çalışma şeması.....	16
Şekil 3.9. Katı Oksit Yakıt Hücresi Çalışma şeması.....	17
Şekil 3.10. Erimiş Karbonat Yakıt Pili Çalışma şeması.....	18
Şekil 3.13. Alkali Yakıt Hücresi Çalışma şeması	19
Şekil 3.14. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi Çalışma şeması.....	20
Şekil 3.13. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi Çalışma şeması.....	21
Şekil 3.14. PEM yakıt hücresinin bileşenleri [42].	22
Şekil 3.17. Nafion'un Kimyasal Yapısı [43].	23
Şekil 3.18. Platin Katalizörün TEM Mikroskop Görüntüsü [46].....	24
Şekil 3.17. Gaz Difüzyon Tabakasının Karbon Kağıt Yapısı [47].	25
Şekil 3.18. Yakıt Hücresi Elektrotunda gaz, elektron ve proton taşınımı [48].	25
Şekil 3.19. Yakıt Hücresi Polarizasyon eğrisi [1].	33
Şekil 4.1. Metal Kaplı Bipolar Plaka (24 kg, 33 kW PEM yakıt hücresi) [50].....	35
Şekil 4.2. Bipolar Plakalar Malzeme Sınıflandırması [51].	36
Şekil 4.3. Bipolar Tabaka Akış Bölgelerinin Sınıflandırması [54].....	40
Şekil 4.4. Bipolar Plakalar Üretim Teknikleri Sınıflandırması [54].	42
Şekil 5.1. Modelleme Adımları	45

Şekil 5.2. Yakıt Hücresinin Tabakaları	46
Şekil 5.3. Yakıt Hücresi Fiziksel Model Geometrik Ölçüleri	47
Şekil 5.4. Parametrelerin ANSYS Görüntüsü	48
Şekil 5.5. Yakıt Hücresi Ağ Yapısı ANSYS Görüntüsü	50
Şekil 5.6. Engelli Akım Toplayıcı Kanal Ağ Yapısı ANSYS Görüntüsü	51
Şekil 5.7. FLUENT sınır şartları görüntüsü	52
Şekil 5.8. FLUENT Katot Voltaj Girdi Görseli	53
Şekil 6.1. 0,65 V' da Akım Yoğunluğunun İterasyon Sayısı ile Değişimi	54
Şekil 6.2. ANSYS İteasyonla Değişim Görüntüsü	55
Şekil 6.3. Farklı pil potansiyellerinde elde edilen akım yoğunluğu polarizasyon eğrileri	56
Şekil 6.4. Farklı Akım Yoğunluklarında Elde Edilen Güç Polarizasyon Eğrileri ...	57
Şekil 6.5. Farklı Basınçlarda Elde Edilen Akım Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri	57
Şekil 6.6. Farklı Basınçlarda Elde Edilen Güç Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri...	57
Şekil 6.7. Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Akım Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri	58
Şekil 6.8. Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Güç Polarizasyon Eğrileri	59
Şekil 6.9. z= -25,-10,0,10,25 mm Kesitlerinde Basınç Dağılımı	61
Şekil 6.10. z= -25,-10,0,10,25 mm ve x= -1,5, 1,5 mm Kesitlerinde Basınç Dağılımı	61
Şekil 6.11. z= -25,-10,0,10,25 mm Kesitlerinde Sıcaklık Dağılımı	62
Şekil 6.12. z= -25,-10,0,10,25 mm Kesitlerinde Akım Yoğunluğu Dağılımı	63
Şekil 6.13. Hız Çizgileri	63
Şekil 6.14. z= -25,-10,0,10,25 mm ve x=-1,5,0,1,5 Kesitlerinde H ₂ Mol Kesri Dağılımı	64
Şekil 6.15. z= -25,-10,0,10,25 mm ve x=-1,5,0,1,5 Kesitlerinde O ₂ Mol Kesri Dağılımı	64
Şekil 6.16. z= -25,-10,0,10,25 mm Kesitlerinde H ₂ O Kütle Kesri Dağılımı	65
Şekil 6.17. z= -25,-10,0,10,25 mm ve x=-1,5,0,1,5 Kesitlerinde H ₂ O Su Kütle Kesri Dağılımı	66
Şekil 6.18. 0,65 V' da iki kanalda engelli, tek kanalda engelli ve engelsiz hücrelerin karşılaştırmalı V-I Polarizasyon Eğrileri	66

Şekil 6.19. 0,65 V’da iki kanalda engelli, tek kanalda engelli ve engelsiz hücrelerin karşılaştırmalı P-I Polarizasyon Eğrileri.....	67
Şekil 6.20. z= -25,-10,0,10,25 mm ve x=-1,5, 0, 1,5 mm Kesitlerinde O ₂ Mol Kesri Dağılımı	68
Şekil 6.21. z= -25,-10,0,10,25 mm Kesitlerinde H ₂ O Kütle Kesri Dağılımı	68
Şekil 6.22. z= -25,-10,0,10,25 mm ve x=-1,5, 0, 1,5 mm Kesitlerinde H ₂ O Mol Kesri Dağılımı	69
Şekil 6.23. 0,65 V’da iki kanalda engelli, tek kanalda engelli ve engelsiz hücrelerin karşılaştırmalı V-I Polarizasyon Eğrileri.....	70
Şekil 6.24. 0,65 V’ da iki kanalda engelli, tek kanalda engelli ve engelsiz hücrelerin karşılaştırmalı P-I Polarizasyon Eğrileri.....	71

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri.....	15
Tablo 3.2. Yakıt pili türüne göre bileşenler ve işletim parametreleri	15
Tablo 3.3. Ürünlerin reaktanların oluşum entalpileri ve entropileri [1].....	30
Tablo 4.1. Bazı Metalik Maddelerin Korozyon Oranları [52]	38
Tablo 5.1. Yakıt Hücresini Oluşturan Hacimlerin İsimleri ve Özellikleri	47
Tablo 5.2. Yakıt Hücresinin Tasarım Parametreleri	47
Tablo 5.3. PEM Yakıt Hücresi Elektrokimyasal Parametreler [56].....	48
Tablo 5.4. Relaksasyon Değerleri	49
Tablo 5.5. Ağ Yapısı Sayısal Değerleri	51
Tablo 5.6. Sınır Bölge Şartları	51
Tablo 6.1. Anot Nemliliği Giriş Parametreleri.....	60
Tablo 6.2. Anot Nemliliği Çalışma Parametreleri	60

ÖZET

Anahtar kelimeler: PEM yakıt hücresi, Bipolar plaka, Akım Yoğunluğu

Yapılan bu tez çalışmasında, tek kanallı bir hücreden oluşan 1,5 cm^2 aktif alana sahip PEM yakıt hücresinde, anot akım toplayıcı plakaya 3 farklı sayıda engel yerleştirilerek geometri oluşturulmuş ve ANSYS Fluent 17.0 modülü kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Temel kimyasal ve termodinamik özellikler göz önünde bulundurularak oluşturulan tek kanallı hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli için engel ölçüleri sabit kalacak şekilde sınır şartları ve işletme parametreleri tanımlanmıştır.

Yakınsamanın elde edildiği iterasyon sayısında yapılan çözümleme sonuçlarına göre farklı pil potansiyelleri için akım yoğunluğu ve güç polarizasyon eğrileri; basınç, sıcaklık, hız dağılım grafikleri ve çalışma basıncının etkilerini gösteren eğriler elde edilmiştir. Değişimleri gösteren polarizasyon eğrileri temel alınarak yakıt hücresi için optimum işletme parametreleri belirlenmiştir. Sonuçlar engelsiz tek kanallı yakıt hücresi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre engellerin hücre modelinde sadece tek tarafta olmasından dolayı çok büyük farklar oluşmamış olup en iyi akım ve güç yoğunluğu 2 engelli yakıt hücresinde elde edilmiştir. Optimum pil potansiyeli 0,65V olarak belirlenmiş olup bu değerde 0,1743 A/cm^2 akım ve 0,1221 W/cm^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Akışın engeller koyularak engellenmesi diğerlerine kıyasla daha fazla verim elde edilmesini sağlamıştır fakat engellerin arttırılması akış alanında sınırlamalar oluşturmuş ve en çok engel sayısında en az verim elde edilmiştir.

SUMMARY

Keywords: PEM fuel cell, Bipolar plate, Current Density

In this thesis, in the PEM fuel cell which has $1,5 \text{ cm}^2$ active area and consists of a single channel cell, geometry was created by placing 3 different number of obstacles on the anode current collector plate and analysis was performed by using ANSYS Fluent 17.0 module.

The boundary conditions and operating parameters have been defined for the single channel computational fluid dynamics model which is formed regarding basic chemical and thermodynamic properties.

According to the analysis results of the iteration number in which convergence is obtained, current concentration and power polarization curves for different cell voltages; concentration graphics of pressure, temperature and velocity and curves showing the effects of working pressure have been obtained. The optimum operating parameters for the fuel cell were determined based on the polarization curves indicating the changes. The results were compared with unobstructed single channel fuel cell results.

According to the analysis results, there were no significant differences due to the fact that the obstacles were only on one side in the cell model, and the best current and power concentration were obtained in fuel cells with 2 blockage. Optimum battery potential is set at 0.65V and 0.11741 A / cm^2 current concentration and 0.1221 W / cm^2 power concentration were obtained at this value. Preventing the flow by blockages has increased efficiency compared to others, but increasing the blockage number has created limitations in the flow area and the lowest efficiency was obtained with maximum number of blockages.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Enerji, günümüzde önemli ve başta gelen tüketim maddelerinden biridir. Uygarlık düzeyi ve ekonominin temel göstergesi olan enerji talebi sürekli artmaktadır. Bu ihtiyacın büyük bir kısmı fosil kaynaklardan (petrol, kömür, doğalgaz) karşılanmaktadır.

Yeryüzünün hidrokarbon yakıtlar açısından kaynakları sonludur ve jeolojik süreçlerin hidrokarbon oluşturma oranı, modern toplumumuzun tüketimi ile büyük ölçüde yavaşlamıştır. Petrol şirketleri tarafından yapılan analizlere göre en yaygın olarak kullanılan petrol ve doğal gaz üretimi 2020 yılına kadar artacak ve sonrasında hızla azalacaktır [1]. Yakıt üretim miktarının sınırlı olmasına ilave olarak dünya nüfusu hızla artmaktadır. Birleşmiş Milletler (BM) Nüfus Araştırmaları Birimi' nin verilerine göre 2016 yılında 7.515.284.153 olan dünya nüfusu her yıl %1-1.2 oranında artmaktadır [2]. Bu nüfus artışına paralel olarak asli enerji ihtiyacının 2050 yılında 1.5-3 kat oranında artması beklenilmektedir [3]. Artan nüfus ve sınırlı kaynak faktörlerinin sonucu olarak yakın gelecekte fosil yakıt üretiminin talebi karşılamayacağı düşünülmektedir.

Fosil enerji kaynaklarının atmosfere verdiği zararlar göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşmıştır. Atmosfere verdikleri tahribat sonucunda çeşitli zararlı gazların (CO_2 , sera gazları) etkisiyle yerkürenin ortalama sıcaklığı yükselmekte ve küresel ısınma, asit yağmurları, hava kirliliği gibi çeşitli iklim değişiklikleri meydana gelmektedir [4].

Tüm bu veriler neticesinde, enerjinin sürdürülebilir gelişmeler ve toplum için can damarı olduğu açık bir şekilde ortaya konulmuş ve enerji kaynağı arayışı hız kazanmıştır. Alternatif kaynak olarak yüksek verime ve temiz enerjiye sahip kendi çevremizin doğal ürünü olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelinmiştir Aranan

bu özellikler ve yapılan çalışmalar dünyada bol miktarda bulunan hidrojenin, bir yakıt olarak gerekli özelliklere sahip olduğu görülmektedir.

Hidrojen kendine özgü özellikleri olan, türlerine kıyasla daha verimli, ekolojik açıdan temiz, teorik olarak yandığında ürün olarak sadece su oluşturan, hafif ve ideal bir yakıttır [5]. Hidrojen enerjisinin kullanıldığı en başta gelen araçlar yakıt hücreleri olup elektrokimyasal prosesler vasıtasıyla elektrik üretebilirler. Bununla bağlantılı olarak hidrojenin yakıt hücrelerinde kullanılmasıyla gelecekte geleneksel fosil yakıtlarla çalışan ısı makinalarının yerini alması beklenilmektedir [6].

Cep telefonları gibi taşınabilir cihazlarda, arabalarda, taşıtlarda, ısı jeneratörlerinde vb. gibi geniş ürün yelpazesine sahip olan yakıt hücreleri, basit anlamda girdi olarak yakıt alan ve çıktı olarak elektrik üreten bir fabrika gibi düşünülebilir. Bir fabrika gibi, bir yakıt hücresi, hammadde (yakıt) sağlandığı sürece ürünü (elektrik) yaymaya devam edecektir [7].



Şekil 1.1. Yakıt hücresinin genel konsepti

Elektrokimyasal tepkimenin sürekliliği yakıt hücresi ve pil arasındaki temel farktır. Her ikisinin de çalışma prensibi kendi elektrokimyasını kullanmaya dayanırken, yakıt hücresi yakıt ve hava sağlandığı sürece döngüyü devam ettirip enerji üretebilirken, piller proses süresince enerji kaybederek sonrasında atık haline gelirler [8]. Yakıt hücreleri farklı komponentleri ve farklı çalışma şekilleriyle: fosforik asit yakıt hücresi, katı oksit yakıt hücresi, alkali yakıt hücresi, erimiş karbonat yakıt hücresi, doğrudan metanol yakıt hücresi ve polimer elektrolit membran yakıt hücreleri, olmak üzere sınıflara ayrılırlar. Bu çeşitler arasından Polimer Elektrolit

Membran yakıt hücreleri (PEM) taşınabilir enerji, yüksek verimlilik, hafiflik, uygun çalışma koşulları gibi avantajlarından dolayı endüstride daha çok kullanıma sahiptir.

Tezin ilk bölümünde yakıt hücresinin genel tanımından, tarihçesinden, yakıt hücresi çeşitlerinden ve hücre bileşenlerinden bahsedilmiştir. Yakıt hücresi için gerekli olan elektrokimyasal ve termodinamik özelliklere yer verilerek çalışma prensibi açıklanmıştır. Tezin ikinci bölümünde yakıt hücresinin bölgelerinden biri olan bipolar plakalar daha detaylı sunulmuş olup malzemesi, üretim yöntemleri ve akış alanı gibi konular açıklanmıştır. Tezin üçüncü bölümünde oluşturulacak sayısal model için gerekli sınır şartları işletme parametreleri ve yapılan kabuller belirtilmiştir.

Tezin son bölümünde PEM yakıt hücresinin tek kanallı engelsiz modeli için CREO Parametric 5.0.0.0' da geometri tasarlanıp ANSYS Fluent 17.0 da yakıt hücresi modülü kullanılarak simülasyonlar oluşturulmuştur. Daha sonrasında aynı ölçülere sahip yakıt hücresi geometrisinin anot tarafına engeller eklenerek analiz tekrar gerçekleştirilmiştir. Sayısal verilere göre farklı pil potansiyellerine bağlı akım ve güç yoğunluğu polarizasyon eğrileri elde edilerek engelsiz ve engelli tek kanallı model için karşılaştırmalar yapılmıştır. Hücre içerisinde gerçekleşen basınç, sıcaklık, hız, ve akım gibi birçok değişken parametrenin dağılımı ve etkileri incelenmiştir.

Sonuç olarak aynı özelliklere sahip engelsiz ve çeşitli sayıda engellere sahip tek kanallı PEM yakıt hücresi kıyaslanarak en iyi akım yoğunluğu ve pil potansiyelinin 2 engele sahip hücrede meydana geldiği gözlenmiştir. Engel sayısı arttırıldığında ise aynı performansın devam etmediği akış alanında sınırlamalar arttıkça verimin düştüğü gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yakıt hücresinin geliştirilmesi üzerine son yirmi yıl boyunca pek çok araştırma yapılmıştır. Geçmişte ilerleme kaydedilmesine rağmen araştırmacılar hala yeni hücre tasarımlarına ve yakıt hücresi performans iyileştirmesine odaklanmaktadır. Bir PEM yakıt hücresinin uzaysal boyutları sebebiyle iç niceliklerini kolayca ölçmek mümkün değildir. Deneyssel olarak bu zorlu süreci ve maliyetinden dolayı sayısal analiz çalışmaları araştırmalar için alternatif bir yol sunmaktadır.

CFD (Computational Fluid Dynamics) gibi sayısal modelleme yöntemleri; konsantrasyon türleri, sıcaklık gradyanları ve yakıt hücresinin her bileşeni boyunca basınç dağılımı gibi analizleri yapmak için geliştirildi. Farklı çalışma parametreleri ve düzenlemelere göre hücrenin içinde meydana gelen olayların detaylı yorumlanması modelleme yöntemleri ile mümkün hale gelmeye başladı [9].

İlk çalışmalarda çoğunlukla yakıt hücresinin bir veya iki boyutlu elektrokimyasal modellenmesi üzerinde duruldu ve membrandaki, katottaki taşınım olayları araştırıldı. Daha sonra, reaktant ve su dağılımı, sıcaklık ve basınç, fiziksel ve işletme parametrelerinin etkileri (nem oranı, membran kalınlığı, difüzyon tabakasının gözenekliliği, kanalın geometrik özellikleri vb.) gibi içsel koşulları incelemek amacıyla kütle, momentum ve yükün korunmasını çözen tek fazlı çok boyutlu modeller geliştirilmiştir [10]. PEM yakıt hücresinin modellenmesindeki öncülerden biri olan Bernardi, PEM yakıt hücresinde su dengesini korumak için giriş gazlarının nemlendirme gereksinimlerini araştırarak membran ve katot elektrodu için tek boyutlu izotermal matematiksel modelini geliştirdi. Bu çalışma, hücrenin izotermal olduğunu, gaz difüzyon elektrotlarının su damlacıklarından arınmış olduğunu ve elektrokimyasal reaksiyonla sadece su buharının üretildiğini varsayar. Modelde, suyun elektro-ozmotik sürtünmesi ve membran boyunca basınçla indüklenen akımın,

konsantrasyon gradyanlarının neden olduğu akımın yanında önemsiz olduğu varsayılmıştır. Bernardi modeli, katottaki daha büyük su buharlaşmasına bağlı olarak artan su sıcaklığı ile su dengesini sürdürmek için gereken akım yoğunluğunun arttığını göstermektedir. Çalışması ayrıca katottaki oksijen taşınmasının, su dengesinin difüzyon sınırlayıcı sertleşme yoğunluğundan daha yüksek olmasını sağlamak için gerekli olan akıma bağlı olarak yakıt hücresi performansını sınırlayabileceğini ileri sürmektedir [11].

Bernardi, modelleme çalışmasına Verbrugge ile devam ederek, iyon değiştirici bir membrana bağlı gazla beslenen gözenekli katodun performansını araştırmıştır [12]. Bu modelde, hücrenin izotermal ve gaz akışlarının ideal olduğu varsayılmaktadır. Önceki modelin aksine potansiyel gradyanlar ve basınç nedeniyle membrandan geçen su akışı ele alınmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hem basınç farkı hem de elektrik potansiyel kuvvetleri ile su taşınmasının, hücre çalışma koşullarının güçlü bir işlevi olduğunu ve oksijen indirgeme reaksiyonundan kaynaklanan polarizasyon direncinin, tüm mevcut yoğunluklarda önemli olduğunu göstermiştir. Modelin sınırlanması, sadece tamamen hidratlanmış membranlar için geçerli olmasıdır. Bir sonraki modellerinde, anot katalizör tabakasını ekleyerek gözeneklilik ve kalınlık gibi membran ve elektrot özelliklerinin etkilerini incelemişlerdir [13]. Bernardi ve Verbrugge'ın çalışmaları, çağdaş PEM yakıt hücresi modelleme çalışmasının başlangıç noktası ve daha ileri modelleme araştırması için temel olarak alınabilir [14].

Springer ve arkadaşları, aynı yıllar içerisinde Bernardi ve Verbrugge'ın modellerinden farklı olarak değişken su içeriğine sahip membran ile başka bir boyutlu izotermal MEM (Membrane Electrode Assembly- Membran Elektrot montajı)model geliştirdi [15]. Membrandaki su taşınımını modellemek için sıvı suyun varlığı göz ardı edilerek su difüzyon katsayıları, elektro-ozmotik sürtünme katsayıları, su emilim izotermi ve diğer yazarlar tarafından deneysel olarak elde edilen membran iletkenlikleri için verileri bir araya getirmişlerdir [16]. Su baskını için kullandıkları bazı parametrelerden dolayı belirli kısıtlamaları olsa da kısmen namlendirilmiş membran düşünüldüğünde hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fuller ve Newman, su yönetimi, termal yönetim, çalışma koşullarının yakıtın taşınması ve kullanımı üzerine etkisini incelemek için yarı 2 boyutlu izotermal olmayan MEM model sundular [17]. Yarı 2 boyutlu model, önce modelleme denklemleri ile membranda tek boyutlu problem olarak çözülmüş ve daha sonra çözümleri kanal yönündeki çeşitli noktalara entegre ederek inşa edilmiştir.

Nguyen ve White, PEM yakıt hücresinin sabit, iki boyutlu ısı ve kütle transfer modelini 1993 yılında sunmuştur. Bu model, elektro-ozmotik-sürtünme ve difüzyon yoluyla sıvı suyun zardan taşınmasını çözer ve suyun faz değişimini içerir, ancak MEM, "ultra-ince" gaz difüzyon elektrotlarına bakıldığında büyük ölçüde basitleştirilmiştir. Sıvı fazın hacminin ihmal edilebilir olduğu varsayılmaktadır. Bu model, farklı nemlendirme şemalarının yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılmıştır [18].

Aynı yıl, hava katotlarının performansını arttırmak için gereken gelişmeleri tanımlamak için, Springer ve arkadaşları, Pt iyonomer arayüzünde ve katalizör tabakasında ara yüzey kinetiğinin neden olduğu voltaj kayıplarını dikkate alarak bir 2 boyutlu izotermal yarım hücre modeli yayınlamışlardır. Araştırmaları verilen tüm katalizör yüklenmeleri için dağıtılmış katalizör tabakası kalınlığının etkili iletkenliği ve geçirgenliği arttırdığını göstermiştir.

Los Alamos Weisbrod 1995 yılında Springer ve arkadaşlarının membran su modelini baz alarak tam bir hücrenin izotermal, kararlı halde 1 boyutlu modelini geliştirdi. Orta halde katalizör yüklenmeleri için hücre performansının $0,1 \text{ mg/cm}^2$ ' den daha az olduğunu bulmuşlardır. Hücre sıcaklığı ve basıncı yaklaşık 100°C ve 2 atm ' ye yükseldiğinde performansın düştüğünü ileri sürmüşlerdir [19].

Eikerling ve arkadaşları, 1998 yılında membran parametrelerinin etkisini incelemek ve membranın difüzyon ve konveksiyon modelini karşılaştırmak için bir 2 boyutlu MEM modeli sundular. Deneysel verileri, membrandan su taşınmasının konveksiyonel olduğunu gösterdi [20].

Divisek ve arkadaşları, 1 boyutlu fiziksel modellerinde konvektif tabanlı modelin difüzyon temelli modellere göre membrandan su taşınımını daha iyi açıkladığını bildirmişlerdir. Bu modellerde, sadece kapiler kuvvetlerin, membrandaki denge su içeriği üzerinde bir etkisi olduğu varsayılmaktadır [21].

Lee ve arkadaşları bir dizi ampirik korelasyona sahip bir MEM modeli geliştirmiş ve sıcaklık, basınç ve oksijen kısmi basınç dağılımlarını çalışmışlardır. Oksijen kısmi basıncının dağılımı ile hücre akımı arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekillere sahip tüm dağılım eğrilerinde en yüksek oksijen konsantrasyon bölgesine en yüksek akım üretim bölgesinin karşılık geldiğini keşfettiler [22].

Wöhr ve arkadaşları, kapsamlı bir geçici, 1D, izotermal yarım hücre modeli oluşturdular ve gaz difüzyon tabakasının kalınlığı ve gözenekliliği gibi yapısal ve malzeme parametrelerinin etkilerini ve katalitik tabakanın yapısının performansına etkilerini tek ve çoklu hücre yığınları üzerinde araştırdılar.

Elektrik yükü veya gaz akış hızı ve nemlendirme değişikliklerinden sonra geçici etkilerin simülasyonuna izin verir. Membran için daha önce Fuller ve Newman tarafından tarif edilen model kullanılmıştır [23].

Gurau ve çalışma arkadaşları membran, anot ve katot katalizör tabakası, gaz difüzyon tabakaları ve gaz kanalları dahil olmak üzere izotermal olmayan 2 boyutlu tam bir yakıt hücresi inşa ettiler ve ilk kez PEM yakıt hücresi modellemesinin hesaplaması için akışkan dinamiği (CFD) yöntemlerini kullandılar. Ayrıca, yakıt hücresi sandviçinin farklı bölümleri arasındaki ara yüzlerde sınır koşullarını tanımlama ihtiyacını ortadan kaldıran tek alanlı yaklaşımı da kullandılar. Model, gaz fazı ve sıvı fazı ayrı hesaplamalı alanda ele alır, bu da her iki faz arasındaki etkileşimin dikkate alınmadığı anlamına gelir [24].

Dutta ve çalışma arkadaşları, ilk tam 3 boyutlu modeli 2000 yılında yayınlamışlardır [25]. Dutta ve ark. Membran kalınlığının ve hücre voltajının, lokal akım yoğunluğunun eksenel dağılımı ve akış kanalları boyunca hesaplanan tür

konsantrasyonları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Ayrıca, net su taşımacılığı oranını incelemişler ve gaz difüzyon tabakası içindeki sıvı su hacmini ihmal eden iki fazlı akışı basit bir şekilde ele almışlardır [26].

Hontanon ve arkadaşları, 3 boyutlu CFD izotermal modelinde FLUENT kullanarak çalışmalarını yürütmüştür. Gaz akış dağılımını optimize ederek bipolar levha ve anodun yakıt tarafındaki gaz akışını inceleyip performansı arttırmak için çalıştılar. [27] Aynı yıl, Hsing ve Futerko hidrojen ve oksijen stokiyometrisi, akım yoğunluğu üzerine anottan ayrılan ürün suyunun bağımlılığını tahmin etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanarak 2 boyutlu tam yakıt hücresi modeli yayınladı [28].

Cao ve Djilali, su taşıma ve elektrik potansiyelinin membrandaki değişken su içeriği varyasyonu ile tanımlandığı, 2 boyutlu izotermal olmayan, izobarik olmayan tam yakıt hücresi modelini oluşturmuştur. Su içeriğinin bir fonksiyonu olarak elektro-ozmotik sürtünmeyi tanımlayan ampirik bir denklem ve su içeriği değişimi için kuvvetli bir şekilde hesaba katılmış olan elektrik potansiyeli için yeni bir denklem elde edilirken, proton ve su taşınımı sırasıyla Nernst-Planck denklemi ve Schlogl denklemi ile modellenmiştir [29]. Aynı yıl Guvelioğlu, membrandaki karmaşık su dengesini incelemek ve membranın dehidrate olmasını sağlayan çalışma koşullarını belirlemek için bir 2D izotermal, MEM modeli geliştirdi [30].

Tohidi ve arkadaşları, katot katalizör tabakasındaki oksijen dağılımı ve molar azot gazı fraksiyonunun yanında sıcaklık, basınç, membran kalınlığı, bağıl nem ve stokiyometrik akış oranı gibi birincil parametrelerin etkilerini araştıran 1 boyutlu izotermal MEM modeli yayınlanmıştır [31].

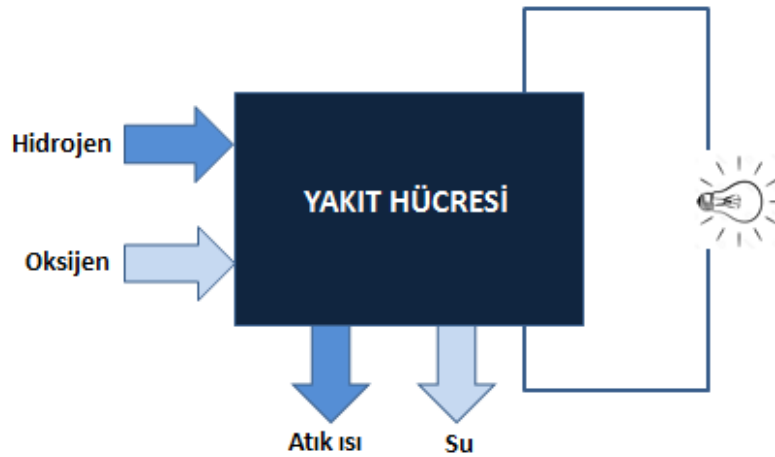
BÖLÜM 3. YAKIT HÜCRELERİ

3.1. Yakıt Hücresi Nedir?

Yakıt hücreleri, bir yakıttaki kimyasal enerjiyi doğrudan doğruya DC enerjisine dönüştüren elektrokimyasal enerji cihazlarıdır. Gerçekleşen süreç elektrolizin zıttı olmakla birlikte temel olarak tüm yakıt hücreleri hidrojen ve oksijen ile çalışır [32].

Tipik olarak, yakıtlardan elde edilen elektrik üretme süreci aşağıdaki adımları içerir:

- Yanan yakıtın, kimyasal enerjisini ısıya dönüştürür.
- Bu ısı daha sonra suyu kaynatmak ve buhar üretmek için kullanılır.
- Buhar termal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren bir prosesle türbini çalıştırmak için kullanılır. Son olarak;
- Mekanik enerji elektrik enerjisi üreten bir jeneratörü çalıştırmak için kullanılır.



Şekil 3.1. Yakıt hücresinin tek adımda yakıttan DC akımı üretmesi

Bir yakıt hücresi tüm bu süreçleri atlatır ve herhangi bir hareketli parça içermeye ihtiyaç duymayarak tek adımda elektrik üretir [33].

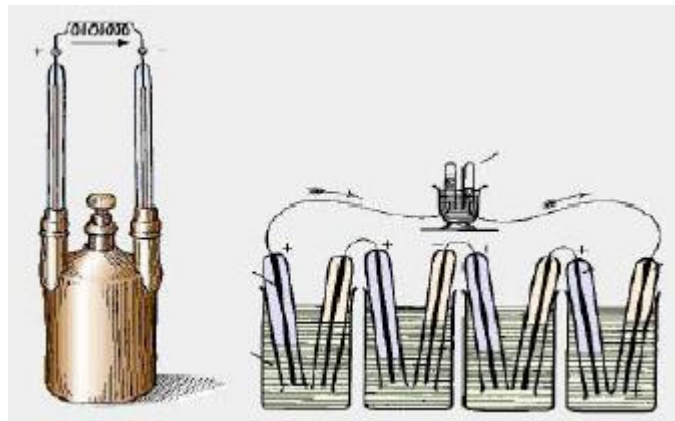
3.2. Yakıt Hücresinin Tarihçesi

Yakıt hücrelerine ait yapılan ilk çalışmaların 150 yıl öncesine dayandığı bilinse de bu konuyla ilgili daha kapsamlı çalışmalar 20.yüzyılın ikinci yarısında ortaya çıkmaya başlamıştır [33].

Christian Frederic Schönbein adındaki İsviçreli bilim adamının 1838’ de suyun elektrolizini tersine çevirerek ısı elde etmiş ve yakıt hücresi etkisini keşfettiği iddia edilmiştir.

Bu çalışmalar ışığında 1839 yılında Galli bilim adamı William Robert Grove’ un yaptığı deneyle yakıt hücrelerinin çalışma prensibi (elektrik üreten gazlar) keşfedilmiştir. 1842’ de yayınlanan makalesi (On Gaseous Voltaic Battery) ile yakıt hücresi tipini açıklayan ilk bilimsel yayın yapılmış oldu [34].

Grove yaptığı çalışmada, ilk hücreyi çinko sülfat içerisine platin elektrot daldırılarak oluşturmuştur. Suyun elektrolizini tersine çevirerek, iki platin elektrotun birini sülfirik asit kabına diğerini ise oksijen ve hidrojen kabına daldırılmış ve iki elektrot arasında elektriksel bir akım olduğu bildirilmiştir [35].



Şekil 3.2. W. Grove' un ürettiği yakıt pili [35]

1893 yılında Friedrich Wilhelm Oswald, yakıt pili içerisinde bulunan her bir elemanın etkisini ve görevini araştırmıştır [36].

1890 – 1900 yılları arasında Nernst, yüksek sıcaklıkta çalışan hücreleri katı oksit elektrolit ile kullanarak kararlı hale getirerek zirkonyanın iyon ilettiğini ortaya koymuştur. Sonrasında Alman bilim adamı Emil Baur, Nernst'in başlattığı katı oksit ile çalışan yakıt hücresi projesini başarıya ulaştırmıştır [37].

Yakıt pilinin günümüzdeki gelişmelere öncü olarak ilerlemesini ve şuan olduğu konuma gelmesini sağlayan en önemli çalışma 1939 yılında Francis Thomas Bacon tarafından yapılmıştır. Grove deneyini tekrarlayarak bir yakıt hücresi inşa etmiş ve çift katmanlı elektrotlar geliştirerek sıvı taşması ve gaz kabarcıkları problemlerini çözmüştür. Alkali yakıt pilleri üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda 0.66 Wcm^{-2} lik güç yoğunluğuna ulaşmış ve böylece sanayinin ilgisini üzerine çekmiştir. Bu çalışmaların geleceğini anlayan Pratt & Whitney şirketi projeye destek vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır [33].

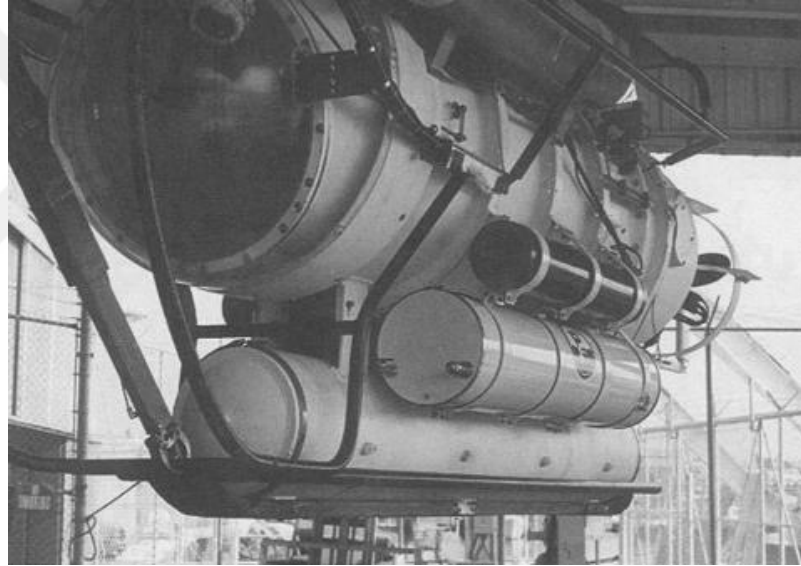


Şekil 3.3. Francis Bacon' un icat ettiği alkali yakıt hücresi: [1].



Şekil 3.4. Apollo yakıt hücresi [1].

Pratt ve Whitney tarafından Bacon' un patentlerinden alınan lisansa dayanan bu yakıt hücreleri daha sonrasında yaşam desteğinin iletişimin vb. aygıtların elektriğini üretmek için Apollo Uzay Program'ın da kullanıldı. General Elektrik ilk polimer membranlı yakıt pillerini (PEM) geliştirerek Gemini uzay projesinde kullanmıştır. 1980'ler de ki petrol krizi ile hidrojen ve hidrojenli yakıtlar önem kazanmış; ABD, Japonya, Kanada gibi ülkeler Ar – Ge çalışmalarını arttırmıştır. Yakıt hücreleri uzay çalışmalarında büyük bir yer almasına rağmen diğer endüstri alanlarında yer edinmesi 1990' lı yılların başına kadar olmamıştır. Perry Technologies ile Ballard polimer membranlı yakıt hücresini bir denizaltıda kullanarak başarılı bir şekilde tanıtmıştır. Bu gelişmeleri ilk olarak yolcu arabasında kullanarak devam ettirmişlerdir [38].



Şekil 3.5. PC1401 - PEM yakıt hücrelerinin kullanıldığı denizaltı [1].

Günümüzde çoğu otomobil üreticisi PEM yakıt hücrelerinin büyük potansiyelini fark ettikten sonra yakıt hücresiyle çalışan araba uygulamaları üzerinde çalışıyor [39].



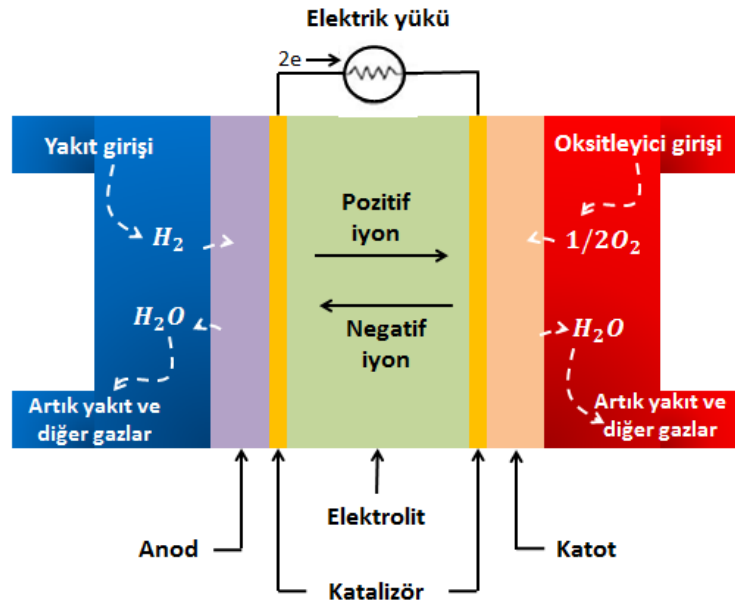
Şekil 3.6. Yakıt hücresiyle çalıştırılan ticari arabalar (a)Mercedes F-Cell (2005) (b)Honda FCX Clarity (2007).

3.3. Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensibi

Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi temelinde suyun elektroliz mekanizmasının tersine dayalı bir prensibe sahip olan, hidrojen ve oksijen kullanarak elektrokimyasal reaksiyon oluşturup sonucunda elektrik akımı üreten bir cihazdır.

Yüzey hacim oranını arttırıp daha fazla reaksiyon alanı sağlamak için ince ve düzlemsel üretilen yakıt hücreleri; elektrolit ve elektrolitle bağlantılı halde olan geçirgen yapıda anot ve katot elektrotlardan oluşur. Tepkime girdileri, katalizörler ve elektrolit arasında gözenekli elektrot bölgesinde bir ara tabaka oluşturmaktadır. Elektrot fazla elektron içeriyorsa, gazların elektrolit kısmından tepkime kısmına geçmesi engellenerek yakıt pilinin performansında önemli bir rol oynar [40].

Tipik bir yakıt hücresinde gaz yakıt (hidrojen) anot elektroda gönderilerek yükseltgenme, oksidant madde (oksijen ya da hava) katot elektroda gönderilerek indirgenme reaksiyonları başlar. Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan potansiyel fark elektron akışını ve elektriksel voltajı meydana getirir. Toplam reaksiyon sonucunda su ve ısı ürünleri açığa çıkar [41].



Şekil 3.7. Yakıt hücresi yapısı

Anot ve katot tabakalarında (katalizör) meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

Anot tarafında, her bir hidrojen molekülü iki protona ve iki elektrona ayrılır.



Katot tarafında, oksijen molekülü elektrolitten iki proton, metalden iki elektron yakalar ve protonlar oksijenle birleşerek su buharı oluşturur.



Yakıt hücresinde gerçekleşen toplam reaksiyon:



Yakıt pilinde gerçekleşen temel süreçleri özetlenirse:

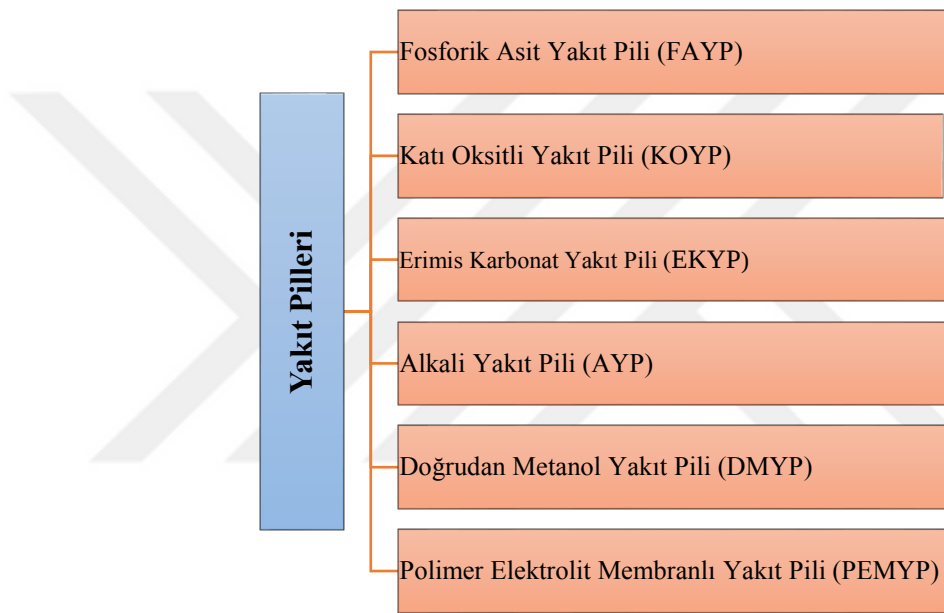
- Tepkimeye giren maddelerin aktarımı: yakıt ve oksitleyici maddelerin uygun akış kanalı ve gözenekli elektrotlar yardımıyla hücreye beslenmesi
- Elektrokimyasal reaksiyon: reaktantlar anot ve katot elektrotlarına taşındıktan sonra reaksiyonun gerçekleşmesi
- Yakıt pilinden ürünlerin uzaklaştırılması: elektrik enerjisi yanında oluşan suyun birikme yapmadan uzaklaştırılması

Yakıt hücresi elektrik enerjisi üretimi sırasında yanma işlemi olmadığı için düşük ısı salınım değerlerine sahiptir. Bu elektrokimyasal reaksiyon gerçekleşirken sistem hareketli bir parçaya sahip olmadığından yakıt hücreleri sessiz çalışırlar ve bu özelliklerinden dolayı oldukça tercih edilen aygıtlardır.

3.4. Yakıt Hücresi Çeşitleri

Yakıt hücrelerinin bir dizi farklı çeşidi geliştirilmiştir ve kullanımdadır. Genellikle kullanılan elektrolit tipi, transfer edilen iyon türü, çalışma sıcaklık aralığı ve kullanılan yakıtın cinsine göre sınıflandırılmaktadır. Günümüzde en yaygın sınıflandırma hücrenin içinde kullanılan elektrolit malzemesinin cinsine göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre 6 çeşit yakıt hücresi bulunmaktadır. Bunlar;

Tablo 3.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri

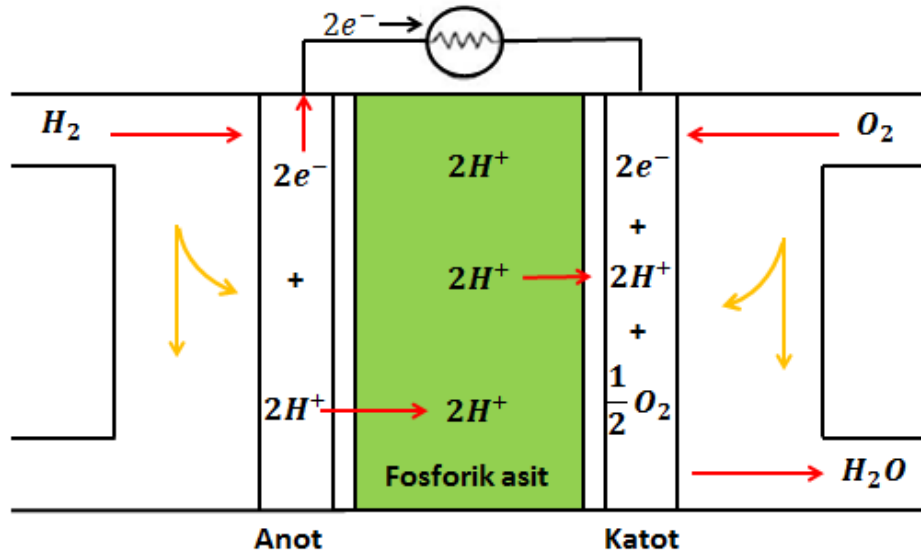
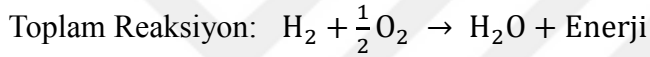
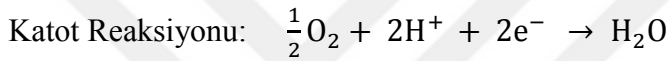


Tablo 3.2. Yakıt pili türüne göre bileşenler ve işletim parametreleri

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Elektriksel Verim	Yakıt/Oksitleyici
FAYP	Fosforik Asit Çözeltisi	150-200 °C	% 55	Doğalgaz, H_2 biyogaz/ O_2 , hava
KOYP	Erimiş Alkali Metal Karışımı	600-1000 °C	% 60–65	Doğalgaz, , H_2 biyogaz, kömür gazı / O_2 , hava
EKYP	Lityum yada potasyum karbonat	600-700 °C	% 65	Doğalgaz, H_2 biyogaz, kömür gazı, / O_2 , hava
AYP	Potasyum Hidroksit	90-100 °C	% 60–70	H_2/O_2
DMYP	Katı Polimer	60-90 °C	% 20–30	CH_3OH/O_2 , hava
PEMYP	Katı Polimer(Nafion)	20-100 °C	% 40	%60 H_2/O_2 , hava

3.4.1. Fosforik asit yakıt hücresi (FAYH)

FAYH, elektrolit olarak sıvı fosforik asit (H_3PO_4) çözeltisi, yakıt olarak doğalgaz, LPG gibi temiz yakıtlar veya kömür gazı kullanır. 150–200 °C sıcaklık aralığında çalışan bu hücreler diğer asidik çözelti kullanan elektrolitlere göre daha yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. İlk ticarileşen hücreler olan FAYH, güç üretimi ve bazı taşıt uygulamalarında kullanılır. Anotta bulunan hidrojen gazı elektron ve protonlarını serbest bırakarak iyonlaşır, fosforik asit elektrolit ve dış devre vasıtasıyla katoda ulaşır. Katotta bulunan oksijen elektron ve protonlarla bir araya gelerek reaksiyona girer ve su oluşturur. Gerçekleşen reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir:

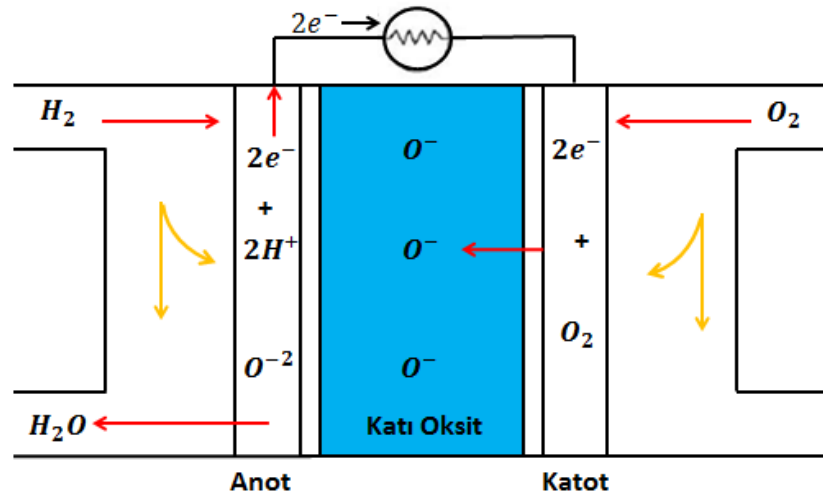
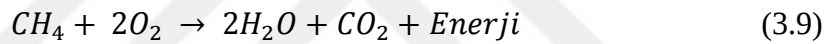
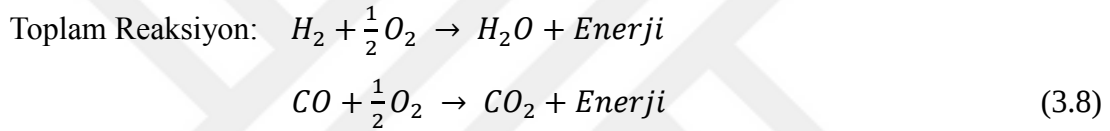
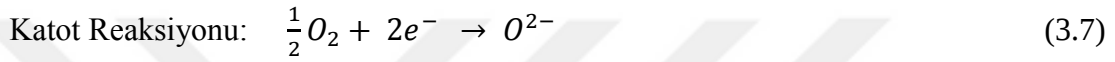
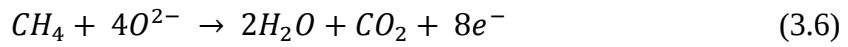
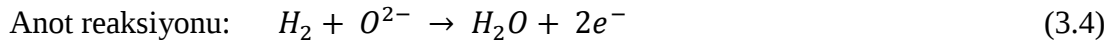


Şekil 3.8. Fosforik asit yakıt hücresi çalışma şeması

3.4.2. Katı oksitli yakıt hücresi (KOYH)

KOYH, elektrolit olarak katı, seramik ve Y_2O_3 içeren ZrO_2 , yakıt olarak doğalgaz, LPG gibi temiz yakıtlar veya kömür gazı kullanır. Elektrolit olarak katı madde

kullanıldığından tepkime sırasında elektrolitte azalma ve besleme mekanizması ihtiyacı olmaz. Yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı yüksek kalitede ısı üreterek kinetik enerji desteklenir. Bu sıcaklıklarından dolayı kojenerasyon uygulamaları için uygundur. KOYH'nin güç verimi yaklaşık olarak %50-%60 arasında değişirken açığa çıkan ısıнын yakalanmasıyla verim %80'e kadar çıkartılabilir. Gerçekleşen reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir:

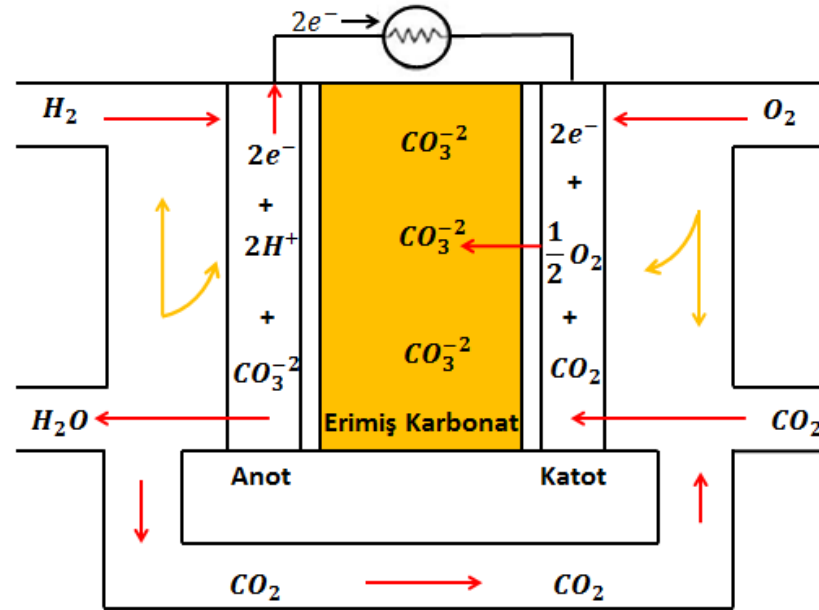
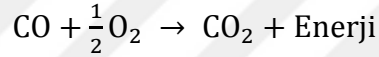
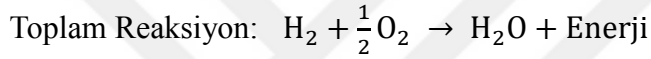
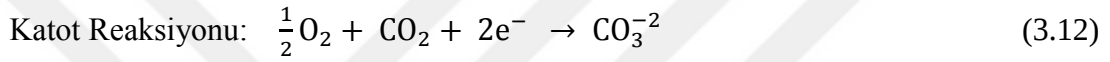
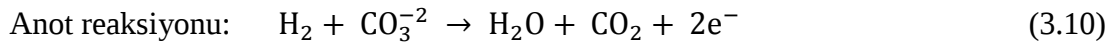


Şekil 3.9. Katı Oksit Yakıt Hücresi Çalışma şeması

3.4.3. Erimiş karbonat yakıt hücresi (EKYH)

EKYH, elektrolit olarak $LiAlO_2$ ' in seramik matriksinde tutulan lityum, potasyum karbonat gibi erimiş alkali karbonatlar, yakıt olarak doğalgaz, LPG gibi temiz

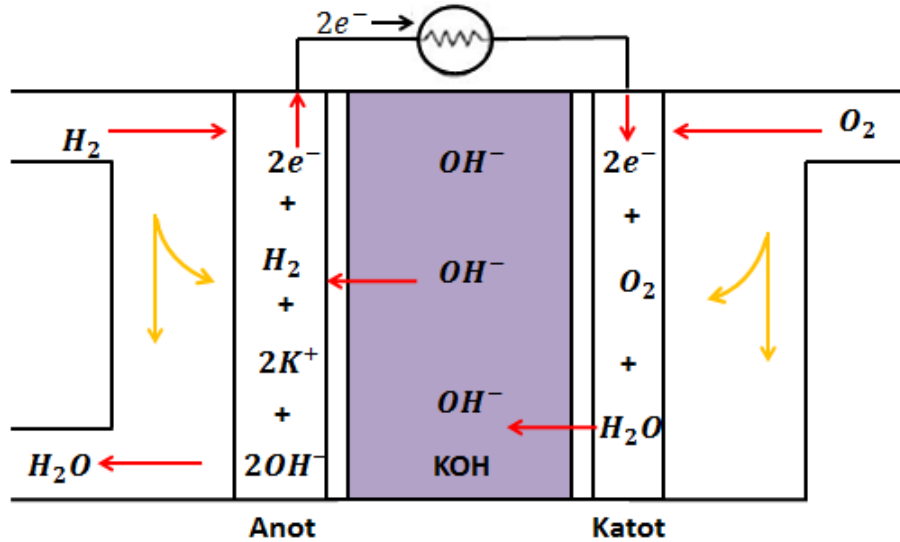
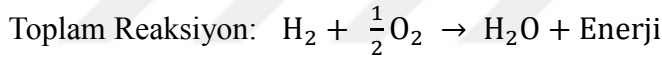
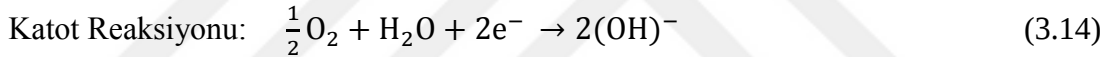
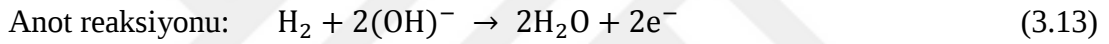
yakıtlar veya kömür gazı kullanır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık 600-700° C arasında yüksek değerlere ulaştığından soy metal katalizörlere ihtiyaç duymazlar. Endüstride doğal gaz ve kömür bazlı güç santrallerinde, çeşitli elektriksel hizmetlerde ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Anotta bulunan hidrojen gazı iyonlarla tepkimeye girerek su, karbondioksit gazı ve elektron üretir. Karbondioksit katoda giren hava ile karıştırılıp karbonat iyonlarını oluşturur. Gerçekleşen reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.10. Erimiş Karbonat Yakıt Pili Çalışma şeması

3.4.4. Alkali yakıt hücresi (AYH)

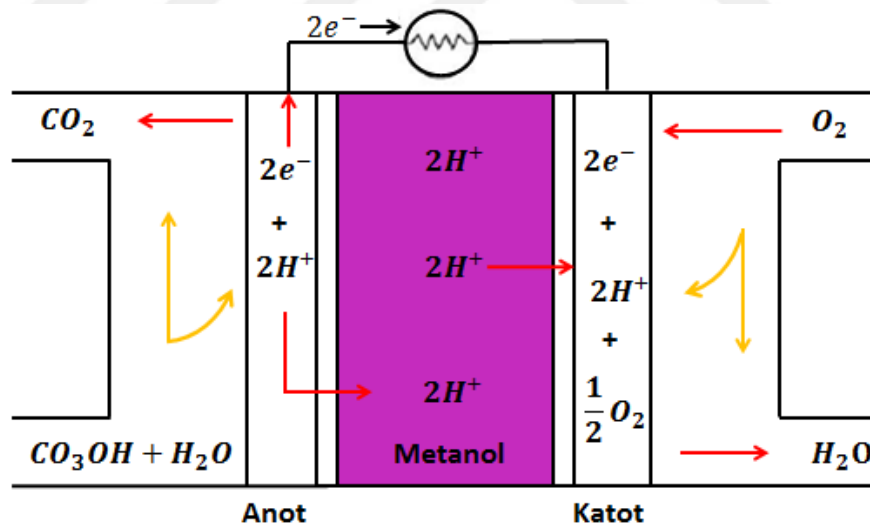
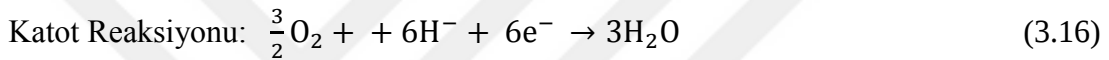
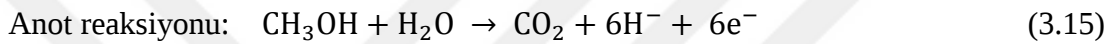
AYH, elektrolit olarak soğutucu özelliğine sahip potasyum hidroksit kullanmaktadır. Kullanılan potasyumun derişimine göre çalışma sıcaklığı 90-100 °C arasında değişmektedir. Geliştirilen ilk modern yakıt hücresi olup NASA uzay programlarında Apollo aracında geniş kullanım olanağı bulmuştur. Anot olarak sinterlenmiş nikel, katot olarak lityumlu nikel oksit kullanılmaktadır. AYH' nin dezavantajı yüksek maliyetli oluşu ve karbondioksit'e karşı hassas olmasıdır. Bu sebeple mobil uygulamalar için uygun değildir. En yüksek verimli pillerden biri olan AYH' nin anodunda bulunan hidrojen katalizör ile proton ve elektronlarına ayrılır. Elektronlar katota taşınarak hidroksil iyonlarını meydana getirirler. Hidroksil iyonları elektrolit vasıtasıyla anoda taşınarak tepkimeye girer ve su açığa çıkar. Gerçekleşen reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.11. Alkali Yakıt Hücresi Çalışma şeması

3.4.5. Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH)

DMYH, elektrolit olarak polimer membran, yakıt olarak hidrojen yerine metanol kullanılmaktadır. Çalışma prensibi olarak PEM yakıt piline benzer olan bu hücreler diğer yakıtlar yerine metanolü tercih edilmesinin sebepleri; kükürt bulundurmaması, ortam basınca sıvı fazda olması ve yüksek dönüşüm hızıdır. PEMYH' de olduğu gibi dönüştürücüye ihtiyaç duymadan metanolün su ile birleşmesiyle sıvı olarak kullanılmasına olanak sağlar. Enerji kapasitesi düşük olup küçük bir alanda depolanmaktadır. Bu sebepten dolayı cep telefonları, dijital kameralar gibi taşınabilir cihazlar için daha uygundur. Gerçekleşen reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir:

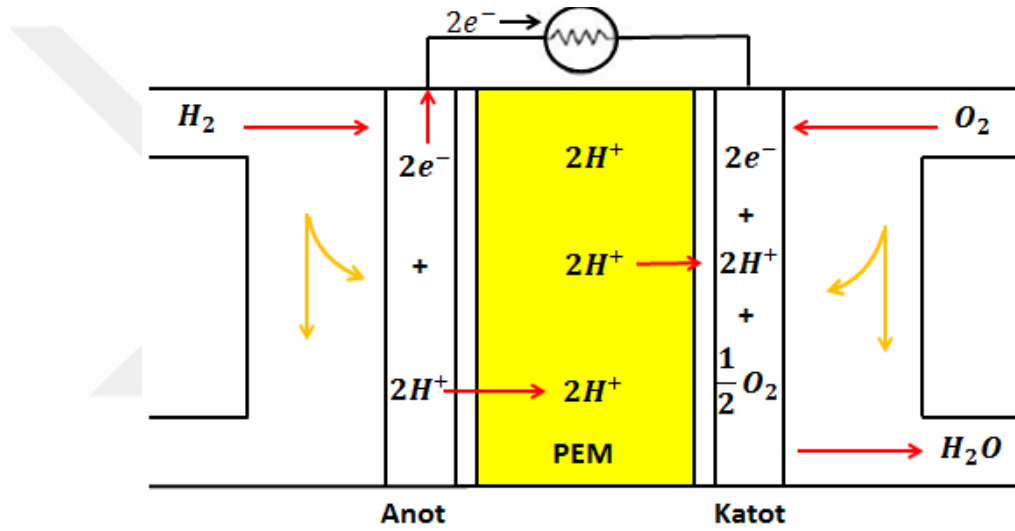
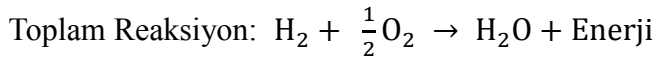
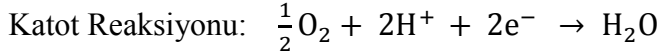
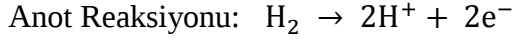


Şekil 3.12. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi Çalışma şeması

3.4.6. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi (PEMYH)

PEMYH, elektrolit olarak katı polimer membran, yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır. Diğer yakıt pillerine kıyasla daha fazla güç konsantrasyonuna ve düşük ağırlığa sahiptir. Çalışma sıcaklıkları 100 °C' nin altında olup verimleri

yaklaşık %50 civarındadır. Düşük sıcaklıklarından dolayı platin gibi pahalı katalizörlerin kullanılması gerekmektedir buda sisteme ek bir maliyet getirir. PEMYP hızlı tepki süresi ve kompakt yapısından dolayı özellikle taşıt uygulamalarında tercih edilmektedir. Gerçekleşen reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir:

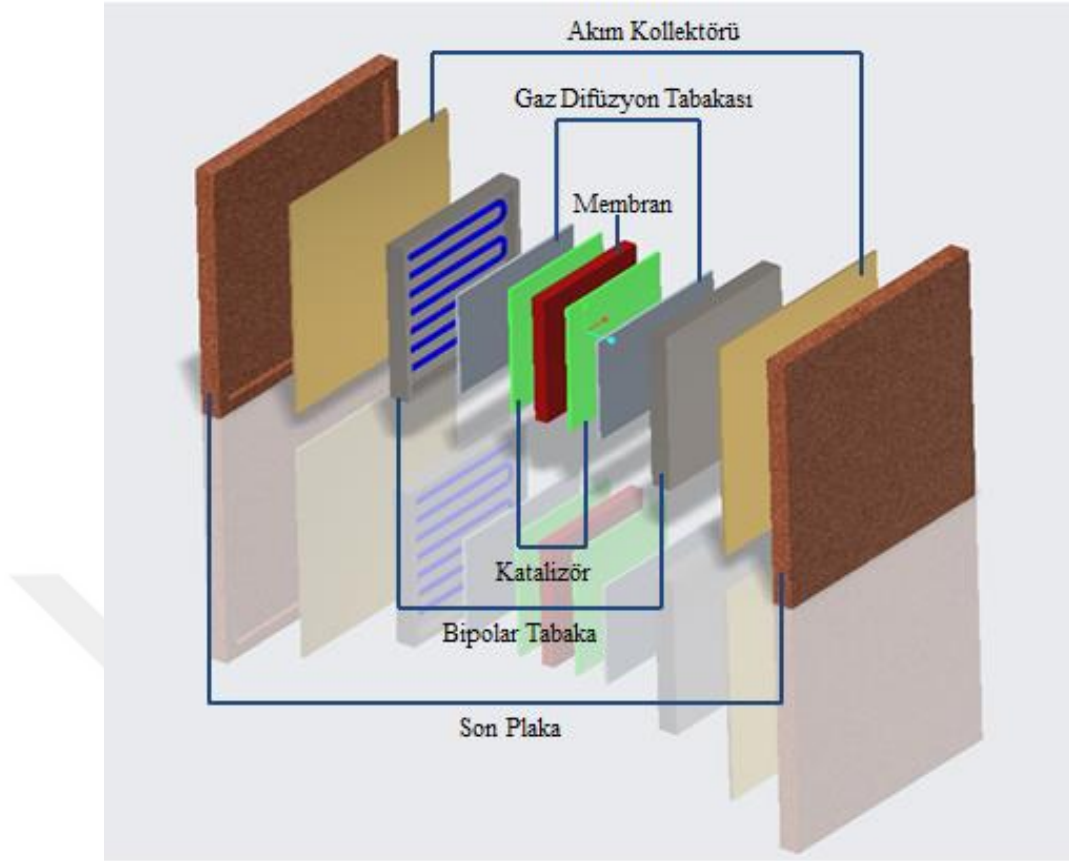


Şekil 3.13. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi Çalışma şeması

3.5. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücreleri (PEMYH)

3.5.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresinin bileşenleri

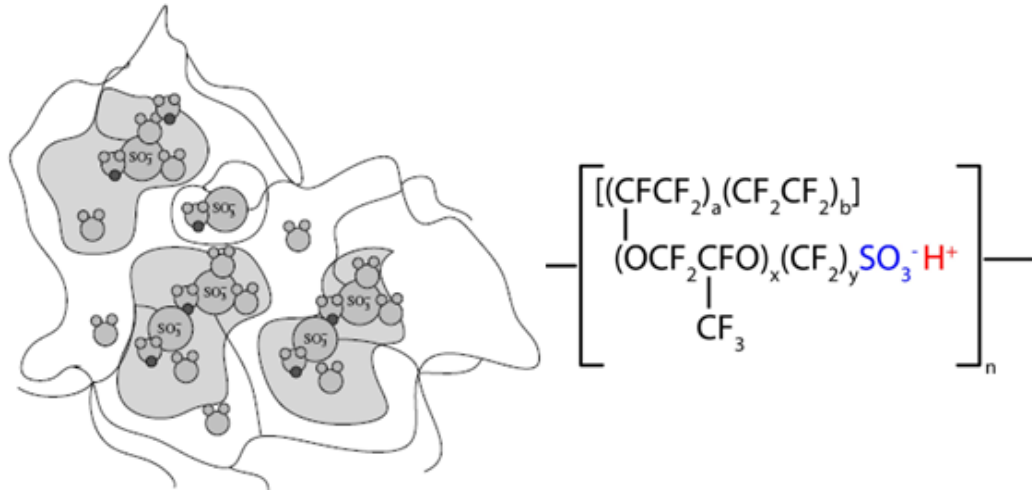
Bu bölümde PEMYH' nin komponentleri anlatılacaktır. PEM hücreleri; polimer membran, anot ve katot elektrotları, elektrotları destekleyen katalizör tabaka, gaz difüzyon tabakaları, bipolar tabaka ve en dışta hücreyi saran sızdırmazlık contaları olmak üzere 6 ana kısımdan oluşan kompozit bir yapıdır. Yakıt hücresinin en önemli, yapı taşı; anot, katot elektrotları ve membranın bir araya gelmesiyle meydana gelen Membran Elektrot Montajı (MEM)'dir.



Şekil 3.14. PEM yakıt hücresinin bileşenleri [42].

3.5.1.1. Polimer elektrolit membran

Polimer yakıt hücresine adını veren membran, hücrenin en önemli bileşeni olup polimer esaslı bir elektrolitten meydana gelmektedir. Yakıt hücresinin performansı membranın özelliklerine bağlıdır. Su ve enerji geçişine izin veren membranın, proton iletkenliği yüksek fakat kısa devre olmaması için elektrik iletkenliği zayıftır ve yakıt geçişi mümkün değildir. Asıl görevi anot kutbundan katot kutbuna protonun verimli bir şekilde geçişini sağlamak ve kutuplar arası reaktan gazların (hidrojen ile oksijenin) karışmasını önlemek için arada ayırıcı bir tabaka oluşturmaktır. Membran kalınlığı 12-210 μm arasında değişmektedir.

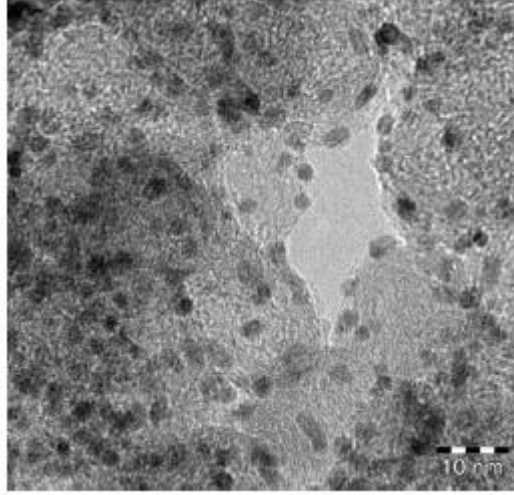


Şekil 3.15. Nafion'un Kimyasal Yapısı [43].

En çok kullanılan elektrolit, 1960 ların sonlarında Dr.Walther Gustav Grot tarafından keşfedilen ve DuPont Nemours' da üretilen, Florinli Teflon(Perflorosulfonik asit-PFSA)olup, ticari adı Nafion'dur [44]. Kullanılan elektrolitler çeşitlilik göstermekle birlikte Nafionlar kimyasal stabilite, mükemmel derecede proton iletkenliği, su geçirgenliği ve uzun çalışma saatleri boyunca dayanıklılık gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmekte olup en sık kullanılan tipi Nafion 117' dir [45].

3.5.1.2. Katalizör tabakası

Katalizör tabakası; membran ve gaz difüzyon tabakası ile doğrudan bağlantısı olan aktif bir tabakadır. Anot ve katot kutuplarında, katalizör yarı hücre reaksiyonunun hücre içinde gerçekleştiği yerdir. 5-25 μm aralığında kalınlığa sahip katalizörlerin yakıt hücresi içindeki görevi gazların reaksiyon alanına taşınması ve düşük sıcaklıklarda daha yavaş gerçekleşen tepkimeyi hızlandırmaktır. Bu sebepten dolayı her iki kutba, elektrotların yanına yerleştirilir ve istenilen reaksiyon hızının elde edilmesi için elektrotların geometrik alanlarından daha büyük üretilir.

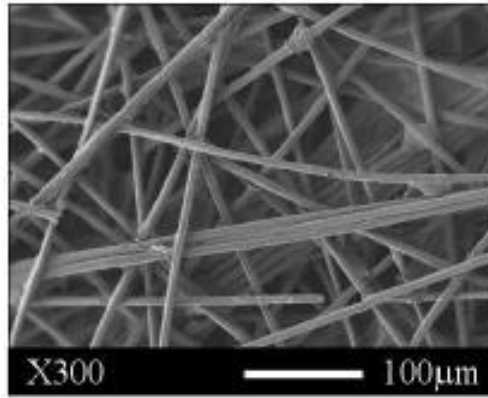


Şekil 3.16. Platin Katalizörün TEM Mikroskop Görüntüsü [46].

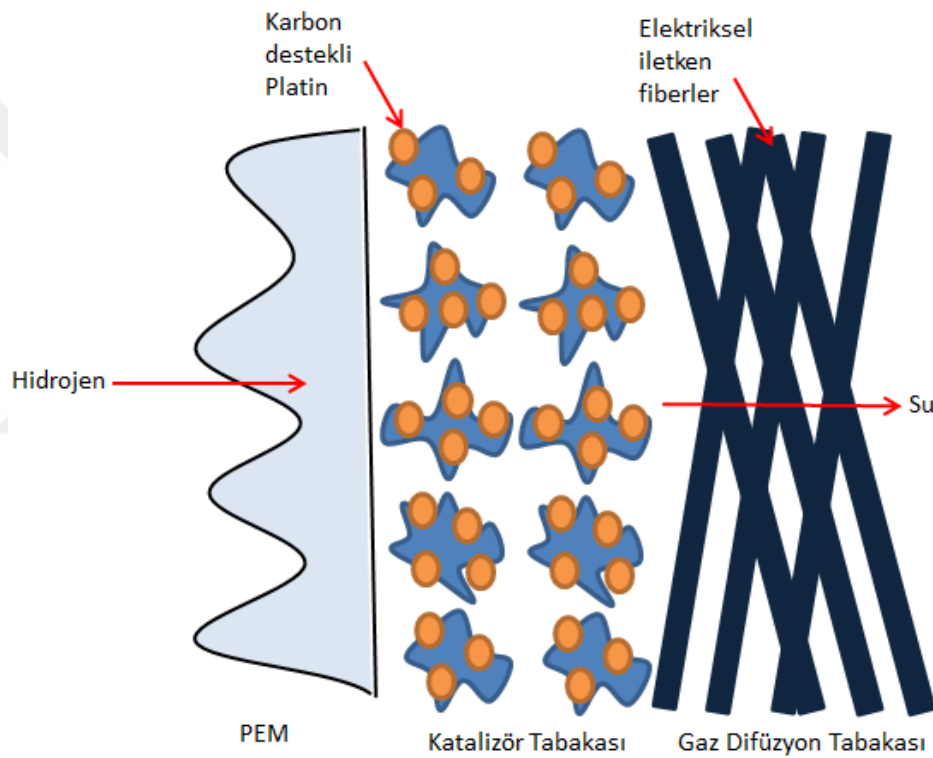
Genellikle içeriği platinyumdan (Pt) oluşan katalizörler karbon taneciklerinden destek alan, iyonomerler içine gömülü poroz yapıda maddelerdir. Gözenekli yapısı katalizöre su geçirgenliği ve hidrojenin iyonlarına ayrılmasında yardımcı olur. Yüksek maliyetinden dolayı platinyum katkısı azaltılmaya çalışılmakta ya da daha ucuz maddeler kullanılmaktadır.

3.5.1.3. Gaz difüzyon tabakası

Katalizör tabaka ile bipolar tabaka arasında bulunan gaz difüzyon tabakası karbon kumaş ve karbon kâğıttan imal edilmektedir. Temel görevi katalizör katmanı boyunca reaktantların homojen konsatrasyon dağılımını sağlamak ve bipolar tabaka ile elektriksel bağlantıyı kurarak anot ve katot tarafındaki bipolar tabakalara elektron taşınmasını gerçekleştirmektir. Gaz difüzyon tabakası ayrıca katalizör tabakasına yapısal destek oluşturur ve katalizör katmanından suyun ve ısıнын çıkarılmasına katkıda bulunur. 100-250 μm arasında bir kalınlığı olan gaz difüzyon tabakasının düşük hücre performansına sebep olan taşkın problemini en aza indirmek için genellikle teflon kaplama gibi hidrofobik (su sevmeyen) maddeler tercih edilir.



Şekil 3.17. Gaz Difüzyon Tabakasının Karbon Kağıt Yapısı [47].



Şekil 3.18. Yakıt Hücresi Elektrotunda gaz, elektron ve proton taşınımı [48].

3.5.1.4. Bipolar plakalar

Anot ve katot gaz difüzyon tabakalarını dıştan saran bipolar plakalar (çift kutuplu plaka), yakıt hücresi içerisinde pek çok görevi gerçekleştirir. Bipolar plakaların temel görevi birden fazla hücreden oluşan pillerde; hücre yığınınına yapısal destek sağlayarak bir arada tutmaktır. Bunun dışında; gaz difüzyon tabakaları üzerinde yakıt ve oksidantın homojen bir şekilde dağıtımını sağlamak, aktif alanda meydana gelen

fazla akım ve fazla ısıнын yönetilerek hücreden uzaklaştırılması, yan ürün olarak üretilen suyun hücreden çıkarılması ve gazların nemlendirilip gaz kaçağının engellenmesi görevleri arasındadır. En yaygın kullanılan malzeme tipi grafitir. Tercih edilen hücre geometrisine ve ihtiyacına göre bipolar tabakanın yüzeyinde konumlandırılan farklı tipte akış kanalları mevcuttur. Doğru seçim ile hücre verimi ve performansını oldukça etkileyen kanallar; düz, iğne ve kapalı olmak üzere çoğunlukla kullanılan tiplerdir.

3.5.1.5. Akım toplayıcı plaka

Son tabaka ile bipolar tabaka arasında bulunan akım kolektörü, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olup elektron geçişini sağlar. En yaygın kullanılan malzemeler bakır veya altın ile kaplanmış metal alaşımlardan üretilmektedir.

3.5.1.6. Son plaka

Hücrenin her bir katmanını bir arada toplayarak bir yığın haline getirip sabitlemek, temas basıncını azaltarak Membran Elektrot Montajı (MEM) ile arasında bir sızdırmazlık sağlamak, reaktant gazların ve soğutucu akışkanların geçişini yönetmek görevleri arasındadır. Bu yüzden basınca direnç oluşturabilmek için yeterli mekanik dayanıma; yüksek enerji yoğunlukları elde etmek için hafif ağırlığa, kararlı elektrokimyasal özelliklere ve elektriksel yalıtıma ihtiyaç duyarlar. Son plakalar için tasarım kriterleri; malzeme, bağlantı yöntemi ve şekil olmak üzere üçe ayrılır. İlk başlarda alüminyum, titanyum ve paslanmaz çelikten yapılırken korozyon sorunları ve ısı kayıplardan dolayı plastik gibi alternatif malzemeler düşünülmüştür. Mekanik mukavemetlerini artırmak için uç plakalar için iki veya daha fazla malzemenin kombinasyonundan oluşan kompozit malzemeler de önerilmiştir.

3.5.2. PEM yakıt hücresinin avantajları ve dezavantajları

Avantajları :

- Çevreyi atık gazlar (CO, NO_x vb.) ile kirlilemezler.
- Karbondioksit'e karşı toleranslıdır. Bunun bir sonucu olarak PEM yakıt hücreleri temizlenmemiş havayı oksidan olarak kullanabilir ve yakıtı yeniden kullanabilir.
- Hareketli parçaya sahip olmadıkları için sessiz çalışır ve uzun ömürlüdür.
- Verimleri yüksektir ve düşük sıcaklıklarda çalışabilir. Bu durum malzeme konusundaki problemleri azaltarak, hızlı başlamayı sağlar (daha kısa ısınma süresi) ve güvenliği artırır.
- Katı, kuru bir elektrolit kullanılır. Bu sayede sıvı taşınması, elektrolit kaybı ve takviyesi gibi sorunları ortadan kaldırır.
- Aşındırıcı olmayan bir elektrolit kullanılır. Saf su işlemi korozyon sorunlarını minimuma indirir ve güvenliği artırır.
- Yüksek voltaj, akım ve güç yoğunluğuna sahiptir.
- Düşük basınçta çalışır, bu da güvenliği artırır.
- Diferansiyel reaktif gaz basınçlarına karşı iyi toleransları vardır.
- Kompakt ve sağlamdır.
- Nispeten basit mekanik tasarıma sahiptir.
- Kararlı yapı malzemeleri kullanılır.

Dezavantajları:

- Üretimleri ve araştırmaları pahalıdır.
- Sadece 50 ppm karbon monoksit'i ve çok az kükürtü tolere edebilirler.
- Reaktant gazların nemlendirilmesine ihtiyaç duyarlar. Nemlendirmek için yapılan su kullanımı yakıt hücresinin çalışma sıcaklığını sınırlar.
- Katalizör olarak pahalı bir madde olan platini kullanılır.
- Gelişimleri için yüksek teknolojiye ihtiyaç vardır ve bu sebeplerden dolayı kolaylıkla seri üretimi tam olarak gerçekleştirilememektedir.

3.5.3. PEM yakıt hücresinin temel kimyası ve termodinamiği

Yakıt hücreleri yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirir ve bu reaksiyonu gerçekleştirirken termodinamiğin özellikle 1 ve 2. kanunlarına uymak zorundadır.

3.5.3.1. Temel reaksiyonlar

Yakıt hücresinde elektrokimyasal olaylar membranın her iki anot ve katot tarafında da aynı anda meydana gelir. Temel yakıt hücresi reaksiyonları aşağıdaki gibidir:

Anot Reaksiyonu: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ (hidrojenin yükseltgenme reaksiyonu)

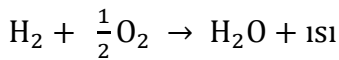
Katot Reaksiyonu: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ (oksijenin indirgenme reaksiyonu)

Toplam Reaksiyon: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Bu reaksiyonlar birkaç ara adıma ve yan reaksiyonlara sahip olabilir. Fakat yukarıda verilen tepkimeler bir yakıt hücresinde gerçekleşen ana prosesleri tam olarak göstermektedir.

3.5.3.2. Reaksiyon ısısı

Toplam reaksiyon, hidrojen yanma reaksiyonu ile aynıdır. İşlem süresince enerji salınımı anlamına gelen yanma ekzotermik bir olaydır.

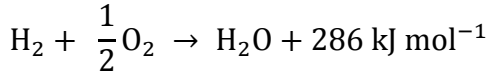


Bir kimyasal reaksiyonun sıcaklığı (veya entalpisi); ürünlerin ve reaktantların oluşma sıcaklıkları arasındaki farka eşittir. Yukarıda verilen eşitlik düzenlenirse:

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{O_2} \quad (3.18)$$

Sıvı suyun oluşum ısısı -286 kJ mol^{-1} (25°C ' de) ve diğer elementlerin oluşum ısısı sıfıra eşittir.

$$\begin{aligned}\Delta H &= (h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (h_f)_{\text{O}_2} = -286 \text{ kJ/g} - 0 - 0 \\ &= -286 \text{ kJ mol}^{-1}\end{aligned}$$



3.5.3.3. Teorik elektriksel iş

Yakıt hücresinde yanma reaksiyonu meydana gelmediği için, hücreye enerji girişinin ölçüsü olarak hidrojen ısı değeri (maksimum termal enerji miktarı) kullanılır. Ancak elektrik, yakıt hücresi içerisinde oluşsa da tüm enerji girdisi tam olarak elektriğe dönüştürülemez. Bundan dolayı hidrojenin üst ısı değerinin bir kısmı yararlı işe dönüştürülürken bir kısmı da entropi üretimi (tersinmezlik kayıpları) olarak açığa çıkar. Reaksiyon entalpisinin elektriğe dönüştürülebilen kısmı (veya hidrojenin üst ısı değeri) sabit sıcaklık ve basınçta Gibbs enerjisine denk gelir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.19)$$

Bir kimyasal reaksiyonun sıcaklığında olduğu gibi entropideki değişimde ürünlerin ve reaktantların entropileri arasındaki farka eşittir.

$$\Delta S = (s_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (s_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (s_f)_{\text{O}_2} \quad (3.20)$$

Aşağıdaki tabloda 25°C ' de ürünlerin ve reaktantların entalpi ve entropileri verilmiştir.

Tablo 3.3. Ürünlerin reaktanların oluşum entalpileri ve entropileri [1].

Ürünler ve Reaktantlar	h_f [kJ/mol]	s_f [kJ/mol.K]
H ₂	0	0,13066
O ₂	0	0,20517
H ₂ O (sıvı)	-286,02	0,06996
H ₂ O (gaz)	-241,98	0,18884

Verilen rakamsal ifadeler denklemlerde yerine koyulduğunda 25°C’de 286 kJ mol⁻¹ enerjinin 237,34 kJ mol⁻¹ elektrik enerjisine dönüştürülmüş geriye kalan 43,68 kJ mol⁻¹ ‘lük kısım ise ısı olarak açığa çıkmıştır.

3.5.3.4. Teorik yakıt pili potansiyeli

En genel ifadelerle elektriksel iş; yük ve potansiyelin bir çıktısıdır.

$$W_{el} = q \cdot E \quad (3.21)$$

$$W_{el} = \text{Elektriksel iş } \{ J mol^{-1} \}$$

$$q = \text{Yük } \{ Coloumbs mol^{-1} \}$$

$$E = \text{Potansiyel } \{ Volt \}$$

Her bir H₂ molekülü için toplam yük transferini ifade edecek olursak:

$$q = n \cdot N_{Avg} \cdot q_{el} \quad (3.22)$$

n =molekülde bulunan elektronların sayısı

N_{Avg} = her moldeki moleküllerin sayısı (Avagadro sayısı=6,022x10²³ molekül/mol)

q_{el} = bir elektron yükü (1,602x10⁻¹⁹ Coulombs/elektron)

$F = N_{Avg} \cdot q_{el} = 96485$ Coulombs/elektron.mol (Faraday Sabiti)

Yakıt hücresinde üretilen maksimum elektrik enerjisine dönüştürülebilen kısmının Gibbs enerjisi olduğu hatırlanarak, denklem tekrar düzenlenirse:

$$W_{el} = n \cdot F \cdot E = -\Delta G \quad (3.23)$$

Yakıt hücresinin teorik potansiyeli:

$$E = \frac{-\Delta G}{n.F}$$

25°C' de yukarıdaki formülde rakamsal ifadeleri yerine koyulursa Hidrojen/Oksijen yakıt pili potansiyeli:

$$E = \frac{-\Delta G}{n.F} = \frac{237340 \text{ Jmol}^{-1}}{2 \times 96485 \text{ Asmol}^{-1}} = 1,23 \text{ Volt}$$

3.5.3.5. Sıcaklığın etkisi

Teorik hücre potansiyeli sıcaklıkla değişmektedir. Genellikle işletme sıcaklığı arttıkça hücre potansiyelininde arttığı gözlenmiştir. Bazı küçük yakıt hücrelerinde dışarıdan ek bir ısıtıcıya ihtiyaç duyulurken; bazılarında hücre sıcaklığını koruyabilmek için soğutma sistemi kullanılmaktadır. ΔH ve ΔS sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu için sıcaklıktan etkilenen ifadelerdir, bu yüzden dolaylı olarak ΔG de sıcaklığa bağlı olarak değişir. Gibbs ve teorik potansiyel denklemleri düzenlenirse:

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{n.F} - \frac{T\Delta S}{n.F}\right)$$

Klasik tip Hidrojen/Oksijen yakıt hücresinin potansiyeli 1,18-1,20 Volt arasındadır.

3.5.3.6. Basıncın etkisi

Önceki işlenen başlıklardaki denklemler atmosferik basınç için geçerli olsa da yakıt hücreleri tipik olarak 6-7 bar arası bir basınçta çalışmaktadır. İzotermal bir reaksiyon için Gibbs serbest enerji değişimi şöyle gösterilebilir:

$$dG = V_m \cdot dP$$

V_m = molar hacim $\{m^3 mol^{-1}\}$

dP = basınç $\{Pa\}$

İdeal gazlar için:

$$P \cdot V_m = R \cdot T$$

V_m değerini çekerek ilk denklemde yerine yazıp integralini alınırsa:

$$dG = R \cdot T \cdot \left(\frac{dP}{P} \right)$$

$$G = G_o + R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{P}{P_o} \right)$$

G_o =Gibbs serbest enerjisi (25°C ve 1 atm’de)

P_o =Standart basınç

Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyona göre denklemi uyarlanırsa:

$$\Delta G = \Delta G_o + R \cdot T \cdot \ln \left[\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}} \right]$$

$$E = E_o + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left[\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}} \right]$$

3.5.3.7. Teorik yakıt hücresi verimi

Yakıt hücresinde verim; faydalı enerjinin (elektrik enerjisi), sisteme giren enerjiye (hücreye giren hidrojenin ısı değeri) oranıdır. Tersinir olarak çalışan bir yakıt hücresinin teorik verimi:

$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-n \cdot F \cdot V}{\Delta H}$$

Gibbs serbest enerjisinin %100 olarak elektrik enerjisine dönüştüğünü varsayarsak, 25°C’de hücre teorik verimi:

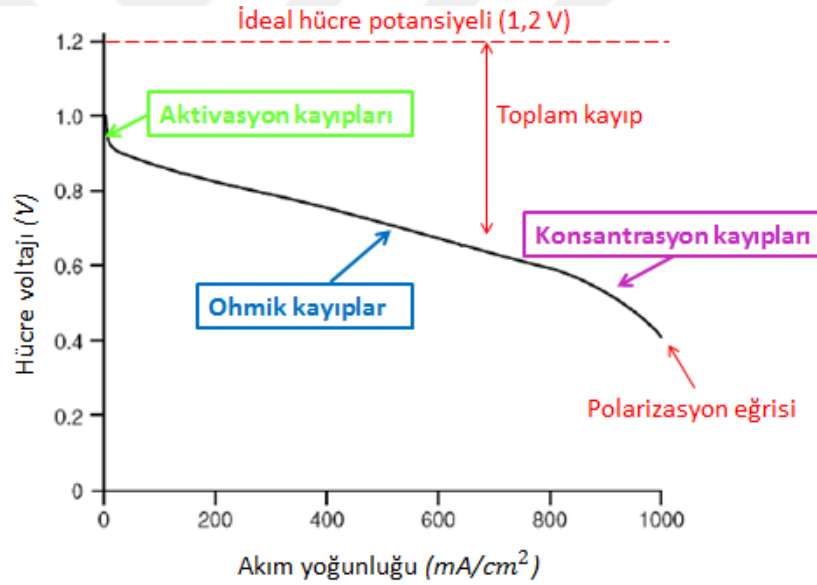
$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = \%83$$

Yakıt hücresinin çalışması gerçek durumda çeşitli kayıplar ortaya çıktığından dolayı teorik verimden daha düşüktür.

3.5.3.8. Yakıt hücresinde kayıplar

Bir yakıt hücresine reaktan gazlar girdiğinde ve aynı zamanda elektrik devresinin açık olduğu durumda, akım üretilmez ve hücre geriliminin teorik değerine eşit olması beklenir. Ancak uygulamada açık devre potansiyeli olarak isimlendirilen hücre potansiyeli, teorik potansiyel değerinden düşük olup genellikle 1 Volt'tan daha azdır. Bu durum dış bir akım olmadığında bile hücre içerisinde bazı kayıplar olduğunu göstermektedir.

Başlıca kayıplar; aktivasyon kayıpları, ohmik (direnç) kayıpları ve konsantrasyon (kütle transferi) olmak üzere 3 grupta toplanabilir.



Şekil 3.19. Yakıt Hücresi Polarizasyon eğrisi [1].

Aktivasyon kayıpları: elektrokimyasal reaksiyon sırasında giren molekül bağlarının kırılması için gereken enerjiden kaynaklanan kayıplardır. Tepkimenin sürebilmesi için voltaj farklılıklarının oluşması gerekmektedir. Katot kutbunda reaksiyon daha yavaş ilerlediği için, anot kutbunda meydana gelen kayıplar nispeten ihmal edilebilir. Aktivasyon kaybını en aza indirmek için; elektrolit-elektrot aktif ara yüzeylerinin iyi ayarlanıp artırılması ve hücreyi yüksek sıcaklıklarda çalıştırmak gereklidir. Deneysel Tafel eşitliğine göre aktivasyon kayıpları:

$$\Delta V_{akt} = \frac{R.T}{a.F} \ln \frac{i}{i_o}$$

α = reaksiyon alanı

i_o = değişim akım yoğunluğu $\{Acm^{-2}\}$

Ohmik (direnç) kayıplar: Membran boyunca iyon hareketine ve elektron akışına karşı oluşan dirençten kaynaklanan kayıplardır. Direnç kayıpları; iyonik iletkenliğin arttırılması, elektrot kalınlığının azaltılması, elektrotlar arası mesafenin azaltılması gibi önlemler alınarak minimize edilebilir.

$$\Delta V_{ohm} = i.R_i$$

$$R_i = R_{i,i} + R_{i,e} + R_{i,c}$$

$$R_{i,i} = \text{iyonik direnç } \{\Omega cm^2\}$$

$$R_{i,e} = \text{elektronik direnç } \{\Omega cm^2\}$$

$$R_{i,c} = \text{temas direnci } \{\Omega cm^2\}$$

$$R_i = \text{toplam hücre iç direnci } \{\Omega cm^2\}$$

Konsantrasyon (kütle transferi) kayıpları: anot ve katot kutupları yüzeyinde gaz hareketinden dolayı akışkanın ilk konsantrasyon değerini koruyamamasından dolayı meydana gelen kayıplardır. Reaktif gazların konsantrasyonu yakıt hücresi içerisinde bir gradyan oluşturur ve reaksiyon sırasında hızlı tüketilmelerinden dolayı elektrotlar arası bir kutuplanma meydana gelir. Kütle transferi kayıpları sıcaklığın arttırılması ve saf hidrojen, oksijen tüketilmesi ile azaltılabilir.

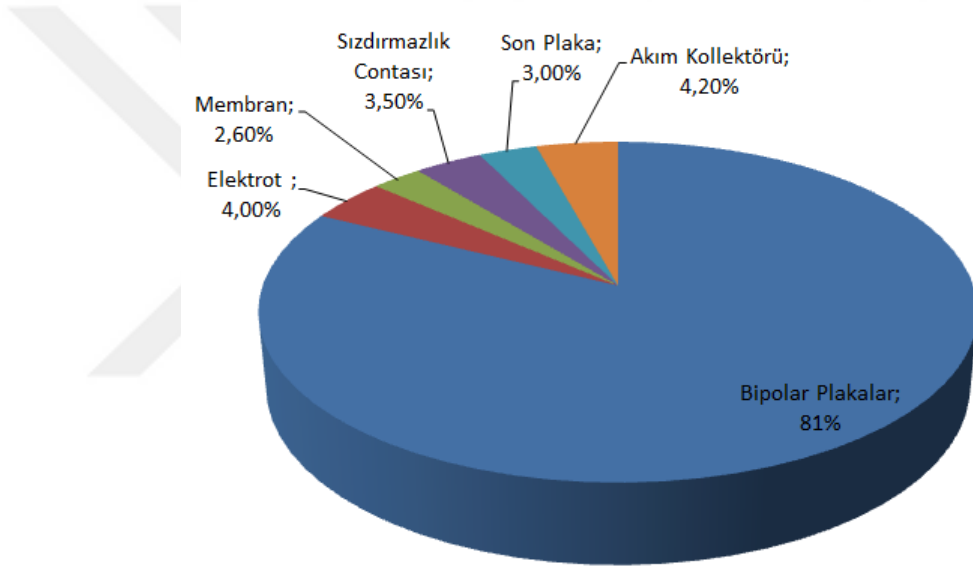
$$\Delta V_{conc} = \frac{R.T}{n.F} \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right)$$

C_B = Reaktan bulk konsantrasyonu

C_S = Katalizör yüzeyinde reaktan konsantrasyonu

BÖLÜM 4. BİPOLAR PLAKALAR

Yakıt pili hücresinin ağırlık olarak yaklaşık %80-88' i gibi önemli bir bölümünü oluşturan bipolar plakalar (akış alanı), akış kanalları vasıtasıyla reaktif gazların Membran Elektrot Montaj'ına getirilmesi için kullanılan kısımdır [49].



Şekil 4.1. Metal Kaplı Bipolar Plaka (24 kg, 33 kW PEM yakıt hücresi) [50].

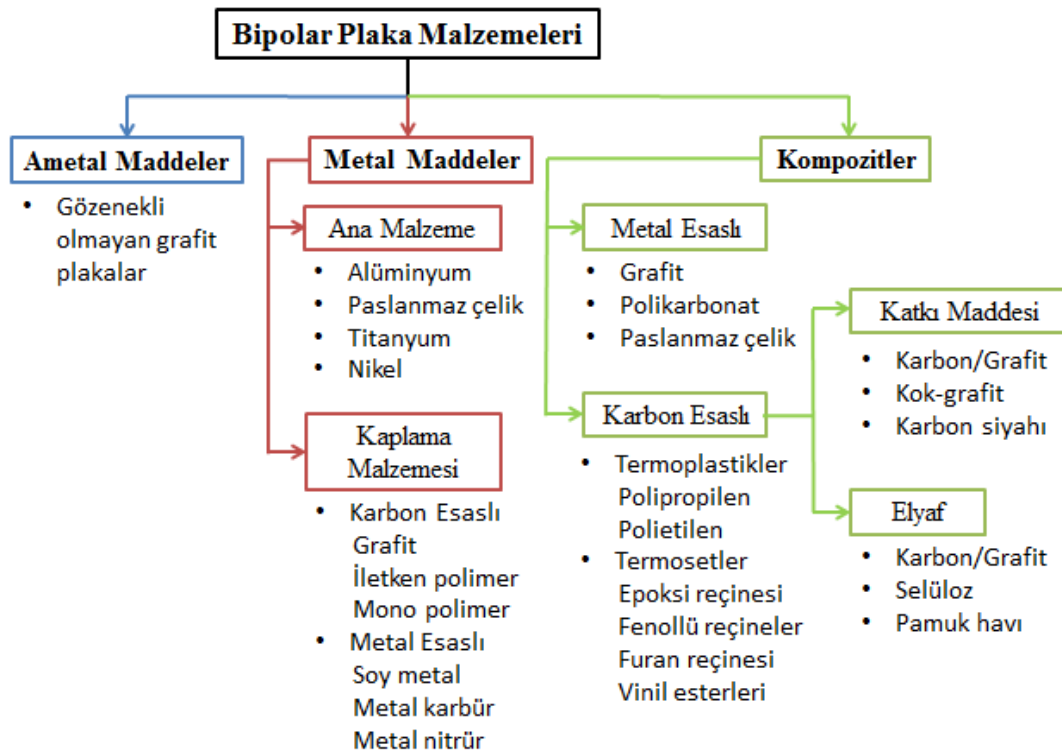
Bipolar plakalar iyi bir hücre yığın performansı ve ömür elde etmek için eş zamanlı olarak pek çok görevi yerine getirirler. Bipolar plakaların yakıt hücresi içindeki görevleri:

- Reaktif gazları akış kanalları vasıtası ile elektrotlara taşıyarak, elektriksel iletimi sağlamak,
- Membran Elektrot Montajının anot ve katot tarafına sırasıyla, hidrojen ve hava/oksijen gazını üniform şekilde dağıtmak, (bunu yapmak için bipolar plakalar üzerindeki akış kanalları kullanılır)

- Net reaksiyonda meydana gelen artık ısı ve su buharının aktif bölgeden uzaklaştırılması için bir mekanizma görevi görmek,
- Mekanik olarak zayıf ve ince MEM' na yapısal destek sağlayarak, istenmeyen bozulma ve bükülmelere karşı platform görevi görmek,
- Reaktantların ve soğutucuların sızmasını önlemek,
- Korozyona karşı dirençli olmak görevleri arasındadır.

4.1. Bipolar Plakaların Üretildiği Malzemeler

Bipolar plakanın çok işlevli olması nedeniyle malzemenin seçimi genellikle bir optimizasyon işlemine dayanır. En yaygın kullanılan malzeme tipi grafit, grafit esaslı kompozitler veya metallerdir. Geçmişte sadece grafitten üretilen bipolar plakalar günümüzde pek çok çeşide sahiptir. Kullanılan malzemeler tablodaki gibidir:



Şekil 4.2. Bipolar Plakalar Malzeme Sınıflandırması [51].

Başlıca kullanılan maddeler; ametal maddeler, metal maddeler ve kompozitler olmak üzere 3 başlıkta toplanabilir.

Ametal maddeler: geleneksel olarak en yaygın kullanılan sentetik olmasının yanında doğal olarak da bulunabilen grafitin tercih edilme sebebi yakıt hücresinde sürekliliği sağlayabilen mükemmel bir kimyasal stabiliteye sahip olmasıdır. Aynı zamanda en yüksek elektrokimyasal güç çıkışında çok düşük özdirence sahiptir.

Ancak yüksek maliyet ve düşük mekanik mukavemete sahiptir. Kırılgan olduklarından düşük kalınlıklarda üretilmesi ve akış kanallarının işlenmesi zor olup işleme maliyeti yüksektir. Birkaç üretim prosesine sahip olan grafitin istenilen özelliklerde imal edilmesi zor ve uğraşıdır. Bu dezavantajlarından dolayı farklı alternatifler geliştirilmiştir.

Metal maddeler: Alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum ve nikel, PEM yakıt hücrelerinde bipolar plaka için bir seçenek oluşturabilir. Grafitlerin ince üretim zorluğuna karşılık metal bipolar plakalar işleme açısından bir zorluğa sahip olmayıp istenen kalınlıkta kolaylıkla imal edilebilirler. Ayrıca geliştirilmiş elektriksel iletkenlik ve iyi mekanik mukavemet gibi özelliklere de sahiptir.

Başlıca demir, krom ve nikelden oluşan paslanmaz çelikler; şekillendirmesi kolay, grafitte göre daha sünek, düşük gaz geçirgenliğine sahip ve geniş aralıkta alaşım seçimine izin veren düşük maliyetli bir malzemedir. Fakat çözülme ve korozyon gibi dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle metal plaklar çözündükleri zaman, çözünen metal iyonları membrana yayılıp iyon değişim deliklerini tıkararak membran ve katalizörde kirliliğe sebep olur ve iyonik iletkenliğin düşme meydana gelir. Bunlara ek olarak bipolar tabaka yüzeyindeki korozyon tabakası, aşınmış kısımdaki elektriksel direnci artırır. Bu gibi sorunlardan kaçınmak amacıyla, paslanmaz çelik bipolar plakalar koruyucu bir katmanla kaplanarak tasarlanmaktadır. Fakat kaplama işlemi oldukça maliyetli olup, avantajlarının önüne geçebilir.

Bazı durumlarda paslanmaz çeliklere kıyasla hafif olmasından dolayı titanyum plakalar tercih edilebilir. Paslanmaz çelik gibi titanyum plakalar da elektriksel olarak iletken, sünek ve kolay işlemeye olanak sağlarlar. Miktarca fazla kullanıldığında çok maliyetlidir. Aynı zamanda yüzeyde temas direncini artıran ve yakıt hücresinin

performansını kötüleştiren pasifleştirici bir tabaka oluşturur. Yüzey kaplama gibi benzer kaplama stratejileri korozyonu önlemek için titanyumlarda da uygulanmaktadır. Titanyum plakalar genellikle maliyetin önemli bir faktör olduğu otomotiv kullanımlarından ziyade havacılık uygulamalarında tercih edilir.

Bipolar plaka üretiminde bir diğer dikkat çeken metalik malzemede alüminyumlardır. Diğer birçok metallere kıyasla hafif ve ucuzdur. Bununla birlikte, yüzeyinde pasif bir film olmadığından, korozyon saldırılarına karşı alüminyum daha fazla hassastır.

Tablo 4.1. Bazı Metalik Maddelerin Korozyon Oranları [52].

Malzeme	Korozyon Oranı ($\mu\text{m}/\text{yıl}$)
Alüminyum	~ 250
Grafit	< 15
Titanyum	< 100
Paslanmaz çelik	< 100
Nikel	> 1000

Kompozitler: hafiftir ve her türlü şekil ve büyüklükte kalıplanabilir, bu özellikleri de PEM yakıt yığınları üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Düşük temas direncine sahip olması ve yüksek korozyon dayanımına sahip olması günümüz uygulamalarında tercih edilmesi açısından önemli özelliklerdir. Kompozit tabakalar metal ve karbon bazlı olarak kategorize edilmektedir.

Metal esaslı kompozit bipolar levhalar Los Alamos Ulusal Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir [53]. Yapılan tasarımda; farklı malzemelerin avantajlarından yararlanmak amacıyla, gözenekli grafit, polikarbonat plastik ve paslanmaz çelik gibi maddeler bir araya getirilmiştir. Gözenekli grafit plakaları üretmek, fazla zaman almayan veya gözeneksiz grafit plakaları üretmek kadar pahalı olmadığından, sızdırmazlık, paslanmaz çelik ve polikarbonat parçalar tarafından sağlandığı zaman kullanılabilir. Grafitin korozyona karşı dirençli olmasına karşılık, paslanmaz çelikler ayrıca yapıya sağlamlık sağlarlar. Polikarbonatlar ise kimyasal direnç sağlar ve herhangi bir şekilde kalıplanabilir.

Yakıt hücrelerinde karbon bazlı kompozit bipolar plakaların kullanımı üzerine geniş bir çalışma yapılmıştır. Karbon kompozit plakalar termoplastikleri (polietilen,

polipropilen vs.) veya termoset reçineleri (epoksi, fenol, vinil ester vs.) elyaf benzeri katkı maddeler ile birlikte kullanılmaktadırlar. Gelişiminin ilk yıllarında, reçine malzemesi olarak termoplastikler tercih edilmiştir. Ancak, seksenlerin sonlarına doğru reçine tercihi termosetler olarak değişmiştir.

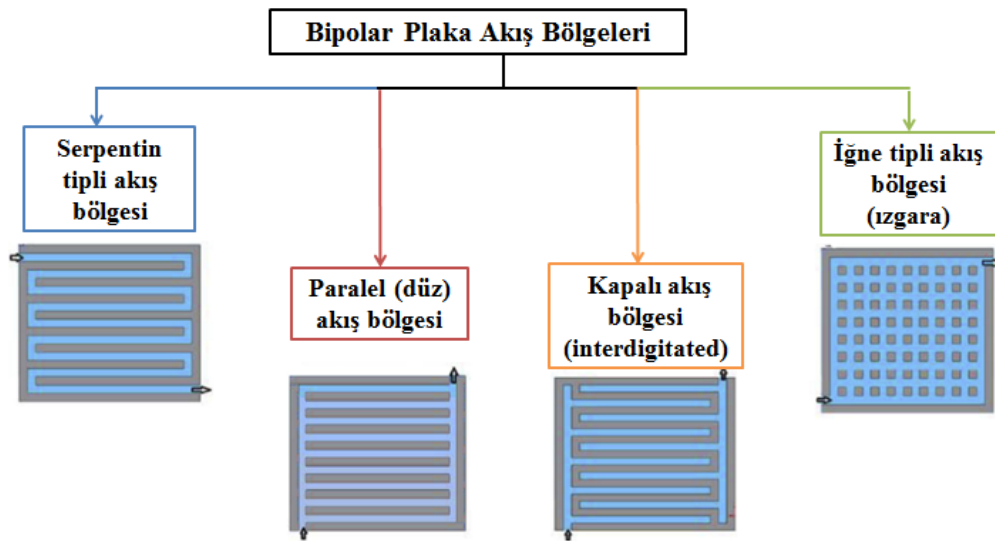
Bipolar plaka malzemesinden özet olarak beklenen özellikler:

- Yüksek mukavemet
- Kolay şekillendirilebilme
- Yüksek elektriksel iletkenlik
- Yüksek termal iletkenlik
- Hidrojen geçirgenliği
- Korozyon ve kimyasal bozulmalara karşı mukavemet
- Isıya ve ateşe karşı direnç
- Titreşim sönümleme

4.2. Bipolar Plakaların Akış Alan Tipleri

Tercih edilen hücre geometrisine ve ihtiyacına göre bipolar tabakanın yüzeyinde konumlandırılan farklı tipte akış kanalları mevcuttur. Bazı küçük ölçekli yakıt hücreleri, hidrojen ve / veya havayı dağıtmak için bir akış alanı kullanmaz, fakat çevreden difüzyon işlemlerine akışı sağlanır. Fakat PEM yakıt hücresi yığını için uygun bir akış alanı vasıtasıyla kanal konfigürasyonu ile maliyet azaltma ve performans iyileştirme gibi özellikler edinilebilir. Akış alanı optimizasyonu ile orijinal çıkış güç yoğunluğunu %50' den fazla iyileştirmek mümkündür.

Gaz akış alanlarının geometrik konfigürasyonlarına gelince, çeşitli tasarımlar bilinmektedir ve geleneksel modeller tipik olarak pim, düz veya serpentin olarak tercih edilmektedir.



Şekil 4.3. Bipolar Tabaka Akış Bölgelerinin Sınıflandırması [54].

Serpentin tipli akış bölgesi: küçük aktif alanlı hücreler için en yaygın akış tipi olan serpentine sıvı akış baştan sona kadar kesintisiz olarak devam etmektedir. Akış yolundaki sürekliliği sayesinde herhangi bir tıkanmanın meydana gelmeyip tüm aşağı akış aktivitesini engellememesi bir avantajdır. Serpentin geometrisinin bir dezavantajı, reaktant maddenin kanal uzunluğu boyunca tüketilmesidir, bu nedenle aşırı polarizasyon kayıplarını önlemek için yeterli miktarda gaz sağlanmalıdır. Fazla basınç düşüşlerinden dolayı geniş akış alanlarında işe yaramayan tekli serpentinli akış yerine çoklu tercih edilir. Basınç düşüşü suyun uzaklaştırılması açısından faydalı olsa da, aşırı basınç düşüşü daha büyük parazitik enerji kayıpları üretebileceğinden önlem alınması çok önemlidir.

Paralel (düz) akış bölgesi: bu tasarımda, gaz akış alanı plakası, gaz girişine ve egzoz başlıklarına bağlı, plakanın kenarlarına paralel olan birkaç ayrı paralel akış kanalı içerir. Akış tasarımı vasıtasıyla her bir kanal başına daha az kütle akışı gerekir ve düşük basınç değişimleri ile sürekli bir gaz dağılımı elde edilir. Paralel akış konfigürasyonunun bir dezavantajı, kanaldaki bir tıkanmanın, kalan kanallar arasında akışın yeniden dağıtılmasına neden olması ve böylece tıkanmanın altında ölü bir bölge oluşturmasıdır. Bu tasarımla ilgili bir diğer konu, kanalların kısa olması ve çok az yön değişimine sahip olmasıdır. Bunun bir sonucu olarak, kanallardaki basınç

düşüşü azdır. Fakat boru sisteminde ve hücre yığını dağıtım manifoldun da aynı durum geçerli olmayabilir.

Kapalı akış bölgesi: kanal uçları kapalı olan bu akış bölgesinde, tasarım diğer akış geometrilerine göre oldukça farklıdır. Genellikle, akış kanalları plaka girişinden plaka çıkışına doğru sürekli değildir. Reaktif akış elektrot yüzeyine paralel gerçekleşir. Bu tasarım, suyun taşmasını önleyen ve performansını artıran elektrot yapısından etkili bir şekilde suyu uzaklaştırabilir. Homojen gaz dağılımını sağlayarak iyi bir kütle transferi ve yüksek performans elde edilir. Ancak, gaz difüzyon tabakasının kalınlığına ve porozluluğuna bağlı olarak, bu akış alanı daha yüksek basınç düşüşlerine neden olabilir. Uzun vadede gaz difüzyon tabakasında hasara neden olur ve geniş çapta kullanılmamaktadır.

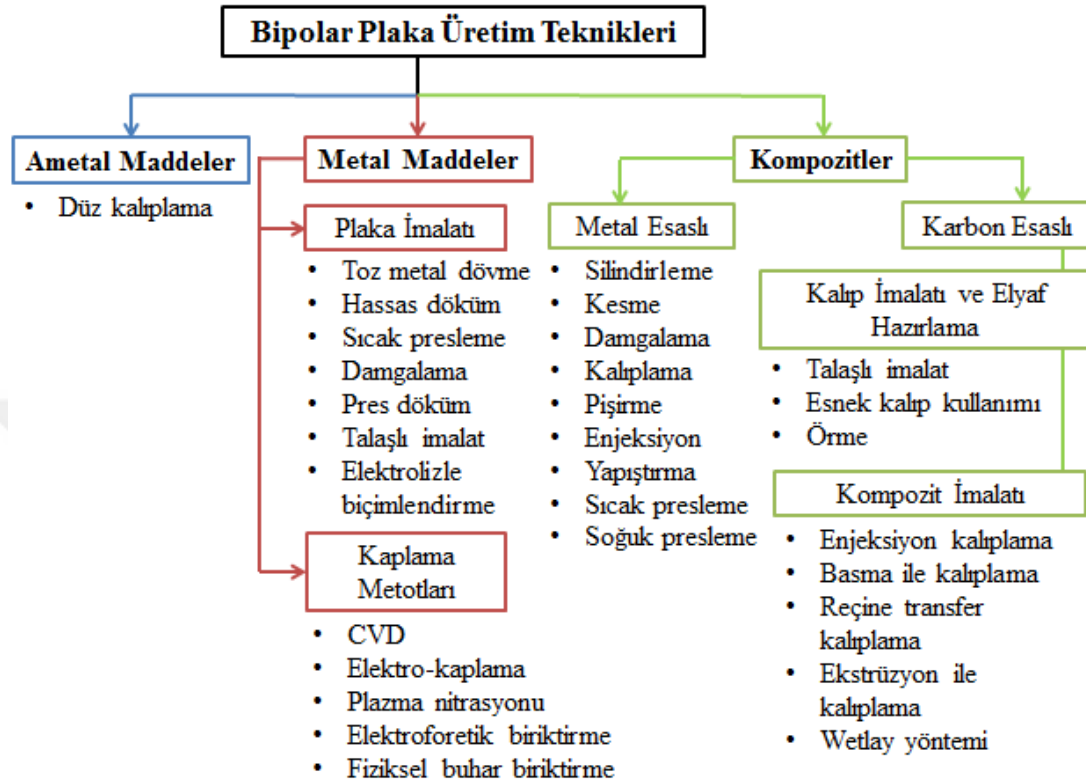
İğne tipli (ızgara) akış bölgesi: Tipik olarak işlenmiş, preslenmiş veya enjeksiyonla kalıplanmış geleneksel akış alanları yerine, iğne tipli akış bölgesi çeşitli geometrik şekillerde olabilen pimlerden yapılmış bir akış alanıdır. En yaygın olan modeli katot ve anot tabakalarının dairesel veya dikdörtgen şeklindeki çıkıntılardan meydana gelmektedir.

Akışkanlar pimlerin oluşturdukları oluklar boyunca taşınmaktadır. Pimlerin oluşturduğu akış alanları az basınç düşüşüne neden olmaktadır ve reaksiyona giren akışkanlar en az dirençle karşılaştıkları akışa yönelmektedir. Heterojen reaktant dağılımı ile su uzaklaştırmasına sahip olması ve düzensiz akım yoğunluğuna sahip olması dezavantajlarındandır. Bağlı kararlı devridaim bölgeleri, her bir pimin arkasında ortaya çıkabilir, çünkü bu gibi küçük bir akış kanallarında tepken akış çok yavaş olur ve bunun için Reynolds sayısı küçük kalır, özellikle yakıt akışı için Reynolds sayısı değişkenlik gösterebilir.

4.3. Bipolar Plakalar Üretim Yöntemleri

Yakıt hücresi tasarlarken ve oluştururken, hücrenin bileşenlerinin malzemelerinin seçimi, bu parçaların imalat yöntemleri ve montaj metotları da oldukça önemlidir.

Çünkü nihai amaç sadece yüksek verimli bir hücre yığını değil ayrıca yüksek seviyede tekrar üretilebilir bir yakıt hücresi oluşturmaktır.



Şekil 4.4. Bipolar Plakalar Üretim Teknikleri Sınıflandırması [54].

Çoğu hali hazırda kullanılan yakıt hücresi plakalarının tasarım ve malzemelerinden dolayı seri üretime geçilememiştir. Bu nedenle, bir bipolar plakanın tasarım ve seçim sürecinde, alternatif yöntemler, malzemeler ve üretim yöntemleri dikkatli olarak uygulanmalıdır. Geleneksel olarak yaygın kullanılan üretim metotları bu bölümde ametal, metal ve kompozit malzemeli bipolar plakalar için anlatılacaktır.

Ametal maddeler için üretim yöntemleri: geleneksel alternatiflerden biri olan kristal grafit, katkı maddeleri ve bağlayıcılardan oluşan katı grafit bipolar plakalara basınçla kalıplama uygulanır ve oksijen eksikliğinde ısıtılma tabi tutulur. Grafit karışımları tipik olarak alüminyum oksit, zirkon dioksit, silikon dioksit, titanyum dioksit, silisyum karbür ve tozlaşmış kok gibi katkı maddeleri ile yapılmış ve fruktoz, glukoz, galaktoz ve mannoz gibi bağlayıcıların yanı sıra sukroz, maltoz ve laktoz gibi oligosakaritler gibi bağlayıcıları içermektedir.

Metal maddeler için üretim yöntemleri: metalik plakaların imalatı, taban plakasının oluşumunu, yüzeyin hazırlanmasını, temizleme işlemlerini ve son olarak kaplama işlemlerini içerir. Katı metalik bipolar plaka tasarımlarında, standart yöntemlerden olan taban plakasının talaşlı imalat veya damgalanma ile oluşturulmasıdır. Hali hazırda kullanılmakta olan diğer yöntemler; hassas döküm, sıcak presleme, elektrolizle biçimlendirmedir. Bu işleme prosesleri makro boyutlu yakıt hücresi plakaları içindir ($> 1cm^3$). Hassas döküm, toz metal döküm ve çoğu zaman pres döküm küçük yüzeyli makro yakıt hücresi tasarımları ile uyumlu olmayan tekniklerdir. Diğer metalik yakıt hücreleri için ($< 1cm^3$) çok sayıda imalat yöntemleri mevcuttur.

Özellikle metalik maddeler için malzemenin kalitesini ve çalışma ömrünü arttırmak, korozyon maddelerin etkisini minimuma düşürmek, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi gibi pek çok avantajı bulunan kaplama vazgeçilmez bir unsurdur.

Kimyasal buhar biriktirme anlamına gelen CVD, adından da anlaşılacağı üzere buhar fazındaki kimyasal bir reaksiyondan ısıtılmış metal plaka yüzeyi üzerine katının biriktirilmesine ve plakanın bu katıyla kaplanmasına dayanan bir işlemdir. Bu yöntemin en önemli avantajı kaplanan metal plakanın her tarafının üniform olarak kaplanmasıdır.

Fiziksel buhar biriktirme anlamına gelen PVD ise vakum ortamında bulunan malzemenin buharlaştırma sonucu kaplanılacak olan metalik plaka üzerine birikmesi esasına dayanır. Kaplama malzemesi kaynaktan kimyasal olarak değil fiziksel olarak elde edilip atom veya iyon şeklinde plaka üzerine çöker. CVD işlemine göre nispeten düşük sıcaklıkta meydana gelmesi bazı durumlarda tercih edilme sebebi olmaktadır.

Elektro-kaplama yöntemi ise malzeme yüzeyine elektro-kimyasal yöntemler vasıtasıyla metalik bir film oluşturulmasıdır. Korozyona, aşınmaya karşı direnç oluşturması, düşük maliyetli olması ve iyi bir görsel sonuç elde edilmesinden dolayı tercih edilmektedir.

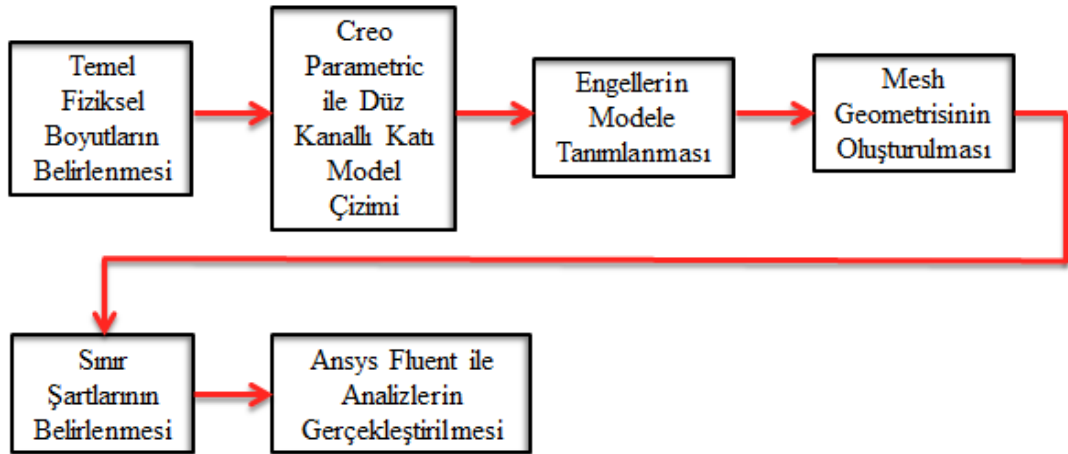
Plazma nitrasyonu işlemi yüzey sertliğini, aşınma ve yorulma dayancını artmasını sağlayan hidrojen azot vb. karbon içeren gazların kullanıldığı kaplama prosesidir. Düşük basınçta gerçekleşen bu işlemde parçalar etrafında yüksek iyonizasyonlu plazmalar oluşturulur ve iyon yüklenen yüzeye aktif azot verilerek yüzey örtü tabakası ile kaplanır.

Kompozit maddeler için üretim yöntemleri: katmanlı Kompozit levhalar için kaplama süreci birkaç adımdan meydana gelmektedir. Döküm imalatı, elyaf hazırlanması ve Kompozit üretimi gibi aşamalardan meydana gelmektedir. Uygulamada tercih edilecek yöntem; takviye malzemesine (elyaf), matris malzemeye, parça geometrisine ve istenen mukavemet özelliklerine göre seçilir.

BÖLÜM 5. SAYISAL ÇALIŞMA

5.1. Tez Çalışmasının Adımları

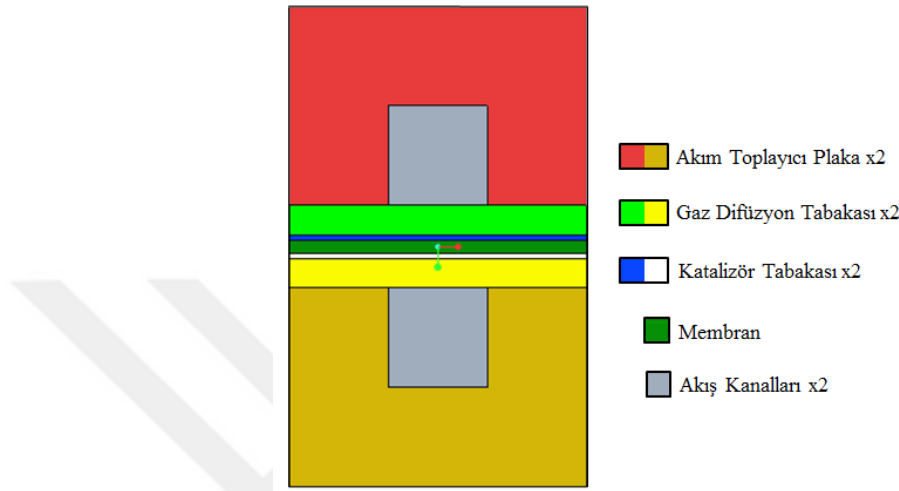
Tez çalışması PEM yakıt hücresinin tek kanaldan oluşan yapısı için akışkanlar mekaniği, enerji korunum denklemleri ve elektrokimyasal reaksiyonları kapsayan matematiksel model oluşturulması ile başlamaktadır. Fiziksel boyutlar belirlenip engeller hücreye tanımlandıktan sonra katı model ve ağ yapısının oluşturulması için Creo Parametric, sayısal analizler içinde ANSYS-FLUENT kullanılmıştır. Başlangıçta tek kanallı bir akış için PEM yakıt pili analizleri gerçekleştirilmiş ardından tek kanallı akışta çeşitli geometrik şekil ve sayılarda engel varyasyonları eklenerek çözümleme gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Modelleme Adımları

5.2. Yakıt Hücresinin Fiziksel ve İşletme Parametreleri

Akım toplayıcı plakalar, anot ve katot gaz kanalları, gaz difüzyon tabakaları, katalizör tabakaları ve membran olmak üzere temel olarak 9 hacimden meydana gelen tek akışlı bir yakıt hücresi üzerinde çalışılmıştır.



Şekil 5.2. Yakıt Hücresinin Tabakaları

Yukarıdaki modelde gösterilen 9 adet PEM yakıt hücresini oluşturan katmanları sıralanırsa:

- Anot akım toplayıcı plaka
- Anot gaz akış kanalı
- Anot gaz difüzyon tabakası
- Anot katalizör tabakası
- Membran
- Katot akım toplayıcı plaka
- Katot gaz akış kanalı
- Katot gaz difüzyon tabakası
- Katot katalizör tabakası

Bu hacimlerin ANSYS FLUENT’de akışkan(fluid), katı(solid) özelliklerinin belirten ve analizde kullanılan isimleri aşağıdaki tablodaki gibidir.

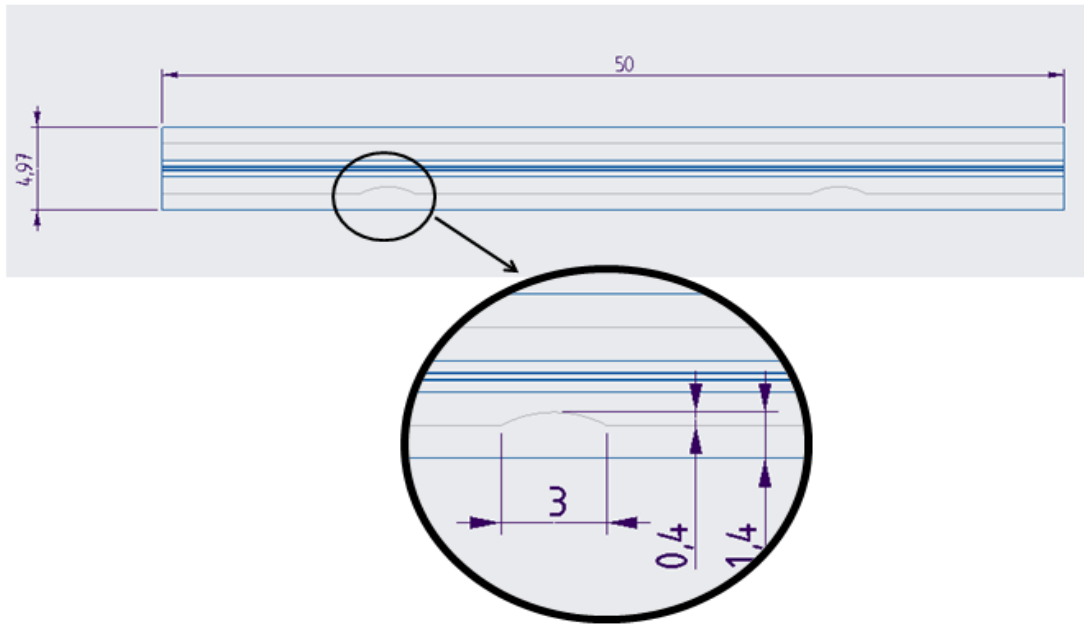
Tablo 5.1. Yakıt Hücresini Oluşturan Hacimlerin İsimleri ve Özellikleri

Yakıt Hücresi Hacmi	FLUENT İsmi	Akışkan / Katı Özellik
Anot akım toplayıcı plaka	Current-a	Solid
Anot gaz akış kanalı	Channel-a	Fluid
Anot gaz difüzyon tabakası	Gdl-a	Fluid
Anot katalizör tabakası	Catalyst-a	Fluid
Membran	Membrane	Fluid
Katod katalizör tabakası	Catalyst-c	Fluid
Katod gaz difüzyon tabakası	Gdl-c	Fluid
Katod gaz akış kanalı	Channel-c	Fluid
Katod akım toplayıcı plaka	Current-c	Solid

Anot ve katod tarafında olmak üzere toplam 2 adet düz kanal bulunmaktadır. Tüm tabakaların meydana getirdiği hücre yığınının aktif alanı ($X \times Z$) $1,5 \text{ cm}^2$ 'dir.

Tablo 5.2. Yakıt Hücresinin Tasarım Parametreleri

Parametreler	Değerler
Kanal uzunluğu	50 mm
Kanal kalınlığı	1 mm
Kanal genişliği	1 mm
Akım toplayıcı plaka kalınlığı	2 mm
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0,35 mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0,05 mm
Membran kalınlığı	0,17 mm
Toplam yakıt hücresi kalınlığı	4,97 mm

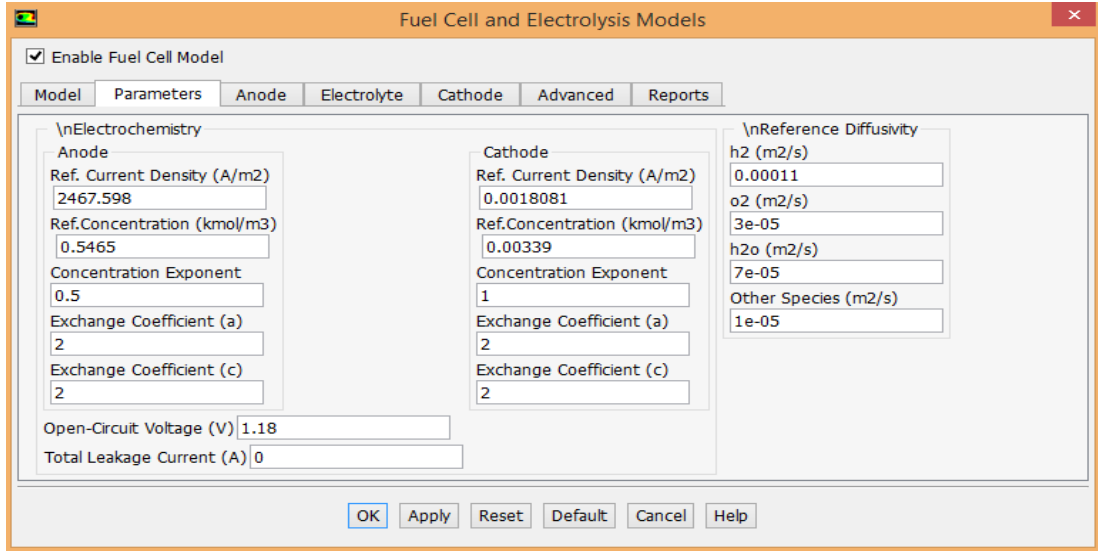


Şekil 5.3. Yakıt Hücresi Fiziksel Model Geometrik Ölçüleri

Temel geometrik özellikler ve engellerin boyutları, yeri, sayısı gibi çeşitli değişkenler belirlendikten sonra ANSYS FLUENT programında model için giriş elektrokimyasal parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 5.3. PEM Yakıt Hücresi Elektrokimyasal Parametreler [56]

Elektrokimyasal parametreler	Değer	Birim
Anot Referans Akım Yoğunluğu	2467,598	A/m^2
Anot Refereans Mol Konsantrasyonu	0,5465	$kmol/m^3$
Anot Konsantrasyon Üssü	0,5	
Anot Dönüşüm Katsayısı	2	
Katot Referans Akım Yoğunluğu	0,0018081	A/m^2
Katot Refereans Mol Konsantrasyonu	0,00339	$kmol/m^3$
Katot Konsantrasyon Üssü	1	
Katot Dönüşüm Katsayısı	2	



Şekil 5.4. Parametrelerin ANSYS Görüntüsü

V, W, F ve Flex olmak üzere 4 tane multigrid çevrimi bulunan ANSYS-FLUENT programında tavsiye edilen F çevrimi kullanılmıştır. Lineer çözücünün yakınsaklığını iyileştirmek için ise eşlenik gradyan stabilize yöntemlerinden BCGSTAB (bi-conjugate gradient stabilized method) kullanılarak fiziksel modelde daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

Relaksasyon faktörü adı verilen FLUENT te tanımlı olan değerler çözüm için iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayan bir kontrol algoritmasıdır. Değişkenlerin her biri, çözücünün çözmeye çalıştığı bir denklemi temsil eder. Değişkenler için elde edilen değerlerin birbirine yakınsak olması gerekir. Çok yüksek ve çok düşük relaksasyon faktörü seçimlerinde sonuçta dalgalanmalar meydana gelebilir. Bu tezde kullanılan değerler aşağıdaki tablodaki gibidir.

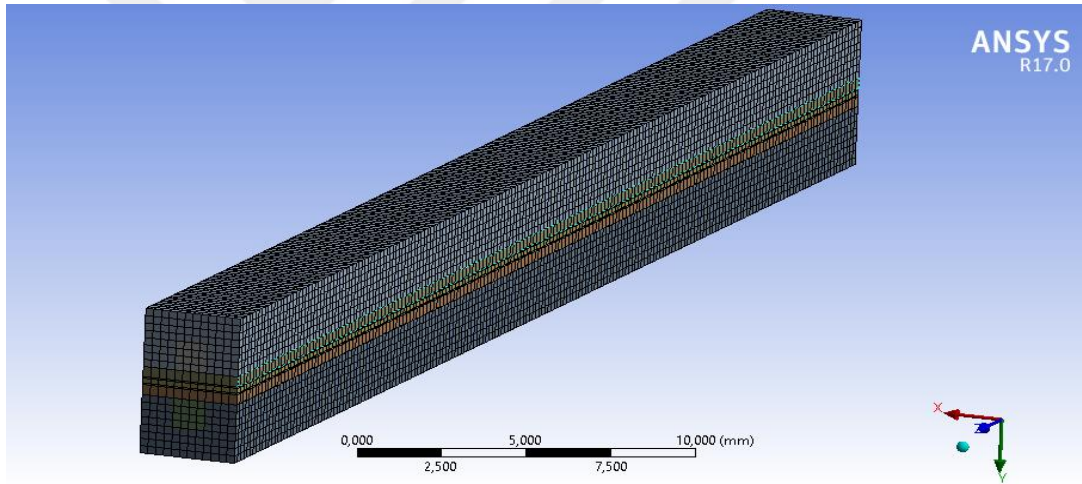
Tablo 5.4. Relaksasyon Değerleri

Değer	Relaksasyon Faktörü
Momentum	0,3
Basınç	0,7
Protonik Potansiyel	0,95
Elektrik Potansiyel	1
H_2	1
O_2	1
H_2O	1
Su İçeriği	0,95

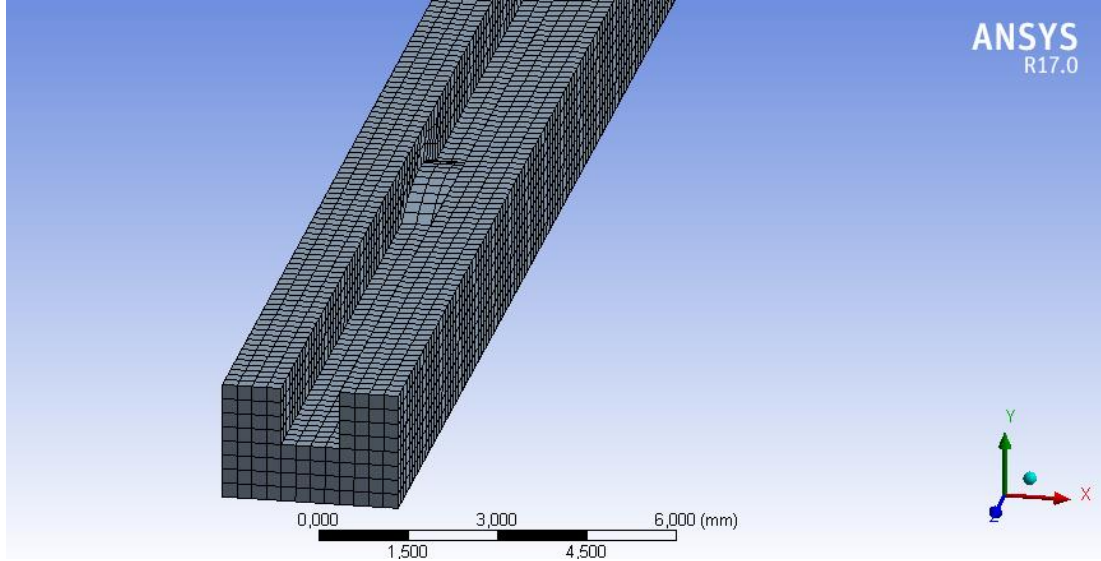
Program SIMPLE, SIMPLER, PISO ve NITA olmak üzere dört ayrı basınç bazlı ayrılmış algoritma sunar. Sürekli sabit akışlarda SIMPLE ve SIMPLER tercih edilirken türbülanslı akışlarda genellikle PISO kullanılır. Bu tezde düzgün bir basınç alanı elde etmek ve kütle korunumunu hızlandırmak için basınç ve hız arasında bir bağlantı sağlayan SIMPLE algoritması kullanılmıştır.

5.3. Yakıt hücresinin Ağ Yapısı

PEM yakıt hücrelerinde modelin tek kanallı olmasından dolayı boyutsal problemler yaşanmış ve bilgisayar yetersizliğinden dolayı karesel (hex-dominant) ağ yapısı oluşturulmuştur. Analiz için en düşük hata payı ile yakınsanma yapılmaya çalışılarak en uygun hücre tipi elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Yakıt Hücresi Ağ Yapısı ANSYS Görüntüsü



Şekil 5.6. Engelli Akım Toplayıcı Kanal Ağ Yapısı ANSYS Görüntüsü

Ağ yapısında elde edilen elemanlar şekil üzerinde görülmektedir. Anot ve katot akım toplayıcı plakalar, gaz kanalları kenar ve hacim boyutlandırma yapılarak daha küçük elemanlara bölünmüştür.

Tablo 5.5. Ağ Yapısı Sayısal Değerleri

PEM Yakıt Hücresi Modeli	Ağ Sayısı	Düğüm Sayısı
İki Engelli Model	50740	77234
Dört Engelli Model	51220	78964
Altı Engelli Model	58453	97115

5.4. Yakıt Hücresi Sınır Şartları

PEM yakıt hücresi için ANSYS-FLUENT modülü kullanılarak sınır şartları geometri de tüm bölgeler için tanımlanmış ve aşağıdaki tablodaki gibidir.

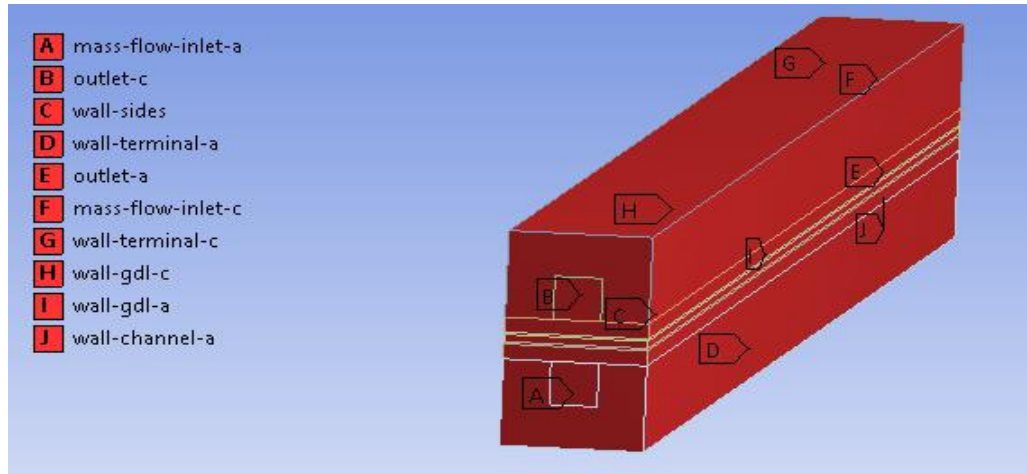
Tablo 5.6. Sınır Bölge Şartları

Yakıt Hücresi Hacmi	Sınır İsmi	Sınır Tipi
Anot giriş	Mass-flow-inlet-a	Kütle giriş sınır şartı
Anot akış kanalı duvar	Wall-ch-a	Duvar
Anot gaz difüzyon tabakası duvar	Wall-gdl-a	Duvar
Anot çıkış	Outlet-a	Basınçlı çıkış sınır şartı
Anot terminal	Wall-terminal-a	Duvar
Katot giriş	Mass-flow-inlet-c	Kütle giriş sınır şartı

Katot akış kanalı duvar	Wall-ch-c	Duvar
Katot gaz difüzyon tabakası duvar	Wall-gdl-c	Duvar
Katot çıkış	Outlet-c	Basınçlı çıkış sınır şartı
Katot terminal	Wall-terminal-c	Duvar
Yakıt hücresi sonu	Wall-ends	Duvar
Yakıt hücresi kenarları	Wall-sides	Duvar

Tabloda bahsedilen sınır tiplerinden kütle giriş sınır şartı; debi ve kütle dağılımı tanımlamak için kullanılmakta ve ek olarak kütle yüzde oranları ve sıcaklık belirtilmektedir. Basınçtan ziyade kütleli debinin önemli olduğu bu sınır şartında kütleli yoğunluk bölgelere göre farklılık gösterirken basınç değişimi sabit olarak kabul edilmektedir. Bu tezde anot ve katot giriş şartlarında kütleli sınır uygulanmıştır.

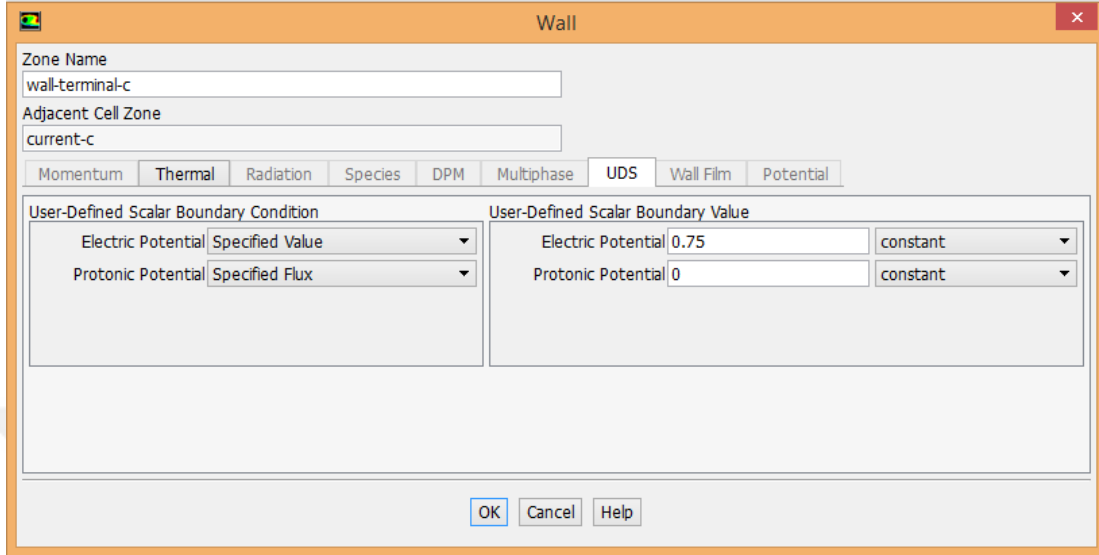
Basınçlı çıkış sınır şartında durum tamamen kütle giriş sınırının tersidir. Anot ve katot çıkış şartlarında basınçlı sınır tanımlanmıştır. Katı anot ve katot akım toplayıcı plakalarda ve akışkan olan geriye kalan tabakalarda ise duvar sınır şartı tanımlanmaktadır. Bu bölgelerin temas yüzeylerine duvar sınır koşulları uygulanmaktadır.



Şekil 5.7. FLUENT sınır şartları görüntüsü

PEM yakıt hücresi için verilen sınır şartları toparlanırsa giriş için sabit kütleli debi, çıkış için ise sabit basınç ve ara tabakalar için duvar tanımlanmıştır. Anot voltajı 0, katot potansiyeli ise 1,2 olan maksimum açık devre voltajından düşük olmak kaydı

ile sırasıyla 0,75V, 0,65V, 0,55V ve 0,45V uygulanarak katot duvar terminalinde varyasyonlar yapılmıştır.



Şekil 5.8. FLUENT Katot Voltaj Girdi Görseli

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma 3 adımdan oluşmaktadır. İlk olarak PEM yakıt hücresinin temel bilgileri, çeşitleri, bileşenleri özetlenerek çalışma prensipleri kimyasal ve termodinamik açıdan tanıtılmıştır. Literatür taraması bölümünde, PEM yakıt hücresi modelleme çalışmalarının tarihçesi ve son gelişmelerin birkaçından bahsedilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde tek kanallı PEM yakıt hücresinin genişliği, tabakaların kalınlığı gibi temel geometrik özellikler optimize edilmiş ve engeller akım toplayıcı plakaya belirli varyasyonlara göre eklenmiştir. Elde edilen yakıt hücresinin bölgeleri için ana kabuller yapılmış ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak sınır şartları ile işletme parametreleri tanımlanmıştır.

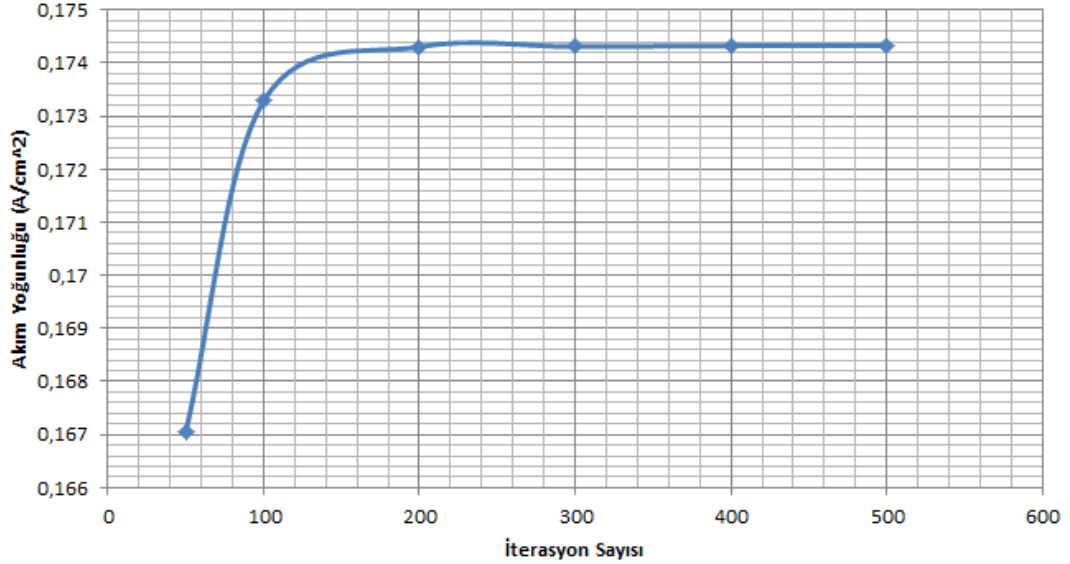
Son olarak belirlenen ağ yapısı ve iterasyon sayısında analizler gerçekleştirilmiştir. Belirlenen işletme parametrelerinin yakıt hücresi performansına göre etkileri incelenmiş ve sonuç bölümü oluşturulmuştur.

6.1. İterasyon Sayısı Bağımsızlık Çalışması

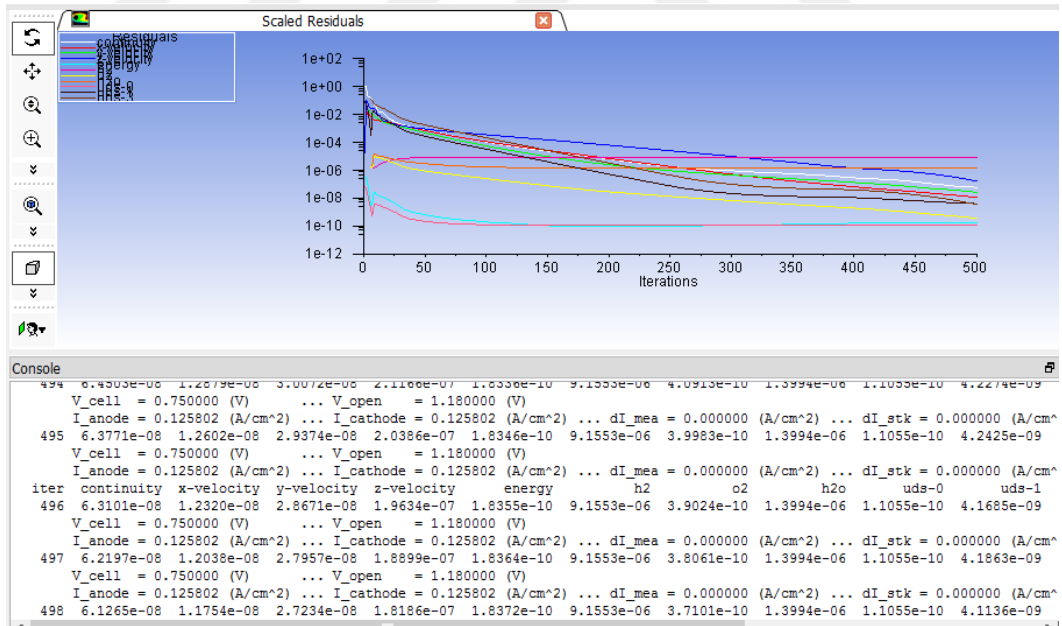
Yakınsama en genel tanımıyla, analizde hücrenin giriş, çıkış şartları ve çalışma parametreleri sisteme uygulandıktan sonra çeşitli çözümlemelerle kararlılık seviyesine ulaşp sonuçlar arasındaki farkların azaltılmasıdır.

Sonuçların iterasyon sayısından bağımsızlığını test etmek için 6 farklı sayı için ANSYS FLUENT'te çözümlemeler gerçekleştirilip her birine karşılık gelen akım yoğunlukları elde edilmiştir.

Hücre voltajı 0,65V olan tek kanallı 2 yarı silindirik engelli yakıt hücresi için akım yoğunluğu değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimi aşağıdaki şekildeki gibidir.



Şekil 6.1. 0,65 V' da Akım Yoğunluğunun İterasyon Sayısı ile Değişimi



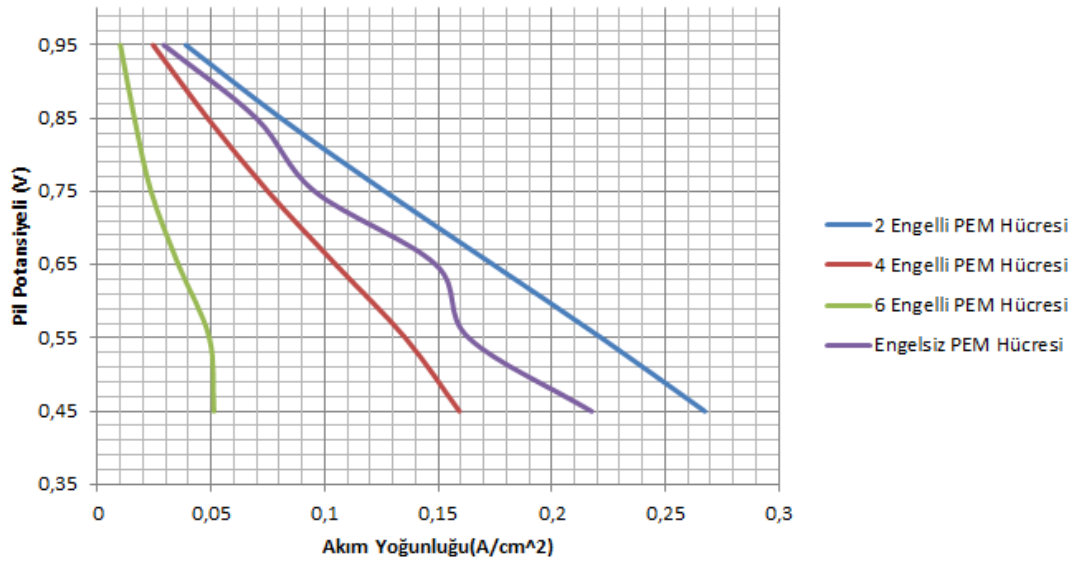
Şekil 6.2. ANSYS İteasyonla Değişim Görüntüsü

Şekil incelendiğinde 50, 100, 200, 300, 400 ve 500 iterasyon sayısı için gerçekleştirilen analizde karşılık gelen akım değerleri görülmektedir. Görselden de anlaşılacağı üzere 300 iterasyondan sonra akım yoğunluğunda çok fazla değişim

meydana gelmemektedir. Daha büyük sayılarda iterasyon yapılması çözüm süresinin gereksiz uzatacağından dolayı, tek kanallı engelli akış geometrisi için analizlerde 300 iterasyon sayısı kullanılmıştır.

6.2. Polarizasyon Eğrileri

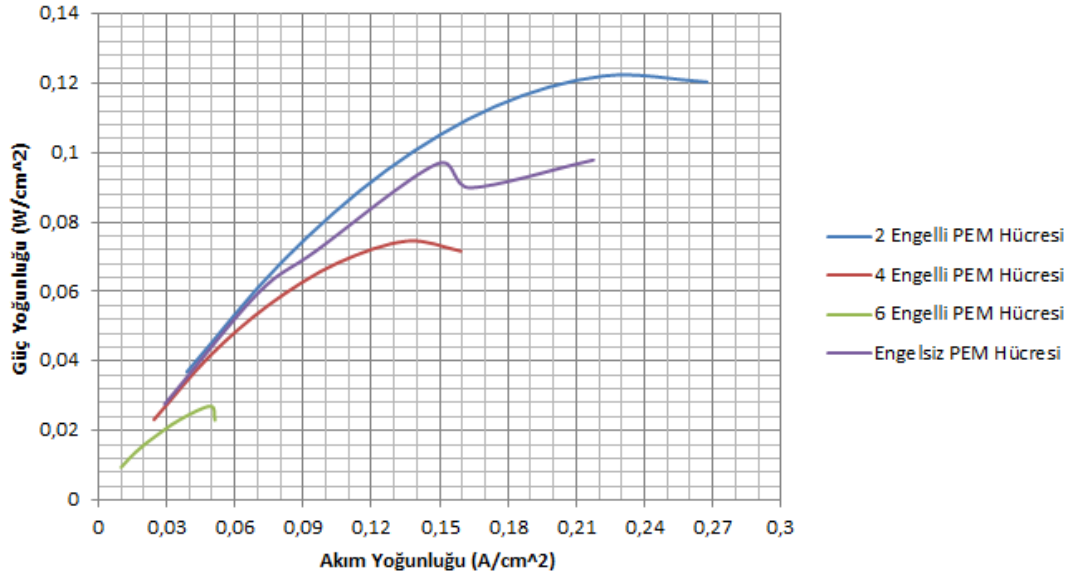
ANSYS Fluent programında 300 iterasyon yapılarak 0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V ve 0,95V hücre gerilimleri için çözdürülen analiz sonucunda elde edilen akım ve güç yoğunluğu değerleri kaydedilmiş ve 80°C için polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Daha sonrasında aynı çalışma parametreleri engelsiz model için tekrar gerçekleştirilmiş ve grafiklerde karşılaştırma yapılmış olup aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Farklı pil potansiyellerinde elde edilen akım yoğunluğu polarizasyon eğrileri

Şekillerden anlaşılacağı üzere çeşitli pil potansiyellerinde alınan en çok akım yoğunluğu 2 engelli modelde elde edilmiştir. En yüksek alınan akım yoğunluğu 0,45V' da 0,2674 A/cm² olarak kaydedilmiştir.

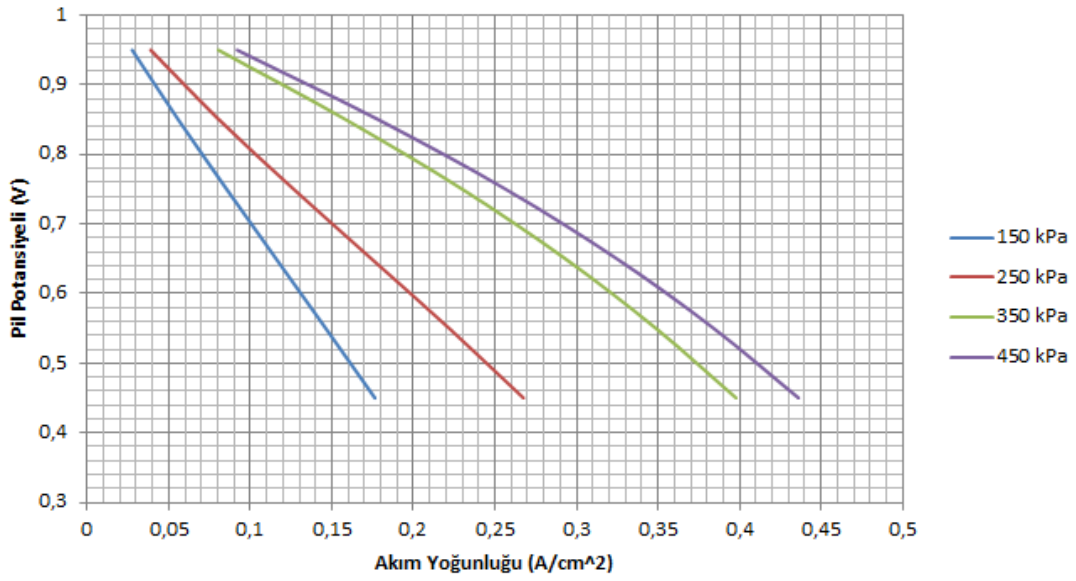
Elde edilen akımlara göre güç yoğunluğu kaydedilmiş ve aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir. Şekile bakıldığında en yüksek güç değeri 0,1221 W/cm² 'de 0,65V gerilimde gözlenmiştir.



Şekil 6.4. Farklı Akım Yoğunluklarında Elde Edilen Güç Polarizasyon Eğrileri

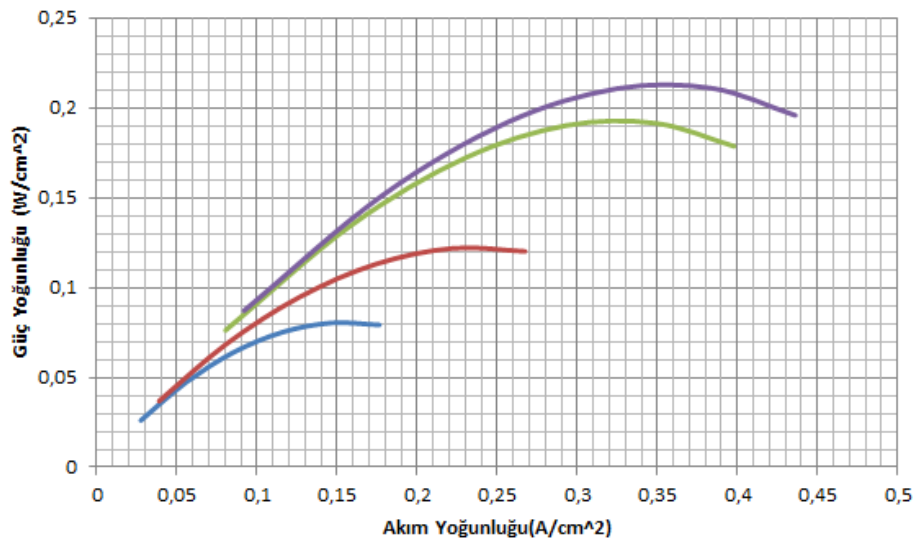
6.3. Çalışma Basıncının Etkisi

Yapılan polarizasyon eğrilerine bakıldığında en verimli olan model 2 engelli PEM yakıt hücresinde elde edilmiştir, bu yüzden işletme parametreleri bu model üzerinde incelenmiştir. Çalışma basıncının etkisinin akım yoğunluğu üzerindeki etkisinin incelenmesi için 2 engelli model dört farklı basınçta analiz yapılmıştır. Yakıt hücresine sırasıyla 150kPa, 250kPa, 350kPa ve 450kPa basınçları 0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V, 0,95V potansiyelleri için uygulanarak her basınç değerine karşılık akım yoğunluğu elde edilerek çözümler yapılmış ve diğer parametreler sabit tutulmuştur.



Şekil 6.5:Farklı Basınlarda Elde Edilen Akım Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri

Şekil incelendiğinde çalışma basıncının arttırılmasıyla hücre performansı artmış ve eğriler pozitif yönde sağa doğru kaymıştır. Bunun nedeni basıncın artması ile akım yoğunluğunun artarak aktivasyon kayıplarında azalma meydana gelmesidir. 450 kPa olan en yüksek basınçta en yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Yüksek basınçta yüksek performans elde edilmesi hücre için bir avantaj olarak görülsede, basınç artışı ek gerilmeler, gaz kanalları çalışma verimi gibi belirli konularda negatif etkiye sahiptir.

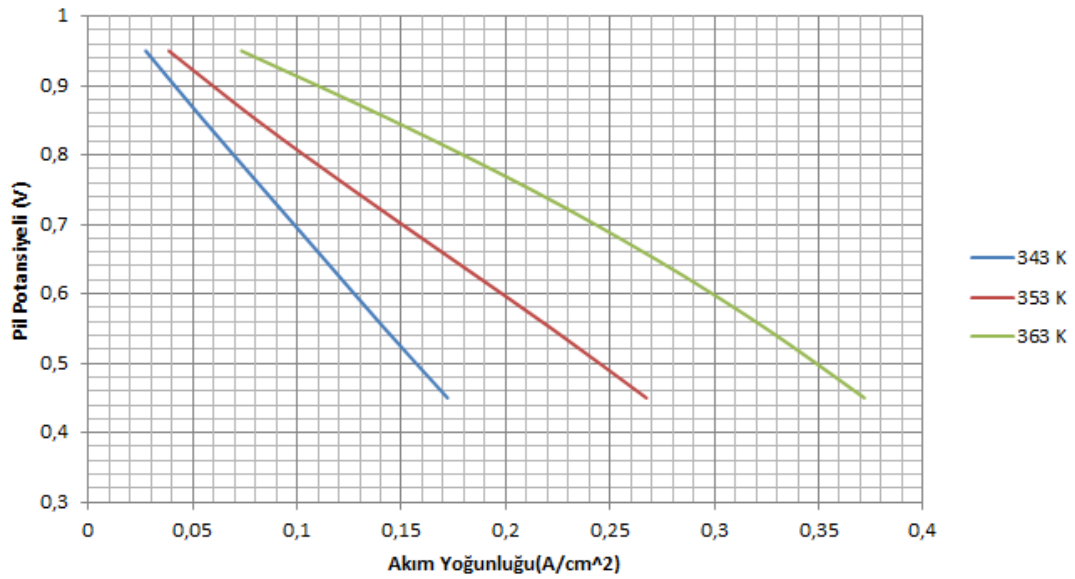


Şekil 6.6:Farklı Basınlarda Elde Edilen Güç Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri

Farklı voltaj değerlerinde akım yoğunlukları elde edilmiş ve yukarıdaki polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Şekile bakıldığında güç eğrileri basınç arttıkça artmış belirli bir süre sonrasında süreklileşerek azaldığı gözlenmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 450 kPa’ da elde edilmiş olup değeri $0,1962 \text{ W/cm}^2$ ’ dir.

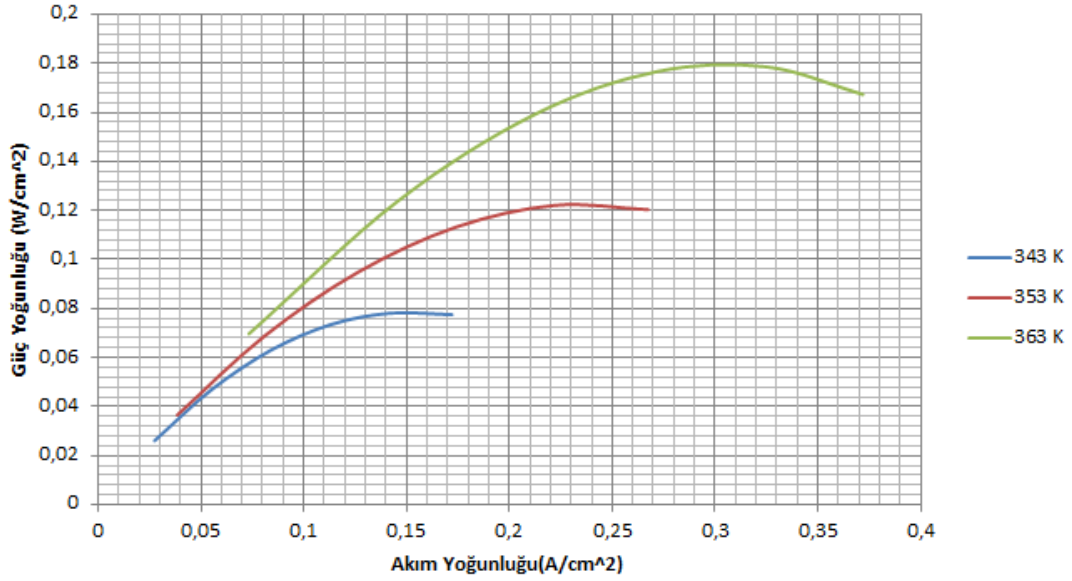
6.4. Çalışma Sıcaklığının Etkisi

Temel olarak hücrede tüm taşınım olaylarını sağlayan sıcaklığın etkisini incelemek için 343K, 353K ve 363K olmak üzere üç farklı sıcaklıkta diğer değişkenler sabit tutularak analiz gerçekleştirilmiş ve 0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V, 0,95V voltaj değerlerine karşılık gelen akım yoğunluklarının polarizasyon eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 5: Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Akım Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri

Şekildeki polarizasyon eğrisi incelendiğinde en yüksek akım yoğunluğu 363K ‘de elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça, yakıt hücresinin protonik iletkenliği ve artan indirgeme reaksiyonlarından dolayı hücre verimi artmıştır.



Şekil 6:Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Güç Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri

Şekile bakıldığında, sıcaklık arttırıldığında elde edilen güç yoğunluğunun da arttığı gözlenmektedir. En yüksek güç 343K'de elde edilmiş olup $0,1673 \text{ W/cm}^2$ 'dir. Sıcaklığın yakıt hücresi üzerindeki etkisi basınca göre kıyaslandığında daha az etkiye sahip olduğu görülmüş ve hücre performansının arttırılması için basıncın arttırılması ile daha verimli sonuçlar elde edileceği anlaşılmıştır.

6.5. Anot Nemliliğinin Etkisi

Çalışma sıcaklığı ve basıncı gibi parametrelere ek olarak anot nemliliğide yakıt hücresinin performansı ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Membranda gerekli nemlilik oranı sağlanarak kütle transferi, proton iletkenliği gibi özellikler kimyasal reaksiyon sırasında arttırılabilir.

Bu bölümde yakıt hücresinde ozmotik kurumaya bağlı olarak su uzaklaştırmaya meyilli olan anot bölgesinde nemliliğin hücre performansına etkisi araştırılmıştır. Bunun için katot tarafındaki hava %100 olarak sabit şekilde nemlendirilirken anot tarafı %15,%55 ve %95 yüzdelerinde nemliliğe sahip hidrojen ile beslenerek etkileri gözlenmiştir.

Aşağıdaki formül kullanılarak farklı anot nemlilikleri için öncelikle anot ve katot gazı giriş hızları hesaplanmış ve kullanılan çalışma parametreleri tabloda verilmiştir.

$$u_{a,in} = \delta_a \frac{I}{n_e F} A_{MEA} \frac{1}{X_{H_2,in}} \frac{RT_{in,a}}{P_{a,in}} \frac{1}{A_{ch}} \quad (6.1)$$

$$u_{c,in} = \delta_c \frac{I}{n_e F} A_{MEA} \frac{1}{X_{O_2,in}} \frac{RT_{in,c}}{P_{c,in}} \frac{1}{A_{ch}} \quad (6.2)$$

Tablo 7:Anot Nemliliği Giriş Parametreleri

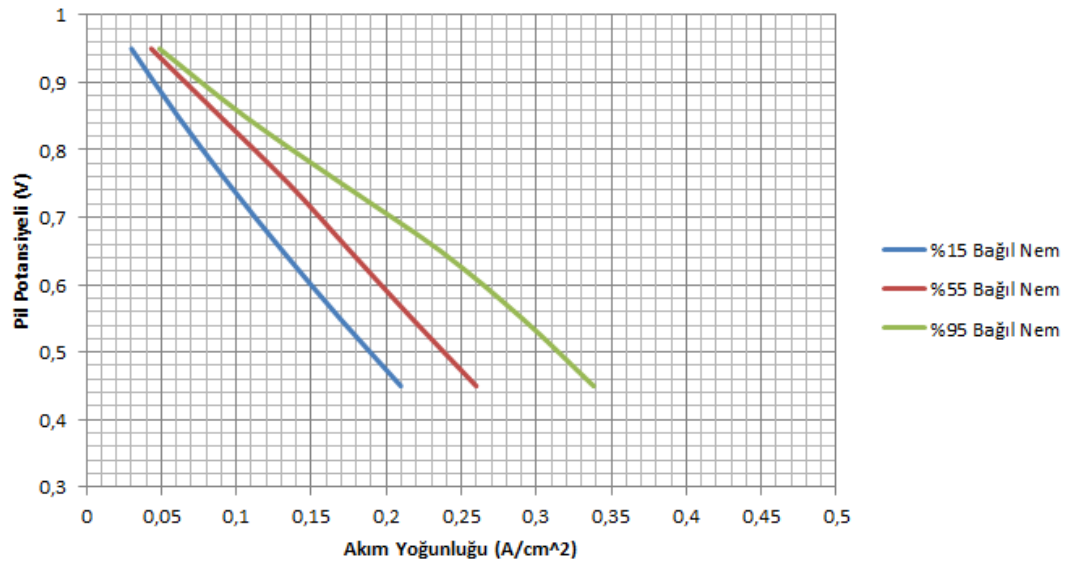
Durum	Hücre Sıcaklığı (°C)	Bağıl Nem (%)	Giriş Basıncı (atm)	Gaz Kanalı Giriş Hızı (m/s)	
				$u_{a,in}$	$u_{c,in}$
1	80	%15	2	0,25	0,66
2	80	%55	2	0,25	0,66
3	80	%95	2	0,25	0,66

Formülasyona göre durum 1,2 ve 3 için anot gaz kanalına beslenen kütleli debi miktarları ve kütle kesirleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

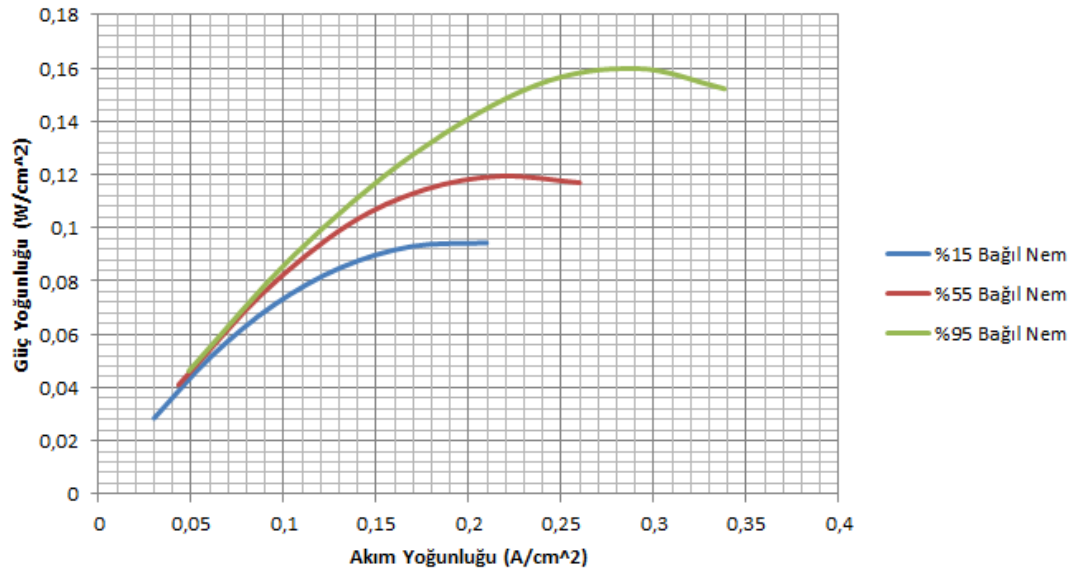
Tablo 8:Anot Nemliliği Çalışma Parametreleri

Durum	Bağıl Nem (%)	Anot Giriş Debisi (kg/s)	Katot Giriş Debisi (kg/s)	Anot Kütle Kesri		Katot Kütle Kesri	
				y_{H_2}	y_{H_2O}	y_{O_2}	y_{H_2O}
1	%15	$5,97 \times 10^{-8}$	5×10^{-6}	0,89	0,11	0,2	0,1
2	%55	$7,41 \times 10^{-8}$	5×10^{-6}	0,71	0,29	0,2	0,1
3	%95	$8,82 \times 10^{-8}$	5×10^{-6}	0,56	0,44	0,2	0,1

353 K' de 2 atm basınç için 0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V, 0,95V voltaj değerlerinde üç farklı anot nemliliği için akım ve güç yoğunluğu polarizasyon eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 6.9:Farklı Anot Nemliliklerinde Elde Edilen Akım Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri

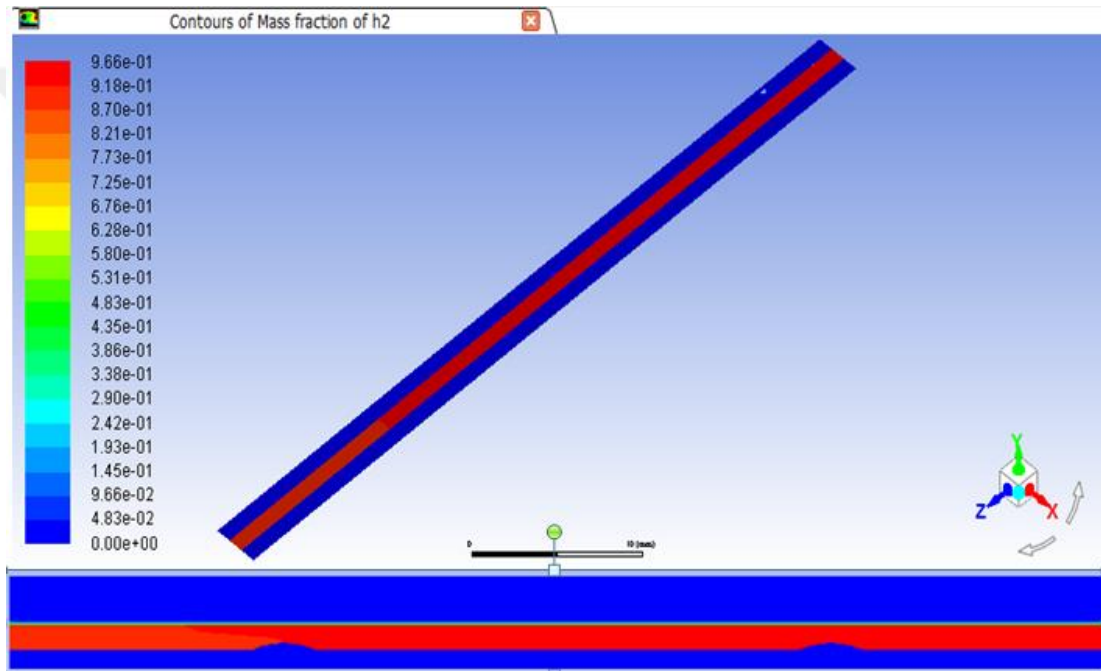


Şekil 6.10:Farklı Anot Nemliliklerinde Elde Edilen Güç Yoğunluğu Polarizasyon Eğrileri

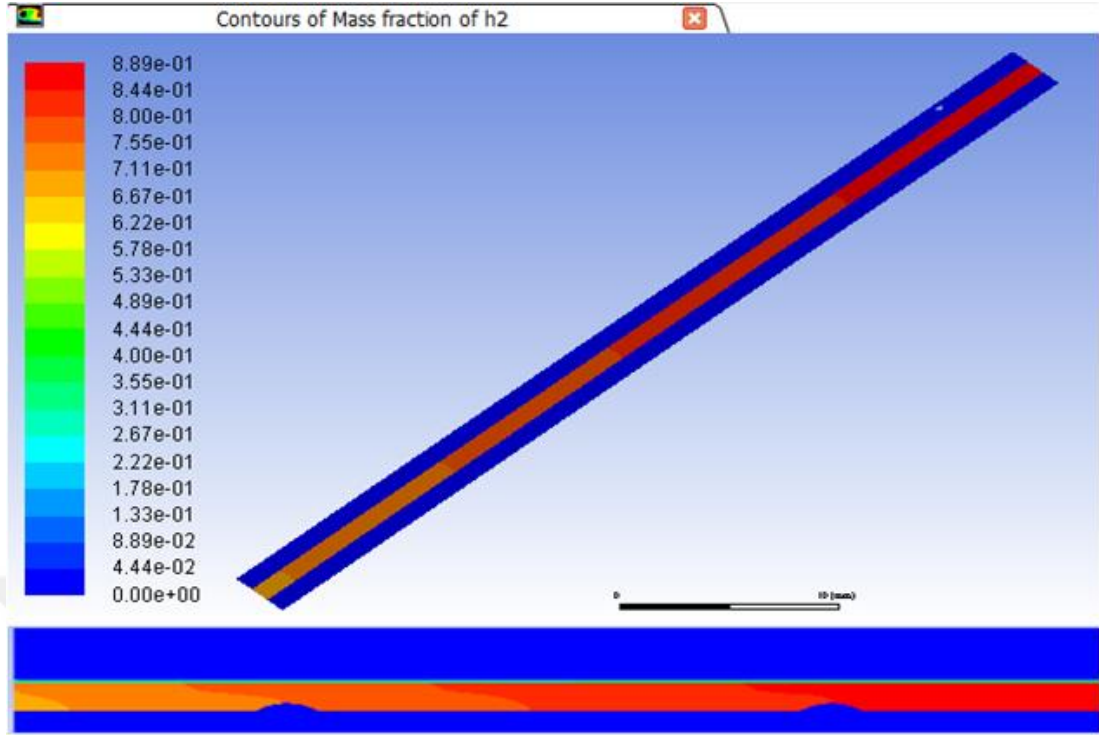
Şekil 6.9’da görüldüğü gibi, nemlilik değeri %15’ ten %95’ e doğru kademeli şekilde arttırılmış ve hücre performansında önemli ölçüde iyileşme meydana gelmiştir. Hücre nemlendirildikçe proton iletkenliğinde artma oluşmuş ve en iyi verim %95 nemlilikte $0,2361 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğu ile elde edilmiştir.

Şekil 6.10'da akım yoğunluklarına karşılık gelen güç elde edilmiş ve polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Eğri incelendiğinde en yüksek verim % 95 nemlilikte $0,1534 \text{ W/cm}^2$ güç yoğunluğu ile elde edilmiş ve nemlilik azaldıkça güç yoğunluğunda azalma meydana gelmiştir.

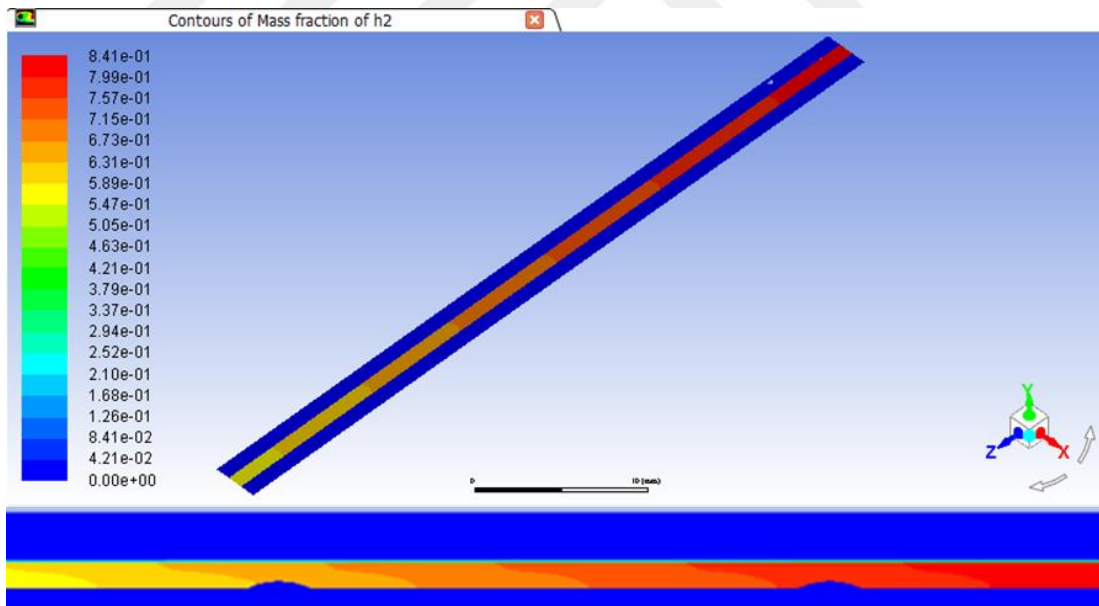
Aşağıdaki şekillerde farklı anot nemlilikleri için anot gaz kanalının $y=1,5$ ve $x=0$ yüzeylerinden kesitler alınarak hidrojen kütle kesri dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 6.11: %15 Anot Nemliliği için hidrojen kütle kesri dağılımı



Şekil 6.12:%55 Anot Nemliliği için hidrojen kütle kesri dağılımı

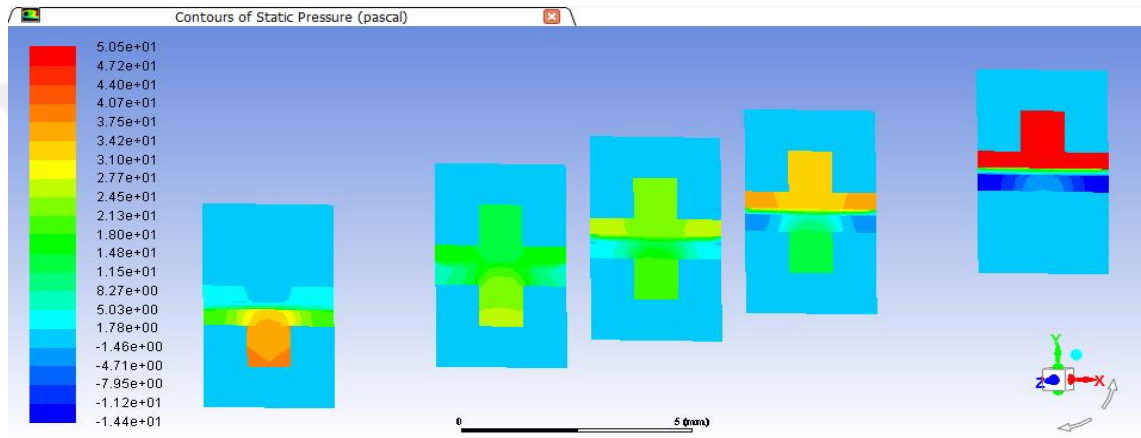


Şekil 6.13:%95 Anot Nemliliği için hidrojen kütle kesri dağılımı

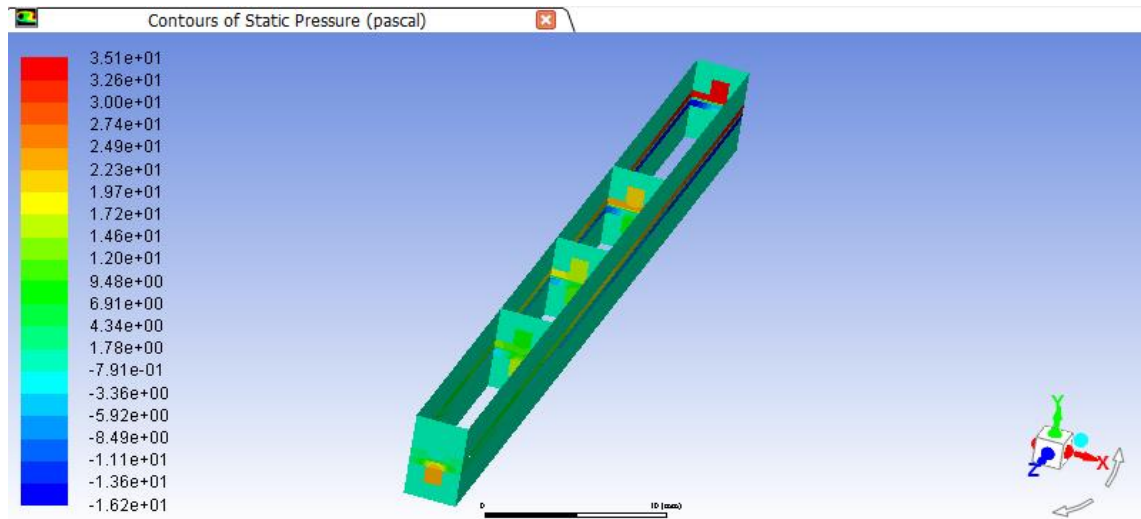
Bağıl nem arttıkça, sistemdeki genel su alımı artmış ve hücre performansı gelişmiştir. Şekiller incelendiğinde en yüksek değerlerin kanal çıkışının sonunda yoğunlaştığı görülmektedir. Hidrojen kütle kesri oranı, gaz kanalı girişinden çıkışına doğru reaksiyona bağlı olarak azalmaktadır.

6.6. Basınç Dağılımı

PEM yakıt hücresinde en yüksek performans 0,65V ve 200kPa'da 2 engelli yakıt hücresinde elde edildiğinden dolayı dağılım görselleri bu model ve çalışma parametreleri esas alınıp $z=-25, -10, 0, 10, 25$ yüzeylerinden kesit alınarak oluşturulmuştur. Şekiller incelendiğinde anot ve katot gaz kanallarında elde edilen basınç değerleri başlangıç yüzeyinden çıkış yüzeyine doğru ilerledikçe azalmakta ve yakıt hücresi çıkışında atmosfer basıncı elde edilmektedir.



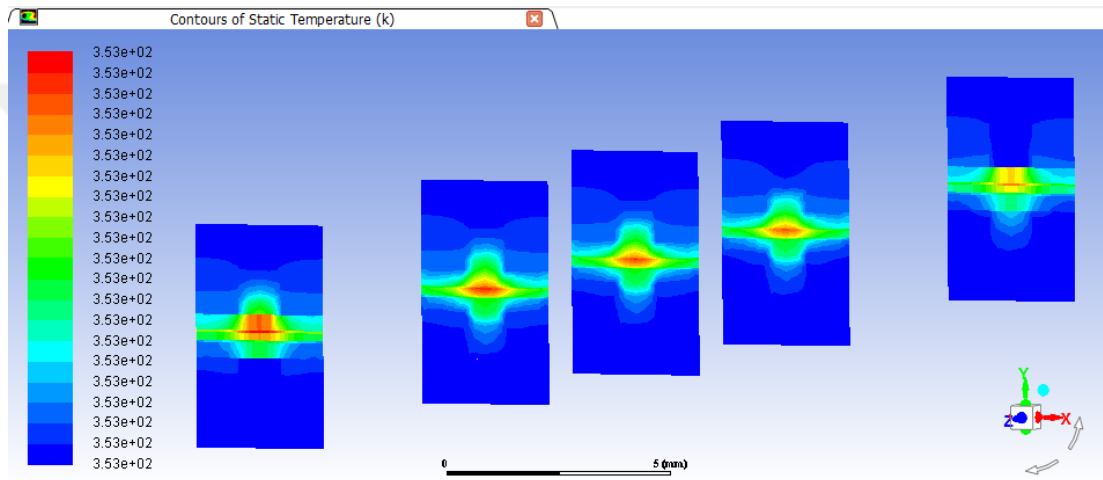
Şekil 6.14: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm Kesitlerinde Basınç Dağılımı



Şekil 6.15: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm ve $x = -1, 1$ mm Kesitlerinde Basınç Dağılımı

6.7. Sıcaklık Dağılımı

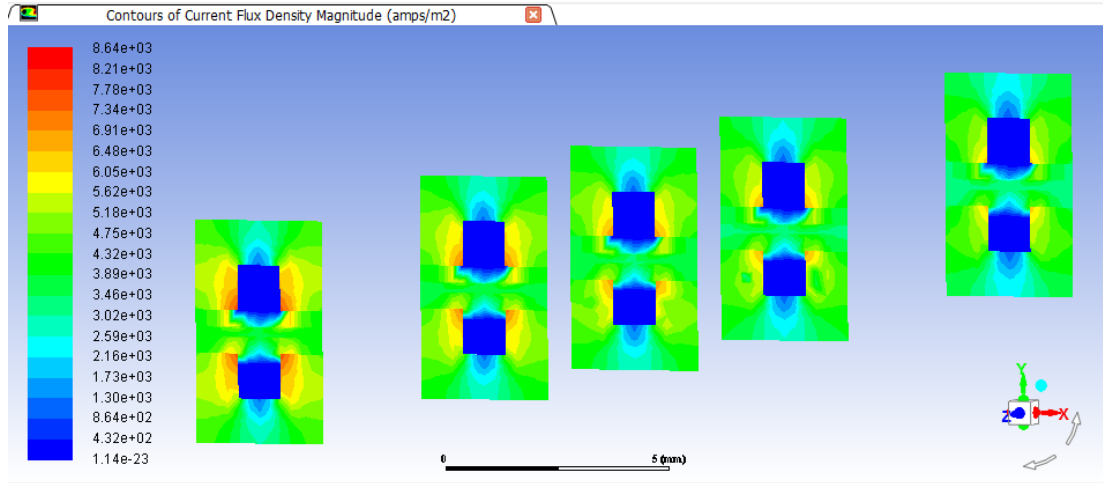
PEM yakıt hücresinde belirlenen yüzeylerden alınan kesitler sonucu 353 K’ de sınır şartında gerçekleştirilen analizin sıcaklık dağılımını gösteren şekil aşağıdadır. Gerçekleşen elektrokimyasal tepkime sonucunda katot tarafında ısı çıkışı meydana gelerek sonucunda gaz difüzyon ve katalizör tabakalarında sıcaklık artışı belirlenmiştir. Hücre daha yüksek sıcaklık değerlerinde çalıştırıldığında, katot tarafında daha fazla sıcaklık farkları gözleneceği düşünülmektedir.



Şekil 6.16: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm Kesitlerinde Sıcaklık Dağılımı

6.8. Akım Yoğunluğu Dağılımı

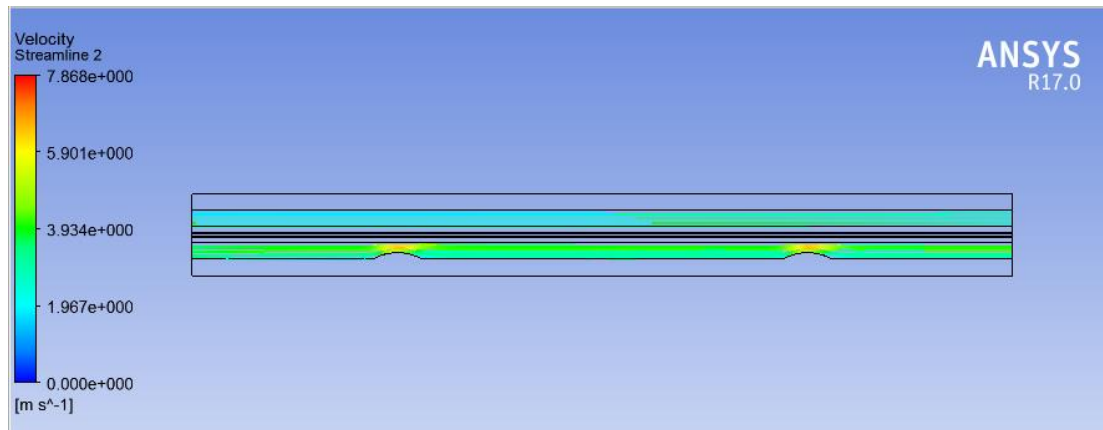
PEM yakıt hücresinde belirlenen yüzeylerden alınan kesitlerde 0,65V gerilimde elde edilen akım yoğunluğu dağılım grafiği aşağıda gösterilmektedir. Gerçekleşen yükseltgenme ve indirgeme reaksiyonu sonucunda anot tarafından ayrılan elektronlar dış bir vasıtayla katoda gelir. Şekil incelendiğinde gaz kanalları etrafında reaksiyon sonucu gerçekleşen elektron aktarımından dolayı akım yoğunluğunun az olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.17: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm Kesitlerinde Akım Yoğunluğu Dağılımı

6.9. Hız Dağılımları

PEM yakıt hücresinde $y=2,485$ yüzeyinden alınan kesitte hız dağılım çizgileri gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere uygulanan işletme parametrelerinde katot gaz kanalında engelli taraflardan geçilirken akışın o bölgelerde sınırlandığından dolayı meydana gelen küçük bir artış oluşmakta ve anot tarafında oluşan hızdan daha yüksek şiddette bir hız gözlenmektedir.

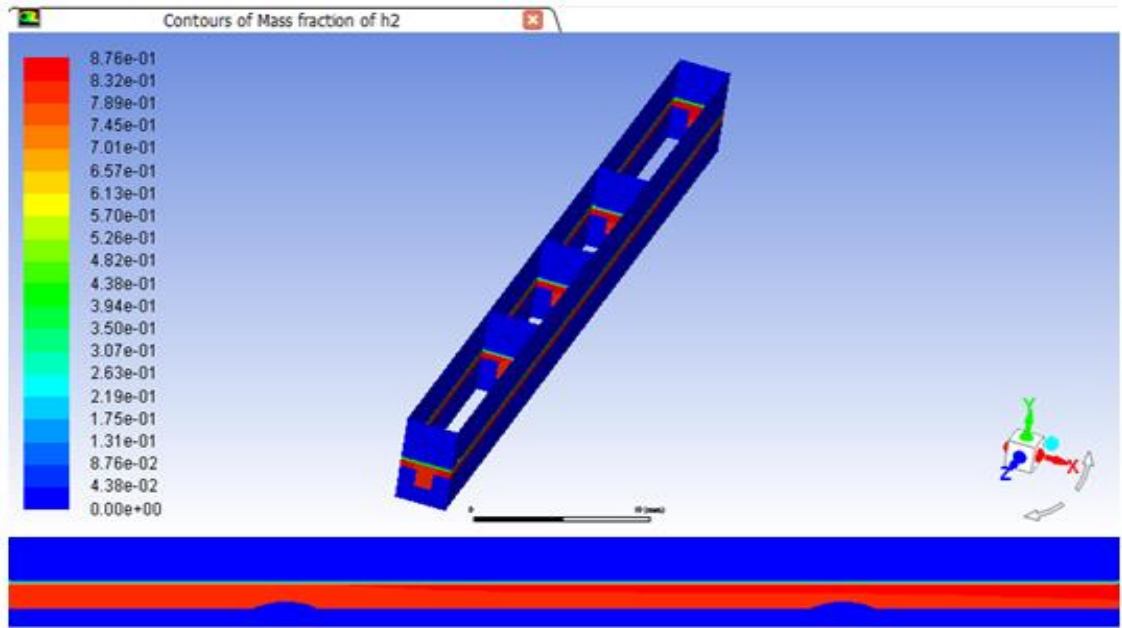


Şekil 6.18: Hız Çizgileri

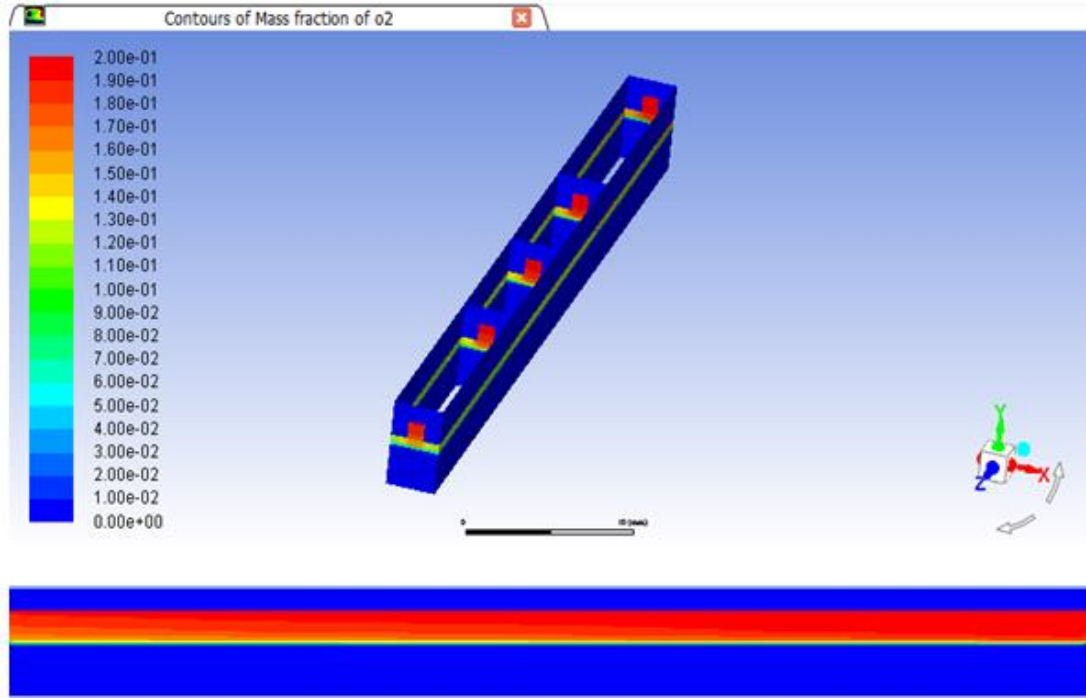
6.10. H₂ ve O₂ Dağılımı

PEM yakıt hücresi geometrisinde $z=-25, -10, 0, 10, 25$ ve $x=-1,5, 0, 1,5$ mm yüzeylerinden kesit alınarak oluşturulan hidrojen ve oksijen mol kesir dağılımları görülmektedir.

Hidrojen gazı yakıt hücresi içerisinde tepkimeye girdikçe gaz yoğunluğunun akış kanalı çıkışına doğru azaldığı gözlenmektedir. Şekil incelendiğinde engellerin bulunduğu anot akım toplayıcı plakada mol kesrinin konsantrasyonunda artma meydana gelmiştir. Oksijen mol kesri ise meydana gelen tepkimede tüketildiğinden dolayı gaz akışı boyunca azalmaktadır.



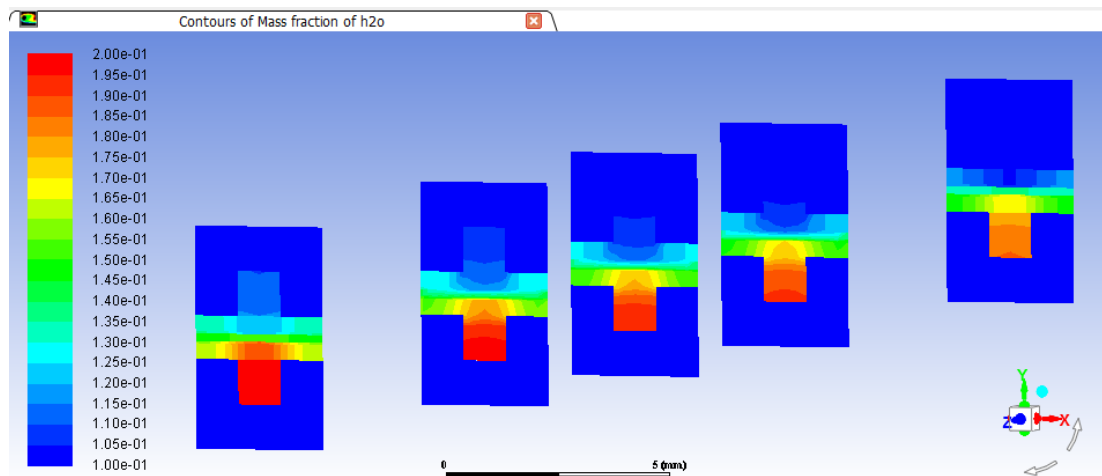
Şekil 6.19: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm, $x = -1,5, 0, 1,5$ mm Kesitlerinde H₂ Mol Kesri Dağılımı



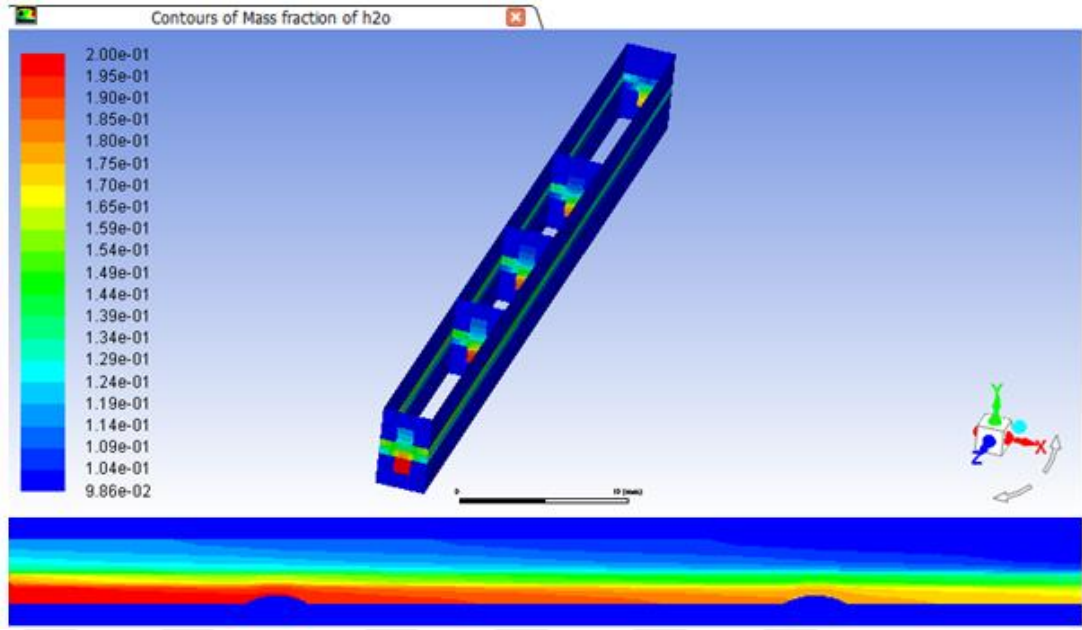
Şekil 6.20: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm ve $x = -1, 5, 0, 1, 5$ mm Kesitlerinde O_2 Mol Kesri Dağılımı

6.11. Su Tutma Kapasitesi

PEM yakıt hücresinde belirlenen yüzeylerden alınan kesitlerde elde edilen su buharı kütle kesri dağılımı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Anotta gerçekleşen yükseltgenme reaksiyonuyla birlikte dış devre ile gelen elektronların hidrojen ve oksijen ile tepkimeye girmesi sonucu su elde edilir. Bu nedenle katot tarafında su kütle kesrinin arttığı gözlenmektedir.



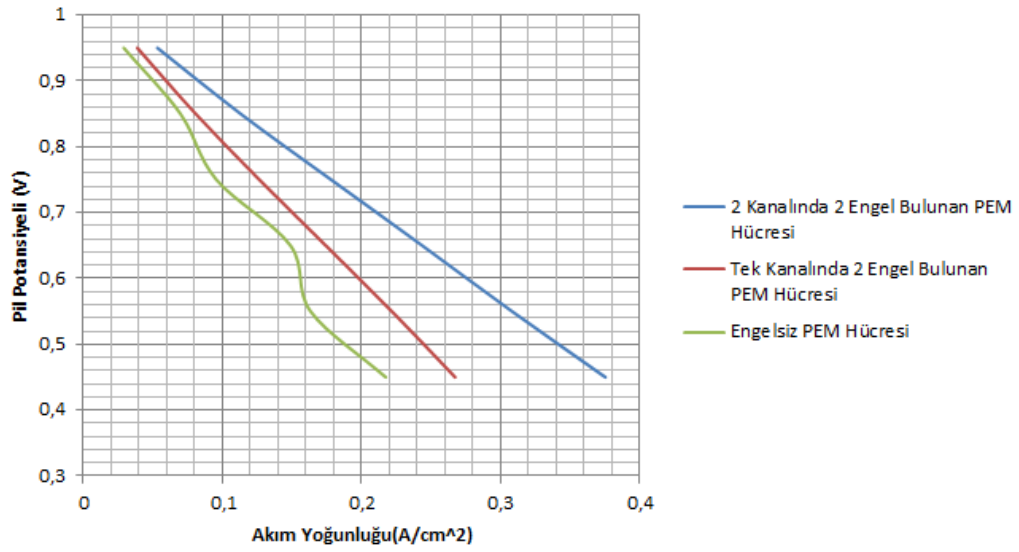
Şekil 6.21. $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm Kesitlerinde H_2O Kütle Kesri Dağılımı



Şekil 6.22: $z = -25, -10, 0, 10, 25$ mm ve $x = -1, 5, 0, 1, 5$ mm Kesitlerinde H_2O Mol Kesri Dağılımı

6.12. İki Kanalı Engel Bulunan Model ile Karşılaştırma

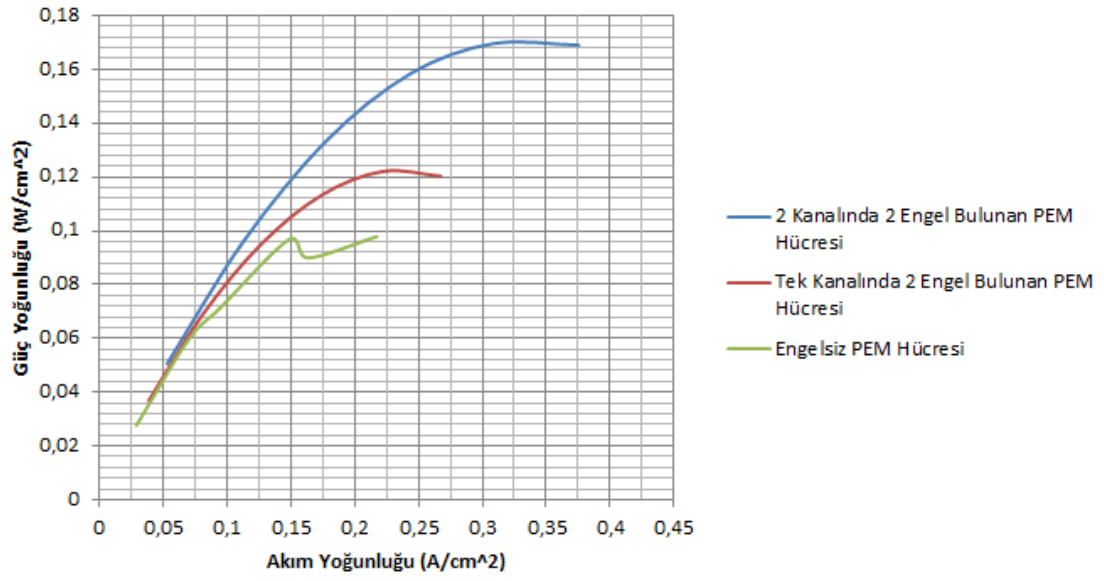
Bu çalışmada sadece anot akım toplayıcı plakalara çeşitli sayılarda engeller yerleştirilerek analizler yapılmıştır. Daha sonrasında katot akım toplayıcı plakayada aynı geometrik ölçülerde engeller eklenerek aynı çalışma parametrelerinde analizler tekrar gerçekleştirilmiş ve farklı pil potansiyellerine karşılık gelen akım yoğunluklarının polarizasyon eğrileri oluşturularak karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 6.23: 0,65 V'da iki kanalda engelli, tek kanalda engelli ve engelsiz hücrelerin karşılaştırmalı V-I Polarizasyon Eğrileri

Yapılan analizler sonucunda en yüksek akım yoğunluğu 2 akım toplayıcı plakasındada engel bulunan yakıt hücresinde elde edilmiştir. Böylelikle daha fazla hidrojen ve oksijen engellerin tahrik edici baskısı sayesinde reaksiyona girmeye zorlanmış ve hücre performansının artması sağlanmıştır.

Modelin iki tarafına engel koyulmasıyla akışın şiddeti engeller üzerinde daha çok yoğunlaşmış ve sürekli bir şekilde artış olduğu gözlemlenmiştir. Her bir pil potansiyeline kaydedilen akım yoğunlukları için yakıt hücresi gücü elde edilmiş ve aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en yüksek güç yoğunluğu 2 plakasındada engel bulunan yakıt hücresinde meydana gelmiştir. Bu analizlerin sonucunda 2 kanala engel yerleştirmenin hücre performansı açısından iyi olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 6.24:0,65 V' da iki kanalda engelli, tek kanalda engelli ve engelsiz hücrelerin karşılaştırmalı P-I Polarizasyon Eğrileri

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında literatürde yapılan PEM yakıt hücresi modelleri göz önünde bulundurularak, geçmişte gerçekleştirilmiş yakıt hücresi parametreleri engelli tek kanallı akış modeli için tekrar revize edilip model oluşturulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal modelleme ve analiz çözümleme çalışmaları sonucunda yüksek hücre veriminin elde edildiği optimum tasarım parametreleri belirlenmiş ve farklı değişkenlerin hücre performansına etkileri incelenmiştir.

PEM yakıt hücresi için ilk olarak engelsiz tek kanallı düz akış için model oluşturulmuş, sınır şartları ve işletme parametreleri tanımlanarak 0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V ve 0,95V için analiz gerçekleştirilmiştir. Her bir voltaj değeri için akım yoğunluğu elde edilerek akım yoğunlukları not edilmiş ve V-I polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur.

Daha sonrasında modelin anot tarafı gaz akış kanalına aşamalı olarak yarı silindirik kesit alanı sabit kalacak şekilde 2,4 ve 6 adet yarı silindirik engeller eklenmiş ve model için uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Engelsiz durum için gerçekleştirilen çalışma şartlarında model çözdürülmüş ve iki durum kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalı polarizasyon eğrilerinden de görüleceği üzere engelli modelde tek bir gaz akış kanalında engel tanımlandığından dolayı çok büyük farklılıklar oluşmasa da %4 ve %5 oranlarında engelli modelin daha iyi akım yoğunluğuna ve güce sahip olduğu gözlenmiştir. Hücre gaz kanalları içerisinde engellerin bulunması molar konsantrasyonu arttırıp konvektif olarak reaktif gazı tahrik etmiş ve verimli değerlere ulaşılmıştır.

Oluşturulan engelli geometrilerden en çok verim 2 yarı silindirik engele sahip modelde olduğu belirlenmiş ve çeşitli parametrelerdeki değişimler bu hücrede

incelenmiştir. Engeller artırıldığında alınan akım yoğunluklarında azalmalar meydana gelmiş ve engelsiz hücre verimine göre daha düşük değerler alınmıştır. Sonuç olarak akışın sınırlandırılması az engel sayısında iyi sonuç verse de sürekli sınırlamaların akış alanını ve çizgilerini saptığı ortaya koyulmuştur.

2 engelli model için en iyi güç yoğunluğu 0,65V çalışma potansiyelinde elde edilmiştir. Bu gerilim değerinde katot ve anot tarafında kararlı bir dağılım gözlenmiş olup 0,1221 W/cm² akım yoğunluğu elde edilmiştir. Çalışma voltajı artırıldığında ise güç polarizasyon eğrisi bir süre sonra azalmaya başlamış ve performans düşüşü meydana gelmiştir. 2 engelli model için basınç, sıcaklık ve nemlilik parametreleri değiştirilerek yakıt hücresi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda basınç, sıcaklık ve nemlilik arttıkça verimin arttığı gözlenmiştir. Fakat yüksek artışların hücre performansı üzerinde negatif etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Daha sonrasında yakıt hücresinin katot tarafındaki akım toplayıcı plakasına aynı geometrik ölçülerde engeller eklenmiş ve analizler tekrar gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde en yüksek akım yoğunluğu yakıt hücresinin 2 plakasındada engel bulunan modelde elde edilmiş olup diğerlerine göre en yüksek performansı göstermiştir.

Yürütülen bu tez çalışmasındaki yapılan analizler ve edinilen bilgi dağarcığı sonucunda hücre performansını geliştirmek için farklı çalışmalarda uygulanmak üzere aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Tasarlanan hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelinin sayısal çözümlerinde gerçek verilere daha yakın sonuçlar elde etmek için engellerin tanımlandığı bölgelerde ağ yapısı sıklaştırılabilir.
- Akım toplayıcı plakaya yerleştirilen engeller çeşitlendirilerek trapez, dikdörtgensel gibi farklı engel modellerinde, farklı geometrik boyutlarda ve sayılarda eklenerek performans incelenebilir.

- Yakıt hücresi kanalları arttırılarak hücre yığını oluşturulabilir. Gaz akış kanalları farklı yükseklik ve genişliklerde tasarlanarak performansa etkisi araştırılabilir.
- Sıcaklık, basınç, ağ sayısı ve kütle kesri parametrelerinin etkilerini incelemeye yönelik çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKÇA

- [1] F. Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Academic Press, 2005.
- [2] «<http://nufus.mobi/dunya/nufus>,» Birleşmiş Milletler Nüfus Araştırmaları.
- [3] E. Traversa ve A. B. Stambouli, «Fuel Cells; An alternative to standard sources of energy,» %1 içinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2002, p. 297.
- [4] U. Gülan, «Proton Değiştirici Membran Yakıt Hücrelerinin Katot Tarafındaki Akış Ve Hücre Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi,» p. 20, Ocak 2008.
- [5] «Hidrojen Yakıtının Özellikleri,» 18 11 2007.
<http://enginsalli.blogcu.com/hidrojen-yakitinin-ozellikleri/2613025>. Erişim Tarihi: 13.10.2018.
- [6] S. Güneş, *Pem Yakıt Hücresi Katodunda Kullanılmak Üzere Platin Bazlı Üçlü Katalizörlerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Elektrokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi*, Ankara, 2008.
- [7] R. O'Hayre, S.-W. Cha ve W. Colella, «Fuel Cell Principles,» %1 içinde *Fuel Cell Fundamentals*, WILEY, p. 42.
- [8] M. Ölmez, *Fuel Cell Systems : Theory and*, İzmir, 2007.
- [9] C. Siegel, «Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane(PEM) fuel cells,» *Elsevier*, p. 1331, 2008.
- [10] S. Ulusoy, *Mathematical And Computational Modeling Of Polymer Exchange Membrane Fuel Cells*, 2012.
- [11] B. Dawn, «Water Balance Calculations for Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells,» *J.Electrochem Soc.*, pp. 3344-3345, 1990.
- [12] D. M. Bernardi ve M. W. Verbrugge, «Mathematical-Model of a Gas-Diffusion Electrode Bonded To A Polymer Electrolyte,» *Aiche Journal*, pp. 1151-1163,

1991.

- [13] D. M. Bernardi ve M. W. Verbrugge, «A Mathematical-Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel-Cell,» *Journal of the Electrochemical Society*, pp. 2477-2491, 1992.
- [14] P. Quan, *Water Transport Management of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, Detroit, Michigan, 2008.
- [15] T. A. Zawodzinski, T. E. Springer ve S. Gottesfeld, «Polymer Electrolyte Fuel-Cell Model,» *Journal of the Electrochemical Society*, pp. 2334-2342, 1991.
- [16] T. A. Zawodzinski, T. E. Springer, F. Uribe ve S. Gottesfeld, «Characterization of Polymer Electrolytes For Fuel-Cell Applications,» *Solid State Ionics*, pp. 199-211, 1993.
- [17] T. F. Fuller ve J. Newman, «Water and Thermal Management in Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells,» *J.Electrochem Soc.*, pp. 1218-1225, 1993.
- [18] T. V. Nguyen ve R. E. White, «A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells,» *J.Electrochem Soc.*, pp. 2178-2186, 1993.
- [19] K. R. Weisbrod ve N. E. Vanderborgh, «Through-the-Electrode Model of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell,» *Electrochemical Society Proceedings*, pp. 152-166, 1995.
- [20] M. Eikerling, Y. I. Kharkats, A. A. Kornyshev, ve Y. M. Volfkovich, «Phenomenological Theory of Electro-osmotic Effect and Water Management in Polymer Electrolyte Proton-Conducting Membranes,» *Journal of The Electrochemical Society*, pp. 2684-2699, 1998.
- [21] J. Divisek, M. Eikerling, V. Mazin, H. Schmitz, U. Stimming ve Y. M. Volfkovich, «A Study of Capillary Porous Structure and Sorption Properties of Nafion Proton-Exchange Membranes Swollen in Water,» *Journal of The Electrochemical Society*, pp. 2677-2683, 1998.
- [22] J. H. Lee, T. R. Lalk ve A. J. Appleby, «Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks,» *J. Power Sources*, p. 258, 1998.
- [23] M. Wöhr, K. Bolwin, W. Schnurnberger, M. Fischer ve W. Nuebrand, «Dynamic modelling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitation,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 213-218, 1998.

- [24] V. Gurau, H. Liu, ve S. Kakaç, «Two-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells,» *AIChE Journal*, pp. 2410-2422, 1998.
- [25] S. Dutta, S. Shimpalee ve J. W. Van Zee, *J. Appl. Electrochem.*, p. 135, 2000.
- [26] S. Dutta, S. Shimpalee ve J. W. Van Zee, *Int. J. Heat Mass Transfer*, p. 2029, 2001.
- [27] E. Hontanon, M. J. Escudero ve C. Bautista, «Optimisation of flow-field in polymer electrolyte membrane fuel cells using computational fluid dynamics techniques,» *Journal of Power Sources*, pp. 363-368, 2000.
- [28] P. Futerko ve I.-M. Hsing, «Two-dimensional finite-element method study of the resistance of membranes in polymer electrolyte fuel cells,» *Electrochimica Acta*, pp. 1741-1751, 2000.
- [29] J. Cao ve N. Djilali, «Numerical Modeling of PEM Fuel Cells Under Partially Hydrated Membrane Conditions,» *Journal of Energy Resources Technology*, pp. 26-36, 2005.
- [30] G. H. Güvelioğlu ve H. G. Stenger, «Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells,» *Journal of Power Sources*, pp. 95-106, 2005.
- [31] M. Tohidi, S. H. Mansouri ve H. Amiri, «Effect of primary parameters on the performance of PEM fuel cell,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 9338-9348, 2010.
- [32] M. Bangs, «Fuel Cells,» %1 içinde *Energy Technology*, 2003.
- [33] F. Barbir, «Indroduction,» %1 içinde *PEM FUEL CELLS - Theory and Practice*, pp. 7-10.
- [34] E. Ata, *İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİ*, GEBZE: 2013.
- [35] S. Srinivasan, *Fuel Cells From Fundamentals to Applications*, New York: springer, 2006.
- [36] M. Çetinkaya ve F. Karaosmanoğlu, «Yakit Pili Tarihi,» *Yakit Pilleri*, p. 2, 2003.
- [37] M. M. Mench, *Fuel Cell Engines*, New Jersey, ABD: John Wiley & Sons, 2008.

- [38] M. R. M. N. S. Swain, «A Comparison of H_2 , CH_4 , and $CaHg$ Fuel,» %1 içinde *International Journal of Hydrogen Energy*, 1992.
- [39] C. Spiegel, *Designing and Building Fuel Cells*, Mc Graw Hill, 2007.
- [40] EG&G Technical Services, Inc., *Fuel Cell Handbook (Sixth Edition)*, West Virginia: U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2002.
- [41] S. G. Meibuhr, «Review of United States fuel-cell patents issued during 1860,» *Journal of Electrochimica Acta*, 1966.
- [42] D. Andrew, *Fuel System Explained*, Second Edition, 2003.
- [43] 2018.<https://www.iconspng.com/image/3274/nafion-protonic-membrane-chemical-structure>.
- [44] P. W. Majsztrik, «Mechanical And Transport Properties Of Nafion® For Pemfc; Temperature And Hydration Effects,» p. 5, 2008.
- [45] M. Gasik, *Materials for fuel cells*, Cambridge England: CRC Press Boca Raton Boston New York Washington, DC, 2008.
- [46] <http://nanomat.uprrp.edu/insidepage18-en.html>. Erişim Tarihi: 15.05.2018.
- [47] http://www.me.udel.edu/research_groups/prasad/research/cgdl.html. Erişim Tarihi: 28.08.2018.
- [48] S. Litster ve G. Mclean, «PEM fuel cell electrodes,» *Journal of Power Sources*, p. 62, 2004.
- [49] X. Li, ve I. Sabir, «Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs,» *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 359-371, 2 Eylül 2004.
- [50] A. S. Woodman, E. B. Anderson ve K. D. Jayne, «Development of Corrosion-Resistant Coatings for Fuel Cell Bipolar Plates,» 1999.
- [51] V. Mehta ve J. S. Cooper, «Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing,» *Journal of Power Sources*, pp. 32-53, 23 Eylül 2002.
- [52] S.-J. Lee, C.-H. Huang ve Y.-P. Chen, «Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 688-693, 22 Eylül 2003.

- [53] «<http://www.ott.doe.gov/pdfs/contractor.pdf>,» 1998. Erişim Tarihi: 10.08.2018.
- [54] L. Rostami, P. M. G. Nejad ve A. Vatani, «A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells,» 2016.
- [55] S. Chen, *Fabrication of PEM Fuel Cell Bipolar Plate by Indirect Selective Laser Sintering*, 2006, p. 45.
- [56] S. Al-Baghdadi ve S. Al-Janabi, «Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model,» *Renewable Energy*, pp. 1077-1101, 2007.
- [57] S. Çelik, «Akiş Kanalı Tasarımının Pem Yakıt Pili Performansına Etkilerinin İncelenmesi,» *ÖHÜ Mühendislik Bilim Dergisi(OHU J. Eng. Sci.)*, cilt 7, no. 1, p. 409, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Pelin Meral, 19.09.1994’de Sakarya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya’da tamamladı. 2012 yılında Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü 2016 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü’nde enerji alanında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında 1 yıl süreyle Başak Traktör Tarım Ziraat ve İş Makineleri San. ve Tic. A.Ş.’de AR-GE mühendisliği yapmış daha sonrasında Alimex Alüminyum A.Ş.’de proje mühendisliği görevine başlamış ve devam etmektedir.