

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

**PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE GAZ AKIŞ KANALI
İÇERİSİNDEKİ ENGELLEYİCİ BLOKLARIN HÜCRE
PERFORMANSINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Safiye Nur ÖZDEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İmdat TAYMAZ

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE GAZ AKIŞ KANALI
İÇERİSİNDEKİ ENGELLEYİCİ BLOKLARIN HÜCRE
PERFORMANSINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

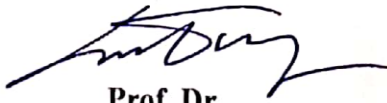
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Safiye Nur ÖZDEMİR

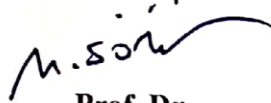
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

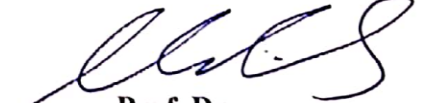
Bu tez 27.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



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.

Safiye Nur ÖZDEMİR

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 değerli danışman hocam Prof. Dr. İmdat TAYMAZ'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	4
2.1. Gaz Akış Kanalındaki Engellerin Yakıt Pil Performansına Etkisi.....	4
2.2. Tasarım Parametrelerinin Yakıt Pil Performansına Etkisi.....	12
2.3. İşletme Parametrelerinin Yakıt Pil Performansına Etkisi	25
2.4. Diğer Çalışmalar	31
BÖLÜM 3.	
HİDROJEN ENERJİSİ VE YAKIT PİLLERİ	35
3.1. Hidrojen Enerjisi	35
3.1.1. Hidrojen üretim yöntemleri.....	36
3.2. Yakıt Pili Tarihçesi.....	38
3.3. Yakıt Pili Nedir?.....	40
3.4. Yakıt Pili Çeşitleri.....	41

3.4.1. Polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMFC).....	42
3.4.2. Alkali yakıt pili (AFC).....	43
3.4.3. Fosforik asit yakıt pili (PAFC).....	44
3.4.4. Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC).....	45
3.4.5. Katı oksit yakıt pili (SOFC).....	46
3.5. PEM Yakıt Pili Bileşenleri	47
3.5.1. Membran.....	47
3.5.2. Gaz difüzyon tabakası (GDL).....	48
3.5.3. Katalizör tabakası (CL).....	49
3.5.4. Membran elektrot düzeneği (MEA).....	49
3.5.5. Bipolar plakalar.....	50
3.6. PEM Yakıt Pili İşletme Koşulları.....	51
3.6.1. Çalışma basıncı.....	51
3.6.2. Çalışma sıcaklığı.....	51
3.6.3. Reaktant akış hızı.....	52
3.6.4. Reaktant nemliliği.....	54
3.7. Yakıt Pil Temel Bağlantıları ve Termodinamiği.....	55
3.7.1. Temel bağlantılar.....	55
3.7.2. Reaksiyon ısısı.....	55
3.7.3. Teorik elektrik işi.....	56
3.7.4. Teorik yakıt hücre potansiyeli.....	57
3.7.5. Sıcaklığın etkisi.....	58
3.7.6. Basıncın etkisi.....	59
3.8. Yakıt Pilinin Gerçek Performansı.....	60
3.8.1. Aktivasyon kayıpları.....	61
3.8.2. Direnç kayıpları.....	62
3.8.3. Konsantrasyon kayıpları.....	62
3.8.4. Elektrot polarizasyonunun toplanması.....	63

BÖLÜM 4.

PEM YAKIT PİL TEORİSİ.....	65
----------------------------	----

4.1. Kütlenin Korunum Denklemi.....	66
4.2. Momentumun Korunum Denklemi.....	67
4.3. Enerjinin Korunum Denklemi.....	68
4.4. Türlerin Korunum Denklemi.....	69
4.5. Yüklerin Korunum Denklemi.....	71
4.6. Elektrokimyasal Denklemler.....	71
4.7. Özellikler.....	75
4.7.1. Gazların tür yayılımı.....	75
4.7.2. Membranın iyonik iletkenliği.....	76
4.7.3. Ozmotik sürüklenme katsayısı.....	76
4.7.4. Geri difüzyon akısı.....	76

BÖLÜM 5.

PEM YAKIT PİLİ MATEMATİKSEL MODELİ.....	78
5.1. Model Geometrisi.....	78
5.2. Modelin Ağ Yapısı.....	81
5.3. Sayısal Çözümün Ağ Bağımsızlığı.....	81
5.4. Sayısal Çözümün İterasyon Bağımsızlığı.....	83
5.5. Sınır Şartları ve Çözüm Metodu.....	84

BÖLÜM 6.

GELENEKSEL GAZ AKIŞ KANALLI PEM YAKIT HÜCRE MODELİ.....	87
6.1. Çalışma Sıcaklığının Etkisi	87
6.2. Gaz Difüzyon Tabakası Gözenekliliğinin Etkisi	88
6.3. Çalışma Basıncının Etkisi.....	91
6.4. Kütleli Debi Etkisi.....	93

BÖLÜM 7.

ENGELLİ GAZ AKIŞ KANALLI PEM YAKIT HÜCRE MODELİ.....	96
7.1. Dikdörtgensel Engellerin PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi.....	96
7.1.1. Hız dağılımı.....	98

7.1.2. Hidrojen kütle kesri dağılımı.....	99
7.1.3. Akım yoğunluğu değişimi.....	100
7.2. Yarı Silindirik Engellerin PEM Yakıt Pil Performansına Etkisi.....	100
7.2.1. Hız dağılımı.....	102
7.2.2. Hidrojen kütle kesri dağılımı.....	103
7.2.3. Akım yoğunluğu değişimi.....	104
7.3. Dokuz Engelli PEM Yakıt Hücre Modeli.....	105
7.3.1. Hız dağılımı.....	106
7.3.2. Hidrojen ve oksijen kütle kesri dağılımı.....	107
7.3.3. Akım yoğunluğu değişimi.....	108

BÖLÜM 8.

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	116

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AFC	: Alkali yakıt pili
α	: Elektron transfer katsayısı
BPP	: Bipolar plakalar
CL	: Katalizör tabakası
c_p	: Özgül ısı (J/kg K)
DA	: Doğrudan akım
$D_{i,eff}$	: Serbest akış kütle difüzyon katsayısı
e	: Elektron yükü ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
ϵ_m	: Membran su gözenekliliği
F	: Faraday sabiti (C/mol)
GDL	: Gaz difüzyon tabakası
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
i	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
J_w^{diff}	: Geri difüzyon akısı
j^{ref}	: Aktif yüzey alanı başına referans akım yoğunluğu (A/m ²)
k	: Isı iletim katsayısı (W/mK)
K_Φ	: Elektrokinetik geçirgenlik (m ²)
K_p	: Membranın hidrolik geçirgenliği (m ²)
MCFC	: Erimiş karbonat yakıt pili
MEA	: Membran elektrot düzeneği
μ	: Dinamik viskozite (kg/ms)
n_d	: Ozmotik sürüklenme katsayısı
η	: Yüzey aşırı potansiyeli (V)
P	: Basınç (Pa)
P_{sat}	: Doyma basıncı (atm)

PAFC	: Fosforik asit yakıt pili
PEM	: Polimer elektrolit membran
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
R	: İdeal gaz sabiti (kJ/kmol K)
R	: Hacimsel geçiş akımı (A/m ³)
SAA	: Serpantin akış alanı
SOFC	: Katı oksit yakıt pili
S_e	: Enerji kaynak terimi
S_m	: Momentum kaynak terimi
T	: Mutlak sıcaklık (K)
ϕ	: Elektrik potansiyeli (V)
ϕ_m	: Elektrolit faz potansiyeli (V)
ϕ_s	: Katı faz potansiyeli (V)
ΔG	: Gibbs serbest enerji değişimi (kJ/mol)
ΔH	: Entalpi değişimi (kJ/mol)
ΔS	: Entropi değişimi (kJ/molK)
σ_{sol}	: Katı fazın elektriksel iletkenliği (1/ohm-m)
σ_{mem}	: Membranın elektriksel iletkenliği (1/ohm-m)
ζ	: Özgül aktif yüzey alanı (1/m)
[]	: Yerel tür konsantrasyonu (kmol/m ³)
[] _{ref}	: Tür konsantrasyonunun referans değeri (kmol/m ³)
λ	: Su içeriği
$\vec{V}$	: Hız vektörü (m/s)
V_{OC}	: Açık devre voltajı (Volt)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. PEM yakıt hücresi için düz (a), engelli (b) ve gözenekli model (c).....	7
Şekil 2.2. Dalga form gaz akış kanallı PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi...	11
Şekil 2.3. Çeşitli katot gaz akış kanallı PEM yakıt pili şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.4. Optimum performansın sağlandığı PEM yakıt pilinin sayısal modeli...	19
Şekil 2.5. Serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresinin sayısal model çeşitleri.....	21
Şekil 2.6. PEMFC bileşenlerinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.7. Yeni akış alan modelinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.1. Yakıt hücresinin giriş ve çıkışları.....	41
Şekil 3.2. PEM yakıt pilinin şematik gösterimi.....	43
Şekil 3.3. Alkali yakıt pilinin şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.4. Fosforik asit yakıt pilinin şematik gösterimi.....	45
Şekil 3.5. Erimiş karbonat yakıt pilinin şematik gösterimi.....	46
Şekil 3.6. Katı oksit yakıt pilinin şematik gösterimi.....	47
Şekil 3.7. İdeal ve gerçek yakıt hücresi voltaj/akım karakteristiği.....	61
Şekil 4.1. Elektrik potansiyeli (katı ve membran) için sınır koşulları.....	73
Şekil 5.1. PEM yakıt hücresinin x-y düzleminde şematik gösterimi.....	79
Şekil 5.2. Geleneksel gaz akış kanallı PEM yakıt hücresi fiziksel modeli.....	79
Şekil 5.3. Altı engelli PEM yakıt hücresi fiziksel modeli.....	80
Şekil 5.4. Dokuz engelli PEM yakıt hücresi fiziksel modeli.....	80
Şekil 5.5. Yarı silindirik engellere sahip sayısal modelin ağ yapısının y-z düzlem kesiti.....	81
Şekil 5.6. Dikdörtgensel engellere sahip sayısal modelin ağ yapısının y-z düzlem kesiti.....	81
Şekil 5.7. Sayısal modelde kullanılan farklı ağ yapıları, a) 163800, b) 280800, c) 327600, d) 374400.....	82
Şekil 5.8. Ağ bağımsızlığı.....	83

Şekil 5.9. Nümerik çözümün iterasyon sayısı ile değişimi.....	83
Şekil 5.10. Çözüm metodunun akış diyagramı.....	86
Şekil 6.1. Sıcaklığın hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi ($P=500$ kPa, $\varepsilon=0.5$).....	88
Şekil 6.2. Sıcaklığın hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi ($P=500$ kPa, $\varepsilon=0.5$).....	88
Şekil 6.3. Katot tarafı gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi ($P=300$ kPa, $T=343$ K).....	90
Şekil 6.4. Katot tarafı gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi ($P=300$ kPa, $T=343$ K).....	90
Şekil 6.5. Oksijenin molar konsantrasyon değişiminin x-y düzleminde orta kesitte şematik gösterimi (a) $\varepsilon=0.2$, (b) $\varepsilon=0.3$, (c) $\varepsilon=0.4$, (d) $\varepsilon=0.5$ ($T=343$ K, $P=300$ kPa)	91
Şekil 6.6. Çalışma basıncının hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi ($T=343$ K, $\varepsilon=0.5$).....	92
Şekil 6.7. Çalışma basıncının hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi ($T=343$ K, $\varepsilon=0.5$).....	93
Şekil 6.8. Kütleli debinin hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi ($T=343$ K, $P=300$ kPa).....	95
Şekil 6.9. Kütleli debinin hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi ($T=343$ K, $P=300$ kPa).....	95
Şekil 7.1. Dikdörtgensel engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının I-V grafiği ile gösterimi ($T=343$ K, $P=300$ kPa).....	97
Şekil 7.2. Dikdörtgensel engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının V-P grafiği ile gösterimi ($T=343$ K, $P=300$ kPa)....	98
Şekil 7.3. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modeldeki gaz akış kanallarının y yönündeki hız alanı.....	99
Şekil 7.4. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modelin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle kesri.....	99
Şekil 7.5. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modelin gaz akış kanallarındaki akım yoğunluğu değişiminin x-z düzleminde gösterimi.....	100

Şekil 7.6. Yarı silindirik engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının I-V grafiği ile gösterimi ($T=343K$, $P=300$ kPa)..	101
Şekil 7.7. Yarı silindirik engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının V-P grafiği ile gösterimi ($T=343K$, $P=300$ kPa)..	102
Şekil 7.8. Altı yarı silindirik engelli sayısal modeldeki gaz akış kanallarının y yönündeki hız alanı.....	103
Şekil 7.9. Altı yarı silindirik engelli sayısal modelin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle kesri.....	104
Şekil 7.10. Altı yarı silindirik engelli sayısal modelin katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle kesri.....	104
Şekil 7.11. Altı yarı silindirik engelli sayısal modelin gaz akış kanallarındaki akım yoğunluğu değişiminin x-z düzleminde gösterimi.....	105
Şekil 7.12. Dikdörtgensel engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının I-V grafiği ile gösterimi ($T=343K$, $P=300$ kPa)..	106
Şekil 7.13. Dokuz engelli sayısal modeldeki gaz akış kanallarının y yönündeki hız alanı.....	107
Şekil 7.14. Dokuz engelli sayısal modelin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle kesri.....	107
Şekil 7.15. Dokuz engelli sayısal modelin katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle kesri.....	108
Şekil 7.16. Dokuz engelli sayısal modelin gaz akış kanallarındaki akım yoğunluğu değişiminin x-z düzleminde gösterimi.....	108

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Hidrojenin fiziksel özellikleri	35
Tablo 3.2. Reaktant tüketimi ve su üretimi.....	54
Tablo 3.3. Yakıt hücresi reaktant ve ürünlerin oluşum entalpileri ve entropileri..	57
Tablo 3.4. Hidrojen oksitlenme işlemlerinde entalpi, entropi ve gibbs serbest enerji.....	59
Tablo 3.5. Özgöl ısı bağıntısındaki ampirik katsayılar.....	59
Tablo 5.1. Referans geometrinin tasarım parametreleri.....	80
Tablo 5.2. Sayısal modelin sınır şartları ve elektrokimyasal özellikleri.....	85
Tablo 7.1. Engelli ve engelsiz gaz akış kanallarının akım yoğunlukları arasındaki ilişkisi.....	97
Tablo 7.2. Engelli ve engelsiz gaz akış kanallarının akım yoğunlukları arasındaki ilişkisi.....	102

ÖZET

Anahtar kelimeler: CFD modelleme, hücre performansı, dikdörtgensel engeller, yarı silindirik engeller

Proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücreleri optimum hücre performansı sağlandığında, umut vaat eden güç üretim kaynakları olarak kabul edilmektedir. Tasarım ve işletme parametreleri hücre performansını önemli ölçüde etkileyen anahtar faktörlerdir.

Bu çalışmanın ilk aşamasında; üç boyutlu, tek fazlı, geleneksel gaz akış kanallı PEM yakıt hücresinin sayısal modeli literatürdeki tasarım parametrelerine göre geliştirilmiş, sınır koşulları ve elektrokimyasal parametreler tanımlanmış, ANSYS FLUENT HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kodu kullanılarak çözülmüştür. Sayısal modelin simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış, iyi bir uyum göstermiştir. Sıcaklık, basınç, kütsel debi hücre performansını etkileyen işletme parametreleri ve bir tasarım parametresi olan PEM yakıt hücresinin gaz difüzyon katmanlarının gözenekliliğinin etkisi düz gaz akış kanal geometrisi için incelenmiştir. Bir sonraki aşamada aynı sayısal modelin gaz akış kanallarına farklı geometrilerde engeller ekleyerek, sayısal çözümleme yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, PEM yakıt hücresinin gaz akış kanallarında bulunan dikdörtgensel ve yarı silindirik engellerin hücre performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Nümerik sonuçlar, belirli hücre potansiyellerinde proton değişim membranlı yakıt hücresindeki geleneksel gaz akış kanalına kıyasla yarı silindirik veya dikdörtgensel engelli gaz akış kanalları için daha yüksek akım yoğunluklarının elde edilebileceğini göstermektedir.

Sayısal analizlere göre, gaz akış kanallarına belirli sayıda engelleyici blok eklemek kanal merkezinden yakıt hücresinin katalizör tabakasına olan kütle taşınımını iyileştirmektedir.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF OBSTACLES WITH THE GAS FLOW CHANNELS IN PEM FUEL CELLS

SUMMARY

Keywords: CFD Modeling, cell performance, rectangular obstacles, wave-like form obstacles

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are considered as promising power generation sources if optimal cell performance is supplied. Design and operating parameters are key factors that significantly affect the cell performance.

In the first stage of this study; the three dimensional, single phase, PEM fuel cell with conventional gas flow channel has been developed by using the design parameters in the literature, boundary conditions and electrochemical parameters have been defined and solved by using ANSYS FLUENT CFD (Computational Fluid Dynamics) code. The simulation results of numerical model are compared with experimental data showing a good agreement. The effects of operating parameters such as temperature, pressure, mass flow rate and gas diffusion layer's porosity that is a design parameter are investigated on the cell performance for the straight geometry. In the next stage, numerical analysis are performed by adding obstacles with different geometries to the gas flow channels of the same numerical model.

The objective of this study is to investigate the effects of rectangular and wave-like form obstacles in the gas flow channels of PEM fuel cell on the cell performance. Numerical results show that higher current densities can be obtained in certain cell potentials for gas flow channels with the wave-like form or rectangular obstacles compared to the conventional gas flow channel in the proton exchange membrane fuel cell.

According to numerical analysis, adding a certain number of obstacles to the gas flow channels improves the mass transport from the channel core to the catalyst layer of the PEM fuel cell.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde kullandığımız enerjinin büyük bir çoğunluğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların oluşum hızları tüketim hızlarından çok daha düşük olduğu için yenilemeyen enerji kaynakları olarak değerlendirilebilir. Dünya nüfus artışı, şehirleşme, kaynakların verimli bir şekilde kullanılmaması ve endüstrileşme kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlarla karşılanan enerji ihtiyacının fazlaşmasına sebep olmaktadır. Sanayi devriminin başlangıcından itibaren fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi, fiyatlarının sürekli olarak artmasının yanı sıra fosil yakıtlar zararlı kimyasal maddeler içerdiğinden dolayı yanmaları sonucunda çevreye yaydığı zehirli emisyonlar hava, su, toprak kirliliklerine sebep olmuş çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemiş, enerji-çevre sorunlarının oluşmasının temel sebebi olmuştur. Başta karbondioksit olmak üzere metan, karbonmonoksit, hidrokarbonlar ve kloroflorakarbonlar sera etkisi yapan gazlar olduğundan dolayı küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Son yüzyılda sera etkisinin artması ekolojik denge ve iklimin değişmesine neden olmuş insanoğlunun sosyoekonomik yaşamını da doğrudan veya dolaylı olarak olumsuz yönde etkilemiştir.

Fosil (tükenebilir) enerji kaynaklarına göre daha çevre dostu olan yenilenebilir enerji kaynakları güneş, hidrolik, rüzgar, jeotermal, biyokütle ve hidrojen enerjisi gibi doğada çoğunlukla herhangi bir üretim işlemine gereksinim duymadan temin edilebilen doğal enerji kaynaklarıdır. 21. yüzyılın yakıtı olarak bilinen hidrojen, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemi gün geçtikçe artan ve üzerinde yoğun çalışılan kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlara kıyasla yaklaşık % 33 daha verimli bir alternatif enerji kaynağıdır (Öztürk, 2013).

Bu alternatif enerji kaynağını, hidrojen enerjisini en verimli ve en ekonomik şekilde kullanan teknoloji yakıt pili teknolojisidir. Yakıt pili, anot gaz akış kanalına hidrojen katot gaz akış kanalına oksijen veya sadece hava sağlandığında izotermal bir işlemle yanma işlemi olmadan kimyasal bir reaksiyonla elektriğe dönüştüren elektro-kimyasal enerji dönüşüm cihazıdır. Her bir yakıt hücresinde biri anot (pozitif yüklü), biri katot (negatif yüklü) olmak üzere iki elektrot bulunmaktadır ve kimyasal reaksiyonlar burada gerçekleşmektedir. Kimyasal reaksiyon sonucu olarak hidrojen yakıtı tüketilir ve yan ürün olarak elektrik, su ve ısı oluşur. Reaksiyon sonucunda herhangi bir atık oluşumu ve kirlenici emisyon olmadığından çevre kirliliği yaratmaz. Çoğu yakıt pili herhangi bir mekanik işlem içermediğinden dolayı içten yanmalı motorlara kıyasla sessiz çalışmakta, gürültü kirliliğine sebep olmamaktadır. Yakıt pilleri taşınabilir güç üretimi, sabit güç üretimi ve taşıma gücü olmak üzere üç temel alanda kullanılmaktadır. Otobüs, bot, tren, uçak, forklift, bisiklet, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, hastane, banka gibi tesislere güç sağlamak için kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın ilk aşamasında geleneksel, düz gaz akış kanallı proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresinin üç boyutlu, tek fazlı sayısal modeli literatürdeki referans modelin geometrik özellikleri kullanılarak ANSYS Design Modular aracılığıyla yakıt hücre geometrisi oluşturulmuştur. Ağ yapısı ANSYS Meshing ile oluşturulduktan sonra referans modelin elektrokimyasal ve çalışma özellikleri programa girildikten sonra sayısal analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen akım yoğunluklarının hücre potansiyeline göre olan değişimleri polarizasyon eğrisi üzerinde gösterilmiş, hesaplı akışkanlar dinamiği (HAD) modelinin sayısal sonuçları referans modelin deneysel verileriyle karşılaştırılmış, birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal model doğrulaması yapıldıktan sonra PEM yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı, gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği, çalışma basıncı ve kütleli debinin hücre performansı üzerindeki etkisi polarizasyon eğrileri ve güç yoğunlukları grafik üzerinde gösterilmiştir. İkinci aşamada, PEM yakıt hücresinin geleneksel düz gaz akış kanallarına engelleyici bloklar yerleştirilmiş engelli üç boyutlu hesaplamalı model geliştirilmiş proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin performans özelliklerini araştırmak için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlar gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek reaktant gazların gözenekli tabaka boyunca

taşınımını geliştirmiş konvektif ısı geçiş etkisini iyileştirmiş ve gaz akış hızını arttırdığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, katalitik reaksiyonun etkinliği önemli ölçüde iyileşmiştir.



BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Gaz Akış Kanalındaki Engelleyici Blokların Yakıt Pil Performansına Etkisi

Kare kanal kesit geometrisine sahip PEM yakıt hücresinin 3 boyutlu sayısal modelini geliştirmiş, bir sonraki adımda yakıt hücresinin hem anot hem de katot gaz akış kanallarının çıkış bölgesine yakın yere engelleyici bloklar yerleştirip FLUENT hesaplamalı akışkanlar dinamiği HAD kodu ile çözümlenmiştir. İlk engel, anot ve katot gaz akış kanallarının girişinden 20 mm uzağa yerleştirilmiştir. Engelleyici blokların merkezleri arasındaki mesafe 5 mm'dir. Farklı çalışma koşullarında (anot stokiyometri, bağıl nem ve sıcaklık) geliştirilen iki model için sayısal analizleri yapmışlardır. Sıcaklığın hücre performansına olan etkisini incelemek için, analizde iki farklı sıcaklık değeri 338 K ve 358 K olarak seçilmiş ve katot stokiyometrisi 3,5 olarak alınmıştır. Anot stokiyometrisi için iki farklı değer 1,5 ve 3 alınmıştır. Yapılan çalışmada son olarak bağıl nem değerleri % 80 ve % 100 alınarak toplam 8 durum elde edilmiştir. Yakıt hücresinin performansının değerlendirilmesi açısından her iki model için de polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Sayısal simülasyon sonuçlarına göre yakıt hücresinin gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek hücrenin akım yoğunluğu değerlerini arttırmıştır. Çalışmada 0,3 V ve 0,4 V hücre potansiyellerinde kayıtlı edilen akım yoğunluğu değerleri ve değişim miktarları bir tabloda izah edilmiştir (Bilgili ve ark., 2015).

25 cm² aktif alana sahip 2 boyutlu PEM yakıt hücresinin gaz akış kanallarına farklı geometride engeller yerleştirip sayısal modelini geliştirmiş ve engelleyici blokların yakıt hücresinin performansına, akım yoğunluğuna ve gaz konsantrasyonlarına olan etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışmada engelleyici blok olarak üçgen ve dikdörtgen geometrisini ele almıştır. Pil performansının doğru bir şekilde değerlendirilmesi açısından geliştirilen model için polarizasyon eğrileri oluşturulduktan sonra deneysel

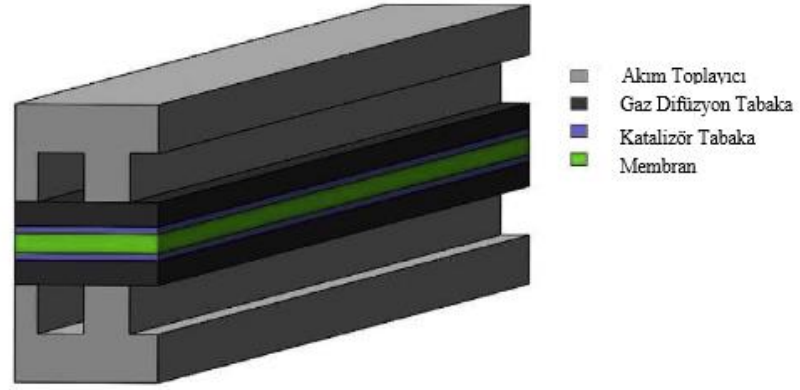
verilerle karşılaştırılması yapılmış, simülasyon ve deneysel sonuçların birbiriyle olan uyumu kontrol edilmiştir. Model düşük gaz akış hızları ve düşük yakıt kullanımından dolayı sıkıştırılamaz, laminar akış, ideal gaz varsayımı yapılarak çözümlenmiştir. Boyutsuz bir parametre olan en boy oranı $AR=L/H$ engelleyici blokların blokaj etkisini karakterize etmektedir. Çalışmada $H = 1$ mm ve $L=0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ mm olarak tanımlanmıştır. Gaz akış kanallarında engelleyici blokların sayısının artırılması genel hücre performansını olumlu yönde etkilemiştir. Engelleyici blokların bulunmadığı gaz akış kanalındaki sıcaklık değerleri diğer durumlara göre daha yüksektir. Çalışmayı özetlemek gerekirse engelleyici blok sayısının, konumunun ve blokların en boy oranının hücre performansına olan etkisi araştırılmıştır (Khazaei, 2013).

PEM yakıt hücresinin performansını arttırmak amacıyla gaz akış kanalının tasarımı ile akış hız karakteristiğini ve taşınım ile ısı geçiş performansını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada Reynolds sayısı yaklaşık olarak 200 civarında, laminar akış rejimi varsayımı ile iki boyutlu, sıkıştırılamaz akış olarak kabul edilip sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yakıt hücresinin anot ve katot gaz akış kanallarına akışkan akışının kesintiye uğramasına sebebiyet veren farklı geometride engelleyici bloklar yerleştirilmiştir. Oluşturulan engelleyici bloklar dalga şeklinde (wave like), yamuk (trapezoid like) ve basamak (ladder like) biçimindedir. Sayısal simülasyonlar sonucunda engelleyici bloklar gaz akış kanalında akışkan hızını arttırmakta ortalama Nusselt sayısı yaklaşık olarak iki katına çıkmaktadır. Maksimum akış hızı x yönünde basamak (ladder like) şeklindeki engelleyici blokların bulunduğu gaz akış kanalında 3,032 m/s olarak elde edilmiştir. Geleneksel gaz akış kanalında akışkan hızı 1,964 m/s olarak tespit edilmiştir. Geleneksel gaz akış kanalına kıyasla yeni gaz akış kanallarının önemli ölçüde taşınım ile ısı geçiş performansını arttırdığı söylenebilir. Bunun sonucu olarak katalizör tabakasındaki kataliz reaksiyon performansı artmaktadır (Kuo ve ark., 2008).

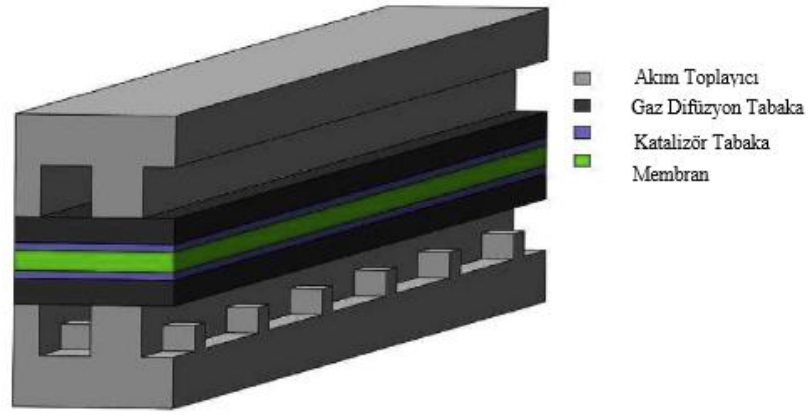
PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalına farklı geometrilerde engeller yerleştirip ideal performans değerlerine yakın akım ve güç yoğunluklarını elde etmeyi amaçlamışlardır. Sürekli rejimde çalışan tek hücreli iki boyutlu PEM yakıt pilinin sayısal modeli Comsol Multiphysics ticari programı kullanılarak oluşturulmuştur.

Giriş sınır koşulu olarak hız, çıkış sınır koşulu olarak ise basınç kullanılmıştır. Hücre potansiyeli skalası 0,2 V-1,2 V aralığında alınıp her 0,1 V'luk artışlarda akım yoğunluğu değerleri kayıt edilmiş ve polarizasyon eğrileri tanımlanmıştır. Akış kanalı boyunca akış yönüne dik dikdörtgen, daire ve yamuk şeklinde engeller yerleştirilmiş, bunların derinlikleri adım adım arttırılıp 8 farklı durum ortaya çıkmıştır. Buradaki amaç daha fazla yakıtı kataliz tabakasına yönlendirmek dolayısıyla daha fazla türleri tepkimeye sokmaktır. Elde edilen sonuçlara göre akış kanalına engel koymak hücre performansını iyileştirmektedir. Engel derinliğinin artması ile birlikte en iyi hücre performansı değerleri elde edilmiştir (Ekiz ve ark., 2011).

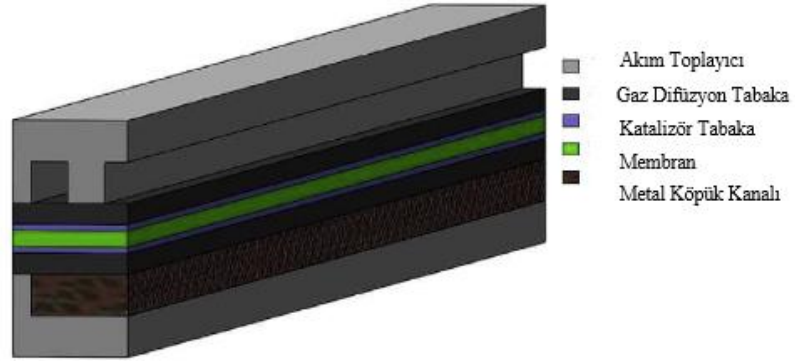
Paralel gaz akış kanallarına sahip PEM yakıt hücresinin performansını incelemek için düz (model A), engelleyici bloklara sahip (model B), gözenekli yapıda (model C) olmak üzere üç sayısal modeli Şekil 2.1.'deki gibi oluşturmuşlardır. Termal elektrokimyasal denklemler sayısal olarak makroskopik, sonlu hacim yaklaşımıyla, tek alanlı (single domain) ve 3 boyutta çözümlenmiştir. Gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etki oluşturmazsa da yakıt hücresinin katot tarafındaki katalizör tabakasına daha fazla oksijen nüfuzuna sebep olmuştur. Bu durum kimyasal reaksiyon hızı, akım yoğunluğu ve hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Metal köpük kullanmak katot katalizör tabakasındaki akım yoğunluğunu ve oksijen konsantrasyonunu arttırmaktadır. Diğer durumlara kıyasla çok daha homojen sıcaklık dağılımları elde edilmektedir. Gaz akış kanalı derinliği azaltıldığında A ve C modelleri için akım yoğunluğu artmış fakat akış kanalı boyunca basınç düşüşünde bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Metal köpüğünün gözenekliliğinin artması C modeli için akım yoğunluğu değerini arttırmakta basınç düşüşünü azaltmakta, sıcaklık dağılımı üzerinde ise neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Ayrıca engelleyici blok sayısının artması yakıt hücresinin sıcaklık dağılımında önemli bir değişikliğe sebep olmamaktadır (Afshari ve ark., 2017).



(a) Model A



(b) Model B



(c) Model C

Şekil 2.1. PEM yakıt hücresi iç yapısı için düz (a), engelli (b) ve gözenekli model (c) (Afshari ve ark., 2016).

Dokuz katmanlı PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalına yerleştirdikleri engelleyici blokların hücre performansına olan etkisini üç boyutlu, sayısal olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısına bağlı kalarak laminar akış rejiminde, sürekli rejim kabulüyle çözümleme yapılmıştır. Yapmış oldukları çalışmada engelleyici blokları kanal akışının bir kısmını ya da tamamını kapatacak şekilde yerleştirmişlerdir. Akış kanalı içerisine

yerleştirilen engelleyici blok, akışı gaz difüzyon tabakasına yönlendirir ve akış kanalı merkezinden katalizör tabakasına olan kütle taşınımını artırır. Bu da hücre performansının iyileşmesine sebep olur. Çalışmalarında ek olarak, engelleyici blokların yüksekliğinin ve sayısının etkisini incelemişlerdir. Kanal akışının tamamını kapatan engelleyici bloklar diğerine göre daha fazla basınç düşüşüne sebebiyet vermekte bir yandan da daha fazla net elektrik gücü elde etmemizi sağlamaktadır. Genel anlamda blok sayısının artması yakıt hücresinin performansını iyileştirir. Akış kanalının bir kısmını kapatan engelleyici blokların yerleştirilmesi polarizasyon eğrisinde konsantrasyon kayıplarının olduğu bölgede hücre performansını arttırdığı gözlemlenmiştir (Heidary ve ark., 2016).

Çalışmalarında optimum hücre performansını elde etmek için üç boyutlu PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalına dikdörtgen şeklinde engelleyici bloklar yerleştirmişlerdir. Gaz akış kanalına engelleyici blok ekleyerek yüksek akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt hücresinin 3 boyutlu modeli bir ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılım programı ANSYS Fluent 16.0 ile çözümlenmiştir. Akış kanalına engelleyici blok eklemek kütle aktarımının ve çıkış voltajının artması için etkili bir yöntemdir. Engelleyici blok eklemek hız vektörü ile konsantrasyon gradyanı arasındaki açıyı etkili bir şekilde azaltabilir ve reaktanların kütle transferini arttırabilir. Çalışmadan elde ettiğimiz bir diğer sonuç ise kütle aktarım katsayısı ne kadar yüksekse o kadar etkin bir şekilde kütle taşınımı olmaktadır (Shen ve ark., 2018).

PEM yakıt hücresinin anot ve katot gaz akış kanallarına farklı yarıçap ve sayıda yarı silindirik engelleyici bloklar yerleştirmiş yakıt hücresinin performansını incelemiştir. Tek hücreden oluşan PEM yakıt hücresinin sayısal modeli ANSYS FLUENT PEMFC modülünde çözülmüştür. Engelleyici blokların yarıçapları ve sayıları toplam kesit alanı sabit kalacak şekilde belirlenmiştir. 0,4 mm yarıçapında dokuz engelli ve 0,49 mm yarıçapında altı engelli yakıt pili geometrileri CATIA'da oluşturulmuştur. Hazırlanan geometriler ANSYS Workbench 12.1'deki Mesh kısmında hücrelere bölünmüş, FLUENT ile çözülmüştür. Dokuz engelli yakıt pili modeli toplam 2171221, altı engelli yakıt pili modeli 1204719 hücreye bölünmüştür. Çalışmada iki farklı

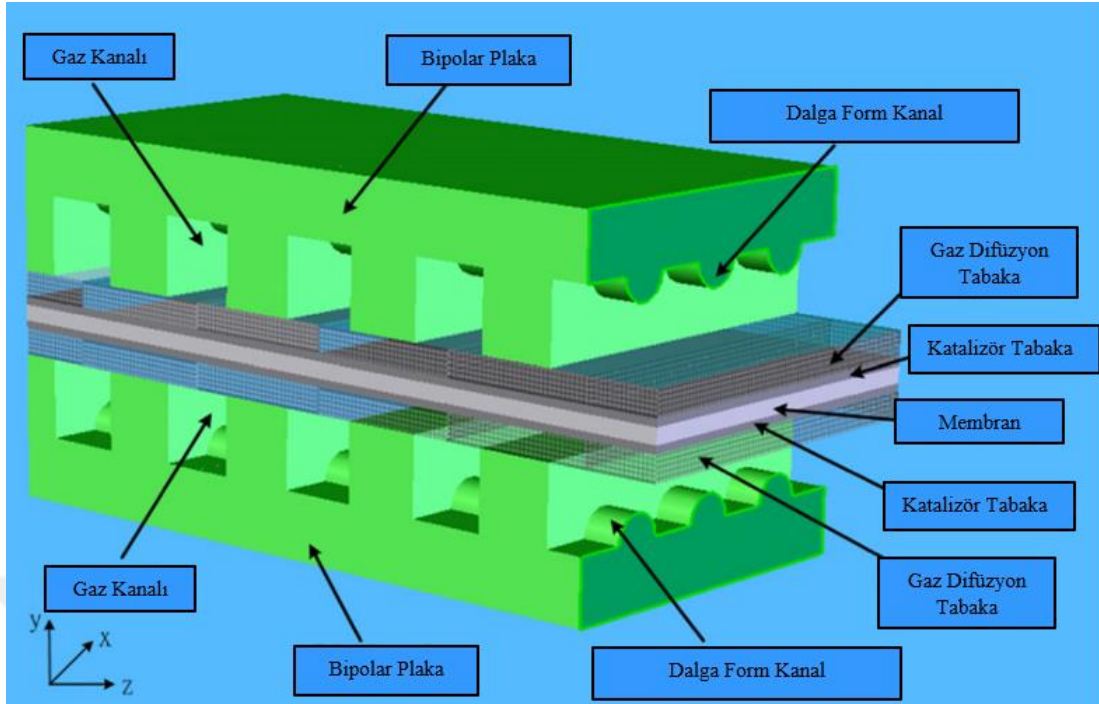
kalınlıkta membran elektrot çifti (MEÇ) modelleri oluşturulmuştur. Engelsiz yakıt pili geometrisi için MEÇ-1, engelli yakıt pili geometrisi için MEÇ-2'nin geometrik özellikleri kullanılarak çözülmüştür. MEÇ-1'in membran ve katalizör tabakası kalınlıklarının MEÇ-2'ye göre çok daha ince olması engelli yakıt pili geometrisinde hücrelere bölme aşamasında zorluk çıkaracağından dolayı MEÇ-2 tercih edilmiştir. MEÇ-1'in kullanıldığı yakıt hücresi için farklı çalışma basınçlarında 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa ve 500 kPa analizler yapılmış, en yüksek akım yoğunluğu değeri 500 kPa basınç değerinde elde edilmiştir. Engelsiz ve engelli yakıt pili geometrileri için hücre gerilim farkı en az 0,60 V, en fazla 0,90 V olmak üzere akım yoğunluğu değerleri kayıt altına alınmış polarizasyon eğrileri oluşturulup kıyaslama yapılmıştır. Engelleyici blok sayısının artması ile maksimum akım yoğunluğu değerinde % 14.5 artış gözlemlenmiştir (Bilgili, 2011).

Bıykoğlu ve Öztoprak çalışmalarında PEM yakıt hücresinin gaz akış kanallarına yerleştirdiği boşluk oranı 0,3 olan dört adet engelleyici bloğun hücre performansına olan etkisini incelemişlerdir. Boşluk oranının 0,3'ün üzerine çıkması akım yoğunluğu değerini önemli derecede arttırmadığı, 0,1'den az olduğu zaman çözümün yakınsamadığı görülmüştür. Engelli yakıt pili modeli 18900 hücreye bölünmüş, Fluent 6.2 PEMFC modülü kullanılarak dokuz farklı durum için çözülmüştür. Engelli yakıt pili geometrisinde daha yüksek akım yoğunlukları elde edilmiş olup, engelsiz yakıt pili geometrisine kıyasla akım yoğunluğu değeri yaklaşık olarak % 16'ya kadar artmıştır. Çalışmada yakıt hücresinden maksimum seviyede performans elde edebilmek için akış kanalına yerleştirilen engelleyici blokların sayısı ve boyutu belirlenmiştir. Dörtten fazla engelleyici bloğun gaz akış kanalına yerleştirilmesi akım yoğunluğu değerinde önemli derecede bir değişikliğe sebep olmamıştır. Akış kanalına giren gazların hızları ve bağıl nemin hücre performansına olan etkisini araştırmak için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Akım yoğunluğunun düşük giriş hızları için bağıl neme ve diğer taraftan düşük bağıl nem için giriş hızına kuvvetle bağlı olduğu sonucuna varılmıştır (Bıyıkoglu ve Oztoprak, 2012).

PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalını kısmen kapatacak şekilde enlemesine engelleyici bloklar yerleştirip yeni bir konfigürasyon oluşturmuşlardır. Engelleyici

blokların çeşitli boşluk oranları ve sayısı, yakıtın Reynolds sayısı, gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği ve kanal uzunluğu boyunca basınç düşüşü incelenmiştir. İlk olarak boşluk bölgesindeki gaz akışının nitel özelliklerini incelemek için yaklaşık olarak bir çözüm yapılmış ve sonrasında yarım hücreli modelde reaktant gaz geçişinin parametrik çalışması için sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Hız dağılımı, katalizör tabakasına geçen oksijenin kütle akış debisi, üretilen su buharının derişimi, gaz difüzyon tabakasına giren yakıt kesri ve çeşitli koşullarda basınç düşüşü analiz edilmiştir. Gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek reaktan gaz geçişini ve basınç kaybını arttırır. Çalışma sonucunda düşük gaz difüzyon tabakası gözenekliliği ile birlikte düşük boşluk oranındaki yüksek akış direncinden dolayı meydana gelen basınç kaybı yüksektir (Soong ve ark., 2005).

Dalga formunda engelleyici blokların yerleştirildiği gaz akış kanalı tasarımıyla kaldırma kuvvetinin PEM yakıt hücresinin gaz akış özellikleri, sıcaklık dağılımı, elektrokimyasal reaksiyon verimliliği ve elektriksel performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hazırlanan dalga benzeri gaz akış kanallı PEM yakıt pilinin sayısal modeli Şekil 2.2.'de gösterilmiştir. Sayısal simülasyon sonuçlarına göre düz gaz akış kanal geometrisine kıyasla gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek gözenekli tabakaya olan taşınımı arttırmış ve sıcaklık dağılımını iyileştirmiştir. Dalga formunda engelleyici blok eklemek PEMFC'nin katalitik reaksiyon etkinliğini ve taşınım ile ısı geçiş performansını iyileştirmiştir. Katalitik reaksiyon etkinliği özellikle kaldırma kuvveti etkisi göz önüne alındığında belirginleşir. Kaldırma kuvveti reaktant gazın hızını hem dikey hem de yatay yönde arttırmıştır. Bu durum yakıt hücresinde oksijen tüketim oranını ve yakıt hücresinin elektriksel performansını iyileştirir. Gaz akış kanalına dalga formunda engelleyici blok eklemek çıkış gerilimini ve maksimum güç yoğunluğu değerini arttırmış ve sayısal sonuçlar maksimum güç yoğunluğu değerini yaklaşık olarak % 39.5 arttırdığını göstermektedir (Kuo ve Chen, 2007).



Şekil 2.2. Dalga form gaz akış kanallı PEM yakıt hücresinin şematik gösterimi (Kuo ve Chen, 2007).

Gaz difüzyon tabakasında reaktant gaz dağılımını iletirmek için PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalına kısmi bloklar yerleştirip iki boyutlu PEM yakıt hücresinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelini geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada geliştirilen yeni tasarımın ve gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin reaktant gaz taşınımı ve dağılımı üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Engelleyici blokların eğim açısı incelenerek optimum hücre performansı için gereken gaz akış kanal geometrisi tasarlanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlara göre gaz akış kanalına kısmi engelleyici blok yerleştirmek hücre performansını geliştirmektedir. Sayısal modelin doğruluğu açısından hücre performansını incelemek için deneysel test düzeneği kurulmuştur. Sayısal model kütle taşınımı, elektrokimyasal olayları ve taşınım olaylarının büyük bir çoğunluğunu dikkate almaktadır. Reaktant difüzyonu gaz difüzyon tabakasındaki gözenekliliğin artmasıyla azaldı. Böylece basınç düşüşü önemli ölçüde azaltılabilir. Çalışma sonucunda PEM yakıt hücresi polarizasyon ve güç yoğunlukları dağılımına dayanarak kısmi blokların eğim derecesi $4,9^\circ$ olduğu zaman diğer eğim açlarına kıyasla daha iyi bir performans elde edildiği sonucuna varılmıştır (Tiss ve ark., 2014).

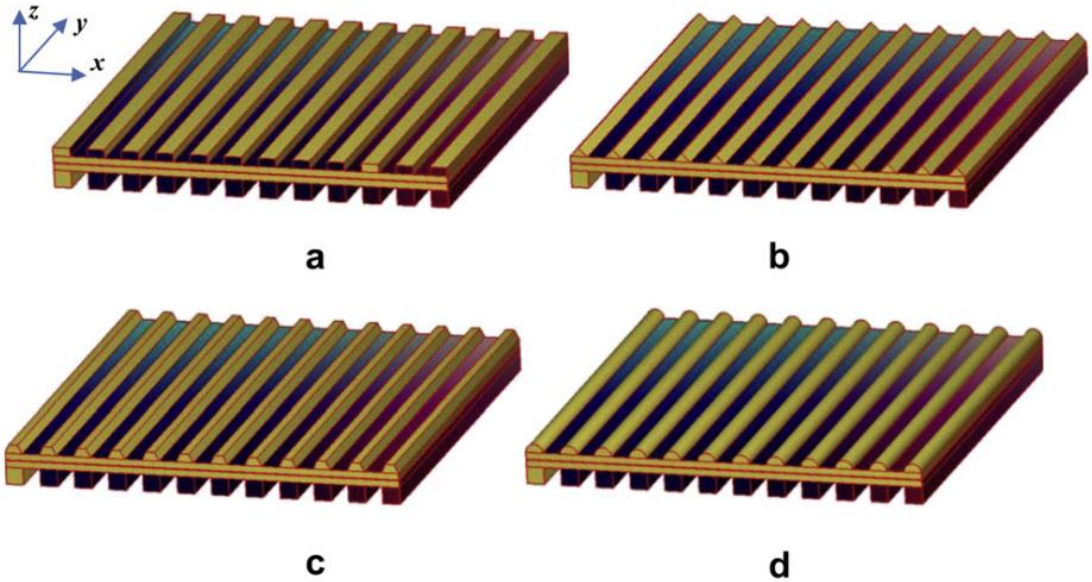
Katot gaz akış kanalında oksijen, nitrojen ve su buharı karışımını içeren tek fazlı, kararlı yapılı, üç boyutlu sayısal model geliştirmişlerdir. Paralel akış alan

geometrisindeki kısmi blokaj hücre performansını ve katalizör tabakasındaki oksijen miktarını arttırmıştır. Yüksek akım yoğunluğu bölgesinde hücre performansına olan etkisi daha fazla önem arz etmektedir. Engelleyici bloklar kare, yarım daire ve yamuk geometrisinde olup hücre performansına olan etkileri incelenmiştir. Sayısal analizler çalışma sıcaklığı 333 K, çalışma basıncı 100 kPa, su çiy noktası 313 K hücre potansiyeli 0,2-0,8 V arasında %50'lik kullanım oranıyla gerçekleştirilmiştir. Yüksek akım yoğunluklarında akışın iki fazlı olacağı tahmin edilmiştir. Gaz akış kanalındaki girinti yükseklikleri ve dizilimleri, akım yoğunluğu değişimi, sıvı viskoz direnci, kaburga yükseklikleri gibi parametrelerin göz önünde bulundurulduğu çalışma yapılmış, net güç % 25 oranında artış göstermiştir (Ghanbarian and Kermani, 2016).

2.2. Tasarım Parametrelerinin Yakıt Pil Performansına Etkisi

Tasarım parametrelerinin (akış kanalı kıvrımlarının sayısı, serpantin akış kanallarının sayısı ve akış kanalı genişlik oranı) bipolar plakalardaki etkisini analiz etmek için üç boyutlu serpantin akış alanlı (SAA) PEM yakıt pilinin sayısal modelini geliştirdiler. İki fazlı akış ihmal edildiğinde üç boyutlu serpantin akış alanlı PEM yakıt pilinde sıvı fazında su oluşumunun gözenekli tabakaların gözenekliliği üzerindeki etkisi dikkate alınmıştır. Tek serpantin akış alanlı PEM yakıt pili modelinde akış kanalı kıvrımlarının sayısı arttığında hücre performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. Tek serpantin akış alanlı PEM yakıt pili modeli ikili ve üçlü serpantin akış modeline kıyasla daha iyi performans gösterir. Gaz akış kanalının genişliği arttırıldığında hücre performansındaki iyileşme hızında yavaşlama gözlemlenmiştir. Bu çalışmada tasarım parametrelerinin hücre performansı üzerindeki etkileri yakıt hücrelerindeki sıvı fazındaki su dağılımları ve yerel oksijenin kütleli akış hızına dayanarak incelendi. Yüksek hücre potansiyellerinde tasarım parametrelerinin yakıt pili performansı üzerinde çok az etkisi vardır. Düşük hücre potansiyellerinde de tasarım parametreleri hücre performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Optimum hücre performansı akış kanalı genişliği oranı $\eta = 0.6$ olduğunda elde edilmiştir. Basınç kayıpları üç farklı serpantin akış alanlı PEM yakıt hücre modelinde farklı olsa da yakıt pilinden elde edilen çıkış gücü basınç kayıplarından çok daha fazla olduğundan, kayıplar ihmal edilebilir (Wang ve ark., 2008).

Katot gaz akış kanalı geometrisinin üç boyutlu, iki fazlı, paralel akışlı ve izotermal olmayan polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresinin performansı ve yerel taşınım özelliklerine olan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Katot gaz akış kanal geometrisi olarak üçgen, yamuk, yarım daire ve dikdörtgen yapıyı ele almışlardır. Çeşitli katot gaz akış kanalı geometrilerine sahip PEM yakıt hücresi Şekil 2.3.'de gösterilmiştir. Yüksek hücre potansiyellerinde çeşitli katot gaz akış kanal geometrilerinde benzer performans değerleri elde edilmiştir. Düşük hücre potansiyellerinde PEM yakıt hücre performansı maksimum üçgen kanal geometrisinde minimum performans dikdörtgen kanal geometrisinde elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında katot gaz akış kanal geometrisi olarak üçgen, yamuk ve yarım daire şekli kullanıldığında reaktant akış hızı, sıvı fazda suyun giderimi ve oksijen kullanımı artmıştır. Yakıt hücresinde meydana gelen basınç düşümünün üstesinden gelmek için gereken kompresör gücü yakıt hücresinden elde edilen güçten çok daha düşük olduğundan ihmal edilebilir. Çalışmada gaz akış kanal geometrisi üçgen, yamuk, yarım daire olan yakıt hücresinin dikdörtgen kesit geometrili kanala göre daha üstün performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Wang ve ark., 2012).



Şekil 2.3. Çeşitli katot gaz akış kanallı PEM yakıt pili şematik gösterimi (Wang ve ark., 2012).

Proton değişim membranlı yakıt hücresinde (PEMFC) dalga formunda gaz akış kanalının yakıt hücresi performansına olan etkisini araştırmışlardır. Gaz akış hızı,

reaktant gazın konsantrasyonu ve hücre performansı incelenmiştir. Dalga formundaki gaz akış kanal geometrisi zorlanmış taşınımı ve gaz difüzyon tabakasına olan reaktant gaz akışını arttırdığından yakıt hücre performansını iyileştirir. Dalga formundaki gaz akış kanal geometrisi düz akış kanal geometrisine kıyasla boşluk boyutu (gaz difüzyon tabakası ile bipolar plaka arasındaki boşluk) 0,5'ten küçük olduğunda hücre performansı belirgin bir şekilde artar. Sonuç olarak, düz kanal geometrisine göre dalga formundaki kanal geometrisi güç yoğunluğunun yaklaşık olarak % 30 değerinde artmasına neden olur. Hücre performansı yüksek akış hızlarında azalır (Yang ve ark., 2013).

Katot tarafındaki gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin PEM yakıt hücresi üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Gaz difüzyon tabakasının dışında tüm geometrik parametreler ve malzeme özellikleri sabit tutulmuştur. Bu çalışmada gaz difüzyon tabakası gözenekliliği için ortalama değer olarak 0,6 ile başlanmıştır. Pem yakıt hücresinin gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği 0,2-0,6 arasında 0,1'lik azalan değerlerle analiz edilmiştir. Yüksek ve düşük hücre potansiyellerinde gözeneklilik değişiminin etkisini görebilmek için polarizasyon grafiklerini oluşturmuşlardır. Simülasyon sonuçları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırıldı sonuçların birbiriyle uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Hazırlanan model ticari bir yazılım ile sonlu elemanlar yöntemi ile çözüldü. Model sonlu elemanlar yöntemi ile hazırlandığı için sonuçların doğruluğu açısından eleman sayısının etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Model 56000, 42000 ve 28000 eleman kullanılarak çözülmüş, eleman sayısının değiştirilmesi modelin doğruluğunu etkilememiştir. Gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin hücre performansına olan etkisi deneysel çalışma çok daha pahalı olduğu için sayısal olarak belirlenmiştir. Sonuçlar 0,7 V ve üzeri hücre potansiyellerinde gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin hücre performansına olan etkisi oldukça düşüktür. Düşük hücre potansiyellerinde akım yoğunluğunun artmasıyla reaksiyon sonucunda suyun oluşumundan dolayı katot tarafındaki katalizör tabakasına oksitleyici madde verilmesi zorlaşır. Yakıt hücresinin anot tarafında yeterli reaksiyonlar meydana gelse de katot tarafında suyun oksitleyici maddeyi tıkaması sebebiyle yeterli miktarda kimyasal reaksiyon gerçekleşemez. Bu yüzden gözenekliliğin düşük olması hücre performansını olumsuz yönde

etkilemektedir. Yakıt hücresinin çalışması esnasında gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin yüksek tutulması gerekir (Turkmen and Celik, 2018).

Montaj basıncının sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tek kanallı PEM yakıt hücresi üzerindeki deformasyon etkisini incelemişlerdir. Deformasyona uğramış tek kanallı, üç boyutlu PEM yakıt hücresini simüle etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği HAD'a aktarıldı. PEM yakıt hücresinin performansını etkileyen parametrelerden biri de yakıt hücresi bileşenlerinin mekanik özelliklerini ve boyutlarını değiştiren montaj basıncıdır. Düşük montaj basıncında yakıt hücresinden sıvı/gaz sızıntısı ya da temas problemleri oluşabilir. Yüksek montaj basıncında da yakıt hücresinin bileşenleri bipolar plakalar (BPP), gaz difüzyon tabakaları (GDL), katalizör tabakaları ve membran zarar görebilir. Montaj basıncı yakıt hücresi komponentlerinin mekanik ve elektriksel özelliklerine bağlıdır. Montaj basıncı arttığı zaman gaz difüzyon tabakasının kalınlığı, porozite ve temas direnci azalmaktadır. Montaj basıncının belirli bir limiti aşması gaz difüzyon tabakasının tahrip olmasına neden olur. Bu yüzden hücre performansı açısından optimum montaj basıncının belirlenmesi gerekir. Çalışma sonuçlarını kullanarak optimum yakıt hücresi tasarımı ve çalışma parametrelerini tahmin edebiliriz. Bu çalışmada montaj basıncının yakıt hücresi performansına olan etkisi mekanik deformasyon içeren sonlu elemanlar modeli ile incelenmiştir. Yakıt hücresine farklı değerlerde montaj basınçlarının uygulanmasıyla polarizasyon eğrisi oluşturulmuş, türler kesirleri ve hızları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda en iyi hücre performansının elde edildiği optimum montaj basıncı 0,5-1 MPa arasında olduğu belirlenmiştir (Taymaz ve Benli, 2010).

Çalışmalarında katalizör mikroyapısının 5 cm² aktif alanlı PEM yakıt hücresi performansına olan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal simülasyonlar ANSYS Fluent 19.0 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katalizör tabakası bileşimi ve özellikleri, katalizör tanelerini çevreleyen iyonomer ve suya bağlı kütle taşınım direnci modele dahil edilmiştir. Yukarıda bahsedilen parametrelerin etkileri polarizasyon eğrileri ve temel parametrelerin yerel dağılımları açısından tartışılmıştır. İyonomer hacim kesrinin optimum aralığı bulunmuş ve hücre performansındaki kazanç % 39 değerindedir. Yüksek platin yükleme ve daha küçük katalizör parçacık yarıçapı PEM

yakıt hücre performansını olumlu yönde etkilemiştir. Elektrokimyasal aktif alanın etkisi akım yoğunluğunda toplam % 22’lik artışa sebep olur. Bunun sebebi daha iyi elektriksel temaslara ve su giderimi için ek yollara sahip platin yükleme, iyot katkılı grafen için geliştirilen yeni malzeme kullanılmasıdır. Bu parametre kullanılarak sayısal model onaylanmış ve deneysel verilerle iyi bir uyum yakalanmıştır. PEM yakıt hücresi performansını iyileştirmek için platin yükleme ve daha düşük parçacık yarıçapı tavsiye edilir (Carcadea ve ark., 2018).

Bipolar plakalardaki akış alanının düzeni proton değişim membranlı elektrolizör hücresinin performansını etkiler. Yakıt hücresindeki bipolar plakaların akış alanının tasarımı homojen akış dağılımını elde edebilmek için dikkate alınmalıdır. Bu bakımdan 64 cm² kesit alanlı, yeni bir akış alan düzenlemesinin üç boyutlu modeli önerilmiş sıcaklık, basınç düşüşü ve akım yoğunluğunun dağılımı incelenmiştir. Sonlu hacim yöntemine dayanan kararlı halde, tek fazlı, izotermal olmayan PEM elektrolizörün sayısal modeli oluşturulmuştur. Daha sonra spiral akış alanına sahip PEM elektrolizör modellenmiştir. S rekli lik, momentum, türler, enerji ve proton değişimli membranlı elektrolizörün farklı bölgelerinde elektrokimyasal kinetik bağıntılarla birlikte elektrik yükü denge denklemleri tek bölgeli bir modelde çözüldü. Sayısal simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldı, sonuçlar düşük ve orta akım yoğunluklarında birbiriyle uyumludur. Spiral akış alanı üretilen hidrojen ve akım yoğunluğunun homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Optimum akış alan düzenlemesi akış kanalı boyunca homojen bir sıcaklık dağılımına sebep olur. Akış alanının düşey yollarında akım yoğunluğu ve suyun mevcudiyeti çok daha yüksektir. Yapılan  alışma sonucunda maksimum akım yoğunluğu çalışma sıcaklığı 80 C, çalışma basıncı 1.5 bar, hücre potansiyeli 1.9 V olduğu zaman yaklaşık 10,600 A/m²’dir (Toghyani ve ark., 2018).

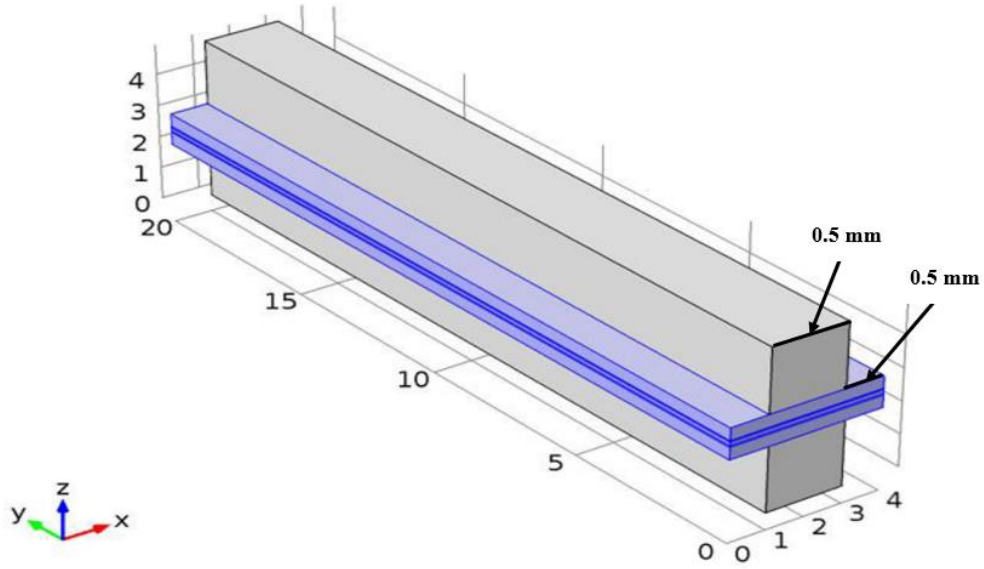
Yüksek akım yoğunluklarında farklı kanal geometrilere sahip PEM yakıt hücresinin performansını incelemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizini kullandılar. Çalışmada düz kanal geometrisi ile birlikte üç boyutlu, izotermal olmayan bir model kullanıldı. Hem anot hem de katot nemlendirmeleri modele dahil edilmiştir. Farklı akım yoğunluklarında çalışan sistemler için toplam su yönetimini elde etmek için modele faz taşınımı dahil edilmiştir. İlk olarak, tüm durumlar için aynı sınır

koşullarını sağlayan aynı kanal yüksekliği, kanal alanı ve reaksiyon alanı ile üç farklı kanal kesit geometrisi (dikdörtgen, yamuk ve paralelkenar) seçildi. Sayısal simülasyonlar, dikdörtgen kanal kesit geometrisinin yamuk ve paralelkenar kanal kesit geometrilerine göre elde edilen hücre potansiyelleri çok daha yüksektir. Fakat, yamuk kanal kesit geometrisi reaktant difüzyonunu kolaylaştırmış daha homojen reaktant ve yerel akım yoğunluklarına, düşük katot aşırıgerilime yol açmıştır. Sayısal simülasyonlar aynı sınır koşulları kullanılarak üç farklı kanal geometrisi için gerçekleştirilmiş ve omuz genişliğinin hücre performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Farklı kanal omuz genişliği oranları kullanan sayısal simülasyonlar yüksek akım yoğunluklarında olduğunu göstermiştir. Omik kayıplar omuz genişliğinin azalmasıyla birlikte önemli derece artmaktadır. Buna karşılık, daha küçük bir omuz genişliği reaktantların dağılımını kolaylaştırır ve konsantrasyon kayıplarını azaltır. Simülasyon sonuçları yüksek akım yoğunluğu çalışma koşulları altında yüksek hücre potansiyeli veren optimum kanal omuz genişliği oranını ortaya koymuştur. Hücre performansı yüksek reaktant akış hızları ve giriş hızları kullanılsa bile kanal omuz genişliği oranının azalmasıyla olumsuz yönde etkilenmiştir. Membran iletkenliği ve omuz genişliği yüksek akım yoğunlukları altında çalışan yakıt pilinin omik kayıpları ve hücre performansını düzenleyen en önemli fiziksel ve geometrik parametrelerdir (Ahmed ve Sung, 2006).

Çalışmalarında 25 kanaldan oluşan $5.1 \times 5.1 \text{ cm}^2$ alana sahip üç boyutlu (HAD) PEM yakıt hücresi modeli oluşturmuşlar, geometrik tasarımların ve akış alan boyutlarının hücre performansına ve yerel taşınım olaylarına olan etkisini araştırmışlardır. Serpantin, birbirine geçmiş ve paralel konfigürasyonlar içeren bipolar plaka tasarımlarına kanal genişliğinin kaburga genişliğine oranı dahil edilmiş, analiz edilmiştir. Tüm tasarımlar için kanal genişliğinin kaburga genişliğine oranı sırasıyla 0,25, 0,43, 0,66, 1,00, 1,50 ve 2,66'dır. Yüksek hücre potansiyellerinde geometrik tasarımların ve akış alan boyutlarının hücre performansına ve yerel taşınım olaylarına olan etkisi düşük elektrokimyasal reaksiyon hızlarından dolayı oldukça azdır. Düşük hücre potansiyellerinde geometrik tasarım ve akış alan boyutları hücre performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Kanal genişliğinin kaburga genişliğine oranı aynı olduğu zaman serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresinin performansı birbirine geçmiş

bipolar plaka tasarımına göre % 4,6, paralel konfigürasyona göre % 39,1 daha fazladır. Ayrıca kanal genişliğinin azaltılması, kaburga genişliğinin artırılması hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Hücre performansı serpantin için % 120,5, birbirine geçmiş tasarımda % 45,2 ve paralel konfigürasyonda % 23,3'e yükselir. En iyi hücre performansı serpantin ve birbirine geçmiş tasarım için kanal genişliğinin kaburga genişliğine oranı en az 0,25, paralel tasarım için de 0,43 olduğunda elde edilmiştir. En fazla basınç düşüşü serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresi için elde edilmiş ve basınç düşüşü kanal genişliğinin kaburga genişliğine olan oranının azalmasıyla birlikte artmıştır. Kanal genişliğinin kaburga genişliğine oranı yüksek ya da düşük olduğu zaman basınç düşüşü paralel ve birbirine geçmiş tasarımlar için hemen hemen aynıdır ancak birbirine geçmiş tasarımın hücre performansı çok daha iyidir (Kerkoub ve ark., 2018).

Dört farklı $L \times C$ 'ye (Landing to channel width) sahip üç boyutlu PEM yakıt hücresinin sayısal modellerini ticari sonlu elemanlar yazılımı COMSOL Multiphysics 4.3b'yi kullanarak oluşturmuşlardır. Sıcaklık, basınç, bağıl nemlilik ve reaktantın kütledebisi gibi işletme parametrelerinin yanı sıra akış alanı tasarımları, boyutları, kanal uzunluğu, membran türü ve gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği gibi tasarım parametreleri de oldukça hücre performansını etkileyen parametrelerdir. Yapılan çalışmada tasarım parametresinin hücre performansına olan etkisi araştırılmıştır. Üç boyutlu modeller 0,5x0,5, 1x1, 1,5x1,5, 2x2 olmak üzere dört farklı $L \times C$ ve kanal uzunluğu 20 mm seçilerek oluşturulup performans kriteri incelenmiştir. Farklı hücre potansiyellerinde performans gösteren PEM yakıt hücresinin akım yoğunluğu değerleri tek tek elde edildikten sonra polarizasyon, güç yoğunluğu eğrileri oluşturulmuştur. Sayısal analizlere göre en yüksek akım ve güç yoğunlukları $L \times C$ 'nin 0,5x0,5 olduğu modelde elde edilmiştir. Optimum performansın elde edildiği sayısal model Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. Ayrıca çok daha iyi su yönetiminden dolayı yüksek akım ve güç yoğunlukları elde etmek için en küçük gaz akış kanal boyutları ($L \times C$) tercih edilmelidir. $L \times C$ 'nin 0,5x0,5 olduğu yakıt pili geometrisinde elde edilen en yüksek akım ve güç yoğunlukları sırasıyla 1,1183 A/cm² ve 0,4473 W/cm²'dir (Loganathan ve ark., 2014).

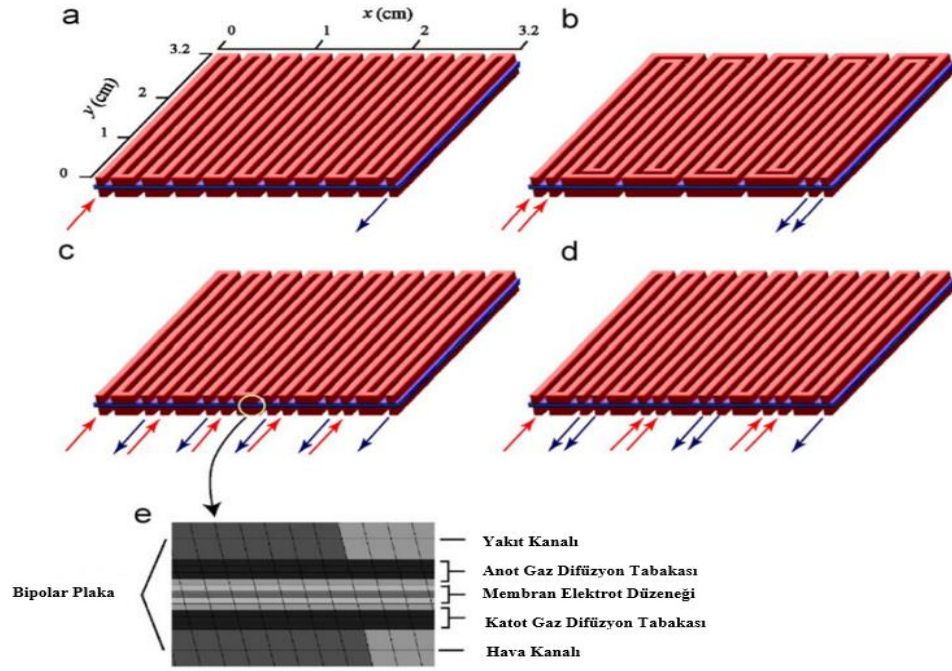


Şekil 2.4. Optimum performansın sağlandığı PEM yakıt pilinin sayısal modeli (Loganathan ve ark., 2014).

Üç boyutlu, izotermal, tek faz halinde akışın matematiksel modelini geliştirmişler, deneysel veri ile doğrulandıktan sonra kanal ve alan genişliğinin optimizasyonu için toplam 73 durumu analiz etmişlerdir. Optimizasyon analizleri 0,4 V hücre potansiyelini ve 1,0 mm kanal derinliğini hesaba katarak düz kanal geometrisi için gerçekleştirilmiştir. 73 durumu analiz etmek performans parametrelerinin yani akım yoğunluğu ve basınç düşüşünün farklı kanal ve alan genişliğindeki değişim için kolayca anlaşılmasına yardımcı olur. Sayısal sonuçlar basınç düşüşü alan genişliğine kıyasla kanal genişliğine daha fazla bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca katot tarafında oluşan basınç düşüşü anot tarafındaki basınç düşüşünden çok daha fazla önem arz etmektedir. Bununla birlikte kanal ve alan genişlikleri hücre akım yoğunluğu üzerinde eşit bir öneme sahiptir. Kanal genişliği minimum olduğunda basınç düşüşü toplam hücre verimliliğini azaltacak şekilde çok yüksektir. Alan genişliğinin basınç düşüşü üzerindeki etkisi çok azdır. Optimizasyon analizlerine göre basınç düşüşü ve akım yoğunluğu dikkate alındığında en iyi PEM yakıt hücresi kanal geometrisi kanal ve alan genişlikleri 1 mm olduğu zaman elde edilmiştir. Akım yoğunluğu $0,96 \text{ A/cm}^2$, anot tarafındaki basınç düşüşü 3 Pa, katot tarafındaki basınç düşüşü de 11 Pa'dır (Chowdhury ve ark., 2018).

Üç boyutlu PEM yakıt hücresi modeli geliştirmişler, membran kalınlığının hücre performansına olan etkilerini Comsol Multiphysics 5.0 ticari yazılım vasıtasıyla araştırmışlardır. 100e-6m, 75e-6m, 50e-6m ve 125e-6m olmak üzere dört farklı kalınlık seçilmiş, belirtilen giriş çalışma koşulları arasında PEM yakıt hücresinin en iyi membran kalınlığı 50e-6m olarak bulundu. Aynı hücre potansiyeli için en fazla su konsantrasyonu membran kalınlığı 50e-6m olduğu zaman elde edildi. Membran kalınlığı 125e-6m olduğu zaman omik kayıplar az, konsantrasyon kayıpları fazladır. Hücre sıcaklığı 333 K olduğu zaman yakıt hücresi, hem oksijen hem de hidrojen protonunun katod katalizör tabakasına yayılmasını sağlayan membran ve katot difüzyon tabakasında optimal bağlı neme sahiptir. Sayısal simülasyonlar, daha ince bir membran kullanıldığı zaman yüksek akım yoğunluklarının elde edildiğini göstermektedir. Hidrojen, oksijen tüketimi ve buna karşı su üretimi de yüksektir. Geliştirilen CFD modeli deneysel verilerle karşılaştırılmış, iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Sayısal model yakıt hücresi tasarım ve optimizasyon maliyetini azaltmak için etkili bir CFD aracı olarak kullanılabilir (Jourdani ve ark., 2017).

Akış alan tasarımının hücre performansına olan etkilerini araştırmak üzere tek kanallı, çift kanallı, döngüsel tek kanallı ve simetrik tek kanal tasarımında dört adet 10 cm²'lik serpantin akış alanına sahip sayısal modeli geliştirip, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile analiz etmişlerdir. Farklı kanal tasarımlarından olusal sayısal model Şekil 2.5.'de şematik olarak gösterilmiştir. Farklı hücre potansiyellerinde aşırı gerilim, akım yoğunluğu dağılımları ve membran su içeriğinin hesaplanması ile reaktantın düşük ve yüksek nem koşulları incelenmiştir. Yüksek giriş neminde, çift kanallı akış alanı daha iyi performans ve homojen bir akım yoğunluğu dağılımına sahiptir. Giriş nemi düşük olduğu zaman dört farklı tasarıma sahip serpantin akış alanlı (SAA) geometrisindeki yakıt hücrelerinin performans açısından birbirleri arasındaki farklılık oldukça azdır. Döngüsel ve simetrik kanallı akış alan tasarımına sahip geometrilerde benzer akım yoğunluğu profilleri elde edilmiş, her iki tasarımda da basınç düşüşü oldukça azdır. Bundan dolayı her iki akış alan tasarımından birine sahip olan geometrilerin büyük ölçekli sistemlerde ve giriş neminin düşük olması koşulunda kullanılması performans açısından daha avantajlı olacağı sonucuna varılabilir (Jeon ve ark., 2008).

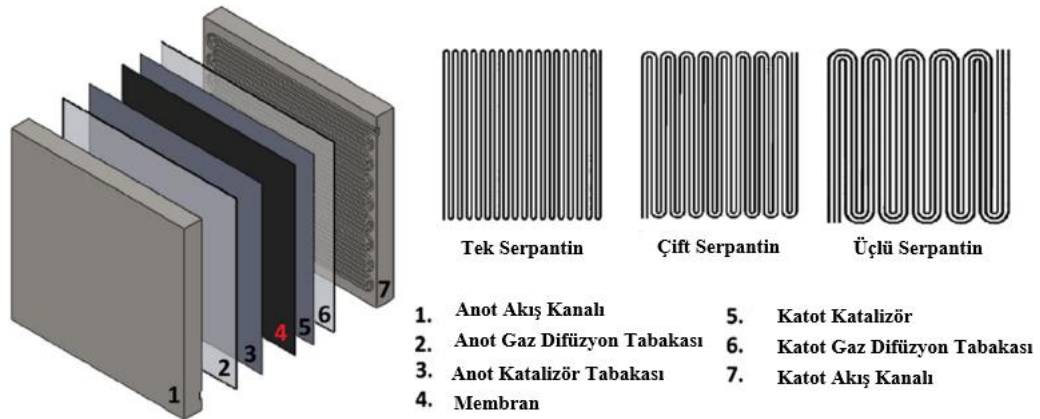


Şekil 2.5. Serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresinin sayısal model çeşitleri (Jeon ve ark., 2008).

Çalışmalarında 50 cm^2 aktif alanlı yüksek sıcaklıkta bir polimer polielektrolit membran hücresinin üç boyutlu yarım hücre hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modelini geliştirmişlerdir. Üç farklı akış kanal geometrisini serpantin, paralel ve ızgara olmak üzere sayısal olarak incelemişlerdir. Paralel akış kanal geometrisinin reaktant gazların elektrot yüzeyi üzerinde iyi yayılmamasından dolayı hücre performansı düşüktür. Yüksek oksijen talep durumunda paralel akış kanal geometrisi düşük akım yoğunlukları ile sonuçlandığı, deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır. Serpantin akış alan geometrisi en iyi hücre performansını verir, yüksek akım yoğunluklarında ızgara tip ve serpantin akış alan geometrisi arasında performans farkı ortaya çıkmaktadır. Çalışma sıcaklığının yanı sıra kanal girişindeki gazın akış debisi incelenmiştir. Hücre potansiyeli 0.65 V , çalışma sıcaklığı 473 K olduğu zaman en yüksek akım yoğunlukları elde edilmiştir. Sıcaklık artışı hücre performansını olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır (Lobato ve ark., 2010).

Çalışmalarında tek(1-S), çift(2-S) ve üçlü(3-S) serpantin akış alanı konfigürasyonunun 49 cm^2 aktif alanlı PEM yakıt hücresinin performansına olan etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. İlk olarak üç boyutlu PEM yakıt hücresi modeli Şekil 2.6.'daki gibi geliştirildi, üç farklı tasarımın hücre performansına olan etkisini

incelemek için ANSYS FLUENT 15.0 HAD kodu kullanılarak sayısal simülasyonlar yapıldı. Çalışma basıncı 1 bar, hücre sıcaklığı 50°C olarak ayarlandı. Yakıt hücresinin üç farklı tasarımı için hidrojen ve oksijen kütleli debileri sırasıyla $2,05 \times 10^{-7}$ kg/s ve $1,67 \times 10^{-6}$ kg/s'dir. Çalışmada hücre performansı ile birlikte basınç dağılımı, hidrojen ve oksijen kütle kesirleri, sıvı fazda su aktivitesi, akım yoğunluğu dağılımı ve membranın su içeriği gibi önemli parametreler sunulmuştur. Sayısal simülasyonları doğrulamak için PEM yakıt hücresinin 1-S, 2-S ve 3-S akış alanı konfigürasyonlarını değiştirerek deneysel çalışma yapılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışma sonucunda polarizasyon grafikleri elde edilmiş, en iyi elektrokimyasal performansı tek serpantin akış alanlı yakıt hücresinin verdiği sonucuna varılmıştır. Hücre potansiyeli 0,7 V'dan fazla olduğu zaman kanal tasarımının hücre performansına olan etkisi önemsizdir. Daha düşük hücre potansiyellerinde kanal tasarımı önem arz etmektedir. Kanal geçişleri sayısı azaldıkça reaktant hızı artacak, bu da hücreden su giderimini geliştirecektir. Katot tarafında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlara ulaşan oksijen miktarı artacaktır. Bu da hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir (Velisala ve Srinivasulu, 2018).



Şekil 2.6. PEMFC bileşenlerinin şematik gösterimi (Velisala ve Srinivasulu., 2017).

Çalışmalarında yakınsayan ve ıraksayan kanallardan oluşan yeni bir bipolar akış alanı tasarlamışlardır. Sayısal simülasyonlar birleşik yönetici denklemlerin ayrıklaştırılması ve çözülmesi için sonlu hacim yöntemini kullanan bir ticari akış çözücü olan ANSYS FLUENT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PEMFC modeli kararlı hal, üç boyutlu, tek

fazlı ve izotermal bir model varsayımları ile oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada katot tarafının sayısal simülasyonları gerçekleştirilmiş, yakınsayan ve ıraksayan kanalların hücre performansına olan etkileri araştırılmıştır. Yakınsama ve ıraksama açısının etkisi üç farklı değer (0° , $0,2^\circ$ ve $0,3^\circ$) dikkate alınarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar hız, basınç ve oksijen mol kesri dağılımlarını göstermiştir. Türler tüketimi ve üretimi önem arz ettiğinde sabit ve değişken kaynak terim modelleri uygulanmıştır. Sonuçlar yakınsayan kanallar iki ıraksayan komşu kanalı beslediğini göstermektedir. Bu durum, komşu kanallar arasında oluşan basınç farkının sebep olduğu kaburga hızının bir sonucudur. Polarizasyon eğrileri geleneksel kanallara kıyasla kanallara $0,3^\circ$ 'lik açı uygulanması net elektrik çıkış gücünün %16 arttığını göstermektedir (Rezaie ve ark., 2017).

Spiral akış alanlı proton değişim membranlı yakıt hücresinde (PEMFC) kanal genişliğinin, spiral kanalın dönüş sayısı ve akış yönünün reaktant tüketimi üzerindeki etkilerini araştırmak için FORTRAN programını geliştirmişlerdir. Kanal kaburga genişliği oranının etkisini araştırmak için bu çalışmada üç oran ($b=1, b=2$ ve $b=3$) dikkate alınmıştır. Spiral kanalın dönüş sayısının reaktan tüketimi üzerindeki etkisini incelemek için üç farklı konfigürasyon (dört, beş, altı dönüş) arasında karşılaştırma yapıldı. Yönetici denklemler silindirik koordinatlarda sonlu hacim yöntemini kullanarak ayrıklaştırıldı. Ayrık denklemleri çözmek için FORTRAN programı kullanılmıştır. Spiral kanalın dönüş sayısının artması ile daha homojen reaktan dağılımı elde edilir. Spiral kanal şekline dolayı merkezkaç kuvveti oluşur. Bu da hücre performansını olumlu yönde etkiler. Çalışmada polarizasyon eğrilerinin yanı sıra PEM yakıt hücresinin farklı kısımlarında oksijen, hidrojen konsantrasyonları ve hız profilleri elde edilmiştir. Laminer akış profilinin devam ettirildiği kanalın merkezinde en yüksek hıza ulaşılmıştır. Geniş kanal konfigürasyonu dar kanal konfigürasyonuna kıyasla daha iyi reaktan dağılımı sağlamaktadır. Reaktanların spiral kanalın dış tarafından enjeksiyonu akım yoğunluğunu artırır bu da hücre performansının artmasına sebep olur. Spiral kanalın dönüş sayısı artırıldığı zaman reaktan tüketimi fazla olduğundan dolayı güç yoğunluğu yüksektir (Monsaf ve ark., 2017).

Çalışmalarında yeni bir katot gaz akış kanalı tasarımı yapıp hücre performansına olan etkisini araştırmışlardır. Açık katot Pem yakıt hücresi için hücre performansını etkileyen katot gaz akış kanalının en-boy oranı ve kesit alanının performansa olan etkisini araştırmak amacıyla üç boyutlu, kararlı yapılı, tek fazlı ve izotermal bir model geliştirdiler. 100 cm² aktif alanlı PEM yakıt hücresinin katot akış kanalının altı adet yeni konfigürasyonu geliştirildi. Kesit alanının artması gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakası arasındaki ara yüzeyin molar oksijen konsantrasyonunun azalmasına yol açtığından hücre performansını olumsuz yönde etkiler. Diğer yandan en-boy oranının artması molar oksijen konsantrasyonunu ve hücre performansını artırır. Sonuçlar katot gaz akış kanalının değişen en-boy oranı ve kesit alan tasarımının hücre performansı üzerinde çok küçük bir etkisi olduğunu göstermiştir. Gaz akış kanalları arasındaki mesafe azaldığı zaman gaz difüzyon ve katalizör tabakaları arasındaki oksijen konsantrasyonu artar bu da elektrokimyasal reaksiyon hızının artmasına hücre performansının iyileşmesine sebep olmaktadır (Kreesaeng ve ark., 2015).

Çalışmalarında dalgalı serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresi modelini geliştirmişler, deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Üç boyutlu, çok fazlı, kararlı yapı, izotermal, laminer simülasyon modeli FLUENT PEM yakıt hücresi modülü vasıtası ile oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı dalga geometrisinin optimum eğim açısını ve dalgalı ile geleneksel tasarımların arasındaki farkları belirlemektir. Bu model, dalgalı serpantin akış alanlı tasarımın geleneksel serpantin akış alanlı tasarımdan su giderimi ve difüzyon tabakasına oksijen aktarımı açısından üstün olduğunu ortaya koymaktadır. Dalgalı serpantin akış alanlı tasarım yerel akış yönü, yerel akış hızı ve yerel basıncın döngüsel değişimini sağlar ve bu durum zorlanmış taşınımına sebep olur. Dalgalı serpantin akış alanlı tasarımın üstün performansı deneysel olarak da doğrulanmıştır. Dalgalı serpantin akış alanlı tasarımın, yalnızca mevcut akım yoğunluğu aralığı boyunca daha düşük bir basınç düşüşü sağlamakla kalmayıp aynı zamanda, yüksek akım yoğunluğu bölgesinde geleneksel serpantin akış alanlı tasarıma kıyasla hücre performansını arttırmıştır. Dalgalı serpantin akış alanlı tasarımın en yüksek güç yoğunluğu değerinde % 17,8'lik bir artış olmuştur. Ayrıca, bu çalışmadaki akış alanı tasarım ve üretim yaklaşımının yükseltilebileceğini ve pratik PEM yakıt hücresi

uygulamalarında umut vaad eden bir akış alanı olarak işlev göreceğine inanılmaktadır (Li ve ark., 2017).

2.3. İşletme Parametrelerinin Yakıt Pil Performansına Etkisi

Farklı işletme parametrelerinin PEM yakıt hücre performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada tüm deneyler için $7,2 \times 7,2$ cm aktif yüzey alanlı, tek hücreli PEM yakıt pili kullanılmıştır. Yakıt hücresinin anot tarafındaki gaz akış kanalında saf hidrojen, katot tarafındaki gaz akış kanalında hava kullanılmıştır. Farklı çalışma sıcaklığı, nemlendirme sıcaklığı ve çalışma basınçlarında deneyler yapılmış, sonuçları polarizasyon eğrileri halinde gösterilmiştir. Üç boyutlu PEM yakıt hücresi modeli oluşturulmuş, simülasyon sonuçları ile deneysel veriler birbirleri ile kıyaslanmış, sonuçların uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Yeterli nemlendirme sağlandığında, PEM yakıt hücresinin performansı çalışma sıcaklığının artmasıyla artar. Yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı nemlendirme sıcaklığından yüksek olduğu zaman hücre performansı bu durumdan olumsuz etkilenir. Bu, özellikle düşük akım yoğunluğu bölgesinde geçerlidir. Yüksek akım yoğunluğu bölgesinde anot ve katot nemlendirme sıcaklığının hücre performansı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Yakıt hücresi performansı reaktant gazın kısmi basıncı ve akım yoğunluğu değişimindeki artıştan dolayı basınç değerinin artışı ile birlikte artar (Wang ve ark., 2003).

Serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresinin performansını araştırmak için üç boyutlu, 25 cm^2 aktif alanlı, tek fazlı bir model oluşturmuşlardır. İşletme parametreleri (sıcaklık, basınç, bağıl nem ve gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği) değiştirilerek model analiz edilmiş, elde edilen akım ve güç yoğunluklarını ifade eden polarizasyon grafiklerini oluşturmuşlardır. PEM yakıt hücre modeli ön işleme yazılımı Gambit 2.4.6 kullanılarak oluşturulmuş, sayısal simülasyonlar FLUENT 16.2 hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodu ile gerçekleştirilmiştir. Modelin geçerliliği açısından simülasyon sonuçları literatürde verilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve model ile deneysel verilerin birbiriyle uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Kütle taşınım direncinin azalmasıyla reaktant gazın basıncı ve yayılımı artar. Çalışma basıncının

artması ile birlikte hücre performansı da artmıştır. Çalışma sıcaklığının artması hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Ancak çalışma sıcaklığı 90 °C'den fazla olduğu zaman membran aşırı ısınır bu da hücre performansının olumsuz yönde etkilenmesine sebep olur. Gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin artırılması hücre performansını iyileştirmiştir. Çünkü gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin artması katalizör tabakasına geçen reaktant miktarını artırır bu da daha fazla kimyasal reaksiyon anlamına gelir sonuç olarak çok daha iyi bir hücre performansı elde edilmesine sebep olur. Anot tarafının bağıl nemi arttıkça membranın su içeriği artar bu durum hücre performansını olumlu yönde etkiler. Katot tarafının bağıl neminin azaltılması oksijen konsantrasyonunun artmasına, su taşmasının azalmasına sebep olacağından hücre performansı artar. Yapmış oldukları çalışmada maksimum güç yoğunluğunu 0,5 V hücre potansiyelinde, 3 atm çalışma basıncında elde edilmiş olup değeri 0,5941 W/cm²'dir (Kahveci and Taymaz, 2018).

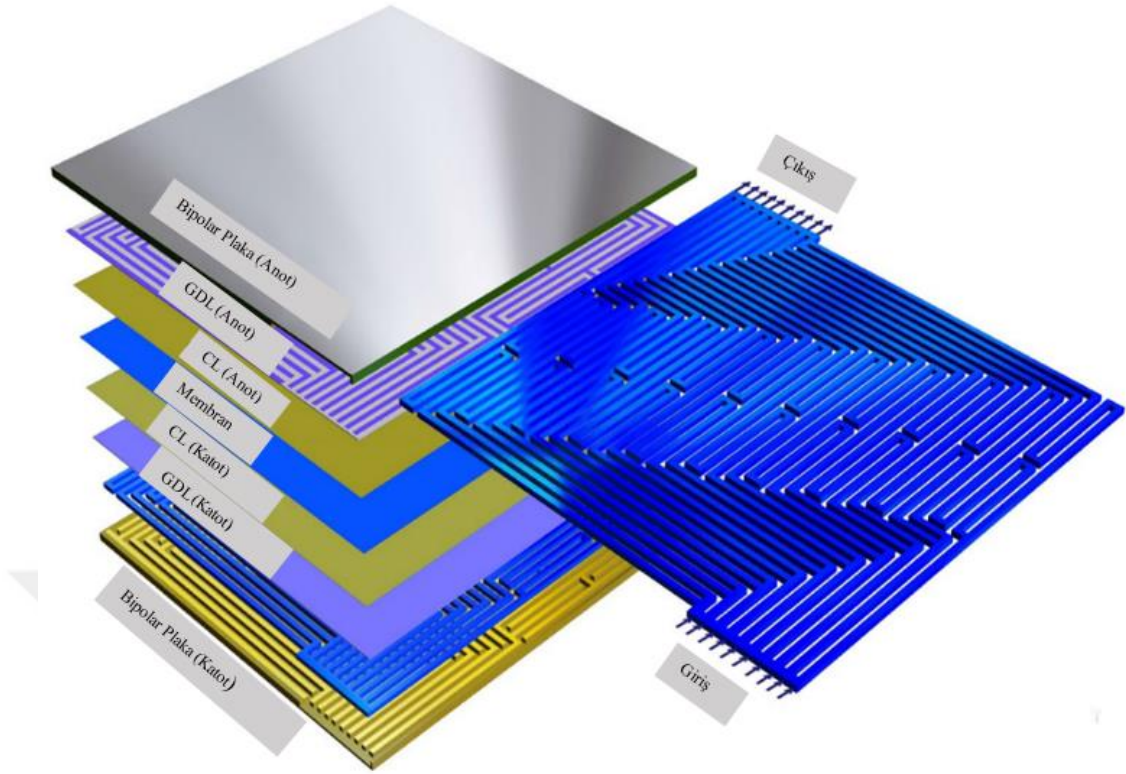
Isı ve su yönetimini kontrol eden işletme parametreleri hidrojen akış hızı, oksijen akış hızı, hücre sıcaklığı ve nemlendirme sıcaklığının 25 cm² aktif alana sahip proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. PEM yakıt hücresinin işletme parametrelerinin optimize edilmesi için yüzey tepki yöntemi (RSM) uygulanmıştır. ANOVA (varyans analizi) analizleri çeşitli faktörlerin PEM yakıt hücresinin maksimum güç yoğunluğuna olan etkilerini hesaplamak için kullanılır. Hidrojen akış hızı 2,5-5 L/dk, oksijen akış hızı 3-5 L/dk, nemlendirme sıcaklığı 40-70°C ve hücre sıcaklığı 40-80°C arasında değiştirilip analizler yapılmıştır. Maksimum güç yoğunluğu 241,977 mW/cm² olarak bulunmuştur. Normal koşullar altında maksimum güç yoğunluğunu belirleyebilmek için Design Expert 8.0 yazılımının optimizasyon sekmesi kullanılmıştır. Yakıt hücresinin performansını etkileyen temel parametrelerden hücre sıcaklığı 40-55°C, nemlendirme sıcaklığı 40-65°C arasında olduğu zaman optimum güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Oksijen akış hızının artması yakıt hücre performansında önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır. Hidrojen akış hızı 4,91 L/dk ve oksijen akış hızı 3,45 L/dk olduğu zaman maksimum güç yoğunluğu değerleri elde edilmiştir (Kahveci and Taymaz, 2014).

Üç boyutlu, kararlı, tek hücreli PEM yakıt hücresinin GAMBIT programında geometrisini oluşturduktan sonra, sonlu hacimlere bölüp, FLUENT 6.3 paket programının PEMFC modülünü kullanarak analiz etmiş, işletme parametrelerinin (sıcaklık, basınç ve havanın kütleli debisi), kanal boyutlarının (farklı kanal yükseklik ve genişlikleri) ve kanal kesit geometrisinin (dörtgen, üçgen, trapez ve yarım elips) hücre performansına olan etkilerini incelemiştir. Analizlerden elde edilen akım yoğunluğu değerleri kayıt edilmiş, polarizasyon ve güç grafikleri oluşturulmuştur. Havanın kütleli debisi $4,322 \times 10^{-6}$ kg/s olduğu durumda maksimum akım yoğunluğu değeri 2.751 A/cm^2 olarak elde edilmiştir. Havanın kütleli debisi $2,708 \times 10^{-7}$ kg/s olduğu durumda da minimum akım yoğunluğu değeri $0,63 \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilmiştir. Üçgen kanal kesit geometrisi için elde edilen maksimum güç değeri 1,769 W, minimum güç değeri 0,517 W'dır. Üçgen kanal kesit geometrisi için maksimum ortalama güç miktarı 1,388 W, minimum ortalama güç miktarı 0.401 W olarak elde edilmiştir. En fazla basınç kaybı sıcaklık $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, basınç 100 kPa olduğu zaman meydana gelmiş, 118,808 Pa olarak bulunmuştur. En az basınç kaybı kanal genişliği 2 mm, kanal yüksekliği 1,6 mm olduğu zaman meydana gelmiştir ve 1,046 Pa olarak bulunmuştur (Özdoğan, 2018).

Çalışmalarında işletme parametrelerinin kanal kesit geometrisi dikdörtgen ve yamuk şeklinde olan serpantin akış alanlı PEM yakıt hücre performansına olan etkisini incelemişlerdir. Reaktant nemlendirme sıcaklığının kanal kesit geometrisi yamuk şeklinde olan serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresi üzerindeki etkisi çalışma sıcaklığı ve basınca kıyasla çok daha fazladır. Kanal kesit geometrisi yamuk olan serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresinin yüksek su giderme kapasitesi su içeriği yüksek olduğu zaman performansı olumlu yönde etkilemektedir. Buna karşılık kanal kesit geometrisi yamuk olan serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresinin yüksek su giderme kapasitesi su içeriği düşük olduğu zaman etkenliği düşük bir membran ile sonuçlanır. Reaktant nemlendirme sıcaklığının kanal kesit geometrisi dikdörtgen olan serpantin akış alanlı yakıt hücresi üzerindeki etkisi önemsizdir. Hücre sıcaklığı ve reaktant nemlendirme sıcaklığı sabit tutulduğunda anot ve katot basınçlarının artması ile hücre performansı artar. Basıncın hücre performansına olan etkisi kanal kesit geometrisinden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır (Freire ve ark., 2014).

Çalışmalarında 25 cm² aktif alana sahip, tek hücreli kanal geometrisi üçgen olan PEM yakıt hücresinin giriş oksijen sıcaklığı, giriş hidrojen sıcaklığı, hücre sıcaklığı, giriş basıncı, oksijen akış hızı ve hidrojen akış hızı gibi parametrelerin hücre performansına olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Normal koşullar altında yukarıdaki parametrelerin tersinmezlik ve polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi deney yapılmıştır. Membran malzemesi olarak Nafion 117 seçilmiş, anot ve katot elektrotlarının cm² alan başına 4 mg platin kullanılmıştır. Oksijen ve hidrojenin giriş sıcaklığı, hücre sıcaklığı ve giriş basıncındaki artış ekserji verimliliğini arttırmış, hücre içindeki tersinmezlikleri azaltmıştır. Ekserji verimliliği 40°C sıcaklıkta %58 ile %42 arasında, akım yoğunluğu ise 0.2 ile 0.6 A/cm² arasında değişim göstermiştir. Oksijen akış hızı 0.9 L/dk olduğu zaman hücre içindeki tersinmezlik düşük, ekserji verimliliği yüksektir. Hidrojen akış hızı arttığı zaman yakıt hücresinin tersinmezliği artar bununla birlikte ekserji verimliliği yüksektir (Khazaei ve ark., 2012).

Taguchi yöntemini kullanarak gerekli hücre potansiyelini azaltmak için PEM elektrolizörünün işletme parametrelerini (çalışma sıcaklığı, katot ve anot basıncı, membran su içeriği, membran kalınlığı, anot ve katot akım yoğunluğu değişimi) optimize etmişlerdir. Yeni akış alan sayısal modeli Şekil 2.7.'de şematik olarak belirtilmiştir. PEM elektrolizörünün termodinamik modeli oluşturulduktan sonra Taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. İşletme parametrelerinin hücre performansına olan etkilerini belirlemek için sinyal/gürültü (SNR) ve varyans analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sıcaklığı, membran su içeriği, katot ve anot akım yoğunluğu değişiminin maksimum olması ve membran kalınlığı, katot ve anot basıncının düşük olması PEM elektrolizör performansının olumlu yönde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Anot akım yoğunluğu değişiminin elektrolizör voltajı üzerinde önemli bir katkısı olup % 67,15'lik bir etkiye sahiptir. Bunun yanı sıra membran su içeriği ve anot basıncının etkisi sırasıyla % 1,1 ve % 0,42'dir (Toghyani ve ark., 2019).



Şekil 2.7. Yeni akış alan modelinin şematik gösterimi (Toghyani ve ark., 2019).

Çalışmalarında proton değişim membranlı yakıt hücresini (PEMFC) sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. PEM yakıt hücresinin hem anot hem de katot tarafındaki çalışma basıncının artırılmasının performans üzerindeki etkisini sayısal olarak tahmin edip, deneysel olarak da doğrulamışlardır. Anot ve katot tarafındaki çalışma basıncı 303975 Pa olarak ayarlandıktan sonra aynı anda 405300 ve 506625 Pa basınçlara yükseltildi. Basıncın artırılması gazların kütle oranının önemli ölçüde artmasına sebep olmaktadır. Reaktant gazların yakıt hücresine akış hızları artar. Böylece gazlar elektrolit içine akar ve elektrokimyasal reaksiyon hızı artar. Sonuçta her iki durumda da çalışma basıncı artırıldığı için hücre performansında iyileşme meydana gelmiştir. Düşük hücre potansiyellerinde maksimum hücre sıcaklığı yüksek reaksiyon hızından dolayı elde edilmiştir. Reaksiyon hızının artmasıyla hücre potansiyeli yavaş yavaş azalmaya başlamaktadır, maksimum hücre sıcaklığı artmaktadır. Bununla birlikte, gaz difüzyon tabakasının geometrik konfigürasyonunun etkisi incelenmiş ve çıkıntılara sahip gaz difüzyon tabakasının akım yoğunluğu üretimini arttırdığı gözlemlenmiştir (Ahmadi ve ark., 2016).

Proton değişim membranlı yakıt hücresinin (PEMFC) performans analizini çeşitli çalışma sıcaklıklarında, basınç ve doyma seviyeleri altında incelemişlerdir. Makro-homojen model kullanarak işletme parametrelerinin katalizör tabakası ve PEM yakıt hücresi performansına olan etkisini araştırmışlardır. Matematiksel model homojen, kararlı yapıda oksijen difüzyonunun etkilerini, elektrokimyasal reaksiyon hızları, protonların ve elektronların polimer elektrolit ve katı fazlar boyunca taşınımını içeren denklemlerden oluşmaktadır. Katalizör tabakası iyonomer, katı katman, katalizör parçacıkları ve boşluk olmak üzere dört fazdan meydana gelmektedir. Bořluk alanlar ya tamamen ya da kısmen su basmış veya hiç su basmamış olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalar literatürle mükemmel bir uyum göstermektedir. Sonuç olarak, hücre sıcaklığı 40 °C'den 90 °C'ye çıkarıldığı zaman katalizör tabakası performansında % 19 oranında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Çalışma basıncı 3 atm'den 7 atm'ye çıkarıldığı zaman katalizör tabakası performansında %9 oranında bir iyileşme meydana gelmiştir. Doyma seviyeleri % 75'ten %25'e dūřürüldüęü zaman katalizör tabakasının performansı % 30 artmaktadır. Pem yakıt hücre performansını en çok etkileyen işletme parametresi doyma seviyeleri olduğu sonucuna varılmıştır (Heidary ve ark., 2016).

alışmalarında 25 cm² aktif alana sahip yüksek sıcaklıkta çalışan üç boyutlu PEM yakıt hücresi geliştirmişlerdir. Kararlı hal, izotermal, tek faz varsayımları ile çözüm yapılmıştır. Fosforik asit katkılı polibenzimidazol (PBI) membranın kullanıldığı üçlü karışık serpantin akış alanlı tek hücre modeli ticari bir yazılım paketi olan Comsol Multiphysics 5.0 Batteries ve Fuel Cell modülü kullanılarak analiz edilmiştir. Programda gerçekleştirilen sayısal çözüm sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilmiştir. Model çalışma sıcaklığının hücre performansına olan etkisini araştırmak için 100-180 °C aralığındaki sıcaklıklarda simüle edilmiştir. Çalışma sıcaklığındaki artış hücre performansını olumlu yönde etkilemiştir. Üçlü karışık serpantin akış alanlı ve tek kanallı PEM yakıt hücresi modelini doğrulamak için deneysel veri kullanılmıştır. Farklı hücre potansiyellerinde akım yoğunluğu değerleri kayıt edilmiştir. Yüksek hücre potansiyellerinde yerel akım yoğunluğu homojen bir dağılım göstermiş ancak daha dūřük hücre potansiyellerinde yerel akım yoğunluğunda düzensizlikler meydana gelmiştir. Çalışma sonucunda polarizasyon grafikleri, her bir türün konsantrasyon profili ve basınç dağılımını elde edilmiştir. Performans

eğrilerindeki temel fark aktif alandan kaynaklanmıştır. Daha büyük membran alanı ohmik kayıpların önemli hale geldiği düşük hücre potansiyellerinde akım yoğunluğunun tahmin edilmesine neden olmuştur. Bu yüzden, tek akışlı kanal modeli işletme parametrelerinin etkisini inceleyebilmek için iyi bir seçenektir. Çalışmada elde edilen verileri özetlemek gerekirse, 0,5 V hücre potansiyelinde 100 °C, 120 °C, 140 °C, 160 °C ve 180 °C’de elde edilen güç yoğunlukları sırasıyla 0,26 W/cm², 0,31 W/cm², 0,35 W/cm², 0,39 W/cm² ve 0,42 W/cm²’dir (Caglayan ve ark., 2016).

Çalışmalarında üç boyutlu, tek fazlı proton değişim membranlı yakıt hücresini sayısal olarak geliştirmişler ve sonlu hacim yöntemiyle hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tekniğini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Oksijen tüketimi, su üretimi, sıcaklık dağılımı, direnç kayıpları, anot suyu aktivitesi, katot aşırı gerilimi ve hücre performansı gibi parametreler detaylı olarak incelenmiştir. Sayısal simülasyonlar yukarıdaki işletme parametrelerinin birbirine bağımlı olduğunu ve hücre veriminin türlerin dağılımından etkilendiğini ortaya koymaktadır. İstenen hücre potansiyellerindeki özel kullanımlar ve istenmeyen kayıpları engellemek için sayısal sonuçlar faydalı olabilir. Bu araştırmanın asıl amacı serpantin gaz akış kanalının geleneksel düz gaz akış kanalına kıyasla hücre performansına olan etkisinin detaylı bir şekilde ortaya koymaktır. HAD modelinin sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış, uyumlu olduğu belirlenmiştir. Aktif alanları eşit olan serpantin gaz akış alanlı PEM yakıt hücresinin geleneksel düz kanal geometri modeline göre daha homojen türler ve sıcaklık dağılımı sağlamasından dolayı kullanım açısından çok daha iyi bir modeldir (Rezazadeh ve Ahmadi, 2015).

2.4. Diğer Çalışmalar

Gaz akışını, sıcaklık dağılımını ve akım yoğunluğunu incelemek için geliştirdikleri PEM yakıt hücresinin sayısal simülasyonlarını yapmışlardır. Kimyasal tepkimelerin ürettiği ısı ve kütle kaynakları ile birlikte süreklilik, momentum ve enerji denklemleri genel bir HAD kodu kullanılarak çözülmüştür. Elektrot yüzeyinde her bir noktadaki yerel akım yoğunluğu gaz basıncının, hücre sıcaklığının, bağıl nemin, kısmi basıncın ve hücre potansiyelinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Hücre performansı

homojen gaz temini için uygun olan bir serpantin akış alanlı (SAA), 100 cm² aktif alana sahip, membran malzemesi olarak Nafion 115'in kullanıldığı bir PEM yakıt hücre modelinde analiz edilmiştir. Kısacası bu çalışmanın amacı optimum yakıt pil tasarımını gerçekleştirmek için tasarım (gaz akış kanalı konfigürasyonlarının düzeni ve boyutları) ve işletme (bağıl nem, reaktant kullanım oranı ve basınç) parametrelerinin hücre performansına olan etkisini araştırmaktır (Jung ve ark., 2004).

Üç boyutlu PEM yakıt hücresi modeli geliştirmişler ve su taşmasının hücre performans parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. PEM yakıt hücresinin katot tarafındaki gaz difüzyon tabakasında suyun varlığı reaktantların katalizör tabakasına akışını sınırlandırır. Bu durum toplam reaksiyon hızını ve hücreden elde edilebilecek maksimum gücü azaltır. Su taşmasının gaz difüzyon tabakası üzerindeki etkilerini nitelendirmek için sızıntı teorisinden türetilmiş gözenekli yakıt hücresi elektrotlarının kıvrılma ve göreceli su doygunluğunu hesaba katan etkin yayılma gücüne sahip modeller tek fazlı akışa sahip HAD modeli ile birleştirilmiştir. Üç boyutlu PEM yakıt hücre modelinin yönetici denklemleri sonlu hacim yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Gaz difüzyon tabakası geçirgenliği, reaktanın nem ve yayılma gücünün hücre performans parametreleri üzerindeki etkilerini karakterize etmek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çalışma sonucunda GDL geçirgenliğinin akım yoğunlukları üzerindeki etkisinin çok az olduğu sonucuna varılmıştır (Dawes ve ark., 2009).

Çalışmalarında hem yanal hem de uzunlamasına değişen homojen olmayan farklı katalizör yükleme dağılımlarının PEM yakıt hücre performansına olan etkilerini sayısal olarak incelemiştir. İki fazlı, çok bileşenli, zamana bağlı rejimde performans gösteren üç boyutlu sayısal model geliştirmişlerdir. Sayısal sonuçlara göre uzunlamasına yapılan katalizör yükleme dağılımları hücre performansını % 3,1 oranında iyileştirmiştir. Hem uzunlamasına hem de yanal doğrultuda homojen olmayan katalizör yükleme dağılımı ile performans % 8 oranında iyileşmiştir. Homojen olmayan katalizör yükleme PEM yakıt hücre performansını arttırmıştır. Gaz akış kanalının giriş ve çıkışları arasında platin oranı 1,857'ye eşit olduğu zaman en iyi oksijen dağılımı ve hücre performansı elde edilmiştir. Ayrıca katalizör yükleme dağılımının polarizasyon eğrileri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Katalizör yükleme

dağılımının yüksek akım yoğunluklarında hücre performansına olan etkisi düşük akım yoğunluklarına göre daha fazladır (Havaej ve ark., 2018).

PEM yakıt hücresinde meydana gelen temel taşınım olaylarını doğru bir şekilde simüle etmek için HAD tabanlı bir araç kullandılar. Tek fazlı PEM yakıt hücresinin sayısal modeli OpenFOAM kullanılarak geliştirilmiştir. Akışkan girişinde Dirichlet sınır koşulları, akışkan çıkışında Neumann sınır koşulları uygulanmıştır. Kullanılan kodun bir eksikliği de PEM yakıt hücresi modülü yoktur. Bu yüzden pemfcModels-4.0 araç kutusu yakıt pili modülünü sağlamak için yapılan bir girişimdir. Çalışmanın simülasyon sonuçları literatürdeki sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış, polarizasyon grafiğinde gösterilmiş ve düşük akım yoğunluklarında birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları seçilen konsantrasyon sabitinin yüksek akım yoğunluklarında hücre potansiyeli üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Sağlanan çözücü geliştirilmiş katalizör ve membran modelleri ya da çok fazlı akış gibi diğer özellikleri geliştirmek için hizmet edebilir. Araç kutusundan faydalanabilmek için birtakım düzenlemeler yapılmıştır (Kone ve ark., 2018).

Üç boyutlu, çok bileşenli ve çok fazlı bir PEM yakıt hücresi modeli detaylandırılmış bileşim ve çoklu ince film yığın modelini kullanarak katalizör tabakaların yapısını HAD kodu ile FLUENT'e uygulamışlardır. Oksijenin hava içinde taşınması sırasında oluşan dirençler katot tarafındaki katalizör tabakasına düşük seviyelerde oksijen konsantrasyonlarına sebep olur bu durum da hücre performansını olumsuz yönde etkiler. Membran ve anot katalizör tabakasındaki polimer elektrolitin kurutulması iyon iletimine karşı artan direnç sebebiyle büyük omik kayıplara neden olmaktadır. Yakıt hücresinin katot tarafında meydana gelen taşkınlığın hücre performansını ciddi anlamda olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. HAD sonuçlarına göre, diğer parametreler değiştirilmeden ince bir polimer elektrolit filminin kalınlığının artabileceğini öngörmektedir. Maksimum akım yoğunluğu değerleri yaklaşık 1000 nm üzerindeki kalınlıklar için sıfıra yaklaşacaktır. Katalizör katmanlarındaki taşınım sınırlamalarının ve omik kayıpların PEM yakıt hücresi performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, katalizör tabakası bileşiminin ve yapısının, tepkenlerin

taşımasına ve iyonların iletilmesine karşı düşük direnç için optimize edilmesi, PEM yakıt hücresi tasarımının önemli bir yönüdür (Schwarz ve Djilali, 2007).

Çalışmalarında düz ve serpantin akış alanlı(SAA) proton değişim membranlı(PEM) yakıt hücresinin performanslarını incelemek için izotermal olmayan, kararlı yapılı, üç boyutlu model geliştirmişlerdir. Model kütle, ısı ve enerji taşınımı, elektrot kinetiği ve potansiyel alanlarını kapsayan yakıt hücresindeki önemli taşınım olaylarını hesaba katmaktadır. Yakıt hücresi içindeki tüm akışlar için eş yönlü ve zıt yönlü akış modelleri dikkate alınmıştır. Oksijen ve hidrojen kütle kesir dağılımları, akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Düz ve serpantin akış alanlı PEM yakıt hücrelerinin performansını değerlendirmek açısından sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, serpantin akış alanlı PEM yakıt hücresindeki akım yoğunluğu ve sıcaklık diğerine kıyasla daha iyi bir dağılım göstermiştir. Simülasyon sonuçları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırıldı, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Model denklemlerinde düz akış alanı, tek fazlı akış kabul edildi. Model denklemleri sonlu hacim yöntemine dayanan sayısal metotla çözüldü. Yüksek akım yoğunluklarında katotta su taşkınlığı ve anotta kurumayı ihmal eden tek fazlı model varsayımı nedeniyle simülasyon verileri deneysel verilerden belli bir miktarda sapmıştır (Hashemi ve ark., 2012).

Çalışmalarında düz gaz akış kanal geometrisine sahip izotermal, kararlı durumlu, üç boyutlu PEM yakıt hücresi modeli geliştirmişlerdir. Birleştirilmiş gaz akış kanalları ve elektrotlarda gaz karışımının tür taşınımını ve akışını tanımlayabilmek için süreklilik, korunum ve türlerin korunum denklemleri formülize edilmiştir. Sayısal model farklı bir çalışmadaki deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Sayısal sonuçlar gaz karışımının üç boyutlu hız vektör ve basınç alanlarını, oksijen konsantrasyonunu, yerel akım yoğunluğunu ve farklı akım yoğunluklarında katot aktivasyon aşırıgerilim dağılımlarını göstermektedir. Dağılım modelleri düşük akım yoğunluklarında daha homojen yüksek akım yoğunluklarında kütle geçiş kısıtlamasından dolayı homojen değildir (Liu ve ark., 2006).

BÖLÜM 3. HİDROJEN ENERJİSİ VE YAKIT PİLLERİ

3.1. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen renksiz, kokusuz, doğada bileşikler halinde bulunan, soluduğumuz havadan yaklaşık olarak 11 kat daha hafif, yakıt olarak kullanıldığı takdirde herhangi bir zararlı kimyevi madde üretimi olmayan, çevre dostu yanıcı bir gazdır. Hidrojenin fiziksel özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Doğada bilinen en yaygın bileşiği sudur. Hidrojen birim kütle başına yüksek enerji içeriğine sahip, yakıt olarak kullanıldığı zaman reaksiyon ürünü olarak sadece su veya su buharının oluşması bu açıdan bakıldığı zaman diğer petrol türevi yakıtlara göre çok daha zararsız yapılı, yaklaşık olarak %33 daha verimli, doğada sınırsız rezervlere sahip olması gibi pek çok üstünlükleri olan temiz enerji kaynağıdır. Dünyanın gün geçtikçe artan enerji ihtiyacını karşılayabilecek en ileri teknolojisi hidrojen enerji sistemidir. Bu enerji sistemini en verimli ve en ekonomik kullanan teknoloji yakıt pili teknolojisidir.

Tablo 3.1. Hidrojenin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Moleküler Ağırlık	2,01594	kg/kmol
Yoğunluk, Gaz (0°C, 1 atm)	0,08987	kg/m ³
Yoğunluk, Katı (-259°C)	858	kg/m ³
Yoğunluk, Sıvı (-253°C)	708	kg/m ³
Erime Noktası	-259	°C
Kaynama Noktası	-253	°C
Kritik Sıcaklık	-240	°C
Kritik Basınç	12,8	atm
Kritik Yoğunluk	31,2	kg/m ³
Buharlaştırma Isısı (-253°C)	447	kJ/kg

Tablo 3.1. (Devamı)

Özellik	Değer	Birim
Isı Sığası, Gaz (25°C)	14,3	kJ/kg°C
Isı Sığası, Sıvı (-256°C)	8,1	kJ/kg°C
Isı Sığası, Katı (-259,8°C)	2,63	kJ/kg°C
Viskozite (25°C)	0,00892	cP

3.1.1. Hidrojen üretim yöntemleri

Doğada kimyasal bileşikler halinde bulunan hidrojen doğalgaz, petrol, kömür yani fosil yakıtlar biyokütle ve su gibi farklı kaynaklardan yararlanılarak üretilir. Yüksek sıcaklıklarda hidrojen üretimi yaklaşık olarak % 90 oranında doğalgazın veya petrolün buhar reformasyonu yöntemi ile sağlanmaktadır. Kömürün gazlaştırılması, buhar metan reformasyonu (SMR) ve suyun elektrolizi hidrojen üretimi için diğer endüstriyel yöntemlerdir (Das, 2002).

Hidrojen üretim yöntemlerini fosil yakıtlar, biyokütle ve su olmak üzere 3 ana başlıkta inceleyebiliriz.

Fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemleri;

1. Doğalgazın buhar reformasyonu
2. Kısmi oksidasyon
3. Doğalgazın termal kırılması
4. Kömürün gazlaştırılması

Biyokütle için hidrojen üretim yöntemleri; Piroliz veya gazlaştırma .

Su için hidrojen üretim yöntemleri; Elektroliz, fotoliz, termokimyasal işlem, termoliz ve biyolojik üretim olmak üzere beş gruba sınıflandırılmaktadır.

1. Doğalgazın Buhar Reformasyonu

Fosil yakıttan hidrojen üreten en verimli ve en ekonomik işlem hidrojen kaynağı olarak metandan oluşan doğalgazın buhar reformasyonudur. Su buharı ve metan yüksek sıcaklık ve basınca maruz bırakıldığında oluşan kimyasal tepkime reaktanları hidrojen ve karbondioksittir. Reformasyon yapılabilmesi için yüksek miktarda enerji gerekmektedir. Net dönüşüm verimi yaklaşık olarak % 65 olmakla beraber küresel olarak petrol rafinerisi ve gübre endüstrilerinde bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır.

2. Kısmi Oksidasyon

Doğalgaz içindeki metan ve diğer hidrokarbonların belirli bir miktarda oksijen ile reaksiyona girmesi işlemidir. Yaklaşık olarak 50% enerji verimliliğinde hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir.

3. Kömürün Gazlaştırılması

Kömür yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlı bir reaktörde su buharı ve oksijen ile oksitlenir reaksiyon sonucunda H_2 , CO , CO_2 ve diğer gaz karışımları elde edilir. Kömürün gazlaştırılması işlemi esnasında karşılaşılabilecek en önemli sorun içeriğinde karbon miktarının yüksek olmasından dolayı reaksiyon sonucunda çok daha fazla CO_2 gaz emisyonunun oluşmasına yol açar (Dincer ve Acar, 2014).

4. Piroliz

Organik atıkların (hayvansal atık, şehir atıkları, zirai atıklar vb.) oksijensiz ortamda yaklaşık olarak 500-600 °C'ye kadar ısıtılıp ısı parçalanma işlemine piroliz denir.

5. Elektroliz

Elektroliz yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretimi için umut verici bir seçenek olup bilindiği üzere elektrik akımının etkisiyle su moleküllerinin hidrojen ve oksijene ayrışması işlemidir. Temelde elektrotlar doğru akım kaynağına bağlandığında elektron hareketi başlar. Su iyi bir iletken madde olmadığı için elektrolit malzemesinde

iletkenliği arttırıcı olarak genelde KOH maddesi ilave edilir. Meydana gelen reaksiyon (Denklem 3.1) gibi yazılabilir;



Ana elektroliz hücre sistemi olan alkalın elektrolizi endüstride yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Çelik ve Yıldız, 2017).

6. Fotoliz

Su moleküllerinin güneş ışığı yardımı ile hidrojen ve oksijene ayrışması işlemidir (Dincer and Acar, 2014).

7. Termoliz

Isıl enerji sağlanmasıyla suyun oksijen ve hidrojen atomlarına ayrışması işlemidir. Su molekülleri termal olarak 2500 K sıcaklığın üzerinde hidrojen ve oksijene ayrışabilir. Meydana gelen reaksiyon (Denklem 3.2) gibi yazılabilir (Dincer ve Acar, 2014).



8. Biyolojik Üretim

Biyolojik hidrojen üretim işlemlerini aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz;

1. Yosun ve siyanobakteriler kullanılarak suyun biyofotolizi
2. Organik bileşiklerin fotosentetik bakteri ile ısı ayrışımı
3. Organik bileşiklerden fermentatif hidrojen üretimi
4. Fotosentetik ve fermentatif bakteri kullanan hibrit sistemler (Das ve Veziroğlu, 2001).

3.2. Yakıt Pili Tarihçesi

1839 yılında İngiliz bilim adamı William R. Grove ilk deneylerini Swansea’da gerçekleştirmiş, suyun elektroliz işleminin tersini uygulayarak hidrojen ve oksijenin

kimyasal reaksiyonundan elektrik akımının ortaya çıktığını bulmuştur ve adına gaz bataryası demiştir.

1841-1842 yıllarında Christian Friedrich Schönbein İsviçre’de bu konuyla ilgili deneyler yapmış ve sonuçları Grove ile yakından ilişkiliydi.

1882 yılında Lord Rayleigh tarafından yeni bir gaz bataryası geliştirildi ve amacı katı elektrot, sıvı ve gaz arasındaki etki yüzeyini arttırarak platin elektrotların verimliliğini arttırmaktır.

1889 yılında Mond ve Carl Langer tarafından geliştirilen gaz bataryası yakıt hücresinin prototipini oluşturmuş, burada sülfürik asidi tutmak için temel olarak gözenekli, iletken olmayan bir diyafram kullanmışlardır.

Mond ve Langer’in gaz bataryası gösterimine cevap olarak, Alder Wright ve Thompson 1889 yılında daha önce geliştirildikleri iddia edilen ‘Çift Hareketli Plaka Hücrelerine’ dikkat çekti.

1896 yılında William W. Jacques kömürden elektrik üretmek için gerçekleştirdiği deneylerini rapor etti. 1904 yılında Haber ve Bruner ‘Jacques Elementi’ olarak adlandırılan doğrudan kömür yakıt hücreleri üzerine çalıştılar.

Francis Bacon gözenekli metal elektrotlara sahip alkalın yakıt hücre sistemi üzerinde çalışmıştır. Bacon yakıt hücre sistemi, NASA uzay yakıt hücresinin ilk prototipi olup 1968 yılında insanoğlunun ilk aya uçuşunu sağlamıştır.

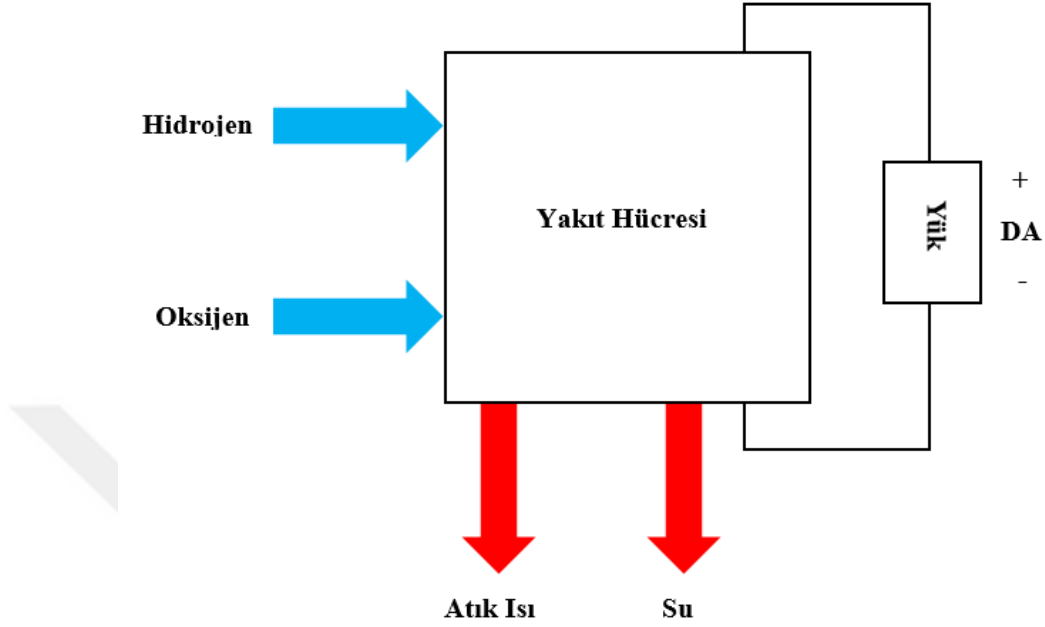
Avrupa Birliği proje girişimi olan Temiz Kentsel Ulaşım (CUTE) Avrupa’nın dokuz şehrinin her birinde üç yakıt hücre otobüsünü test etmesi yakıt hücresinin geniş bir kitlede kullanıldığının bir örneğidir. Proje 2003 yılında yenilikçi, yüksek enerji verimli, temiz kentsel toplu taşıma sisteminin olabilirliğini göstermek amacıyla başlatılmıştır.

Son zamanlarda Madrid merkezli Boeing araştırma ve teknoloji merkezi (BR&TE) 2001 yılından beri geliştirilmekte olan ‘Fuel Cell Demonstrator Airplane’ (FCDA) projesi kapsamında yakıt hücresel hibrid elektrikli uçağı başarılı bir şekilde denedi. Programın asıl amacı insanlı bir uçağın tek güç kaynağı olan yakıt hücreleriyle düz bir uçuş gerçekleştirebildiğini göstermekti (Andújar ve Segura, 2009).

3.3. Yakıt Pili Nedir?

Yakıt hücresi hidrojen ve oksitleyici sağlandığı sürece yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal cihazdır. Şekil 3.1.’de yakıt hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyon reaktan ve ürünleri şematik olarak gösterilmiştir. 1960’larda ilk PEM yakıt hücresi General Electric tarafından geliştirilmiş ve uzay uygulamaları için ABD Gemini ve Apollo programlarında kullanılmıştır. Bu tip yakıt hücresi esasen yüksek oranda dağılmış katalizör parçacıkları ile kaplanmış özel bir polimer membrandan oluşmaktadır. Yakıt hücre teknolojisi ticari olarak yeni bir teknoloji olmasına rağmen karasal uygulamalar için kullanımları yaygındır. Zamanla birçok engel aşıldı, yakıt hücreleri çeşitli uygulamalar için daha uygun hale getirildi ve yavaş yavaş ticarileştirildi. 1990’lı yılların sonunda tüm büyük otomotiv üreticileri ABD, Japonya ve Avrupa’da testlerden geçen yakıt hücre araç ön modellerini geliştirmişlerdir. Sabit güç uygulamaları için 2500’den fazla yakıt hücresi hastane, ofis binaları ve enerji istasyonları için yerleştirilmiştir. 2005 yılında Samsung Elektronik bir dizüstü bilgisayarı yaklaşık 15 saat çalıştırabilen taşınabilir güç uygulamaları için yakıt hücre modelini ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte yakıt hücrelerinin ticarileştirilmesinde birçok sorunla karşılaşılabilir. En önemli problemler işletme güvenilirliklerini arttırmanın yanı sıra maliyetlerini azaltmaktır. Reaksiyon ürünlerinden biri su olduğundan temiz, çevredostu olması yakıt hücresinin en önemli avantajlarından biridir. Yakıt hücreleri fazladan yakıt işleme ve tedarik ekipmanı ile birlikte çalıştığı zaman bile sessiz performans gösterirler. Ayrıca elektrik enerjisi üretiminde % 40’dan fazla verime ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Yakıt hücresinden oluşan atık ısı ısıtma amacıyla kullanılabilir böylece toplam verim artmış olur. Son olarak, farklı türlerde yakıt hücresi, hidrojen, etanol, metanol ve doğal gaz gibi çeşitli geleneksel ve alternatif yakıtlar üzerinde

çalışabildiğinden ve çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla hidrojenin üretilbildiğinden, ulusal enerji güvenliğini artırabilir (Gou ve ark., 2010).



Şekil 3.1. Yakıt hücresinin giriş ve çıkışları

3.4. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt hücreleri yakıtın ve oksitleyici maddenin birleşimi, yakıtın yakıt hücresinin içinde veya dışında işlenip işlenmediği, elektrolit türü, çalışma sıcaklığı, reaktantların hücreye iç veya dış manifoldlar tarafından beslenip beslenmediği vb. çeşitli kategorilere göre sınıflandırılmaktadır. Yakıt hücrelerinin en yaygın sınıflandırılması elektrolit türüne göre olup aşağıdaki gibi sıralanabilir.

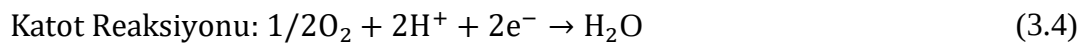
1. Polimer elektrolit membran yakıt pili(PEMFC)
2. Alkali yakıt pili(AFC)
3. Fosforik asit yakıt pili(PAFC)
4. Erimiş karbonat yakıt pili(MCFC)
5. Katı oksit yakıt pili(SOFC)

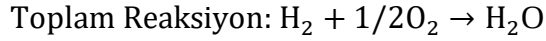
Bir yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı ve ömrü hücre komponentlerinde(elektrot, elektrolit, akım toplayıcı plaka vb.) kullanılan malzemelerin fizikokimyasal ve

termomekanik özelliklerini belirler. Sulu elektrolitlerin yüksek sıcaklıklarda hızlı bozunması ve yüksek su buhar basıncından dolayı çalışma sıcaklıkları 200 °C veya daha düşük sıcaklıklarla sınırlıdır. Yakıt hücresinde kullanılan yakıtın türünün belirlenmesinde çalışma sıcaklığı önemli rol oynamaktadır. Pratikte sulu elektrolitli düşük sıcaklıktaki yakıt hücreleri yakıt olarak hidrojen kullanımı ile kısıtlıdır. Yüksek sıcaklıktaki yakıt hücreleri hızlı elektrot kinetiği ve yüksek katalitik aktiviteye yüksek sıcaklıkta daha az ihtiyaç duyulmasından dolayı yakıt olarak CO ve CH₄ kullanılmaktadır.

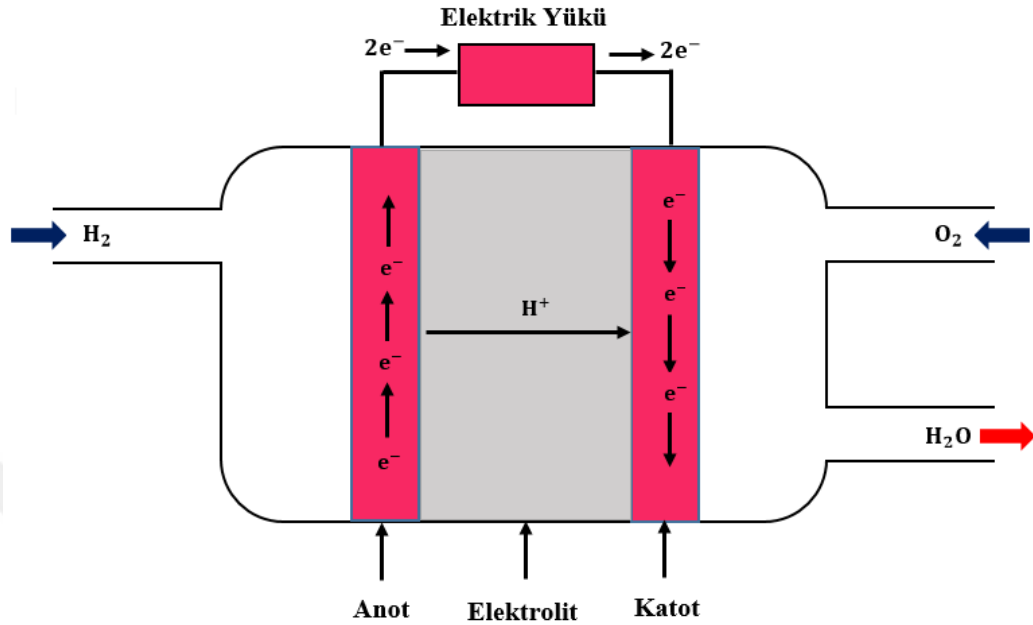
3.4.1. Polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMFC)

Polimer elektrolit membran veya proton değişim membranlı yakıt hücrelerinde (PEMFC) kullanılan membran malzemesi florlanmış sülfirik asit polimeri, kalınlığı ise yaklaşık olarak 50 µm'den azdır. PEM yakıt hücresinde kullanılan elektrolit mükemmel bir proton iletkeni olan iyon değişim membranıdır. Çalışma sıcaklığı 60 ve 80 °C arasında değişim göstermektedir (Barbir, 2005). Yakıt hücresindeki tek sıvı sudur, korozyon problemleri minimumdur. Su yönetimi PEM yakıt hücresinin performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Membranın hidratlanması gerektiğinden yakıt hücresi yan ürün suyunun üretilenden daha hızlı buharlaşmadığı koşullar altında çalışmalıdır. Proton değişim membranlı yakıt hücresinde çalışma sıcaklığının kısıtlı olması (genelde 120 °C altındaki çalışma sıcaklıkları) ve su dengesi ile ilgili problemlerden dolayı içerisinde minimum seviyede ya da hiç olmayan CO gazı hidrojen bakımından zengin yakıt kullanılmaktadır. Pem yakıt hücreleri yalnız otomotiv uygulamalarında değil aynı zamanda taşınabilir güç uygulamalarında, küçük ölçekli dağıtılmış sabit güç üretimleri için de yaygın olarak kullanılabilir. PEM yakıt hücresinde kullanılan elektrokimyasal denklemden (Denklem 3.3) anot reaksiyonunu, (Denklem 3.4) katot reaksiyonunu, (Denklem 3.5) toplam reaksiyonu ifade etmektedir. Şekil 3.2.'de PEM yakıt pili şematik olarak gösterilmiştir.





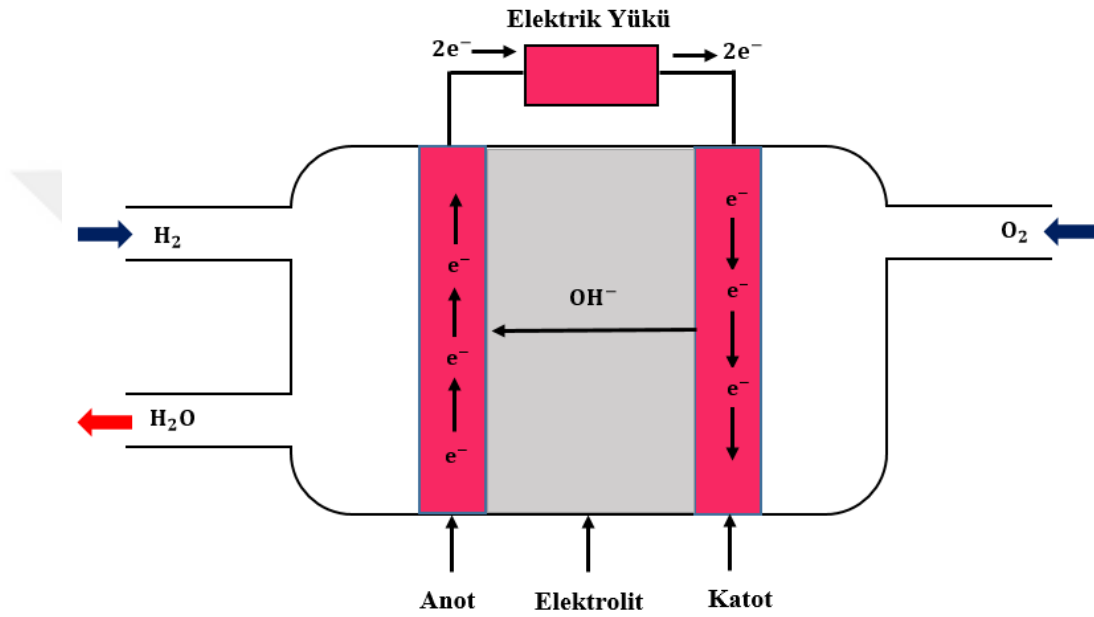
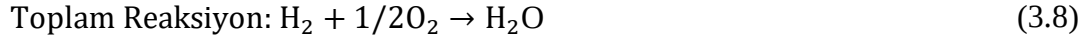
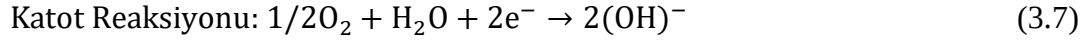
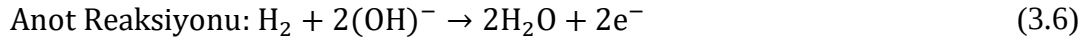
(3.5)



Şekil 3.2. PEM yakıt pilinin şematik gösterimi

3.4.2. Alkali yakıt pili (AFC)

Alkali yakıt hücresindeki elektrolit ağırlıkça %85 KOH içeriyorsa yüksek sıcaklıkta (~250 °C) performans gösterebilir. Yakıt hücresinin KOH içeriği ağırlıkça % 35-50 olduğu zaman düşük sıcaklıkta (< 120 °C) çalışabilmektedir. Çalışma sıcaklıkları 65-220 °C arasında değişim göstermektedir. Elektrolit bir matris içinde tutulur ve çok çeşitli elektrokatalizörler nikel, gümüş, metal oksitleri, soy metaller vb. kullanılmaktadır. Kullanılan yakıt hidrojen dışında reaktif olmayan bileşenlerle sınırlandırılmıştır. Karbonmonoksit gazı (CO) zehirli bir gazdır, karbondioksit (CO₂) potasyum karbonat (K₂CO₃) bileşiğini oluşturmak için potasyum hidroksit (KOH) ile reaksiyona girer böylece elektroliti değiştirir. Hava içerisindeki az miktardaki karbondioksit miktarı bile alkali yakıt hücresini etkilemektedir. 1960'lerden bu yana alkali yakıt hücreleri uzay programında (Apollo ve Space Shuttle) kullanılmıştır (Barbir, 2005). Alkali yakıt pilinde kullanılan elektrokimyasal denklemden (Denklem 3.6) anot reaksiyonunu, (Denklem 3.7) katot reaksiyonunu, (Denklem 3.8) toplam reaksiyonu ifade etmektedir. Şekil 3.3.'de Alkali yakıt pili şematik olarak gösterilmiştir.

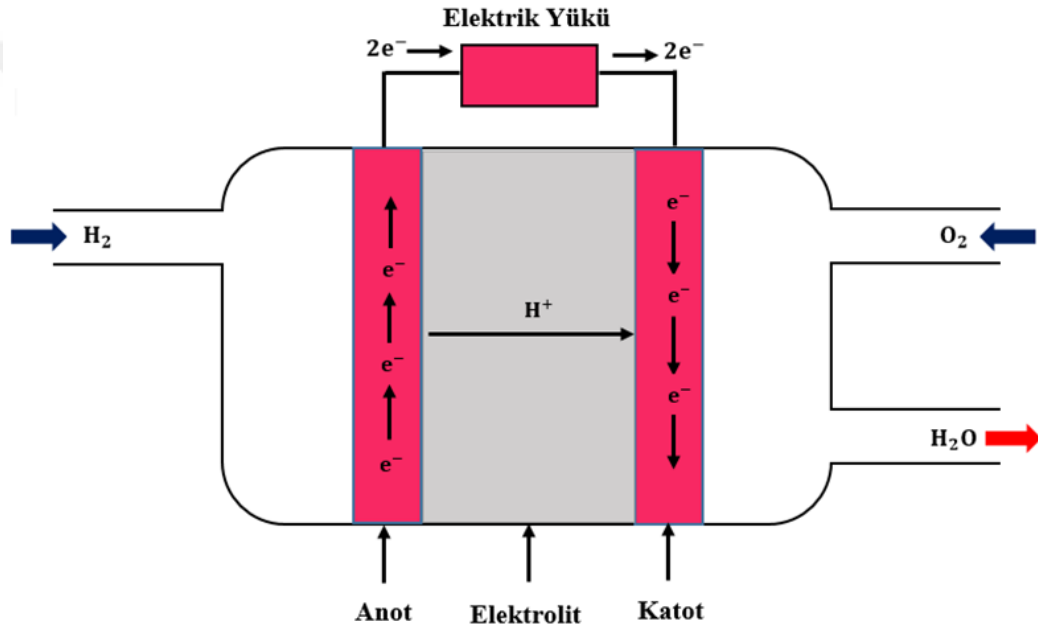
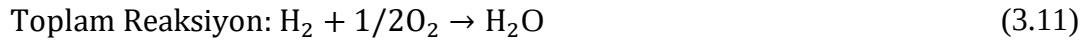
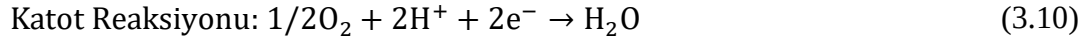


Şekil 3.3. Alkali yakıt pilinin şematik gösterimi

3.4.3. Fosforik asit yakıt pili (PAFC)

Fosforik asit yakıt hücresi elektrolitinde ağırlıkça % 100 fosforik asit kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklıkları 150-220 °C arasında değişim göstermektedir. Fosforik asit diğer yaygın asitlere göre daha kararlı bir yapıda olduğundan çalışma sıcaklığının üst uç noktasında performans gösterebilirler. % 100 yoğunlaştırılmış asit kullanımı su buhar basıncını düşürür bu yüzden yakıt hücresi içindeki su yönetimi zor değildir. Fosforik asiti tutmak için kullanılan matris silisyum karbürdür, hem anot hem katotta kullanılan elektrokatalizörler platindir. Fosforik asit yakıt hücre sistemleri ile yaklaşık olarak % 37'den % 42'ye kadar elektrik verimi elde edilebilir (Barbir, 2005). Fosforik asit yakıt pilinde kullanılan elektrokimyasal denklemden (Denklem 3.9) anot reaksiyonunu,

(Denklem 3.10) katot reaksiyonunu, (Denklem 3.11) toplam reaksiyonu ifade etmektedir. Şekil 3.4.'de Fosforik asit yakıt pili şematik olarak gösterilmiştir.

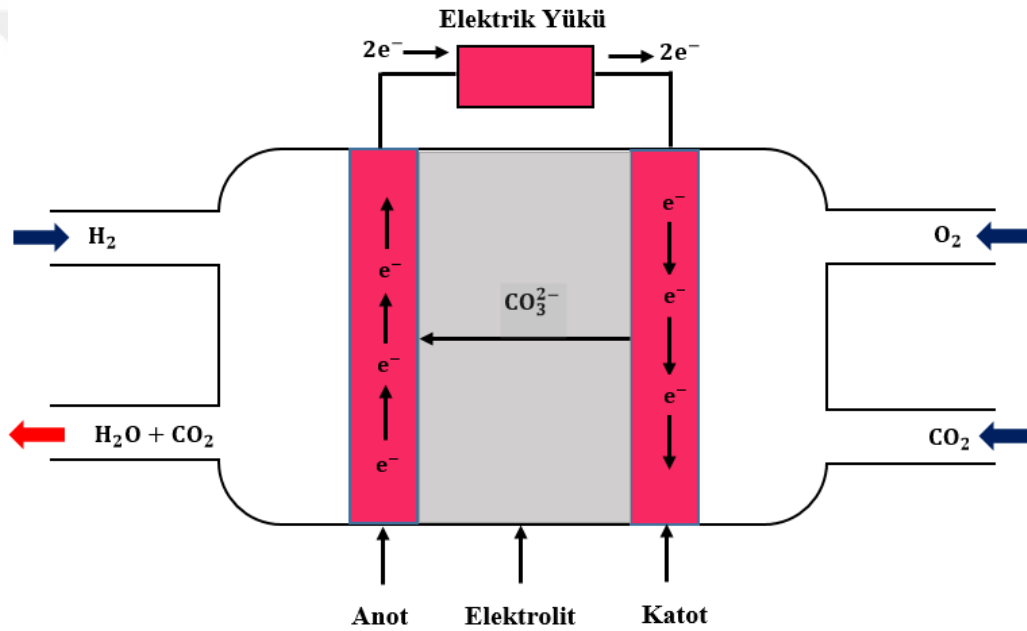
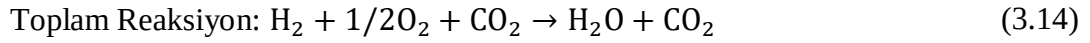
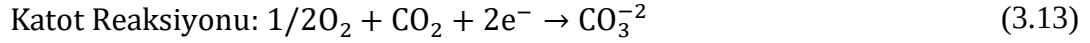
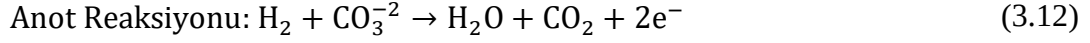


Şekil 3.4. Fosforik asit yakıt pilinin şematik gösterimi

3.4.4. Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC)

Erimiş karbonat yakıt pilindeki elektrolit, LiAlO_2 seramik matrisinde tutulan alkali karbonatların kombinasyonundan oluşmaktadır. Çalışma sıcaklığı 600-700 °C arasında değişim göstermektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında erimiş karbonat yakıt pilinin anot tarafında nikel katotta da nikel oksit kullanımı reaksiyon hızını artırır. Soy metaller gerekli değildir (Barbir, 2005). Erimiş karbonat yakıt pilinde kullanılan elektrokimyasal denklemden (Denklem 3.12) anot reaksiyonunu, (Denklem 3.13)

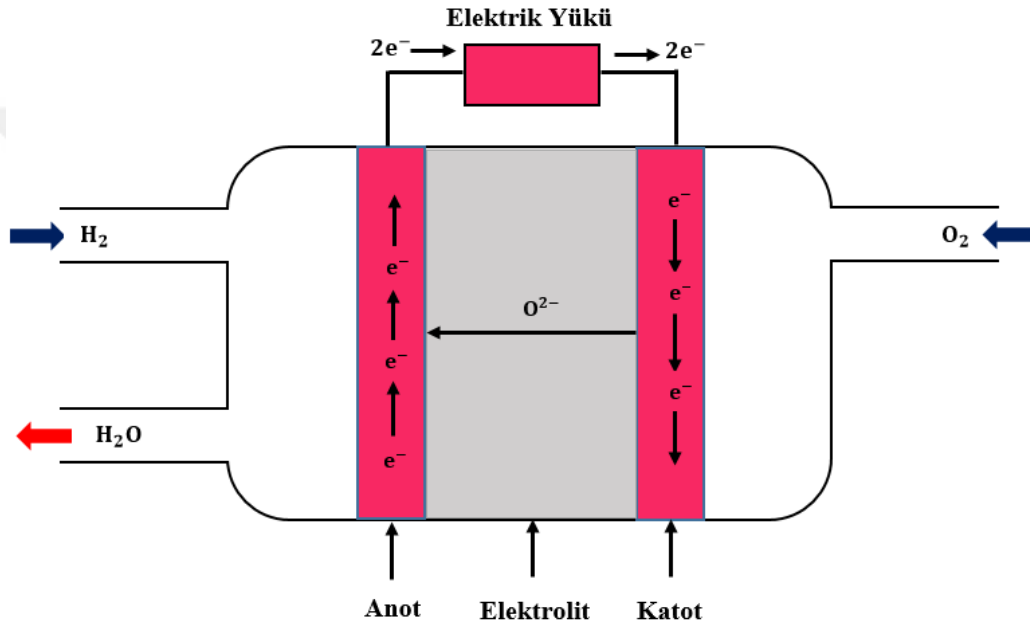
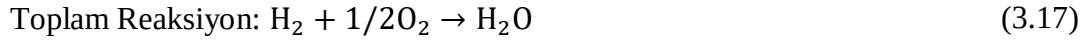
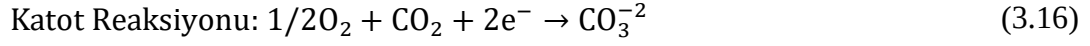
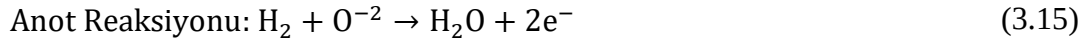
katot reaksiyonunu, (Denklem 3.14) toplam reaksiyonu ifade etmektedir. Şekil 3.5.'de Erimiş karbonat yakıt pili şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Erimiş karbonat yakıt pilinin şematik gösterimi

3.4.5. Katı oksit yakıt pili (SOFC)

Katı oksit yakıt hücrelerinin elektrolit yapısı katı, gözenekli olmayan metal oksit genelde Y_2O_3 içeren ZrO_2 'den oluşmaktadır. Çalışma sıcaklığı 800-1000 °C arasında değişim göstermektedir (Barbir, 2005). Katı oksit yakıt pilinde kullanılan elektrokimyasal denklemden (Denklem 3.15) anot reaksiyonunu, (Denklem 3.16) katot reaksiyonunu, (Denklem 3.17) toplam reaksiyonu ifade etmektedir. Şekil 3.6.'da Katı oksit yakıt pili şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Katı oksit yakıt pilinin şematik gösterimi

3.5. PEM Yakıt Pili Bileşenleri

3.5.1. Membran

Yakıt hücresinin kalbi olarak bilinen proton değişim membranı elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği merkezdir. Membranın temel görevi protonların PEM yakıt hücresinin anot tarafından katot tarafına taşınmasını sağlamaktır. Membran polimerleri protonların taşınımını kolaylaştıran sülfonik gruplara sahiptir. Gazların karışımını engelleyen, yüksek sıcaklıklar, sıcaklık dalgalanmaları, güçlü oksidanlar, reaktif radikaller dahil olmak üzere sert koşullara dayanan hidrojen ve oksidantı

birbirinden ayrı tutması membranın diğer işlevleridir. Böylece, mükemmel bir polimer iyi proton iletkenliğine, kimyasal ve ısı kararlılığına, dayanıklılığa, esnekliğe, düşük gaz geçirgenliğine, düşük su direncine, düşük maliyete ve iyi kullanılabilirliğe sahiptir. PEM yakıt hücresinde kullanım için farklı türde membranlar test edilmiştir. Membranlar sülfonik gruplar gibi içinde iyon bulunduran modifiye edilmiş polimerlerdir. Bu hidrofilik iyonlar membran içinden proton geçişine izin vermektedir. Polimer yapısı membran kullanım ömrünü uzatmak ve membran bozulmasını yavaşlatmak için değişmiştir. İlk yakıt hücrelerinin membran malzemeleri fenol formaldehit sülfonik asit olmakla birlikte kolay hidrolize olmaktadır. Sonrasında membran malzemesi olarak kısmi sülfonatlanmış polistiren malzeme kullanılmıştır. Performans açısından yetersizdirler, kullanım ömürleri 60 °C’de yaklaşık olarak 200 saattir. PEM yakıt hücresinin membran kalınlığı 50 mikrondan daha incedir. Polimer membranların temel özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

1. Kimyasal madde etkisine karşı dirençlidirler.
2. Membranlar çok güçlü bağlara sahip olduklarından dolayı ince filmlere dönüşebilirler.
3. Asidik yapılıdır.
4. Suyun büyük bir kısmını absorbe edebilirler.
5. Yeterli membran nemliliği sağlandığında hidrojen iyonlarının iletimini başarılı bir şekilde gerçekleştirir (Gou ve ark., 2010).

3.5.2. Gaz difüzyon tabakası (GDL)

Gaz difüzyon tabakaları bipolar tabakalara komşu olup tipik olarak makro ve mikro gözenekli alt tabaka katmanları olmak üzere iki tabakadan oluşmaktadır. Bipolar plaka ya da akım toplayıcı ve karbon destekli katalizör tabaka arasında elektriksel bir bağlantı olarak da tanımlanabilir. Gaz difüzyon tabakası reaktanların etkin bir şekilde katalizör tabakasına yayılmasını sağlamaktadır. Kütle taşınım aşırı potansiyelini azaltır. Gaz difüzyon tabakalarının tipik olarak kalınlıkları 100 ile 300 µm aralığında olup, gözenekli karbon kağıdından yapılmaktadırlar. Gaz difüzyon tabakaları membran elektrot düzeneğinden akış kanallarına sıvı suyun taşınması için ağ yollarına

sahiptir. Gaz difüzyon tabakası membran içindeki su seviyesini belli bir değerde tutarak hücre içindeki su yönetimine yardımcı olmaktadır. Buna ek olarak, gaz difüzyon tabakaları Teflon kaplamadan dolayı su sızdırmaz özelliktedir. Böylece tabaka gözeneklerinde tıkanma gerçekleşmez. Optimum bir GDL makul miktarda su buharının membran/elektrot arayüzüne ulaşmasını sağlar, membranı nemli tutar ve böylece hücre verimini artırır. Katotta üretilen suyun yakıt hücresinden uzaklaştırılmasını sağlar böylece su baskınını önler (Maiyalagan ve Pasupathi, 2010).

3.5.3. Katalizör tabakası (CL)

PEM yakıt hücresinde kullanılan en iyi katalizör malzemesi platindir. Platin partiküllerinin yüzeyinde katalitik aktivasyon gerçekleştiğinden, platin partiküllerinin yüzey alanının maksimize edilmesi gerekmektedir. Katalizör tabakasını gaz difüzyon elektroduna uygulamanın birçok yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler yayma (spreading), püskürtme (spraying) ve katalizör gücünün biriktirilmesidir (catalyst power deposition). Yayma yönteminde gaz difüzyon tabakası yüzeyine haddeleme yöntemi ile karbon takviyeli katalizör ve elektrolit karışımı yayılmaktadır. Püskürtme yönteminde ise gaz difüzyon tabakası yüzeyine katalizör ve elektrolit karışımı istenen bir kalınlığa ulaşınca kadar tekrar tekrar püskürtülmektedir. Anot katalizör tabakasında karbonmonoksit oluşumu sık karşılaşılan temel bir problemdir. Katalizör tabakası için tercih edilen platin malzemesi ile bu durum ekarte edilebilmektedir. Platin ile birlikte rutenyumun kullanılması karbonmonoksit gaz zehirlenmesi etkisini azaltmaktadır (Mehta ve Cooper, 2003).

3.5.4. Membran elektrot düzeneği (MEA)

Membran elektrot düzeneği proton değişim membranı, katalizör ve gaz difüzyon tabakalarından oluşmaktadır. Yakıt hücresindeki tüm elektrokimyasal reaksiyonlar membran elektrot düzeneğinde meydana geldiğinden dolayı yakıt hücresinin kalbi olarak adlandırılabilir. Proton değişim membranı, katalizör ve gaz difüzyon tabakaları ayrı ayrı üretilip, yüksek sıcaklık ve basınçlarda preslenmektedir. Membran elektrot

düzenine tasarım ve üretim yöntemi PEM yakıt hücresinin performansını etkilediği için son derece önemlidir (Maiyalagan ve Pasupathi, 2010).

3.5.5. Bipolar plakalar

Yakıt hücresi yığınının bileşenlerinden biri olan bipolar plakanın en pahalı ve en problemli olduğu kabul edilmektedir. Bipolar plaka çok fonksiyonlu bir bileşendir. Temel görevi reaktant gazları gaz akış kanalları vasıtası ile gaz difüzyon elektrotlarına sağlamaktır. Bipolar plakanın farklı akış alanları reaktant taşınımını etkilemektedir. Bipolar plakalar hücreler arasında elektrik bağlantılarını sağlaması gerekir. Katotta üretilen suyu etkin bir şekilde uzaklaştırır. Bipolar plakalar seri üretime uygun, yakıt hücre yığınının bütünlüğünü sağlayacak kadar dayanıklı, gaz geçirgenliğinin olmamasına dikkat edilerek tasarlanır. Taşınım uygulamaları için küçük hacme ve kütleyle sahip olmalıdır. Bipolar plakalar asitli suyla temas halinde çalıştıklarından dolayı yüksek kimyasal kararlılığa ve korozyon direncine sahip olması gerekir. Bipolar plaka malzemesi yaklaşık olarak 80 °C veya daha yüksek sıcaklığa, yüksek nem ve elektrik potansiyeline karşı dirençlidir. Bipolar plakaların teknik olarak tasarım kısıtlamalarını özetlemek gerekirse düşük maliyetli, gaz akışının kolay olması, yüksek elektrik iletkenliği, gaz geçişine karşı sızdırmaz, yüksek imal edilebilirlik, makul seviyede mukavemet, düşük ağırlık, düşük hacim, düşük ısı direnç, yüksek kimyasal kararlılık ve korozyon direncine sahip olması gerekir. Bipolar plaka malzemeleri tüm gereksinimleri karşılayabilmeli, ucuz ve seri üretime uygun olması gerekir. Grafit malzemesi bipolar plaka için mükemmel olmasına rağmen büyük çapta üretim için işleme ve malzeme maliyetleri yüksektir. Grafit malzeme PEM yakıt hücresi için efektif bir malzeme olarak kabul edilmese de, metal plakalara kıyasla kaplama içermeden yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu yüzden uzay uygulamaları için tercih edilmektedir. Yakıt hücre ticarileştirilmesinde grafit polimer kompozitler ve kaplama yapılmış metalik malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca bipolar plakaların akış alanlarının tasarımı hücre performansı açısından bir diğer kritik konudur (Zhang, 2008).

3.6. PEM Yakıt Pili İşletme Koşulları

PEM yakıt hücresinin güç çıkışı malzeme özelliklerine, yakıt hücre tasarımı ve yapısına, gaz akışı, ısı ve su yönetimi, basınç düzenlemesi gibi çalışma koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir. PEM yakıt hücresinden yüksek performans elde etmek için optimum sıcaklık, nemli membran ve reaktanların kısmi basıncının korunması gerekmektedir.

3.6.1. Çalışma basıncı

PEM yakıt hücresi ortam basıncında veya daha yüksek basınç değerlerinde çalıştırılabilir. Bir yakıt hücresinde basınç arttırıldığı zaman genellikle çok daha iyi performans elde edilmektedir. Ancak çalışma basıncı arttığında sisteme gereken sıkıştırma gücü de artar. Bu yüzden çalışma basıncının arttırılması ile net kazancın da sorgulanması gerekir. Bu duruma ek olarak çalışma basıncı hücre su yönetimi ile ilişkilendirilebilir. Genellikle basınçlı bir tanktan yakıt hücresi girişine reaktan beslenir. Geri basıncı olarak bilinen basınç, çıkışa monte edilmiş basınç düzenleyicisi tarafından kontrol edilmektedir. Geri basınç düzenleyicisi yakıt hücre çıkışında istenen basıncı ayarlamaktadır. Gaz akış kanalı boyunca basınç düşüşü meydana geleceğinden dolayı giriş basıncı çıkış basıncından her zaman daha yüksektir. Örneğin, katot girişi için iki tür hava besleme sistemi bulunmaktadır. Hava üfleme, hava soluma. Bir hava üfleme sisteminde katot girişi için kompresör ya da bir üfleyici gibi mekanik bir cihazla hava verilir. Hava üfleme cihazları pompa, valf, fan ve nemlendirici gibi güç harcayan sistemler gerektirdiğinden dolayı taşınabilir uygulamalar için kullanımları oldukça sınırlıdır. Hava soluma sistemleri bu sınırlamaları aşmak için geliştirilmiştir.

3.6.2. Çalışma sıcaklığı

Çalışma sıcaklığı hücre performansı açısından önemli rol oynayan bir işletme parametredir. Genel olarak yüksek çalışma sıcaklığı daha yüksek hücre potansiyeli veya performansı ile sonuçlanmaktadır. Herbir yakıt hücre tasarımının kendine uygun bir optimum çalışma sıcaklığı vardır. Yakıt hücresindeki kimyasal reaksiyon

ekzotermik olduğundan dolayı yan ürün ısıdır. İstenilen sistem sıcaklığını sürdürebilmek için ısıнын uzaklaştırılması gerekmektedir. Bir miktar ısı yakıt pilinin çevresinden yayılmaktadır. Geri kalan ısıнын soğutma sistemi ile alınması gerekir. Soğutma ortamı hava, su ve özel bir soğutucu olabilir. Küçük yakıt pillerinin dış yüzeyinden çok fazla miktarda ısı çıkışı olduğundan dolayı gerekli çalışma sıcaklığı için bir ısıtıcıya ihtiyacı olabilir. Bir yakıt hücresindeki ısı dengesi (Denklem 3.18) gibi yazılabilir;

$$Q_{\text{üretilen}} + Q_{\text{reaktant,g}} = Q_{\text{kayıp}} + Q_{\text{reaktant,ç}} + Q_{\text{soğutucu}} \quad (3.18)$$

$Q_{\text{üretilen}}$: Yakıt hücresinde üretilen ısı

$Q_{\text{reaktant,g}}$: Reaktant gaz tarafından gelen ısı

$Q_{\text{kayıp}}$: Yakıt hücresinden çevreye yayılan ısı

$Q_{\text{reaktant,ç}}$: Reaktan gaz tarafından çıkan ısı

$Q_{\text{soğutucu}}$: Soğutucu tarafından taşınan ısı

Buna ek olarak, yakıt hücre içindeki sıcaklık her yerde aynı olmayabilir.

3.6.3. Reaktant akış hızı

Bir yakıt hücresinin girişindeki reaktant akış hızı hücredeki reaktantın tüketim hızına eşit veya daha büyük olabilir. Reaktantın yetersiz olması hücre performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Hidrojen elektrodunda oksijen bulunması veya oksijen elektrodunda hidrojen bulunması membran üzerinde yerel sıcak noktalara sebep olabilir bu da zarın bozulmasına hücre performansının olumsuz yönde etkilenmesine sebep olmaktadır. Anot ve katot reaktantların kullanımı Faraday yasasına göre hesaplanabilir. Bir mol oksijenden dört elektron transfer edilir ve (Denklem 3.19) veya (Denklem 3.20) ile hesaplanabilir.

$$O_2 \text{ kullanımı} = \frac{I}{4F} \text{ mol/s} \quad (3.19)$$

$$\text{Hava kullanımı} = \frac{I}{4F} \times \frac{1}{0.21} \text{ mol/s} \quad (3.20)$$

Bir mol hidrojen den iki elektron transfer edilir ve (Denklem 3.21) ile hesaplanabilir.

$$\text{H}_2 \text{ kullanımı} = \frac{I}{2F} \text{ mol/s} \quad (3.21)$$

Bir yakıt hücre yığının n hücreden oluşursa, reaktant kullanımı (Denklem 3.22) ve (Denklem 3.23) gibi hesaplanabilir.

$$\text{Hava kullanımı} = \frac{I}{4F} \times \frac{n}{0.21} \text{ mol/s} \quad (3.22)$$

$$\text{H}_2 \text{ kullanımı} = \frac{nI}{2F} \text{ mol/s} \quad (3.23)$$

Anot ve katot fazla gaz oranları, λ_{hava} ve λ_{H_2} , sisteme dahil edildiğinde (Denklem 3.24) ve (Denklem 3.25) gibi ifade edilebilir.

$$\text{Hava kullanımı} = \frac{I}{4F} \times \frac{n}{0.21} \times \lambda_{\text{hava}} \text{ mol/s} \quad (3.24)$$

$$\text{H}_2 \text{ kullanımı} = \frac{nI}{2F} \times \lambda_{\text{H}_2} \text{ mol/s} \quad (3.25)$$

Çoğu yakıt hücresi test istasyonu, akış hızını dakikada standart litre (slpm) olarak ayarlayarak kontrol edildiğinden, yukarıdaki iki denklem daha sonra ideal gaz yasası kullanılarak bir slpm birimiyle transfer edilir ve (Denklem 3.26), (Denklem 3.27) gibi ifade edilebilir.

$$\text{Hava kullanımı} \approx 0.0166nI\lambda_{\text{hava}} \text{ slpm} \quad (3.26)$$

$$\text{H}_2 \text{ kullanımı} \approx 0.0070nI\lambda_{\text{H}_2} \text{ slpm} \quad (3.27)$$

Reaktant tüketimi ve su üretimi Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Reaktant tüketimi ve su üretimi (Barbir, 2005).

Birim	Oksijen Tüketimi	Hava Tüketimi	Hidrojen Tüketimi	Su Üretimi
mol/s	$2,59 \times 10^{-6}$	$1,23 \times 10^{-5}$	$5,18 \times 10^{-6}$	$5,18 \times 10^{-6}$
g/s	$8,29 \times 10^{-5}$	$3,94 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$9,33 \times 10^{-5}$
cm ³ /s	0,063	0,302	0,126	$9,33 \times 10^{-5}$
slpm	0,0038	0,0181	0,0076	N/A
sm ³ /h	$2,28 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-3}$	$4,56 \times 10^{-4}$	N/A

3.6.4. Reaktant nemliliği

Su dengesi ve yönetimi PEM yakıt hücre sistem kontrolü için önemli bir konudur. Pem yakıt hücresi tasarım ve işletiminde en önemli teknik zorluklardan biri de dinamik su dengesi ve yönetimidir. Çünkü PEM yakıt hücre performansı ve kullanım ömrü üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Hücre işletimi sırasında giriş bağıl nemi (RH)% 100 veya daha az olan reaktant gazlara ihtiyaç vardır. Reaktant nemliliği hücre performansı açısından önemlidir, iyi bir performans ve kullanım ömrü için membran tam hidrasyon gerektirir. Membran hidrasyonu yakıt hücresinin hem anot hem de katoda tamamen nemlendirilmiş reaktant gaz akışının sağlanmasıyla elde edilir. PEM yakıt hücresindeki membranın iletkenliği nemlendirilmiş reaktant gazlar tarafından taşıdığı suya, katotta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucunda üretilen su, elektroosmotik sürüklenme, katottan anota suyun geri difüzyonu sırasında su içeriğine bağlıdır. Su yönetimi kontrolü yakıt hücre kullanıcıları için oldukça hassastır. Su içeriğinin az veya fazla olması PEM yakıt hücresinin kullanım ömrünü ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Membranın kuru kalması, membran iletkenliğinin doğrudan azalmasına yol açar. Su yakıt hücresinin katot tarafından yeterli miktarda uzaklaştırılmazsa su baskını oluşur. Aynı çalışma koşullarında öngörülemeyen, güvenilir ve tekrarlanamaz bu durum hücre performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, dinamik çalışma koşullarında mükemmel bir su dengesi hücre performansı ve ömrü açısından çok önemlidir. PEM yakıt hücresinin

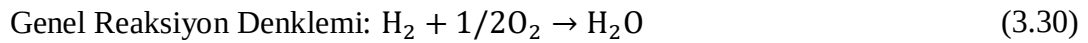
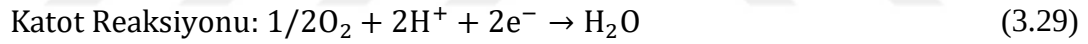
akış alanlarının ve diğer bileşenlerinin düzgün tasarımı çok daha iyi su yönetimi ve dengesinin elde edilmesine yardımcı olur.

3.7. Yakıt Pil Temel Bağıntıları ve Termodinamiği

Yakıt hücresi yakıtın(hidrojen) kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüsüdür. Böylece termodinamik yasalarına uymak zorundadır.

3.7.1. Temel bağıntılar

Elektrokimyasal denklemler yakıt hücresinin anot ve katot tarafında eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Yakıt hücresinde gerçekleşen temel bağıntılardan (Denklem 3.28), (Denklem 3.29) ve (Denklem 3.30) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.



Yukarıdaki reaksiyonlar yakıt hücresindeki temel prosesleri doğru bir şekilde tanımlamaktadır.

3.7.2. Reaksiyon ısısı

Genel reaksiyon denklemi aynı zamanda hidrojenin yanma reaksiyonu anlamına gelmektedir. Yanma işlemi esnasında çevreye enerji yayılımı olduğundan dolayı ekzotermik işlemdir ve (Denklem 3.31)'de verilmiştir.



Bir kimyasal tepkimenin ısısı (entalpi) ürün ve reaktant oluşum ısıları arasındaki farkı temsil etmektedir. Genel reaksiyon denkleminin entalpisi (Denklem 3.32) gibi ifade edilebilir.

$$\Delta H = h_{H_2O} - h_{H_2} - 1/2h_{O_2} \quad (3.32)$$

25°C’de sıvı suyun oluşum ısısı -286 kJ/mol, elementlerin oluşum ısıları sıfır olduğundan dolayı denklemi tekrar düzenlersek (Denklem 3.33) gibi ifade edilir.

$$\Delta H = h_{H_2O} - h_{H_2} - 1/2h_{O_2} = -286 \text{ kJ/mol} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ/mol} \quad (3.33)$$

Kimyasal reaksiyonun entalpi işaretinin negatif olması gerçekleşen prosesin ekzotermik olduğu anlamına gelmektedir.

3.7.3. Teorik elektrik işi

Hidrojen ısıtma değeri yakıt hücresinde enerji girişinin bir ölçüsüdür. Bu hidrojenden elde edilebilecek maksimum ısıl enerjiyi temsil eder. Her kimyasal reaksiyonda bir miktar entropi üretimi vardır. Hidrojen yüksek ısıtma değerinin bir bölümü faydalı işe dönüşmez. Reaksiyon entalpisinin yakıt hücresinde elektriğe çevrilen kısmı Gibbs serbest enerji ifadesi ile tanımlanır ve (Denklem 3.34) ile ifade edilir.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.34)$$

Diğer bir deyişle, entropi oluşumundan dolayı enerji dönüşümünde bazı tersinmez kayıplar oluşmaktadır.

Yukarıdaki ΔS ifadesi ürün ve reaktantların entropileri arasındaki farktır ve (Denklem 3.35)’de verilmiştir.

$$\Delta S = s_{H_2O} - s_{H_2} - 1/2s_{O_2} \quad (3.35)$$

Reaktant ve ürünlerin entalpi ve entropi değerleri 25 °C sıcaklık ve ortam basıncındaki değerleri Tablo 3.3.'de ifade edilmiştir.

Tablo 3.3. Yakıt hücresi reaktant ve ürünlerin oluşum entalpileri ve entropileri (Barbir, 2005).

Molekül	h(kJ/mol)	s(kJ/molK)
Hidrojen, H ₂	0	0,13066
Oksijen, O ₂	0	0,20517
Su(sıvı), H ₂ O(s)	-286,02	0,06996
Su(buhar), H ₂ O(g)	-241,98	0,18884

Bu yüzden 25 °C'de mevcut enerjinin 286.02 kJ/mol bir bölümü yaklaşık olarak 237.34 kJ/mol elektrik enerjisine dönüştürülebilir bunun geri kalanı 48.68 kJ/mol ısıdır.

3.7.4. Teorik yakıt hücre potansiyeli

Genel anlamda elektrik işi yük ve hücre potansiyelinin çarpımından oluşmaktadır. Temel bağıntısı (Denklem 3.36) ile ifade edilebilir.

$$W_{\text{elektrik}} = q \cdot E \quad (3.36)$$

W_{elektrik} : Elektrik işi (J/mol)

q : Yük (C/mol)

E : Hücre potansiyeli (V)

Bir yakıt hücre reaksiyonunda tüketilen H₂'nin mol başına karşılık gelen toplam yük (Denklem 3.37) bağıntıyla ifade edilir.

$$q = n \cdot N \cdot q_{\text{el}} \quad (3.37)$$

n : Molekül başına düşen elektron sayısı(H₂ için molekül başına düşen elektron sayısı 2'dir).

N : Mol başına düşen molekül sayısı(Avogadro sayısı) 6.022×10^{23} molekül/mol

q_{el} : 1 elektron yükü= 1.602×10^{-19} C/elektron

Bir elektron yükü ile avogadro sayısının çarpımı Faraday sabitini verir.

$$F = N \cdot q_{el} = 96485 \text{ C/elektron-mol}$$

Elektrik işi tekrar düzenlendiğinde (Denklem 3.38)'deki gibi yazılabilir.

$$W_{\text{elektrik}} = n \cdot F \cdot E \quad (3.38)$$

Yakıt hücresinde üretilen maksimum elektrik enerjisi Gibbs serberst enerjisi ile ifade edilir ve (Denklem 3.39)'da verilmiştir.

$$W_{\text{elektrik}} = -\Delta G \quad (3.39)$$

Yakıt hücresinin teorik potansiyeli (Denklem 3.40) ile ifade edilebilir.

$$E = -\Delta G / n \cdot F \quad (3.40)$$

25°C'de ΔG , n ve F değerlerinin hepsi bilindiği için, hidrojen/oksijen teorik potansiyeli (Denklem 3.41)'den 1.23 Volt olarak elde edildi.

$$E = \frac{237340}{2 \times 96485} = 1.23V \quad (3.41)$$

3.7.5. Sıcaklığın etkisi

Sıcaklık artışı daha düşük teorik hücre potansiyeli ile sonuçlanır.

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ denkleminin her iki tarafını $n \cdot F$ 'e bölersek, (Denklem 3.42) ile ifade edilebilir.

$$E = \frac{T\Delta S}{n \cdot F} - \frac{\Delta H}{n \cdot F} \quad (3.42)$$

Tablo 3.4.'de hem ΔH hem de ΔS 'nin negatif olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.4. Hidrojen oksitlenme işlemlerinde entalpi, entropi ve gibbs serbest enerji (Barbir, 2005).

Kimyasal Reaksiyon	$\Delta H(\text{kJ/mol})$	$\Delta S(\text{kJ/molK})$	$\Delta G(\text{kJ/mol})$
$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-286,02	-0,1633	-237,34
$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241,98	-0,0444	-228,74

Buna ek olarak, ΔH ve ΔS sıcaklığın bir fonksiyonudur.

$$h_T = h_{298.15} + \int_{298.15}^T c_p dT \quad (3.43)$$

$$s_T = s_{298.15} + \int_{298.15}^T \frac{1}{T} c_p dT \quad (3.44)$$

Herhangi bir gazın özgül ısısı sıcaklığın bir fonksiyonudur. Özgül ısı bağıntısı aşağıdaki ampirik bir bağıntıyla (Denklem 3.45) ile ifade edilmektedir.

$$c_p = a + bT + cT^2 \quad (3.45)$$

Denklemdeki a, b ve c katsayıları her bir gaz için ampirik katsayı olup Tablo 3.5.'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Özgül ısı bağıntısındaki ampirik katsayılar (Barbir, 2005).

Molekül	a	b	c
H_2	28,91404	-0,00084	2,01e-06
O_2	25,84512	0,012987	-3,9e-06
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	30,62644	0,009621	1,18e-06

3.7.6. Basıncın etkisi

Tipik bir proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresinin çalışma basıncı 100-700 kPa arasında değişim göstermektedir. Teorik pil potansiyelinin reaktant veya ürünlerin kısmi basınçlarıyla olan değişimi Nernst eşitliği ile tanımlanır ve (Denklem 3.46) ile ifade edilmiştir.

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (3.46)$$

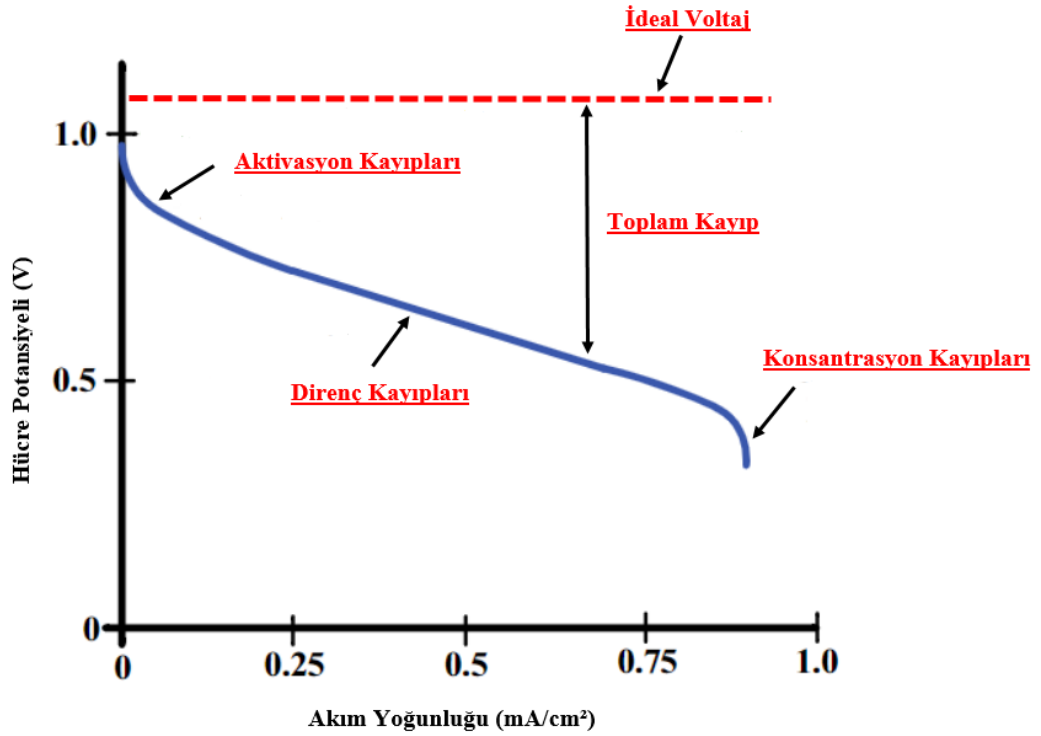
Nernst eşitliğine göre reaktan basıncının artması ile teorik pil potansiyeli artar. Eğer reaktanlarda saf oksijen yerine hava kullanılırsa daha düşük bir pil potansiyeli elde edilmektedir.

3.8. Yakıt Pili Gerçek Performansı

Yakıt hücrelerinin fiziksel unsurlar (taşıma olayları, elektrokimya vb.) ile birlikte hücre komponentinin tasarımına (fiziksel boyutlar, malzeme vb.) dayanan gerçek performansını karakterize etmek için büyük, karmaşık bilgisayar modelleri kullanılmaktadır. Normalde sistem çalışmaları için basit yaklaşımlar kullanılır. Örneğin, sistemde analiz edilmesi beklenen her durumda test yapmak olacaktır fakat bu yaklaşım oldukça maliyetlidir. Bunun yerine sıcaklık, basınç, gaz bileşenleri gibi hücre performansını etkileyen çalışma koşullarını değiştirerek termodinamik modele dayalı korelasyonlar geliştirmek akıllıca bir yaklaşım olur. Denklemleri tanımlamak için termodinamik modelleme kullanılır böylece denklem içerisindeki tasarım sabitlerini tanımlamak için sınırlı sayıda teste gereksinim duyulur. İstenen çalışma koşullarında hücre performansını elde etmek için bilinen çalışma koşullarında referans performansa düzenlemeler yapılabilir. Faydalı iş yalnızca yakıt hücresinden makul bir akım çekildiği zaman elde edilir fakat gerçek hücre potansiyeli tersinmez kayıplardan dolayı denge potansiyelinden düşmektedir. Birkaç kaynak elverişli bir yakıt hücresinde tersinmez kayıplara sebep olabilir. Genellikle kutuplaşma veya aşırı potansiyel olarak adlandırılan kayıplar üç temel kaynaktan kaynaklanmakta ve Şekil 3.7.'de kayıp bölgeleri gösterilmiştir. Aktivasyon kayıpları (η_{act}), omik kayıplar (η_{ohm}) ve konsantrasyon kayıpları (η_{conc}).

Bu kayıplar ideal potansiyelden daha düşük hücre voltajına sebep olur. İdeal potansiyel E , hücre voltajı V ile ifade edilirse $V=E$ -Kayıplar şeklinde tanımlanır. Aktivasyon kaybı akım yoğunluğunun düşük olduğu bölgede baskındır. Bu noktada akım ve iyon akışından önce elektronik bariyerlerin aşılması gerekir. Akım yoğunluğu arttıkça

aktivasyon kayıplarında bir miktar artış meydana gelir. Yakıt hücre direnci sabit kaldığından dolayı tüm akım yoğunluğu boyunca direnç kaybı artmaktadır. Gaz taşınım kayıpları tüm akım yoğunluğu aralığı boyunca meydana gelir, fakat hücre reaksiyon alanlarına yeterli reaktant akışı sağlanamadığı zaman daha belirgin hale gelir.



Şekil 3.7. İdeal ve gerçek yakıt hücresi voltaj/akım karakteristiği

3.8.1. Aktivasyon kayıpları

Elektrot yüzeyindeki elektrokimyasal tepkimenin hızı durgun elektrot kinetiği ile kontrol edildiğinde aktivasyon kayıpları mevcuttur. Diğer bir deyişle, aktivasyon kaybı elektrokimyasal tepkime hızı ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonların her ikisinde de reaksiyona giren türlerin aşması gereken bir aktivasyon bariyeri vardır. Elektrokimyasal reaksiyon durumunda $\eta_{act} \geq 50 - 100$ mV. Aktivasyon polarizasyonundan kaynaklı voltaj düşüşü Tafel eşitliği olarak adlandırılan yarı ampirik bir denklemle (Denklem 3.47) ile ifade edilmektedir.

$$\eta_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \cdot \ln \frac{i}{i_0} \quad (3.47)$$

R: İdeal gaz sabiti (kJ/kmol · K)

T: İdeal gazın Kelvin sıcaklığındaki değeri, mutlak sıcaklık (K)

α : Elektron transfer katsayısı (Elektrot malzemesine göre 0 ile 1 arasında değişen bir katsayıdır. Anotta bu değer 0.5, katotta is 0.1 ile 0.5 arasındadır.)

F: Faraday Sabiti (C/mol)

i: Akım yoğunluğu (A/m²)

i_0 : Akım yoğunluk değişimi (A/m²)

3.8.2. Direnç kayıpları

Elektrot malzemelerden geçen elektron akışı ve elektrolitte iyon akışına karşı dirençten dolayı direnç kayıplar meydana gelebilir. Elektrot ayrımını azaltarak ve elektrolitin iyonik iletkenliğini arttırarak elektrolitte meydana gelen dominant direnç kayıpları azaltılabilir. Hem elektrolit hem de yakıt hücresi elektrotları Ohm kanununa uyduğu için direnç kayıplar (Denklem 3.48) ile ifade edilebilir.

$$\eta_{ohm} = i \cdot R \quad (3.48)$$

i: Hücreden geçen akım

R: Toplam hücre direnci (Elektrik, iyonik ve temas direnci)

Toplam hücre direnci (Denklem 3.49)'da verilmiştir.

$$R_{toplam} = R_{elektrik} + R_{iyonik} + R_{temas} \quad (3.49)$$

3.8.3. Konsantrasyon kayıpları

Elektrokimyasal reaksiyon ile elektrotta reaktant tüketildiği için çevreleyen malzemenin yığın akışın başlangıçtaki konsantrasyonunu koruyamaması nedeniyle potansiyel kayıp oluşmaktadır. Yani konsantrasyon gradyanı oluşur. Birkaç işlem konsantrasyon kaybına sebep olmaktadır. Gaz fazında elektrot gözeneklerindeki difüzyonun yavaş olması, reaktiflerin/ürünlerin elektrolitin içine/dışına çözülmesi veya reaktiflerin/ürünlerin elektrolit yoluyla/elektrokimyasal reaksiyon bölgesinden difüzyonu. Pratik akım yoğunluklarında, reaktiflerin/ürünlerin elektrokimyasal reaksiyon alanına yavaşça taşınması, konsantrasyon polarizasyonuna önemli bir katkıda bulunur. Konsantrasyon kayıpları (Denklem 3.50) gibi ifade edilebilir.

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (3.50)$$

i_L : Sınırlayıcı akım

3.8.4. Elektrot polarizasyonunun toplanması

Yakıt hücrelerinde hem katot hem de anot elektrotunda aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonları bulunmaktadır. Herbir elektrottaki toplam kaybı (Denklem 3.51) ve (Denklem 3.52)' verilmiştir. ;

$$\eta_{\text{anode}} = \eta_{\text{act,a}} + \eta_{\text{conc,a}} \quad (3.51)$$

$$\eta_{\text{cathode}} = \eta_{\text{act,c}} + \eta_{\text{conc,c}} \quad (3.52)$$

Elektrot potansiyelini ($E_{\text{electrode}}$) polarizasyon etkisi ile yeni bir değere taşıyabiliriz ve (Denklem 3.53) gibi ifade edebiliriz.

$$V_{\text{electrode}} = E_{\text{electrode}} \pm |\eta_{\text{electrode}}| \quad (3.53)$$

Anot ve katot voltajları (Denklem 3.54) ve (Denklem 3.55)'te verilmiştir.

Anot için;

$$V_{\text{anode}} = E_{\text{anode}} + |\eta_{\text{anode}}| \quad (3.54)$$

Katot için;

$$V_{\text{cathode}} = E_{\text{anode}} + |\eta_{\text{anode}}| \quad (3.55)$$



BÖLÜM 4. PEM YAKIT PİL TEORİSİ

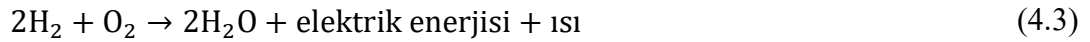
Modellemenin ilk kısmında gaz akış kanallarında engelleyici blok bulunmayan 3-D, tek fazlı, tek hücreli PEM yakıt pil geometrisi geliştirildi. PEM yakıt pil geometrisi ANSYS Design-Moduler, ağ yapısı ANSYS Meshing kullanılarak oluşturulmuştur. Matematiksel modelin çözümünde ticari bir akış çözücü ANSYS FLUENT 18.1 PEM yakıt hücresi ilave modülü kullanılarak geleneksel akış alanına sahip tek fazlı, tek kanallı bir proton değişim membranı PEM yakıt hücresi bazında sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde yönetici denklemler(lineer olmayan, kısmi diferansiyel denklemler) kullanılmıştır. Süreklilik, momentum, türler, enerji denklemleri sonuçların elde edilebilmesi için elektrokimyasal ve membran denklemleri ile birlikte çözülmüştür. Bu denklemlerin eş zamanlı çözümünü elde etmek için birtakım varsayımların yapılması gerekmektedir. Matematiksel modellemede yapılan birtakım kabuller ile kullanılan korunum denklemleri belirlenen sınır şartlarına göre çözümlenecektir. Modellemenin ikinci kısmında yakıt hücresinde ısı geçişini iyileştirip hücre performansını arttırmak amacı ile yakıt hücresi gaz akış kanallarına engelleyici bloklar yerleştirilerek engelli kanal geometrileri oluşturuldu. Çalışmada gaz akış kanallarına yerleştirilen bu engellerin yakıt hücre performansına nasıl bir etkisi olduğu araştırılacaktır.

Aşağıdakiler mevcut modelin sayısal çözümü için yapılan varsayımlardır. Bu varsayımları kullanan sistem bileşenleri için birkaç basitleştirme yapılabilir.

1. Tüm reaktantlar ve ürünler gaz fazındadır.
2. Hem anot hem de katot tarafındaki yakıtın mükemmel gaz olduğu varsayılır.
3. Gaz akışı düşük hızlardan dolayı laminar ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir.
4. Kararlı yapı, tek fazlı, 3-D model kabul edilmiştir.

5. Gaz difüzyon tabakası (GDL), katalizör tabakası (CL) ve membran homojen ve izotropik olarak kabul edilir.
6. Viskoz dağılma, kaldırma kuvveti etkileri ihmal edilmiştir.
7. Membranın içinden hiçbir şekilde su ve gaz geçişi yoktur.
8. Bileşenlerin fiziksel özellikleri sabittir.
9. Farklı tabakaların arasındaki arayüzlerde temas direnci yoktur.
10. Yüksek iletkenlik nedeniyle gaz difüzyon (GDL) ve katalizör tabakalarının (CL) katı bölümlerindeki elektriksel ve omik potansiyel kayıplar ihmal edilmiştir.

PEM yakıt hücresinde meydana gelen elektrokimyasal denklemler (Denklem 4.1), (Denklem 4.2) ve (Denklem 4.3)'de verilmiştir.



4.1. Kütle Korunum Denklemi

Gaz akışı, difüzyon, faz değişimi ve elektrokimyasal reaksiyonlar gibi PEM yakıt hücresinde gerçekleşen proseslerde geçerli olan kütle korunumu için genel bir diferansiyel denklemi, daha çok bilinen adıyla süreklilik denklemi (Denklem 4.4)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.4)$$

ρ : Yoğunluk, kg/m^3

$\vec{V}$: Hız vektörü, m/s

$\vec{\nabla}$: Del operatör, $\frac{d}{dx} + \frac{d}{dy} + \frac{d}{dz}$

4.2. Momentumun Korunum Denklemi

PEM yakıt pilinde momentum korunum denklemi (Denklem 4.5)'te verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu^{\text{eff}} \nabla v) + S_m \quad (4.5)$$

p : Akışkan basıncı, Pa

μ^{eff} : Dinamik viskozite, kg/ms

S_m : Momentum kaynak terimi

Momentum kaynak terimi yakıt hücresinin herbir bölgesinde değişiklik göstermektedir.

Gaz kanalları için kaynak terim (Denklem 4.6)'da verilmiştir.

$$S_m = 0 \quad (4.6)$$

Katalizör tabakalarının boşlukları ve takviye plakaları için kaynak terim (Denklem 4.7)'de verilmiştir.

$$S_m = -\frac{\mu}{k} \epsilon v \quad (4.7)$$

K : Gaz difüzyon tabakası veya katalizör tabakasının geçirgenliği, m^2

ϵ : Gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği

Momentum korunum denklemindeki kaynak terimi akışkan üzerindeki boşluk cidarları tarafından uygulanan Darcy'nin sürüklenme kuvvetinden kaynaklanan bir

basınç düşüşünü temsil etmektedir. Polimer fazda su taşınımı için ek bir kaynak terim elektrokinetik geçirgenliktir ve (Denklem 4.8)'de verilmiştir.

$$S_m = -\frac{\mu}{K_p} \varepsilon_m x_m v + \frac{K_\Phi}{K_p} c_f n_f F \nabla \Phi_m \quad (4.8)$$

ε_m : Membran su gözenekliliği

x_m : Katalizör tabakasındaki iyonomerin hacimsel kesri

K_Φ : Elektrokinetik geçirgenlik, m^2

K_p : Membranın hidrolik geçirgenliği, m^2

c_f : Sabit yük konsantrasyonu, mol/m^3

n_f : Sülfonik asit iyonlarının yük sayısı

F : Faraday sabiti, 9.65×10^7 C/kmol

Φ_m : İyonomer faz potansiyeli

4.3. Enerjinin Korunum Denklemi

PEM yakıt hücresindeki herhangi bir alan için enerjinin korunum denklemi (Denklem 4.9) gibi ifade edilebilir;

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_{eff} (v \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_e \quad (4.9)$$

c_p : Karışımın ortalama özgül ısı kapasitesi, J/kgK

T : Sıcaklık, K

k : Isı iletim katsayısı, W/mK

S_e : Enerji kaynak terimi

Gözenekli ortamın etkin özellikleri 'eff' alt indisi ile (Denklem 4.10) ve (Denklem 4.11)'de verilmiştir.

$$(\rho c_p)_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon)\rho_s c_{p,s} + \varepsilon \rho c_p \quad (4.10)$$

$$k_{\text{eff}} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s + k} + \frac{1 - \varepsilon}{3k_s} \right]^{-1} \quad (4.11)$$

ρ_s : Katı matrisin yoğunluğu, kg/m^3

$c_{p,s}$: Katı matrisin özgül ısı kapasitesi, J/kgK

k_s : Isı iletim katsayısı, W/mK

Enerji korunum denklemindeki kaynak terim, faz değişimi esnasında reaksiyonlarda oluşan ısıyı, omik ısınmayı, yoğunlaşma ya da buharlaşma ısını içerebilir.

4.4. Türlerin Korunum Denklemi

Herbir gaz fazı türü için kütle korunumunu temsil eden türlerin korunum denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho x_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (v \varepsilon \rho x_i) = \nabla \cdot (\rho D_i^{\text{eff}} \nabla x_i) + S_{s,i} \quad (4.12)$$

x_i : Gaz türlerinin kütle kesri, $i = 1, 2, \dots, N$ (örneğin, hidrojen için $i=1$, oksijen için $i=2$, su buharı için $i=3$ vb.)

$S_{s,i}$: Türlerin kaynak veya kuyu terimleri

(Denklem 4.12)'nin sol tarafındaki ilk iki ifade türlerin birikimini ve adveksiyon terimlerini ifade etmektedir. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim ise gözenekli ortamdaki Fick'in türlerin difüzyonu yasasını temsil etmektedir. PEM gözenekli ortamda gaz taşınımı ile ilgili yeterli bilgi bulunmadığından dolayı literatürde yaygın olarak kullanılan Bruggman modeli (Denklem 4.13)'de verilmiştir.

$$D_{i,\text{eff}} = D_i \varepsilon^{1.5} \quad (4.13)$$

D_i : Serbest akış kütle difüzyon katsayısı

Çok bileşenli türler sisteminde bileşenlerin mol kesrindeki gradyanı tanımlamak için Stefan-Maxwell denklemleri eklenebilir, (Denklem 4.14)'de verilmiştir.

$$\nabla y_i = RT \sum_j \frac{y_i N_j - y_j N_i}{p D_{ij}^{eff}} \quad (4.14)$$

y_i : i türünün gaz fazındaki mol kesri

N_i : Sistemin genel boyutlarına göre küçük, ancak gözenek boyutuna göre büyük olan, diferansiyel hacimli bir element üzerinden ortalama i türlerinin yüzeysel gaz fazı akışı

D_{ij}^{eff} : Gözenekli ortamda herhangi bir sıcaklık ve basınç için hesaplanabilen i, j çiftinin etkin ikili yayılım gücü, (Denklem 4.15)'de verilmiştir.

$$D_{ij}^{eff} = \frac{a}{p} \left(\frac{T}{\sqrt{T_{c,i} T_{c,j}}} \right)^b (p_{c,i} p_{c,j})^{1/3} (T_{c,i} T_{c,j})^{5/12} \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{1/2} \epsilon^{1.5} \quad (4.15)$$

T_c : i ve j türlerinin kritik sıcaklığı

p_c : i ve j türlerinin kritik basıncı

M : i ve j türlerinin moleküler ağırlığı

a: H_2 , O_2 , N_2 iki atomlu gazlar için $a=0.0002745$ su buharı için $a=0.000364$

b: H_2 , O_2 , N_2 iki atomlu gazlar için $b=1.832$ su buharı için $b=2.334$

Türlerin korunum denklemindeki kaynak terim $S_{s,i}$ elektrokimyasal reaksiyonlarda türlerin tüketildiği veya üretildiği katalizör tabakaları dışında her yerde sıfıra eşittir.

Hidrojen, oksijen, su buharı ve sıvı su için kaynak terimleri sırasıyla (Denklem 4.16), (Denklem 4.17), (Denklem 4.18) ve (Denklem 4.19) gibi ifade edilebilir;

$$S_{s,H_2} = -j_a \frac{M_{H_2}}{2F} \quad (4.16)$$

$$S_{s,H_2O(g)} = \sigma A_{fg}(X_{sat} - X_{H_2O(g)}) \quad (4.18)$$

$$S_{s,H_2O(l)} = +j_c \frac{M_{H_2O}}{2F} - \sigma A_{fg}(X_{sat} - X_{H_2O(g)}) \quad (4.19)$$

4.5. Yüklerin Korunum Denklemleri

Akım taşınımı yüklerin korunmasına ilişkin geçerli (Denklem 4.20) ve (Denklem 4.21) ile tanımlanır.

Elektrik akımı için;

$$\nabla \cdot (K_s^{eff} \nabla \phi_s) = S_{\phi_s} \quad (4.20)$$

İyonik akım için;

$$\nabla \cdot (K_m^{eff} \nabla \phi_m) = S_{\phi_m} \quad (4.21)$$

K_m^{eff} : İyonomer fazda iyonik iletkenlik, S/cm

ϕ_s : Katı faz potansiyeli, V

ϕ_m : Elektrolit faz potansiyeli, V

S_{ϕ} : Anot katalizör tabakasında hacimsel geçiş akımını temsil eden kaynak terim,

$S_{\phi_s} = -j_a$ ve $S_{\phi_m} = j_a$

Katot katalizör tabakasında hacimsel geçiş akımını temsil eden kaynak terim, $S_{\phi_s} =$

j_c , $S_{\phi_m} = -j_c$ ve $S_{\phi} = 0$

4.6. Elektrokimyasal Denklemler

Yüzey aşırı gerilimi katı fazın elektrik potansiyeli ile membranın faz potansiyeli arasındaki farktan oluşmaktadır. İki elektriksel potansiyel denklem yakıt hücresi ve elektroliz modelinde çözülmektedir: İlk elektriksel potansiyel denklem katı iletken

malzemeler boyunca elektron taşınımını hesaba katarak (Denklem 4.22)'de verilmiştir. Diğer elektriksel potansiyel denklem H^+ ve O^{2-} protonik taşınımını hesaba katan aşağıdaki (Denklem 4.23)'de ifade edilmiştir.

$$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \phi_{sol}) + R_{sol} = 0 \quad (4.22)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \phi_{mem}) + R_{mem} = 0 \quad (4.23)$$

Yukarıdaki Denklem 1 ve Denklem 2'de kullanılan değişkenler aşağıda açıklanmıştır:

σ_{sol} : Katı fazın elektriksel iletkenliği, 1/ohm-m

σ_{mem} : Membranın elektriksel iletkenliği, 1/ohm-m

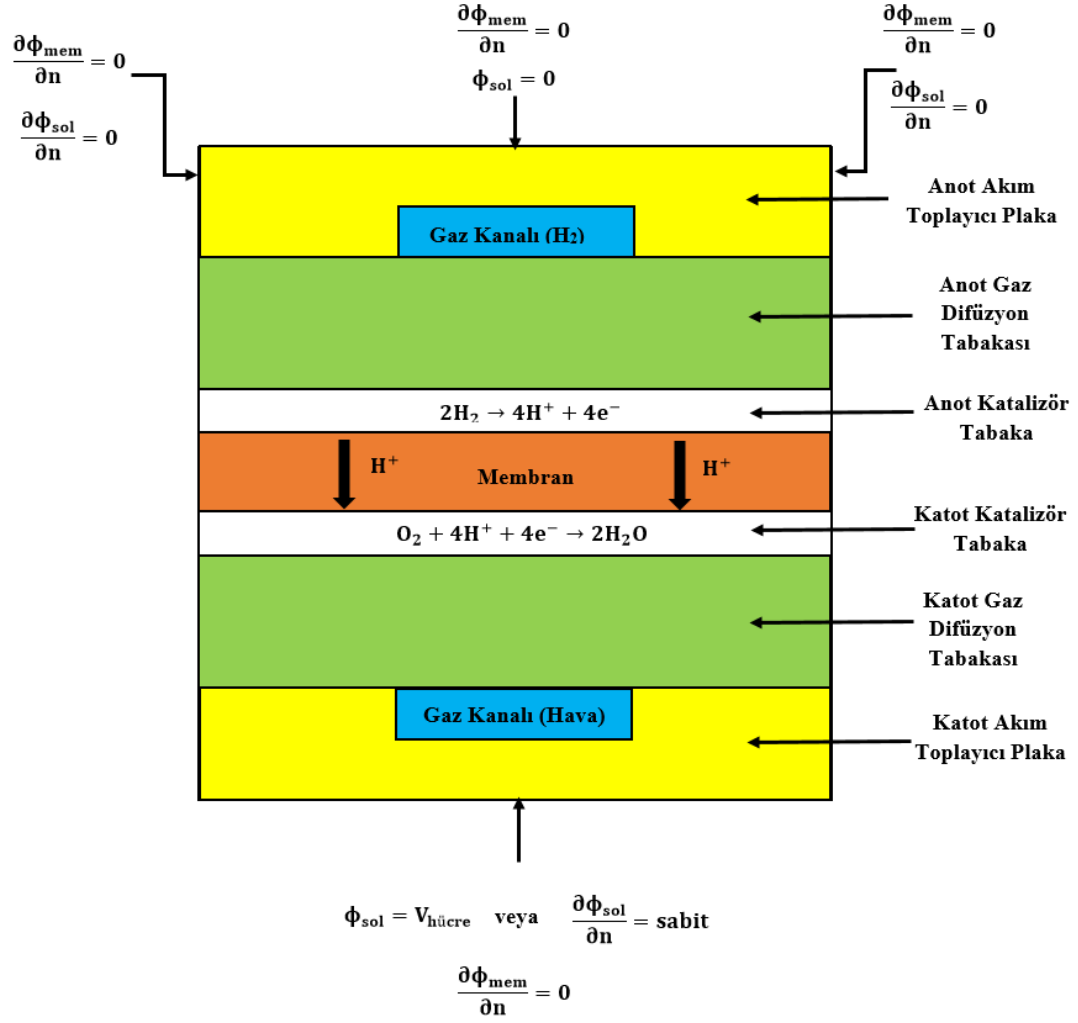
ϕ_{sol} : Katı fazın elektrik potansiyeli, Volt

ϕ_{mem} : Membran faz potansiyeli, Volt

R_{sol} : Katı fazın hacimsel geçiş akımı, A/m³

R_{mem} : Membranın hacimsel geçiş akımı, A/m³

Katı fazın elektrik potansiyeli(ϕ_{sol}) ve membran faz potansiyeli(ϕ_{mem}) aşağıdaki Şekil 4.1.'de tanımlanan sınır koşulları ile çözülmektedir. PEM yakıt hücresinde elektrik akımı geçişinin olduğu ve akım geçişinin olmadığı iki türde dış sınır vardır. Protonlar yakıt hücresinin herhangi bir dış sınırından geçemedikleri için tüm dış sınırlarda membran faz potansiyeli ϕ_{mem} için sıfır akı sınır koşulu vardır. Katı fazın elektrik potansiyeli(ϕ_{sol}) yakıt hücresinin anot akım toplayıcı plakasının üst sınırında sıfırdır. Katot akım toplayıcı plakasının alt sınırında da ϕ_{sol} hücre potansiyeli($V_{hücre}$) olarak alınmaktadır. (Denklem 4.22) ve (Denklem 4.23)'de hacimsel geçiş akımları sadece katalizör tabakalarında sıfır değildir. Anot tarafında katı faz için; $R_{sol} = -R_{an}$ (<0) ve katot tarafında katı faz için; $R_{sol} = +R_{kat}$ (>0), Anot tarafında membran faz için $R_{mem} = +R_{an}$ (>0) ve katot tarafında membran faz için $R_{mem} = -R_{kat}$ (<0) olarak hesaplanabilir. (Denklem 4.22) ve (Denklem 4.23) aşağıdaki genel tanımlamalara sahiptir.



Şekil 4.1. Elektrik potansiyeli (katı ve membran) için sınır koşulları

$$R_{an} = (\zeta_{an} j_{an}^{ref}) \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left(e^{\frac{\alpha_{an} F \eta_{an}}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_{kat} F \eta_{an}}{RT}} \right) \quad (4.24)$$

$$R_{kat} = (\zeta_{kat} j_{kat}^{ref}) \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{kat}} \left(-e^{\frac{\alpha_{an} F \eta_{kat}}{RT}} + e^{-\frac{\alpha_{kat} F \eta_{kat}}{RT}} \right) \quad (4.25)$$

Yukarıdaki (Denklem 4.24) ve (Denklem 4.25) Butler-Volmer denkleminin genel formülasyonu olup denklemlerde kullanılan değişkenler aşağıda açıklanmıştır:

j^{ref} : Aktif yüzey alanı başına referans akım yoğunluğu, A/m²

ζ : Özgül aktif yüzey alanı, 1/m

[]: Yerel tür konsantrasyonu, kmol/m³

$[]_{\text{ref}}$: Tür konsantrasyonunun referans değeri, kmol/m^3

γ : Konsantrasyon üssü

α : Boyutsuz geçiş katsayısı

F: Faraday sabiti, $9.65 \times 10^7 \text{ C/kmol}$

η : Yüzey aşırı gerilimi

Butler-Volmer denkleminin basitleştirilmiş formülasyonu Tafel denklemi olarak tanımlanır ve aşağıda (Denklem 4.26) ve (Denklem 4.27)'de ifade edilmiştir.

$$R_{\text{an}} = (\zeta_{\text{an}})_{\text{an}}^{\text{ref}} \left(\frac{[\text{H}_2]}{[\text{H}_2]_{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{an}}} \left(e^{\frac{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}}}{RT}} \right) \quad (4.26)$$

$$R_{\text{kat}} = (\zeta_{\text{kat}})_{\text{kat}}^{\text{ref}} \left(\frac{[\text{O}_2]}{[\text{O}_2]_{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{kat}}} \left(e^{-\frac{\alpha_{\text{kat}} F \eta_{\text{kat}}}{RT}} \right) \quad (4.27)$$

Butler-Volmer denklemi ANSYS FLUENT yakıt hücre ve elektroliz modelinde katalizör tabakasının içindeki geçiş akımlarını hesaplamak için kullanılmaktadır. Yakıt hücresinin anot tarafındaki yüzey aşırı gerilim katı ve membran faz potansiyelleri arasındaki fark olup (Denklem 4.29)'da verilmiştir. Yakıt hücresinin katot tarafındaki yüzey aşırı gerilim (Denklem 4.30)'da verilmiş; katı, membran faz potansiyellerinin yanı sıra açık devre voltajının da çıkarılmasıyla elde edilmektedir.

$$\eta_{\text{an}} = \phi_{\text{sol}} - \phi_{\text{mem}} \quad (4.29)$$

$$\eta_{\text{kat}} = \phi_{\text{sol}} - \phi_{\text{mem}} - V_{\text{OC}} \quad (4.30)$$

4.7. Özellikler

4.7.1. Gazların tür yayını

Gazların tür difüzyonu seyreltik yaklaşım yöntemi veya tam çok bileşenli yöntem kullanılarak hesaplanabilir. D_i^0 türlerin referans sıcaklık(T_0) ve referans basınç(P_0) koşullarında kütle yayınıdır.

$$D_i = \varepsilon^{1.5} (1 - s)^{r_s} D_i^0 \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\gamma_p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\gamma_t} \quad (4.31)$$

(Denklem 4.31) eşitliğinde kullanılan değişkenler aşağıdaki değerleri almaktadırlar.

p_0 : 101325 Pa

T_0 : 300 K

γ_p : 1.0

γ_t : 1.5

r_s : 2.5

(Denklem 4.31) eşitliğine ek olarak, ANSYS FLUENT Yakıt Hücresi ve Elektroliz Modeli gazların tür yayını hesaplamak için bir yöntem daha içermektedir ve (Denklem 4.32)'de verilmiştir.

$$D_{eff}^{ij} = \varepsilon^{1.5} \cdot D^{ij} \quad (4.32)$$

(Denklem 4.32) eşitliğinde kullanılan değişkenler;

D_{eff}^{ij} : Etkin gazların kütle yayını

ε : Gözenekli ortamın porozitesi

D^{ij} : Çok bileşenli difüzyon yöntemiyle hesaplanan gazların kütle yayını

4.7.2. Membranın iyonik iletkenliği

PEM yakıt pilinde membranın iyonik iletkenliği aşağıdaki (Denklem 4.33) ile modellenmiştir.

$$\sigma_{\text{mem}} = \beta(0.514\lambda - 0.326)\omega e^{1268(\frac{1}{303} - \frac{1}{T})} \quad (4.33)$$

Λ : Su içeriği

β, ω : Model sabitleri

4.7.3. Ozmotik sürüklenme katsayısı

Ozmotik sürüklenme katsayısı (Denklem 4.34) eşitliği ile aşağıda ifade edilmiştir.

$$n_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \quad (4.34)$$

4.7.4. Geri difüzyon akısı

Geri difüzyon akısı (Denklem 4.35) aşağıda verilmiştir.

$$J_w^{\text{diff}} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{\text{H}_2\text{O}} D_l \nabla \lambda \quad (4.35)$$

ρ_m : Membran yoğunluğu (kg/m^3)

M_m : Membran eşdeğer ağırlığı

D_l : Membran su yayılımı

Membran su yayılımı (Denklem 4.36) eşitlik ile ifade edilebilir;

$$D_1 = f(\lambda)e^{2416(\frac{1}{303}-\frac{1}{T})} \quad (4.36)$$

Λ : Su içeriği olmakla birlikte (Denklem 4.37) ve (Denklem 4.38) ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda = 0.043 + 17.18\alpha - 39.85\alpha^2 + 36\alpha^3 \quad (\alpha < 1) \quad (4.37)$$

$$\lambda = 14 + 1.4(\alpha - 1) \quad (\alpha > 1) \quad (4.38)$$

α : Su aktivitesi ve (Denklem 4.39) gibi ifade edilmektedir.

$$\alpha = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (4.39)$$

Su buharı basıncı, buhar molar kesrine ve yerel basınca dayanarak hesaplanır, (Denklem 4.40)'daki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$P_{wv} = x_{H_2O} \cdot P \quad (4.40)$$

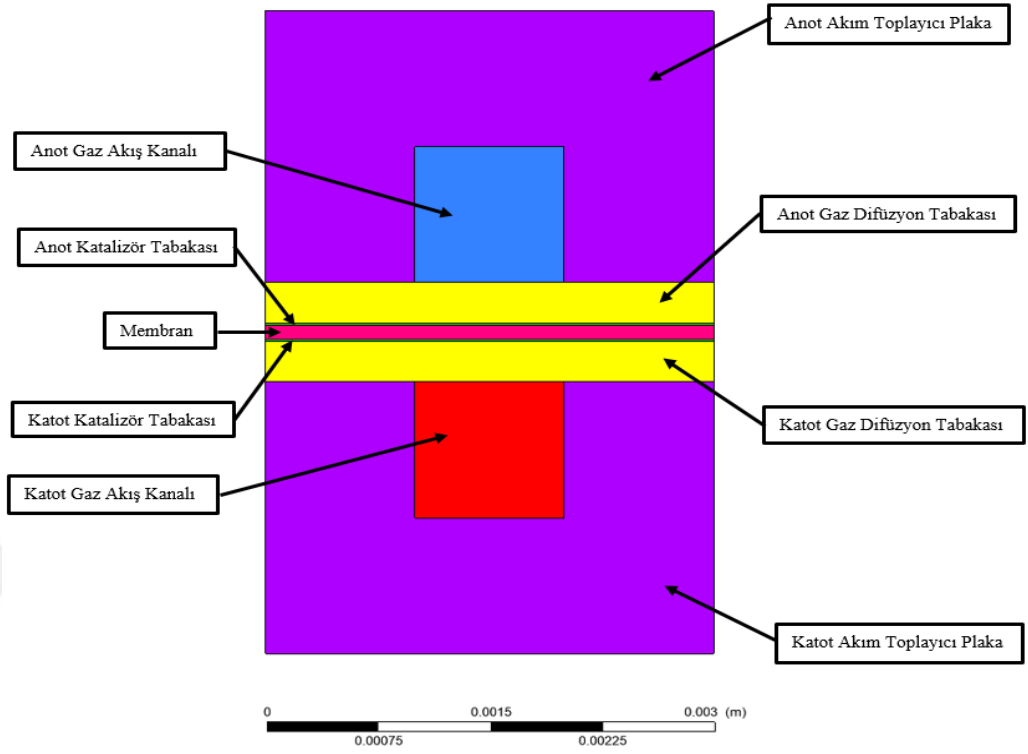
Doyma basıncı atm cinsinden hesaplanmaktadır, aşağıdaki (Denklem 4.41) gibi ifade edilmektedir.

$$\log_{10}P_{sat} = -2.1794 + 0.02953(T - 273.17) - 9.1837 \times 10^{-5}(T - 273.17)^2 + 1.4454 \times 10^{-7}(T - 273.17)^3 \quad (4.41)$$

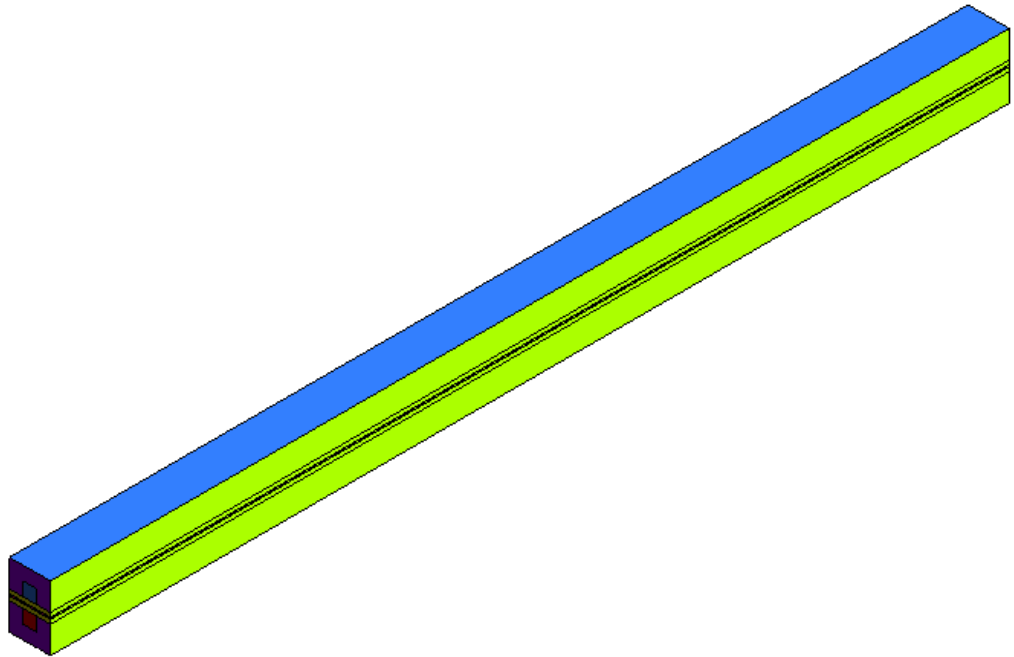
BÖLÜM 5. PEM YAKIT PİLİ MATEMATİKSEL MODELİ

5.1. Model Geometrisi

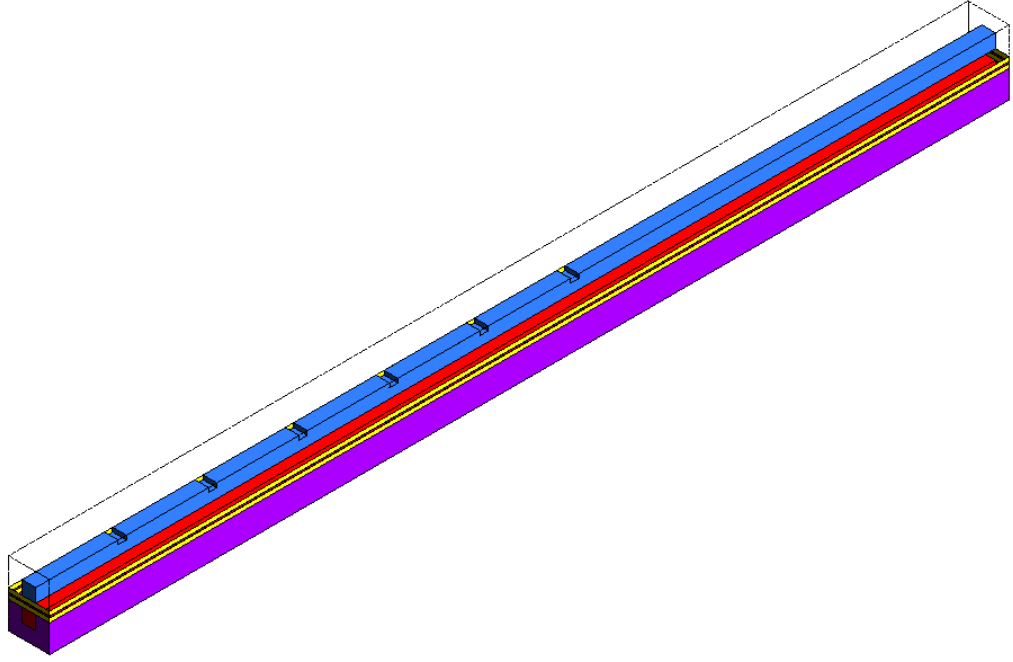
PEM yakıt hücresi membran, anot ve katot gaz akış kanalları, katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları ve akım toplayıcı plakalar olmak üzere dokuz hacim bölgeden oluşan katı model ANSYS Design-Modular’de geliştirilmiştir. İki boyutlu, düz gaz akış kanallı PEM yakıt hücresinin önden görünüşü Şekil 5.1.’de, üç boyutlu katı model Şekil 5.2.’de gösterilmiştir. Üç boyutlu engelli gaz akış kanallı PEM yakıt hücresinin katı modeli Şekil 5.3.’de, iki boyutlu y-z düzlemindeki görünüşü de Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Geleneksel gaz akış kanallı PEM yakıt hücresinin sayısal modeli literatürden Wang ve arkadaşlarının çalıştığı modelin tasarım ve elektrokimyasal parametreleri kullanılarak geliştirilmiştir. Sayısal modelde kullanılan tasarım parametreleri Tablo 5.1.’de verilmiştir.



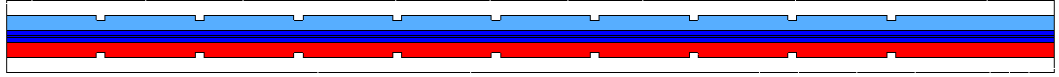
Şekil 5.1. PEM yakıt hücresinin x-y düzleminde şematik gösterimi



Şekil 5.2. Geleneksel gaz akış kanallı PEM yakıt hücresi fiziksel modeli



Şekil 5.3. Altı engelli PEM yakıt hücresi fiziksel modeli



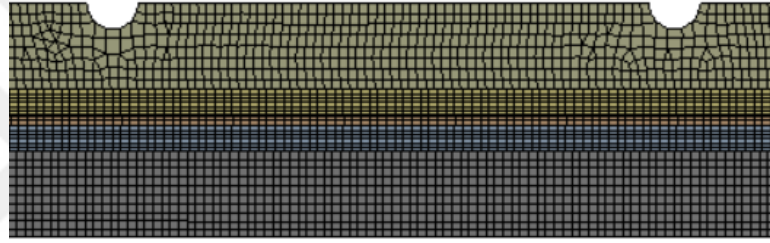
Şekil 5.4. Dokuz engelli PEM yakıt hücresi fiziksel modeli

Tablo 5.1. Referans geometrinin tasarım parametreleri

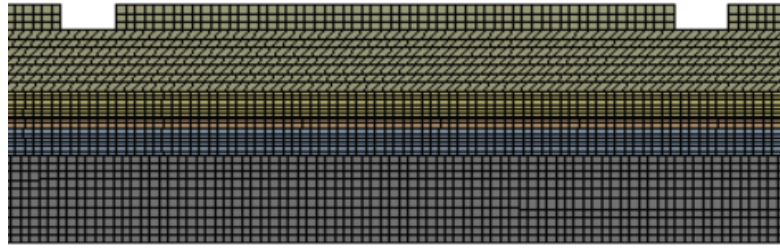
Parametre	Değer	Birim
Kanal genişliği	1	mm
Kanal derinliği	1	mm
Kanal uzunluğu	70	mm
Akım toplama plakası kalınlığı	2	mm
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0,3	mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0,0129	mm
Membran kalınlığı	0,108	mm
Aktif alan	0,00021	m ²

5.2. Modelin Ağ Yapısı

Sayısal çözümleme yapılabilmesi için geliştirilen geometrinin sonlu hacimlere bölünmüş olması gerekir. PEM yakıt hücresinin ağ yapısı ANSYS Meshing’de oluşturulmuştur. Korunum denklemleri her bir sonlu hacim için ayrı ayrı çözümleneceğinden dolayı daha doğru, hassas sonuçlar elde edebilmek için ağ yapısının düzgün olması gerekmektedir. Sayısal analizden doğru sonuçlar elde edebilmek için ağ bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Yarı silindirik engellere sahip sayısal modelin ağ yapısının y-z düzleminde kesiti Şekil 5.5.’de gösterilmiştir. Dikdörtgensel engellere sahip sayısal modelin ağ yapısının y-z düzleminde görünüşü Şekil 5.6.’da verilmiştir.



Şekil 5.5. Yarı silindirik engellere sahip sayısal modelin ağ yapısının y-z düzlem kesiti

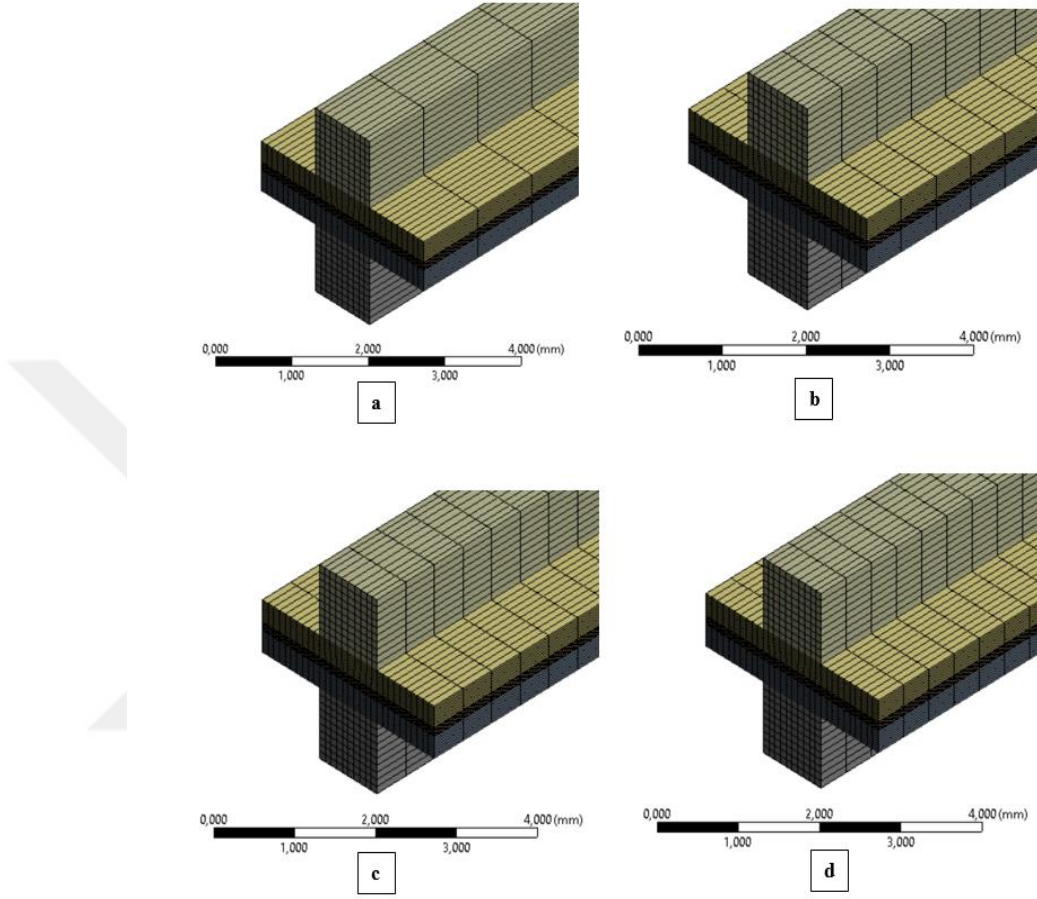


Şekil 5.6. Dikdörtgensel engellere sahip sayısal modelin ağ yapısının y-z düzlem kesiti

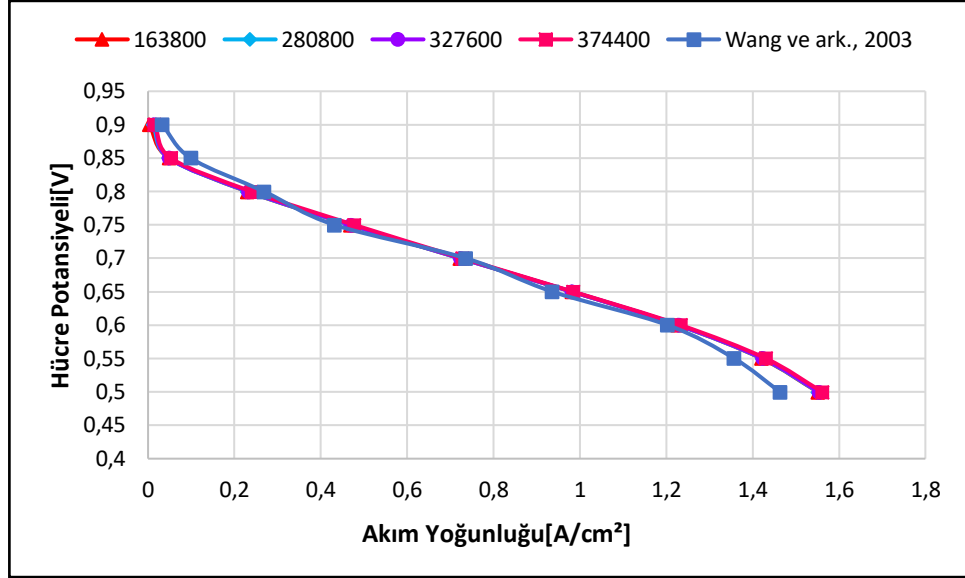
5.3. Sayısal Çözümün Ağ Bağımsızlığı

Sayısal model sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ticari bir yazılımla çözüldüğünden dolayı, eleman sayısının modelin doğruluğu üzerindeki etkisinin incelenmesi gerekir. Sayısal modelde kullanılan farklı ağ yapıları Şekil 5.7.’de gösterilmiştir. Sayısal model 163800, 280800, 327600 ve 374400 eleman kullanılarak çözülmüştür. Şekil 5.8.

sayısal model farklı sayıda çözümlendiğinde akım yoğunluğunun hücre potansiyeline bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 5.8.'e göre sayısal modelin eleman sayısının değiştirilmesi modelin doğruluğunu etkilememiştir.



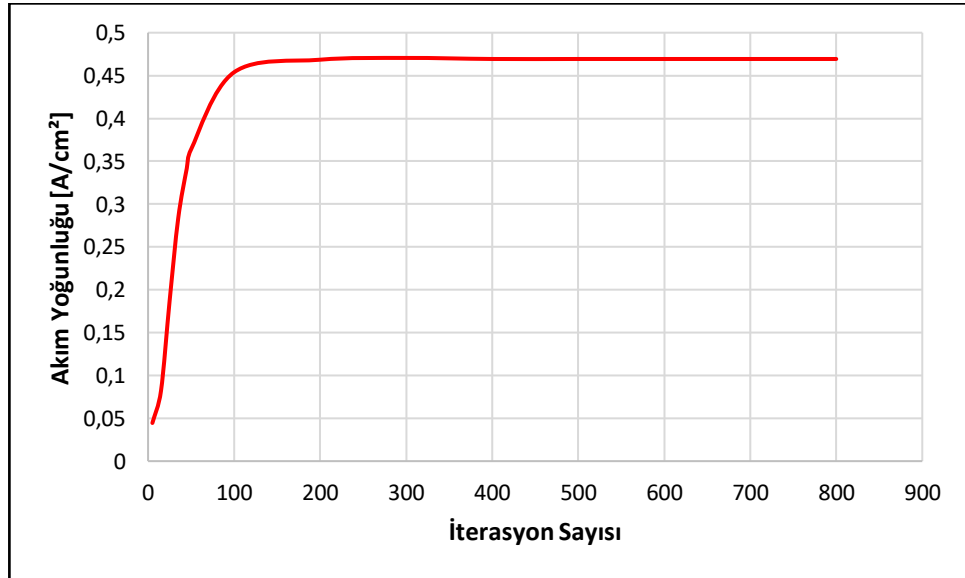
Şekil 5.7. Sayısal modelde kullanılan farklı ağ yapıları, a)163800, b)280800, c)327600, d)374400



Şekil 5.8. Ağ bağımsızlığı

5.4. Sayısal Çözümün İterasyon Bağımsızlığı

Sayısal çözümün iterasyon sayısına bağlı değişimini görebilmek için program 800 iterasyon kadar koşturulmuş, çözümün 300. iterasyon sonunda kalıntıları 10^{-7} değerinde olduğundan sayısal çözüm için yeterli olduğu tespit edilmiştir. Nümerik çözüm 300. iterasyondan sonra değişim göstermediği Şekil 5.9.'da görülmektedir.



Şekil 5.9. Nümerik çözümün iterasyon sayısı ile değişimi

5.5. Sınır Şartları ve Çözüm Metodu

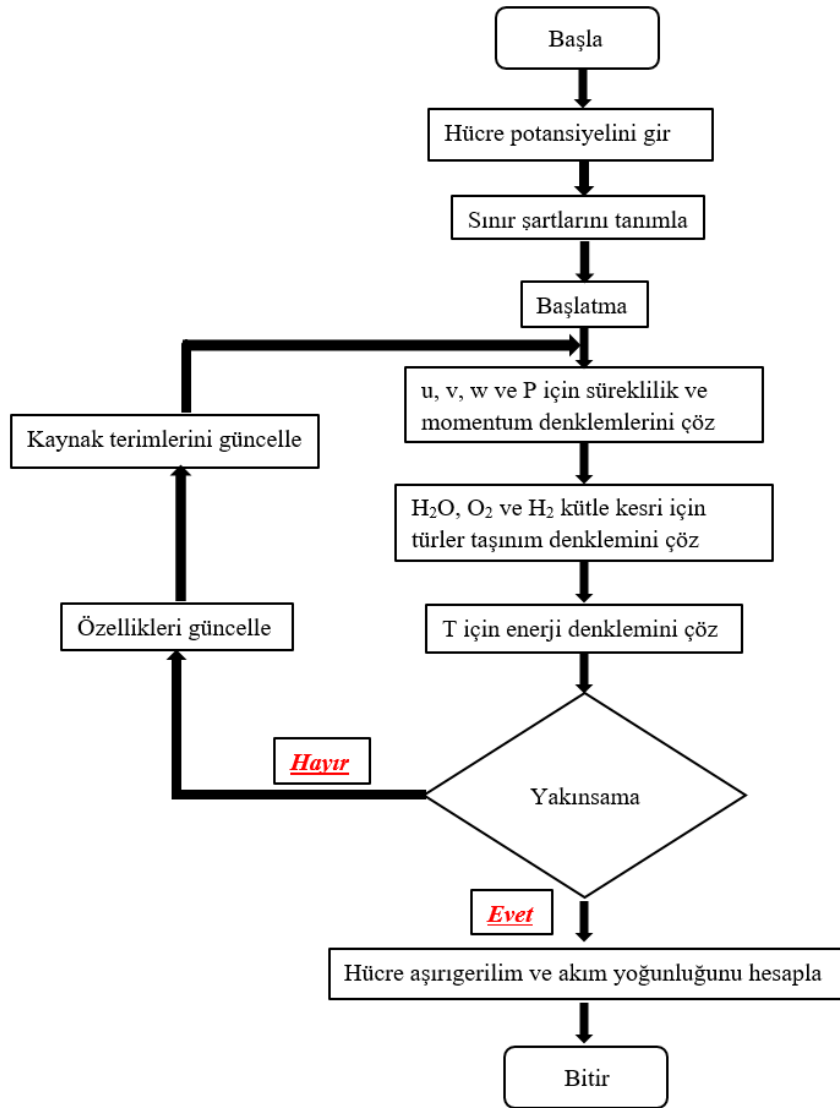
Hazırlanan sayısal modelin anot ve katot gaz akış kanallarının girişinde kütleli debi (mass flow inlet) sınır şartı, gaz akış kanallarının çıkışında basınç tanımlı (pressure outlet) sınır şartı sağlanmıştır. Yakıt hücresinin anot ve katot terminal yüzeylerinde de sabit sıcaklık sınır şartı sağlanmıştır. Tablo 5.2.'de sayısal modelin sınır şartları ve elektrokimyasal özellikleri verilmiştir.

Sonlu hacim yöntemiyle basınç ve hız hesaplamaları için çözüm metodu olarak SIMPLE algoritması kullanılmıştır. SIMPLE algoritması lineer olmayan momentum denklemleri ile taşınım denklemleri arasındaki bağlantı ile ilgili problemleri iteratif bir çözüm yöntemiyle ele almaktadır. İterasyon işleminin kararlılığını sağlayabilmek için rahatlama faktörü kullanılmıştır. Düşük rahatlama faktörleri sayısal çözümü durdurabilir veya yüksek rahatlama faktörleri sayısal çözümde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Sayısal çalışmada rahatlama faktörü basınç için 0,7, momentum için 0,3, protonik potansiyel için 0,95 ve su içeriği için 0,95 kullanılmıştır. PEM yakıt pilinin sayısal analizinde kullanılan çözüm metodu Şekil 5.10.'da verilmiştir. Türler, potansiyel ve doyma denklemlerinde çözümün yakınsaması için Multigrid döngü ayarı F-Cycle ve BCGSTAB (Bi-Conjugate Gradient Stabilization Method) kullanılmıştır. PEM yakıt hücresi modelleme ve analiz işlemleri aşağıdaki sırada takip edilmektedir.

1. Tek kanallı PEM yakıt hücresinin geometrisi ANSYS Design-Modeler, ağ yapısı geliştirilen geometri için ANSYS Meshing kullanılarak oluşturulmuştur.
2. Bölge adları ve türleri, ANSYS FLUENT PEMFC modülünde gerekli olması nedeniyle tanımlanmıştır.
3. Mesh dosyası ANSYS FLUENT'e yüklenir, çalışma ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra program çalıştırılır.
4. İşlem sonunda sonuçlar kayıt edilir.

Tablo 5.2. Sayısal modelin sınır şartları ve elektrokimyasal özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Çalışma Sıcaklığı	323, 333, 343	K
Çalışma Basıncı	200, 300, 400, 500	kPa
Anot Kütle Akış Hızı	6e-07	kg/s
Katot Kütle Akış Hızı	5e-06	kg/s
GDL Gözenekliliği	0,2, 0,3, 0,4, 0,5	-
Anodik Değişim Katsayısı (Anot)	1/2	-
Katodik Değişim Katsayısı (Anot)	1/2	-
Anodik Değişim Katsayısı (Katot)	2	-
Katodik Değişim Katsayısı (Katot)	2	-
Hidrojenin Referans Yayınımı	3e-05	m ² /s
Oksijenin Referans Yayınımı	3e-05	m ² /s
GDL'nin Viskoz Direnci	1e+12	1/m ²
CL'nin Yüzey/Hacim Oranı	200000	1/m

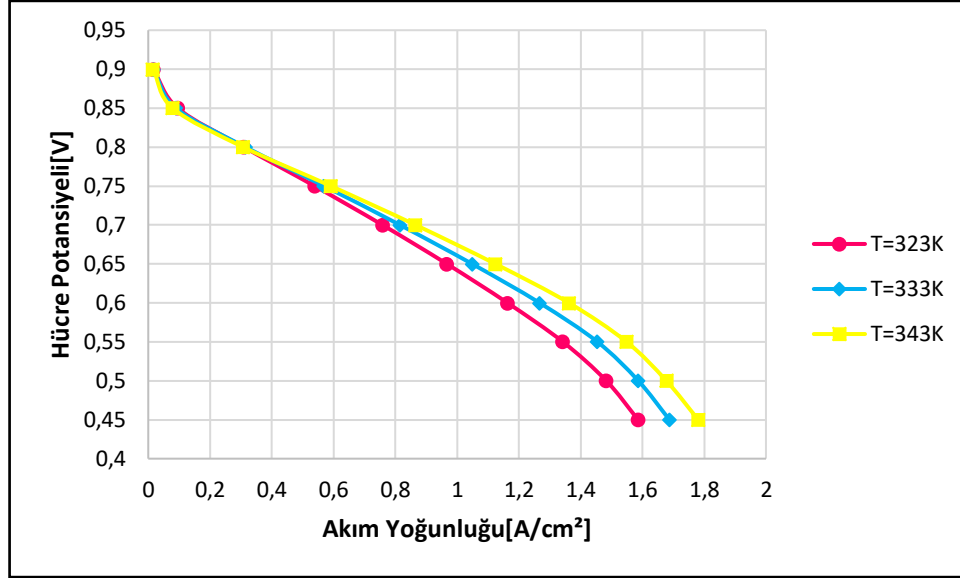


Şekil 5.10. Çözüm metodunun akış diyagramı (Rezazadeh ve Ahmadi, 2015)

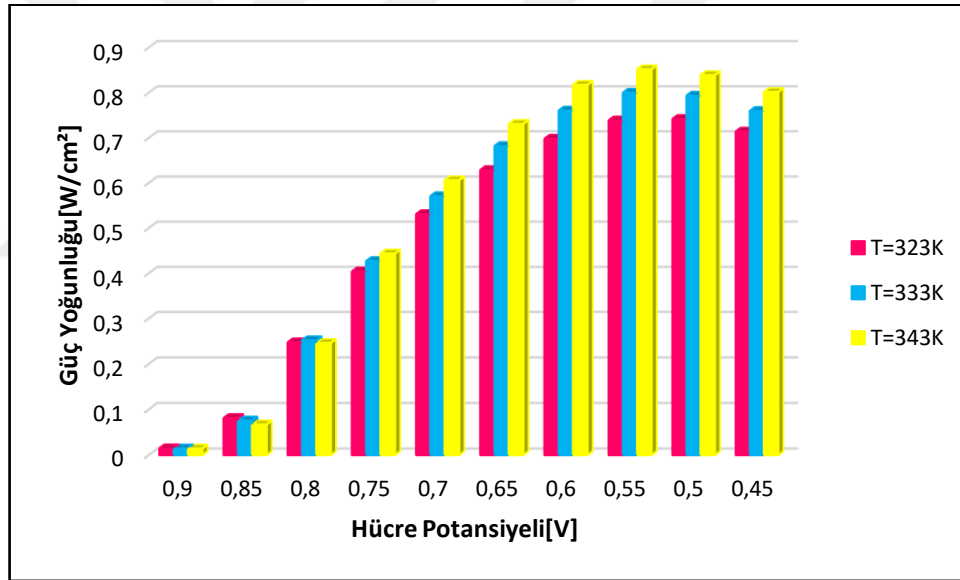
BÖLÜM 6. GELENEKSEL GAZ AKIŞ KANALLI PEM YAKIT HÜCRE MODELİ

6.1. Çalışma Sıcaklığının Etkisi

Çalışma sıcaklığı hücre performansında önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma sıcaklığı üç farklı değer sırasıyla 323 K, 333 K ve 343 K olarak alınmış, her bir sıcaklık değeri için 500 kPa çalışma basıncında sayısal çözümleme yapılmıştır. Çalışma sıcaklığının polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisini görebilmek için toplam 30 farklı sınır şartı FLUENT'te tanımlanmış, her bir hücre potansiyeli 0,45 V, 0,50 V, 0,55 V, 0,60 V, 0,65 V, 0,70 V, 0,75 V, 0,80 V, 0,85 V ve 0,90 V için sayısal analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin hücre potansiyeline bağlı olarak değişimi Şekil 6.1.'de ve güç yoğunluklarının hücre potansiyellerine göre değişimi Şekil 6.2.'deki grafikte gösterilmiştir. En yüksek akım yoğunluğu değerleri hücre potansiyeli 0,45 V-0,75 V arasında çalışma sıcaklığı 343 K olduğu zaman elde edilmiştir. Maksimum akım yoğunluğu değeri hücre potansiyeli 0,45 V olduğu zaman $1,78070 \text{ A/cm}^2$ 'dir. Maksimum akım yoğunluğu değişimi çalışma sıcaklığı 323 K'den 343 K'e çıkarılması ile gözlemlenmiş, değeri % 12,28 olarak hesaplanmıştır. Maksimum güç yoğunluğu hücre potansiyeli 0,55 V olduğu zaman elde edilmiş, değeri $0,85171 \text{ W/cm}^2$ 'dir. Maksimum güç yoğunluğu değişimi hücre voltajı 0,55 V olduğu zaman çalışma sıcaklığı 323 K'den 343 K'e çıkarılması ile gözlemlenmiş, değeri % 15,37'dir. Düşük sıcaklıkta performans gösteren PEM yakıt hücrelerinde sıcaklığın artması, reaksiyon ve kütle transfer hızlarını arttırdığından dolayı belirli bir çalışma sıcaklığına kadar hücre performansını arttırmıştır. . Membranda 353 K ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarında aşırı ısınma meydana gelebilir, bu durum hücre performansını olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 6.1. Sıcaklığın hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi (P=500 kPa, $\epsilon=0.5$)

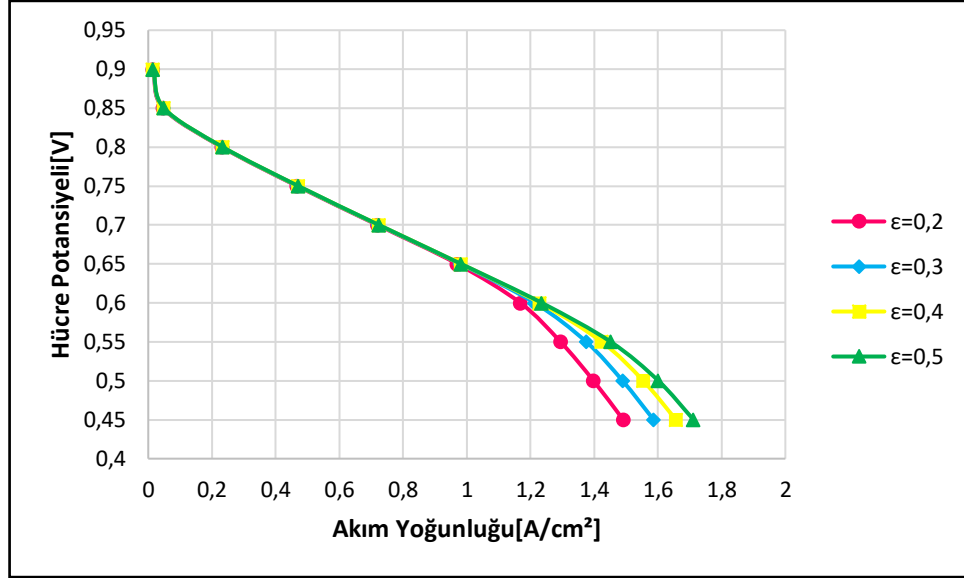


Şekil 6.2. Sıcaklığın hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi (P=500 kPa, $\epsilon=0.5$)

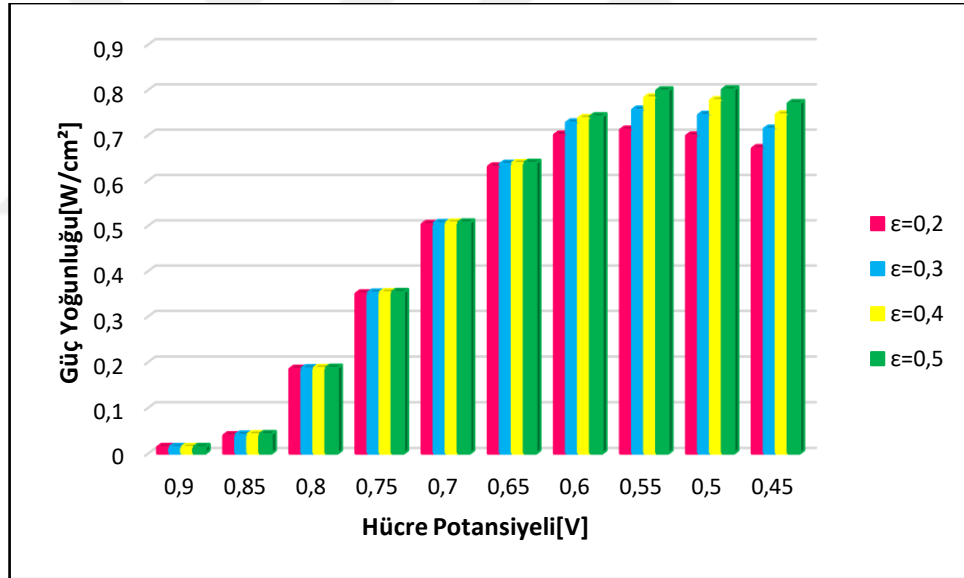
6.2. Gaz Difüzyon Tabakası Gözenekliliğinin Etkisi

Bu bölümde düz kanal geometriye sahip PEM yakıt hücresinin katot tarafındaki gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği dört farklı değer sırasıyla 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,5 olarak alınmış, her bir gözeneklilik değeri için 343 K çalışma sıcaklığında, çalışma basıncı 300 kPa olarak kabul edilip sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Porozitenin polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisini görebilmek için toplam 40 farklı sınır şartı

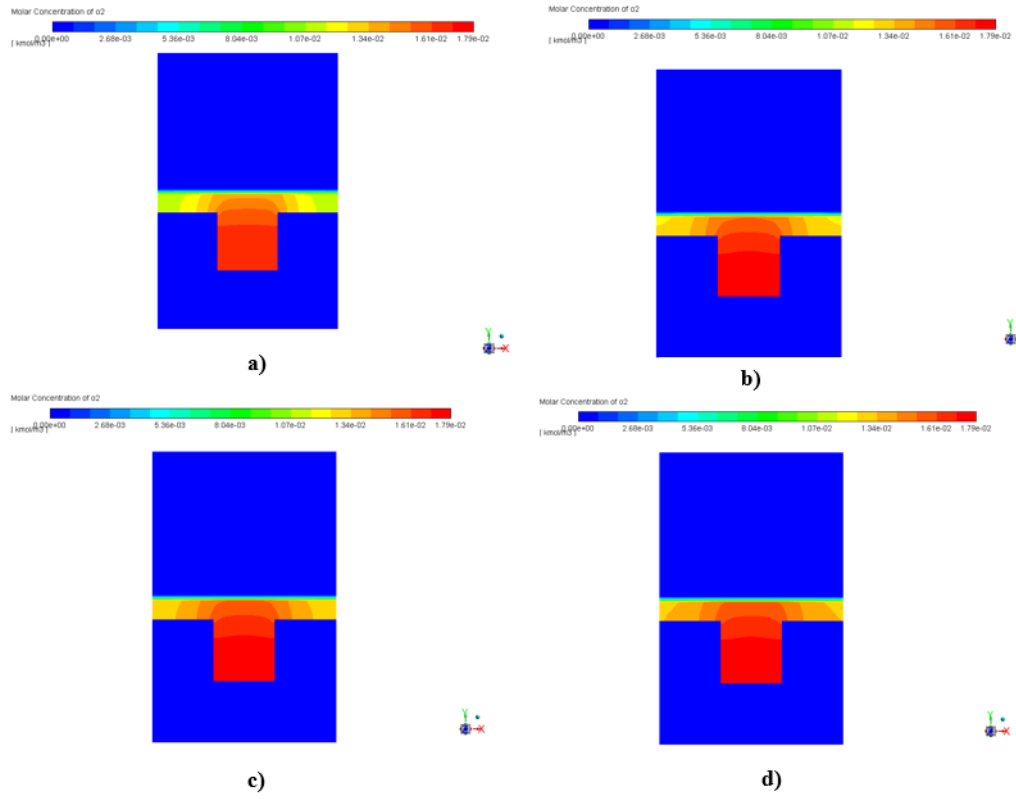
FLUENT'te tanımlanmış, her bir hücre potansiyeli 0,45 V, 0,50 V, 0,55 V, 0,60 V, 0,65 V, 0,70 V, 0,75 V, 0,80 V, 0,85 V ve 0,90 V için sayısal analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin hücre potansiyeline bağlı olarak değişimi Şekil 6.3.'de ve güç yoğunluklarının hücre potansiyellerine göre değişimi Şekil 6.4.'deki grafikte gösterilmiştir. Gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin artmasıyla oksijenin molar konsantrasyonu Şekil 6.5.'e göre artmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlara bakıldığında gaz difüzyon tabakasının porozitesinin artırılması hücre performansını iyileştirmiştir. Bunun sebebi, gaz difüzyon tabakasının porozitesindeki artış katalizör tabakasına geçen reaktant miktarını artırması, reaktant miktarının artması daha fazla kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi ile sonuçlandığından daha iyi bir hücre performansı elde edileceği anlamına gelmektedir. Maksimum akım yoğunluğu gaz difüzyon tabakası porozitesi 0,5 olarak tanımlanıp 0,45 V hücre voltajında elde edilmiş ve değeri $1,71172 \text{ A/cm}^2$ 'dir. Hücre potansiyeli 0,45 V olduğu zaman minimum akım yoğunluğu gaz difüzyon tabakası porozitesi 0,2 olduğu zaman elde edilmiş, değeri $1,49093 \text{ A/cm}^2$ 'dir. Hücre potansiyeli katot terminal duvarında 0, 45 V olarak tanımlandığında maksimum akım yoğunluğu değişimi gaz difüzyon tabakası porozitesinin 0,2'den 0,5'e çıkarılması ile gözlemlenmiş, değeri % 14,81 olarak hesaplanmıştır. Hücre potansiyeli 0,50 V olduğu zaman maksimum güç yoğunluğu gaz difüzyon tabakası porozitesi 0,5 olduğu zaman elde edilmiş, değeri $0,80063 \text{ W/cm}^2$ 'dir. Aynı şekilde minimum güç yoğunluğu gaz difüzyon tabakası 0,2 olduğu zaman elde edilmiş, değeri $0,69889 \text{ W/cm}^2$ 'dir. Hücre potansiyeli katot terminal duvarında 0,50 V olarak tanımlandığında maksimum güç yoğunluğu değişimi gaz difüzyon tabakası porozitesinin 0,2'den 0,5'e çıkarılması ile elde edilmiş, değeri % 14,56 olarak hesaplanmıştır. PEM yakıt hücresinin katot tarafındaki gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin akım yoğunluğu üzerindeki etkisi 0,80 V ve daha yüksek hücre potansiyellerinde oldukça sınırlıdır.



Şekil 6.3. Katot tarafı gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi (P=300 kPa, T=343K)



Şekil 6.4. Katot tarafı gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi (P=300 kPa, T=343K)

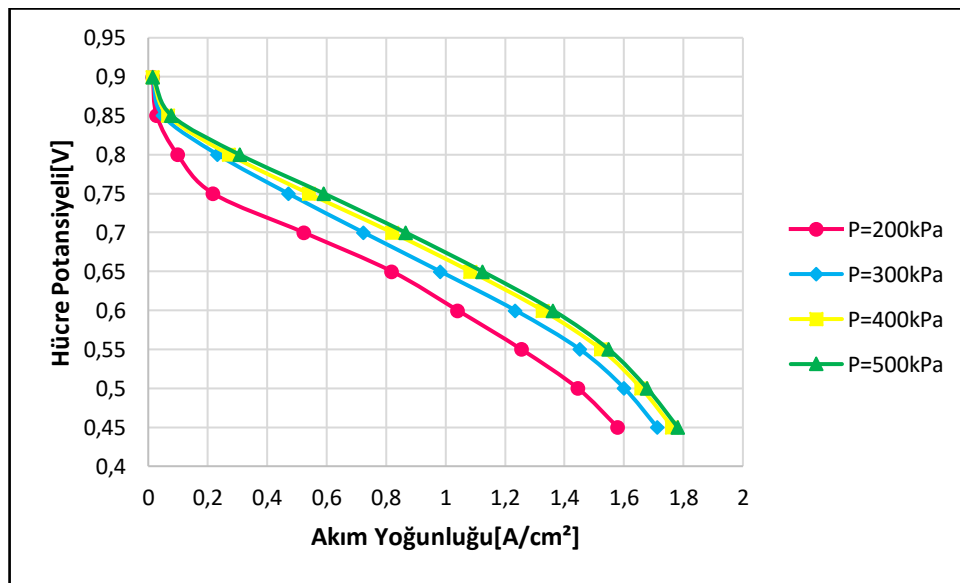


Şekil 6.5. Oksijenin molar konsantrasyon değişiminin x-y düzleminde orta kesitte şematik gösterimi (a) $\varepsilon=0.2$, (b) $\varepsilon=0.3$, (c) $\varepsilon=0.4$, (d) $\varepsilon=0.5$ ($T=343K$, $P=300kPa$)

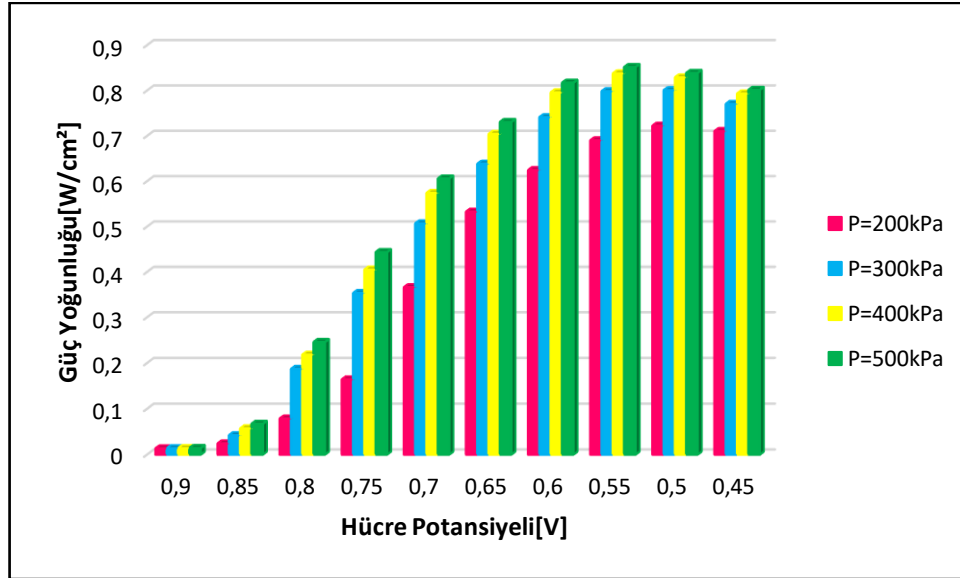
6.3. Çalışma Basıncının Etkisi

PEM yakıt hücresi ortam basıncında veya daha yüksek basınçlarda çalışabilir. Bu bölümde geleneksel, düz kanal geometriye sahip tek hücreli PEM yakıt hücresinin çalışma basıncı dört farklı değer sırasıyla 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa ve 500 kPa olarak alınmış, her bir basınç değeri için 343 K çalışma sıcaklığında, gaz difüzyon tabakası gözenekliliği 0,5 olarak kabul edilip sayısal çözümleme yapılmıştır. Basıncın hücre performansına olan etkisini kolaylıkla anlayabilmemiz için 0,45 V-0,95 V arası 0,05 V artışlarda akım yoğunluğu değerleri kayıt edilip, polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Çalışma basıncının hücre performansı üzerindeki etkisini görebilmek için 40 farklı sınır şartında FLUENT'te PEMFC modülü kullanılarak analiz edilmiş, sonuçlar akım yoğunluğu-hücre potansiyeli (I-V) ve hücre potansiyeli-güç yoğunluğu (V-P) grafiklerinde gösterilmiştir. En yüksek akım yoğunluğu değerleri çalışma basıncı 500 kPa olduğu zaman elde edilmiştir. Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.'deki sayısal

sonuçlara göre çalışma basıncının artması hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte çalışma basıncı arttığında gerekli sıkıştırma gücü artar. Bu yüzden maksimum performans eldesinde çalışma basınç değerindeki artışın sorgulanması gerekmektedir. Maksimum akım yoğunluğu 500 kPa çalışma basıncında, 0,45 V hücre voltajında elde edilmiş ve değeri 1.78070 A/cm²'dir. Maksimum güç yoğunluğu 500 kPa çalışma basıncında, 0,55 V hücre voltajında elde edilmiş, değeri 0,85171 W/cm²'dir. Maksimum akım yoğunluğu değişimi çalışma basıncının 200 kPa'dan 500 kPa'a çıkarılması ile gözlemlenmiş, değeri % 12,78 olarak hesaplanmıştır. Maksimum güç yoğunluğu değişimi 0,55 V hücre potansiyelinde çalışma basıncının 200 kPa'dan 500 kPa'a çıkarılması ile elde edilmiş, değeri % 23,39 olarak hesaplanmıştır. Düşük işletme basıncının akım yoğunluğundaki değişim üzerindeki etkisi diğer işletme basınçlarından daha yüksektir. MEÇ-2 tasarım parametrelerinin kullanıldığı düz kanal geometriye sahip PEM yakıt hücresinde maksimum akım yoğunluğu 500 kPa çalışma basıncında, 0,50 V hücre potansiyelinde elde edilmiş ve değeri 1,52271 A/cm²'dir. Maksimum akım yoğunluğu değişimi çalışma basıncının 200 kPa'dan 500 kPa'a çıkarılması ile gözlemlenmiş, değeri % 21,16'dır. Maksimum güç yoğunluğu 500 kPa çalışma basıncında, 0,55 V hücre potansiyelinde elde edilmiş, değeri 0,76376 W/cm²'dir. Maksimum güç yoğunluğu değişimi 0,55 V hücre potansiyelinde çalışma basıncının 200 kPa'dan 500 kPa'a çıkarılması ile elde edilmiş, değeri % 27,51'dir.



Şekil 6.6. Çalışma basıncının hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi (T=343K, ε=0.5)

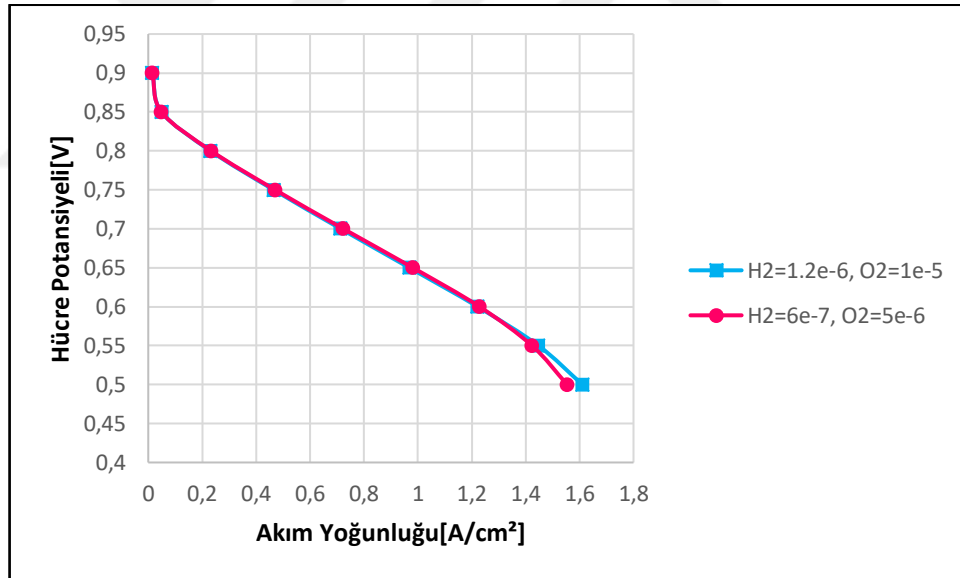


Şekil 6.7. Çalışma basıncının hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi (T=343K, $\epsilon=0.5$)

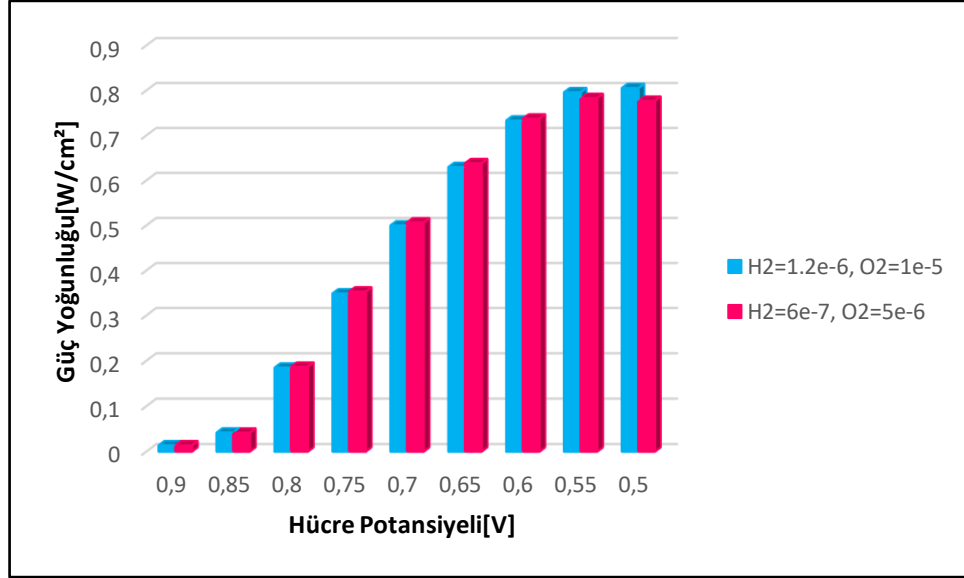
6.4. Kütlesel Debi Etkisi

Bu bölümde ilk adımda kare kanal kesit geometrisine sahip PEM yakıt hücresinin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle debisi 6×10^{-7} kg/s, katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle debisi 5×10^{-6} kg/s olarak belirlenip sayısal çözümleme FLUENT PEMFC modülü vasıtası ile gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki adımda aynı sayısal modelin hem anot hem de katot gaz akış kanalındaki akışkanın kütleli debileri ikiye katına çıkarılmış, kütleli debinin polarizasyon eğrisi üzerindeki etkisini görebilmek için toplam 18 farklı sınır şartı FLUENT'te tanımlanmış, her bir hücre potansiyeli 0,50 V, 0,55 V, 0,60 V, 0,65 V, 0,70 V, 0,75 V, 0,80 V, 0,85 V ve 0,90 V için sayısal analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen akım yoğunluğu değerlerinin hücre potansiyeline bağlı olarak değişimi Şekil 6.8'de ve güç yoğunluklarının hücre potansiyellerine göre değişimi Şekil 6.9.'da grafiklerde gösterilmiştir. Bu çözümler yapılırken her iki durum için de çalışma sıcaklığı 343 K, çalışma basıncı 300 kPa ve anot gaz difüzyon tabakasındaki porozite 0,4, katot gaz difüzyon tabakasındaki porozite de 0,4 olarak alınarak sonuçlar elde edilmiştir. İlk adımdaki işlemde ($H_2=6 \times 10^{-7}$ kg/s, $O_2=5 \times 10^{-6}$ kg/s) maksimum akım yoğunluğu 0,50 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup, değeri 1,55384 A/cm²'dir. Aynı şekilde maksimum güç yoğunluğu 0,50 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup, değeri 0,80521 W/cm²'dir. Bir sonraki işlemde ($H_2=1,2 \times 10^{-6}$ kg/s, $O_2=1 \times 10^{-5}$ kg/s) maksimum

akım yoğunluğu 0,50 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup, değeri 1,61041 A/cm²'dir. Aynı şekilde maksimum güç yoğunluğu 0,55 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup, değeri 0,78293 W/cm²'dir. Maksimum akım yoğunluğu değişimi 300 kPa çalışma basıncında, 0,50 V hücre potansiyelinde, hidrojen kütle debisinin 6×10^{-7} kg/s'den $1,2 \times 10^{-6}$ kg/s'ye aynı şekilde oksijen kütle debisinin de 5×10^{-6} kg/s'den 1×10^{-5} kg/s'ye çıkarılmasıyla elde edilmiş ve değeri % 3,641'dir. Maksimum güç yoğunluğu değişimi 300 kPa çalışma basıncında, 0,50 V hücre potansiyelinde, hidrojen kütle debisinin 6×10^{-7} kg/s'den $1,2 \times 10^{-6}$ kg/s'ye aynı şekilde oksijen kütle debisinin de 5×10^{-6} kg/s'den 1×10^{-5} kg/s'ye çıkarılmasıyla elde edilmiş ve değeri % 3,513'dir. Sayısal sonuçları kısaca özetlemek gerekirse, PEM yakıt hücresinin hem anot hem de katot tarafındaki gaz akış kanallarındaki akışkanın kütle debilerinin ikişer kata çıkarılması hücre performansı üzerinde önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır.



Şekil 6.8. Kütleli debinin hücre performansı üzerindeki etkisinin I-V eğrisi ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)



Şekil 6.9. Kütlesel debinin hücre performansı üzerindeki etkisinin V-P grafiği ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)

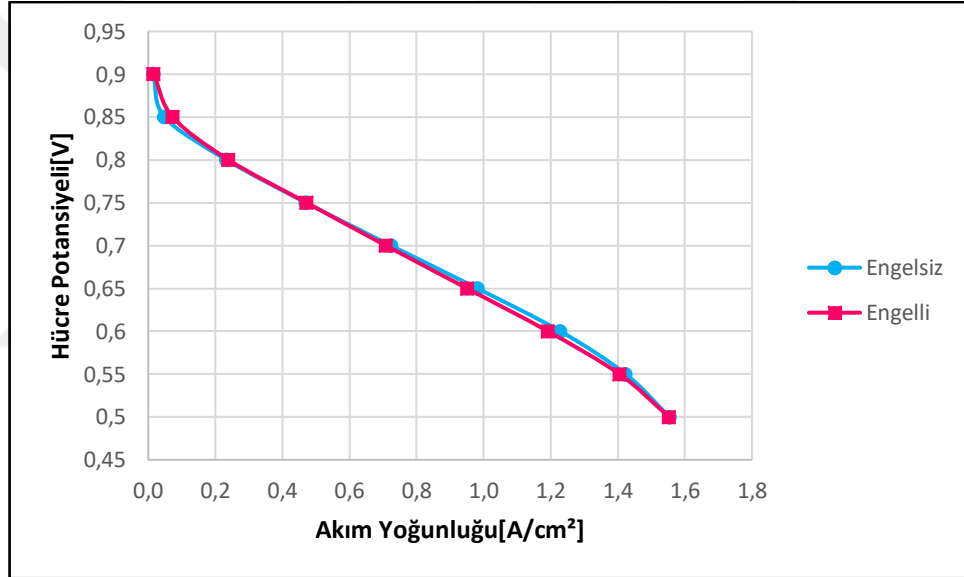
BÖLÜM 7. ENGELLİ GAZ AKIŞ KANALLI PEM YAKIT HÜCRE MODELİ

7.1. Dikdörtgensel Engellerin PEM Yakıt Pil Performansına Etkisi

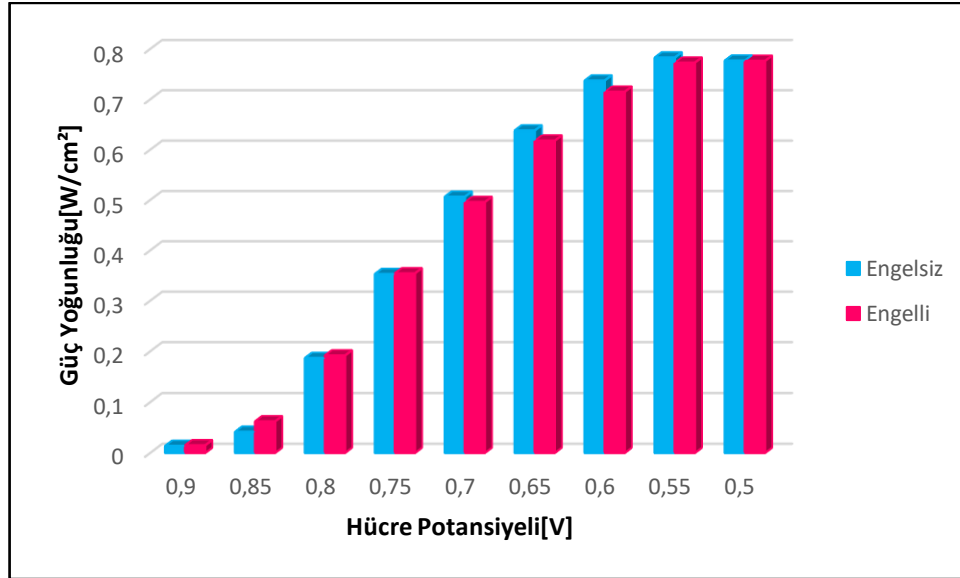
Bu bölümde düz gaz akış kanalına sahip PEM yakıt hücresi ve anot gaz akış kanalında altı engel olan PEM yakıt hücresi modelleri geliştirilmiş, anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle debisi 6×10^{-7} kg/s katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle debisi 5×10^{-6} kg/s olarak belirlenmiştir. Sayısal analizler 300 kPa çalışma basıncında ve 343 K sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal özellikler ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra program 300 iterasyon çalıştırıldıktan sonra yakınsamıştır. Elektrik potansiyel değeri 0,50 V'tan 0,90 V'a 0,05V'luk artışlarla değiştirilmiş, her durum için akım yoğunluğu değerleri kayıt edilmiş ve polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur ve Şekil 7.1.'de gösterilmiştir. Engelli ve engelsiz kanal geometrilerinin güç yoğunluklarının hücre potansiyellerine göre değişimi Şekil 7.2.'de verilmiştir. Gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek belirli hücre potansiyellerinde (0,90 V, 0,85 V, 0,80 V ve 0,75 V) akım yoğunluğu değerlerini arttırmıştır. Maksimum akım yoğunluğu değişimi 0,85 V hücre potansiyelinde elde edilmiş, değeri % 49,266'dır. Tablo 7.1.'de düz gaz akış kanal ve engelli kanal geometrilerinde elde edilen akım yoğunlukları ve değişimleri verilmiştir.

Tablo 7.1. Engelli ve engelsiz gaz akış kanallarının akım yoğunlukları arasındaki ilişkisi

Hücre Potansiyeli[V], Akım Yoğunluğu[A/cm ²], $\dot{m}_{H_2} = 6 \times 10^{-7}$ [kg/s], $\dot{m}_{O_2} = 5 \times 10^{-6}$ [kg/s]			
Hücre Potansiyeli	Akım Yoğunluğu[Engelsiz]	Akım Yoğunluğu[Engelli]	Akım Yoğunluğundaki Değişim[%]
0,90	0,01520	0,01654	8,818
0,85	0,04888	0,07297	49,266
0,80	0,23344	0,23962	2,647
0,75	0,47056	0,47236	0,383



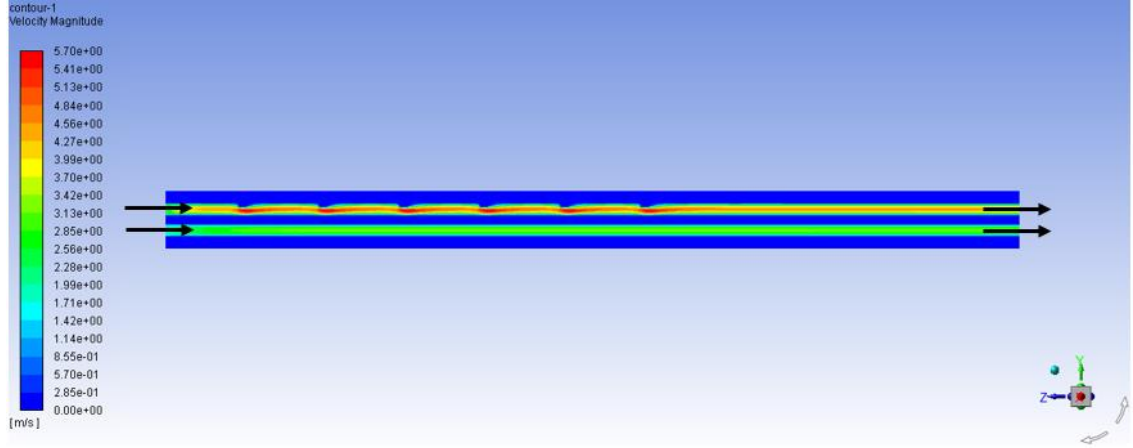
Şekil 7.1. Dikdörtgensel engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının I-V grafiği ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)



Şekil 7.2. Dikdörtgensel engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının V-P grafiği ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)

7.1.1. Hız dağılımı

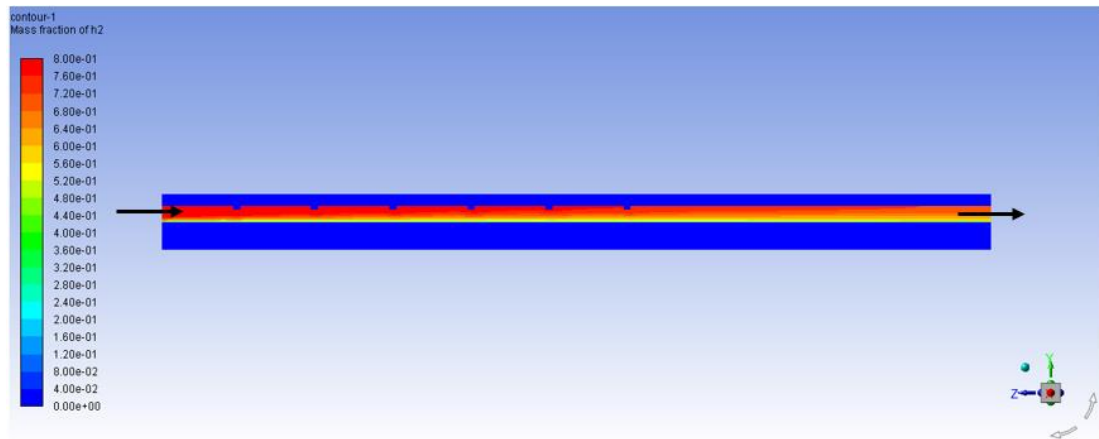
PEM yakıt hücresinin anot gaz akış kanalına 6 dikdörtgen şeklinde engelleyici bloğu yerleştirdikten sonra 0,75 V hücre potansiyelinde bir ticari yazılım olan FLUENT'te çözümlemesi yapıldı ve elde edilen hız dağılımı Şekil 7.3.'de görülmektedir. Altı engelli yakıt pili modelinde anot gaz akış kanalı içerisinde hidrojen hızı 5,70 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Anot gaz akış kanalında hidrojen gazı engelleyici bloğa çarpması ile y yönündeki hızı artmıştır bu durum daha fazla hidrojen ve oksijenin reaksiyona girmesi ile sonuçlanmaktadır. Engelleyici bloğun geometrik şekli, boyutları, engel sayısı katalizör tabakasına nüfuz eden oksijen ve hidrojen miktarını etkilemektedir. Dikdörtgen kesitli engelleyici bloğun boyutları ters akış ve girdap oluşumunu önleyecek şekilde küçük ölçülerde seçilmiş, akış rejiminin laminar olarak kalmasına dikkat edilmiştir. Reaktant miktarının artması hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Katot gaz akış kanalı içerisinde de oksijen hızı 3,70 m/s'ye kadar çıkmaktadır.



Şekil 7.3. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modeldeki gaz akış kanallarının y yönündeki hız alanı

7.1.2. Hidrojen kütle kesri dağılımı

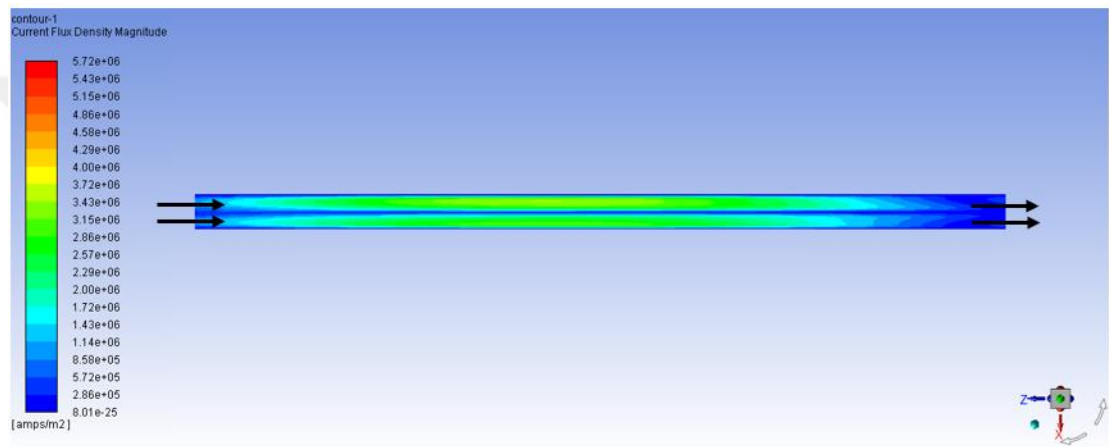
Altı engelli yakıt pili modeli için hidrojen kütle kesri Şekil 7.4.'de görülmektedir. Anot gaz akış kanalında hidrojen kütle kesri kanal giriş kısmında 0,8 oranındadır. Hidrojen gazı zamanla kimyasal reaksiyon esnasında tükeneceğinden dolayı bu oran kanal çıkış kısmında azalacaktır. Hidrojen kesri kanal çıkış kısmında yaklaşık 0,6 oranına kadar düşmektedir. Gaz akış kanalı boyunca oksijen kesri dağılımında önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür.



Şekil 7.4. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modelin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle kesri

7.1.3. Akım yoğunluğu değişimi

Altı engelli yakıt pili modeli 0,75 V hücre potansiyelinde çözümlendikten sonra akım yoğunluğunun gaz akış kanalı boyunca değişimi Şekil 7.5.'de görülmektedir. Gaz akış kanalı giriş kesitinden çıkış kesitine doğru azalan bir akım yoğunluğu elde edilmiştir. Kanal boyunca elde edilen maksimum akım yoğunluğu yaklaşık olarak $3,72 \times 10^6$ A/m²'dir. Akım yoğunluğu kanal çıkış kesitine yakın bölgede $8,01 \times 10^{-25}$ A/m² seviyelerine kadar düşmüştür.

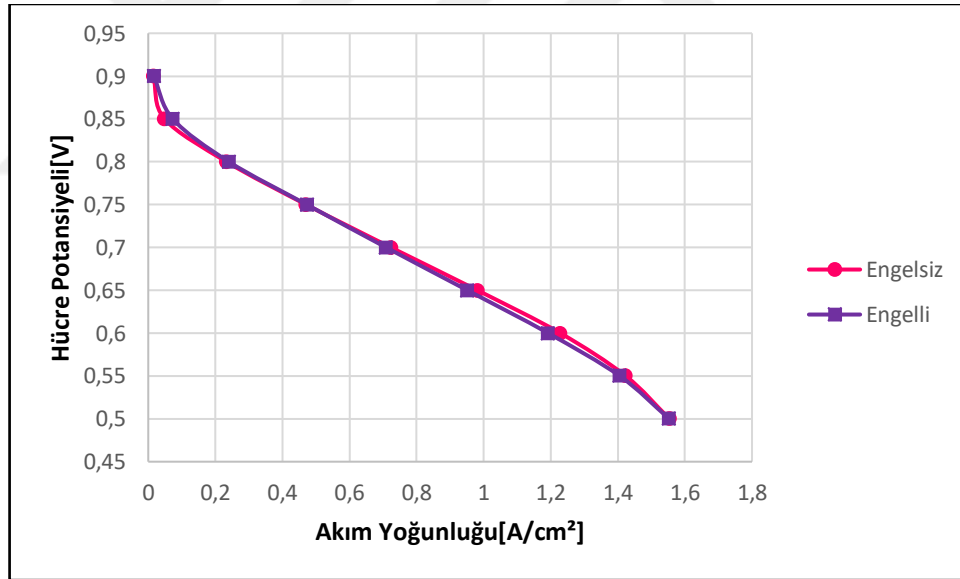


Şekil 7.5. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modelin gaz akış kanallarındaki akım yoğunluğu değişiminin x-z düzleminde gösterimi

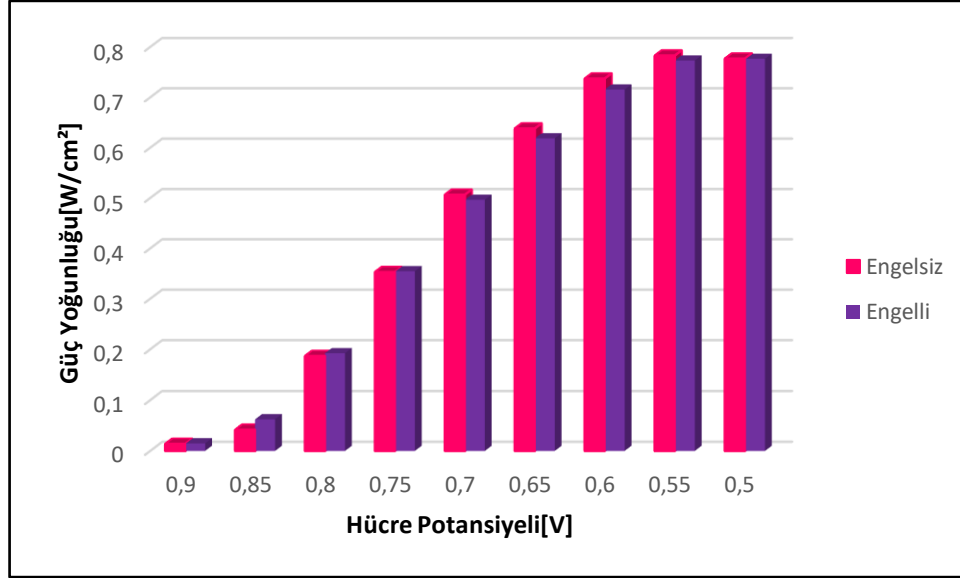
7.2. Yarı Silindirik Engellerin PEM Yakıt Pil Performansına Etkisi

Bu bölümde ilk önce düz, kare kesit kanal geometriye sahip PEM yakıt hücresi modellenmiş, anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle debisi 6×10^{-7} kg/s, katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle debisi 5×10^{-6} kg/s olarak belirlenip FLUENT PEMFC modülü aracılığıyla sayısal olarak çözümlenmiştir. Bir sonraki adımda, anot gaz akış kanalına giriş bölgesine yakın olacak şekilde 6 adet yarı silindirik engelleyici blok yerleştirilmiştir. İlk engelleyici blok 0,3 mm yarıçapında olup, anot gaz akış kanal girişinden 6 mm uzağa yerleştirilmiştir. Engelliyici blok merkezleri arasındaki mesafe 6.6 mm'dir. Geliştirilen yeni sayısal model için de aynı sınır koşulları tanımlanmış, anot gaz akış kanalına engelleyici blok eklemenin hücre performansı üzerindeki etkisi Şekil 7.6. ve Şekil 7.7.'deki polarizasyon eğrilerinde görülmektedir. Çalışma basıncı

300 kPa, çalışma sıcaklığı 343 K, gaz difüzyon tabakası porozitesi 0.4 olarak tanımlanıp sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalına engelleyici blok eklemek engelsiz yapıya kıyasla akım yoğunluğu değerlerini arttırmış, maksimum fark akım yoğunluğu 0,85 V hücre potansiyelinde elde edilmiş, değeri 0,02439 A/cm²'dir. Aynı şekilde maksimum fark güç yoğunluğu 0,85 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup, değeri 0,02073 W/cm²'dir. Maksimum akım yoğunluğu değişimi 300 kPa çalışma basıncında, 0,85 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup değeri % 49,892'dir. Engelli kanal geometrisine sahip PEM yakıt hücresinde maksimum akım yoğunluğu 0,50 V hücre potansiyelinde elde edilmiş, değeri 1,55312 A/cm²'dir. Düz, geleneksel kanal geometriye sahip PEM yakıt hücresinde maksimum akım yoğunluğu 0,50 V hücre potansiyelinde elde edilmiş olup, değeri 1,55384 A/cm²'dir. Tablo 7.2.'de düz gaz akış kanal ve engelli kanal geometrilerinde elde edilen akım yoğunlukları ve değişimleri verilmiştir.



Şekil 7.6. Yarı silindirik engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının I-V grafiği ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)



Şekil 7.7. Yarı silindirik engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının V-P grafiği ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)

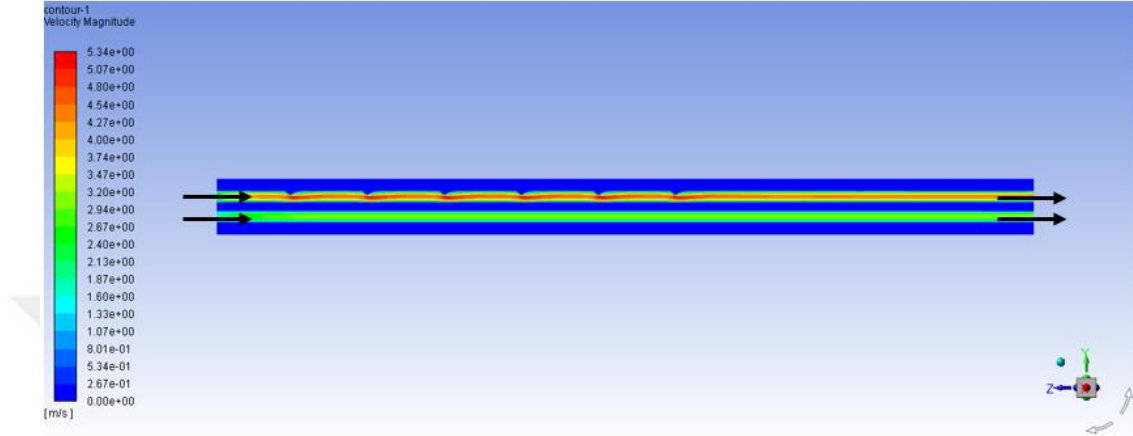
Tablo 7.2. Engelli ve engelsiz gaz akış kanallarının akım yoğunlukları arasındaki ilişkisi

Hücre Potansiyeli[V], Akım Yoğunluğu[A/cm²], $\dot{m}_{H_2} = 6 \times 10^{-7}$ [kg/s], $\dot{m}_{O_2} = 5 \times 10^{-6}$ [kg/s]			
Hücre Potansiyeli	Akım Yoğunluğu[Engelsiz]	Akım Yoğunluğu[Engelli]	Akım Yoğunluğundaki Değişim[%]
0,90	0,01520	0,01658	9,10165
0,85	0,04888	0,07327	49,89233
0,80	0,23344	0,24050	3,02482
0,75	0,47056	0,47289	0,49427

7.2.1. Hız dağılımı

PEM yakıt hücresinin anot gaz akış kanalına 6 yarı silindirik geometride engel yerleştirdikten sonra 0,75 V hücre potansiyelinde bir ticari yazılım olan FLUENT'te çözümlemesi yapıldı ve elde edilen hız dağılımı Şekil 7.8.'de görülmektedir. Altı engelli yakıt pili modelinde anot gaz akış kanalı içerisinde hidrojen hızı 5.34 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Anot gaz akış kanalında hidrojen gazın engelleyici bloğa çarpması ile y yönündeki hızı artmıştır bu durum daha fazla hidrojen ve oksijenin reaksiyona

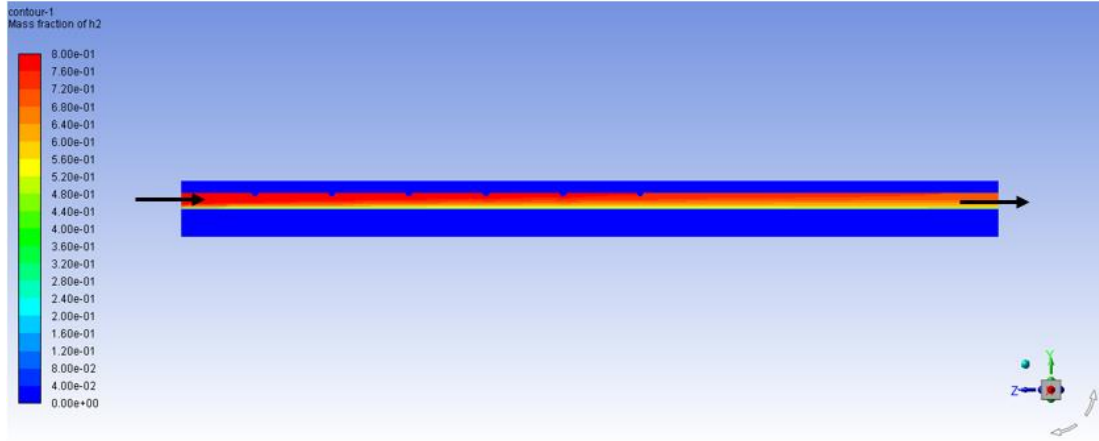
girmesi ile sonuçlanmaktadır. Engelleyici bloğun geometrik şekli, boyutları, engel sayısı katalizör tabakasına nüfuz eden oksijen ve hidrojen miktarını etkilemektedir. Reaktant miktarının artması hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Katot gaz akış kanalı içerisinde de oksijen hızı 3,20 m/s'ye kadar çıkmaktadır.



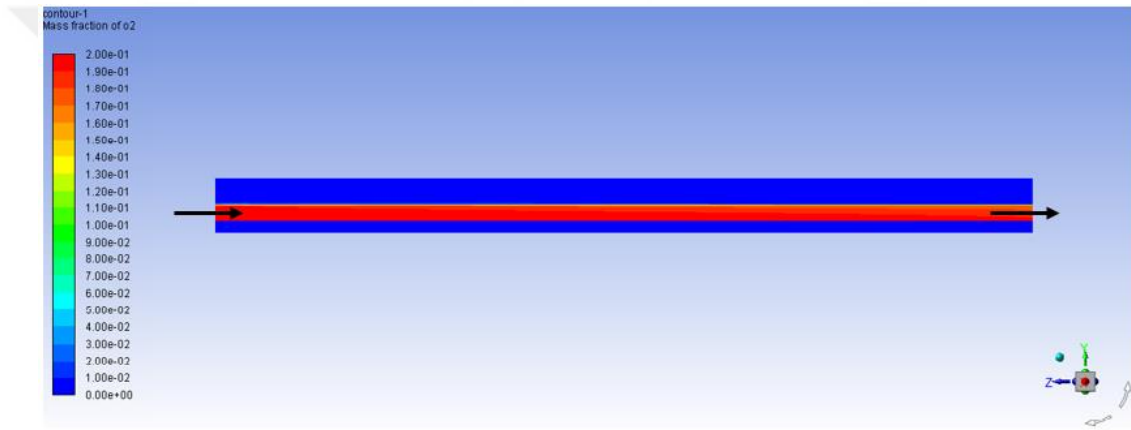
Şekil 7.8. Altı yarı silindirik engelli sayısal modeldeki gaz akış kanallarının y yönündeki hız alanı

7.2.2. Hidrojen kütle kesri dağılımı

Yarı silindirik engelli yakıt pili modeli için hidrojen kütle kesri Şekil 7.9.'da görülmektedir. Anot gaz akış kanalında hidrojen kütle kesri kanal giriş kısmında 0,8 oranındadır. Hidrojen gazı zamanla kimyasal tepkime sırasında tükeneceğinden dolayı bu oran kanal çıkış kısmında azalacaktır. Hidrojen kesri kanal çıkış kısmında yaklaşık 0,56 oranına kadar düşmektedir. Şekil 7.10.'a göre gaz akış kanalı boyunca oksijen kütle kesri dağılımında önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiş, yaklaşık 0,2 oranındadır.



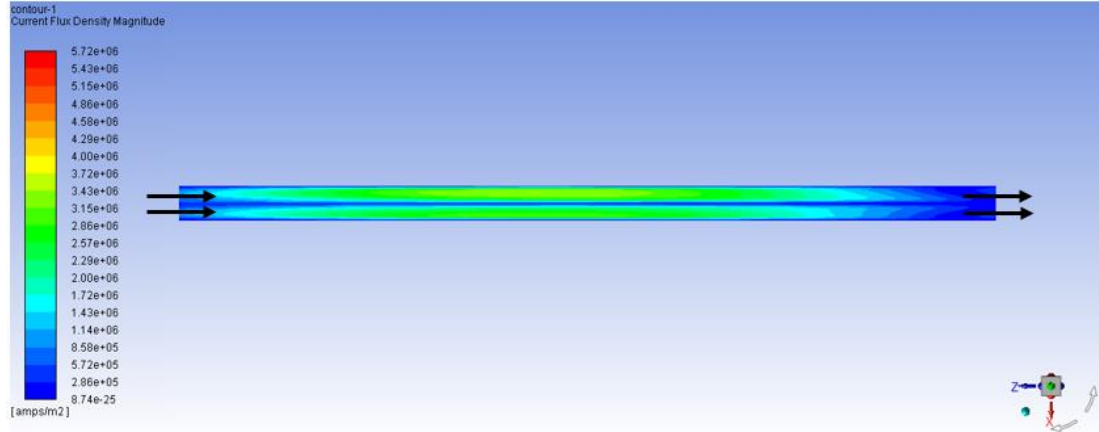
Şekil 7.9. Altı yarı silindirik engelli sayısal modelin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle kesri



Şekil 7.10. Altı yarı silindirik engelli sayısal modelin katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle kesri

7.2.3. Akım yoğunluğu değişimi

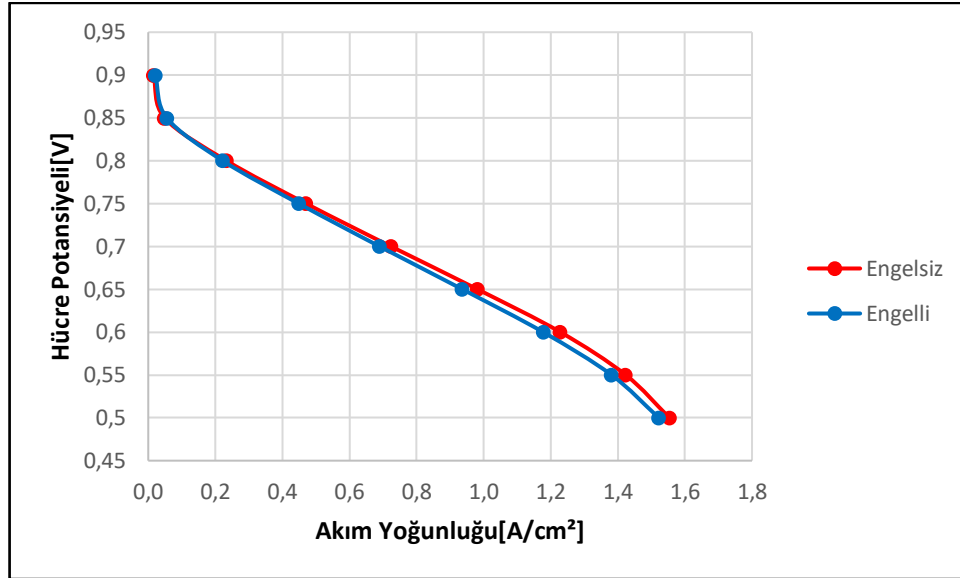
Yarı silindirik engelli yakıt pili modeli 0,75 V hücre potansiyelinde çözümlendikten sonra akım yoğunluğunun gaz akış kanalı boyunca değişimi Şekil 7.11.'de görülmektedir. Gaz akış kanalı giriş kesitinden çıkış kesitine doğru azalan bir akım yoğunluğu elde edilmiştir. Kanal boyunca elde edilen maksimum akım yoğunluğu yaklaşık olarak $5,72 \times 10^6$ A/m²'dir. Akım yoğunluğu kanal çıkış kesitine doğru $8,74 \times 10^{-25}$ A/m² seviyelerine kadar düşmüştür.



Şekil 7.11. Altı yarı silindirik engelli sayısal modelin gaz akış kanallarındaki akım yoğunluğu değişiminin x-z düzleminde gösterimi

7.3. Dokuz Engelli PEM Yakıt Hücre Modeli

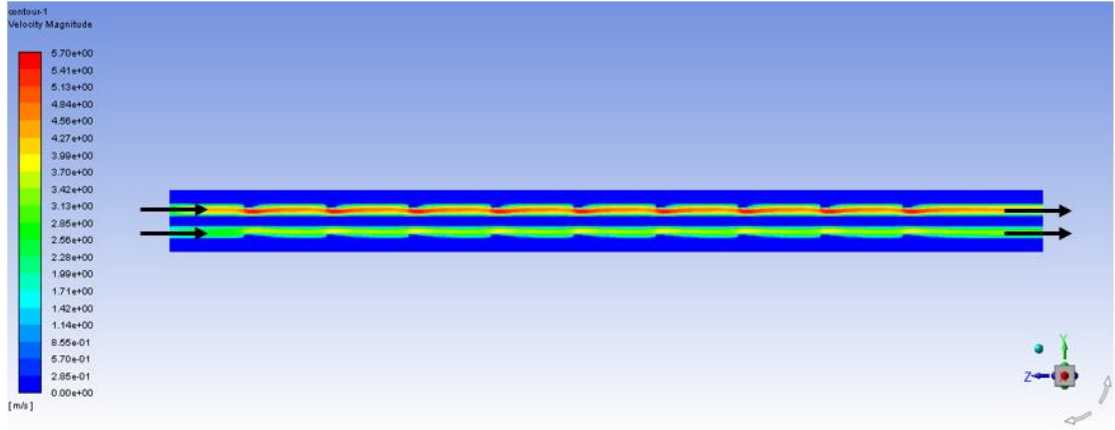
Bu bölümde düz gaz akış kanalına sahip PEM yakıt hücresi ve hem anot hem de katot gaz akış kanalında dokuz engel olan PEM yakıt hücresi modelleri geliştirilmiş, anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle debisi 6×10^{-7} kg/s katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle debisi 5×10^{-6} kg/s olarak belirlenmiştir. Sayısal analizler 300 kPa çalışma basıncında ve 343 K sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal özellikler ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra program 300 iterasyon çalıştırıldıktan sonra yakınsamıştır. Elektrik potansiyel değeri 0,50 V'tan 0,90 V'a 0,05V'luk artışlarla değiştirilmiş, her durum için akım yoğunluğu değerleri kayıt edilmiş ve polarizasyon eğrileri oluşturulmuş ve Şekil 7.12.'de verilmiştir. Hem anot hem de katot gaz akış kanalına fazla sayıda engel eklemek hücre performansını olumsuz yönde etkilemiştir.



Şekil 7.12. Dikdörtgensel engelli ve düz kanal geometrilerinin performans karşılaştırılmasının I-V grafiği ile gösterimi (T=343K, P=300 kPa)

7.3.1. Hız dağılımı

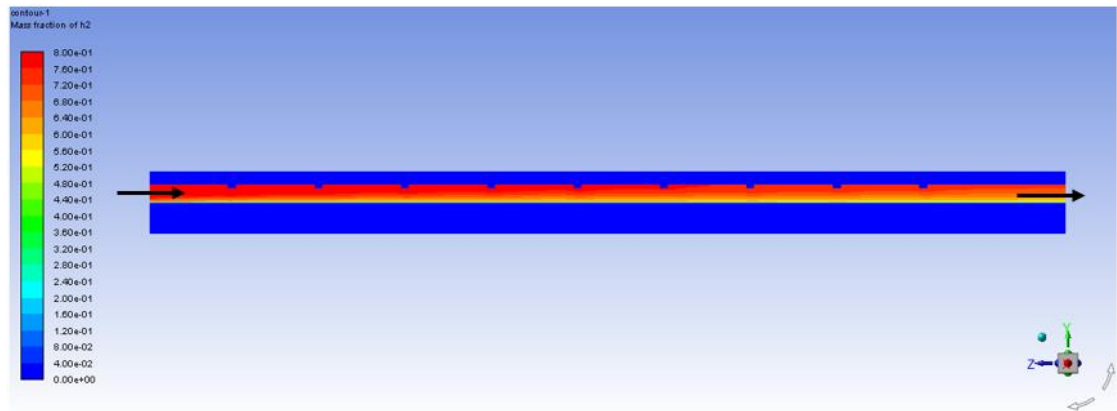
PEM yakıt hücresinin hem anot hem de katot gaz akış kanalına 9 dikdörtgen şeklinde engelleyici bloğu yerleştirdikten sonra 0,75 V hücre potansiyelinde bir ticari yazılım olan FLUENT'te çözümlemesi yapıldı ve elde edilen hız dağılımı Şekil 7.13.'de görülmektedir. Dokuz engelli yakıt pili modelinde anot gaz akış kanalı içerisinde hidrojen hızı 5,70 m/s'ye kadar çıkmaktadır. Anot gaz akış kanalında hidrojen gazı engelleyici bloğa çarpması ile y yönündeki hızı artmıştır bu durum daha fazla hidrojen ve oksijenin reaksiyona girmesi ile sonuçlanmaktadır. Engelleyici bloğun geometrik şekli, boyutları, engel sayısı katalizör tabakasına nüfuz eden oksijen ve hidrojen miktarını etkilemektedir. Dikdörtgen kesitli engelleyici bloğun boyutları ters akış ve girdap oluşumunu önleyecek şekilde küçük ölçülerde seçilmiş, akış rejiminin laminar olarak kalmasına dikkat edilmiştir. Reaktant miktarının artması hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Katot gaz akış kanalı içerisinde de oksijen hızı 3,99 m/s'ye kadar çıkmaktadır.



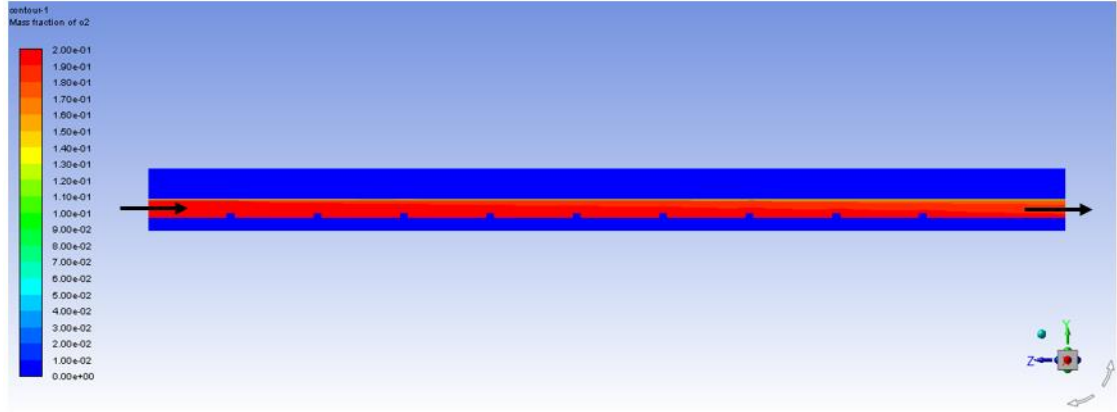
Şekil 7.13. Dokuz engelli sayısal modeldeki gaz akış kanallarının y yönündeki hız alanı

7.3.2. Hidrojen ve oksijen kütle kesri dağılımı

Dokuz engelli yakıt pili modeli için hidrojen kütle kesri Şekil 7.14.'de görülmektedir. Anot gaz akış kanalında hidrojen kütle kesri kanal giriş kısmında 0,8 oranındadır. Hidrojen gazı zamanla kimyasal reaksiyon esnasında tükeneceğinden dolayı bu oran kanal çıkış kısmında azalacaktır. Hidrojen kesri kanal çıkış kısmında yaklaşık 0,6 oranına kadar düşmektedir. Katot gaz akış kanalında oksijen kütle kesri kanal boyunca 0,2 oranında sabit kalmıştır. Kanal çıkışına doğru bu oran yaklaşık 0,19 oranına kadar düşmektedir ve Şekil 7.15.'de verilmiştir. Oksijen konsantrasyonu kimyasal reaksiyon esnasında azalacaktır bu yüzden kanal çıkışına doğru azalması beklenen bir durumdur. Gaz akış kanalı boyunca oksijen kütle kesri dağılımında önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir.



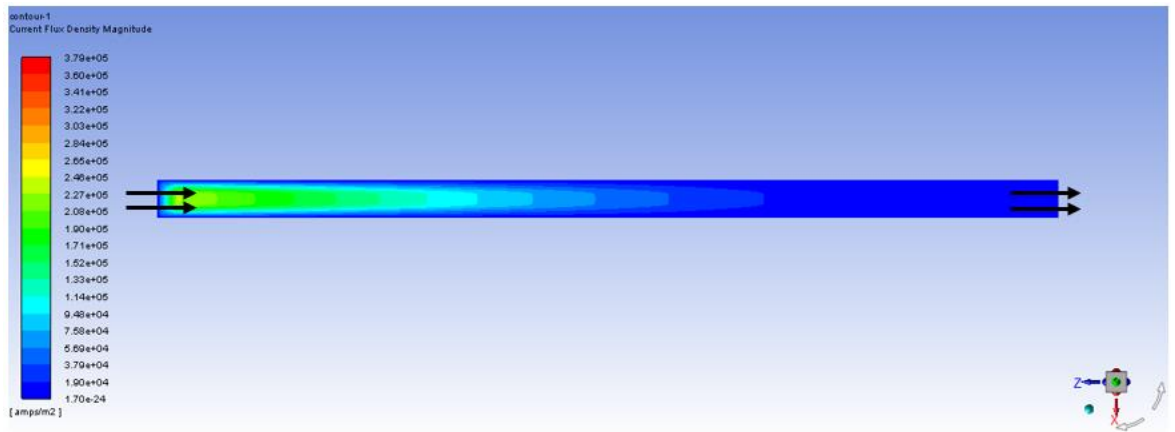
Şekil 7.14. Dokuz engelli sayısal modelin anot gaz akış kanalındaki hidrojen kütle kesri



Şekil 7.15. Dokuz engelli sayısal modelin katot gaz akış kanalındaki oksijen kütle kesri

7.3.3. Akım yoğunluğu değişimi

Dokuz engelli yakıt pili modeli 0,75 V hücre potansiyelinde çözümlendikten sonra akım yoğunluğunun gaz akış kanalı boyunca değişimi Şekil 7.16.'da görülmektedir. Gaz akış kanalı giriş kesitinden çıkış kesitine doğru azalan bir akım yoğunluğu elde edilmiştir. Kanal boyunca elde edilen maksimum akım yoğunluğu yaklaşık olarak $3,79 \times 10^5$ A/m²'dir. Akım yoğunluğu kanal çıkış kesitine yakın bölgede $1,70 \times 10^{-24}$ A/m² seviyelerine kadar düşmüştür.



Şekil 7.16. Dokuz engelli sayısal modelin gaz akış kanallarındaki akım yoğunluğu değişiminin x-z düzleminde gösterimi

BÖLÜM 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ticari bir HAD paketi, ANSYS FLUENT 18.1 PEM yakıt hücresi ek modülü kullanılarak PEM yakıt hücresinin sayısal modeli geliştirilmiştir. Sayısal model literatürden Wang ve ark. (2003) çalıştıkları modelin tasarım ve elektrokimyasal parametreleri kullanılarak geliştirilmiş, modelin doğruluğu açısından iki model karşılaştırılmış, sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın ilk kısmında düz kanallı PEM yakıt hücresinin çalışma parametrelerinin ve gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin değiştirilmesiyle bu parametrelerin hücre performansına olan etkileri araştırılmıştır.

Membran yeterli miktarda nemlendirildiği zaman çalışma sıcaklığının artmasıyla etkin bir hücre performansı elde edilmiştir. Sıcaklık aralığı 323 K-343 K olarak alınmıştır. Çalışma sıcaklığının yüksek olması membranda aşırı ısınmaya sebep olacaktır, bu da hücre performansını olumsuz yönde etkileyecektir. Çalışma sıcaklığı 343 K, hücre potansiyeli 0,55 V olduğunda maksimum güç yoğunluğu 0,85171 W/cm² olarak elde edilmiştir. Gaz difüzyon tabakasının gözeneklilik aralığı 0,1'lik artışlarla 0,2-0,5 arasında seçilmiştir. Gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin artması hücre performansını iyileştirmiştir. Çalışma sıcaklığı 343 K ve gözeneklilik değeri 0,5 olduğunda maksimum güç yoğunluğu 0,80063 W/cm² olarak elde edilmiştir. Sonuçlar, PEM yakıt hücresinin katot tarafındaki gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisinin 0,80 V ve daha yüksek çalışma voltajlarında önemli ölçüde kısıtlandığını göstermektedir. Çalışma basıncı 200'den 500 kPa'a yükseldikçe, akım yoğunluğu değerleri artmaktadır. Akım yoğunlukları, elektrik potansiyelleri 0,50 V'dan 0,90 V'a 0,05 V'lik artışlarla değiştirilerek ölçülmüş, akım yoğunluğunun hücre potansiyeline bağlı değişimlerini gösteren polarizasyon grafikleri oluşturulmuştur. PEM yakıt hücresinin hem anot hem de katot tarafındaki gaz akış

kanallarındaki akışkanın kütle debilerinin ikişer kata çıkarılması hücre performansı üzerinde önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır.

Çalışmanın diğer aşamasında yüksekliği 0,3 mm, uzunluğu 0,6 mm olan dikdörtgen şeklinde ve 0,3 mm yarıçapında yarı silindirik geometride engeller gaz akış kanalına eklenmiş, hücre performansına etkileri araştırılmıştır. Altı dikdörtgensel engelli sayısal modelde engelsiz geometriye kıyasla maksimum akım yoğunluğu değişimi % 49,266 olarak elde edilmiştir. Aynı şekilde altı yarı silindirik engelli sayısal modelde engelsiz geometriye kıyasla elde edilen maksimum akım yoğunluğu değişimi % 49,892'dir. Gaz akış kanalına farklı geometride engel yerleştirmek sonuçlarda önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Polarizasyon eğrilerinin yüksek hücre potansiyellerinde yarı silindirik veya dikdörtgensel engelleri olan gaz akış kanal geometrisi için akım yoğunluk değerlerinin daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Ancak, dokuz dikdörtgensel engelli sayısal modelde gaz akış kanalına fazla sayıda engel eklemek performansı olumsuz yönde etkilemiştir.

PEM yakıt hücresinin gaz akış kanalına belli bir sayının üzerinde engel eklemek türbülans etkisi oluşturabilir. Bu yüzden ileride yapılacak çalışmalarda, sayısal model laminar olarak değil türbülans etkisi göz önüne alınarak çözümlenmesi gerekmektedir. Optimum hücre performansı elde edebilmek için gaz akış kanalına yerleştirilen engel sayısının optimizasyonunun yapılması gerekmektedir. Ayrıca, bu engellerin boyutları, geometrileri, dizilişlerinin hücre performansını nasıl etkilediği konusunda farklı çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Afshari, E., Mosharaf-Dehkordi, M. and Rajabian, H. (2017) 'An investigation of the PEM fuel cells performance with partially restricted cathode flow channels and metal foam as a flow distributor', *Energy*. Elsevier Ltd, 118, pp. 705–715.
- Ahmadi, N. et al. (2016) 'Analysis of the operating pressure and GDL geometrical configuration effect on PEM fuel cell performance', *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 38(8), pp. 2311–2325.
- Ahmed, D. H. and Sung, H. J. (2006) 'Effects of channel geometrical configuration and shoulder width on PEMFC performance at high current density', *Journal of Power Sources*, 162(1), pp. 327–339.
- Andújar, J. M. and Segura, F. (2009) 'Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), pp. 2309–2322.
- Barbir, F. 2005. *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, Academic Press.
- Bilgili, M. 2011. Akış kanalları içerisindeki yarı silindirik blokların PEM yakıt pili performansına etkisinin üç boyutlu analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Bilgili, M., Bosomoiu, M. and Tsotridis, G. (2015) 'Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 40(5), pp. 2303–2311.
- Biyikoglu, A. and Oztoprak, H. (2012) 'Enhancement of cell characteristics via baffle blocks in a proton exchange membrane fuel cell', *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 37(2), pp. 207–222.
- Caglayan, D. G. et al. (2016) 'Three-dimensional modeling of a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell at different operation temperatures', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 41(23), pp. 10060–10070.
- Carcadea, E. et al. (2018) 'ScienceDirect Influence of catalyst structure on PEM fuel cell performance e A numerical investigation', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, (xxxx), pp. 1–13.
- Çelik, D. and Yıldız, M. (2017) 'Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), pp. 23395–23401.

- Chowdhury, M. Z., Genc, O. and Toros, S. (2018) 'Numerical optimization of channel to land width ratio for PEM fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 43(23), pp. 10798–10809.
- Das, D. (2002) 'Hydrogen production by biological processes: a survey of literature', *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(1), pp. 13–28.
- Dawes, J. E. et al. (2009) 'Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells : An investigation into the effects of water flooding', 64.
- Dincer, I. and Acar, C. (2014) 'Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 40(34), pp. 11094–11111.
- Ekiz, A., Camcı, T., Türkmen, İ., Sankır, M., Uslu, S., Baker D., Ağar E. 2011. PEM tipi yakıt pilleri için çift kutuplu akış plakalarının modellenmesi., 26(3), pp. 591-605.
- Freire, L. S. et al. (2014) 'Influence of operational parameters on the performance of PEMFCs with serpentine flow field channels having different (rectangular and trapezoidal) cross-section shape', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 39(23), pp. 12052–12060.
- Ghanbarian, A. and Kermani, M. J. (2016) 'Enhancement of PEM fuel cell performance by flow channel indentation', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 110, pp. 356–366.
- Gou, B., Na, W., Diong, B. (2010) *Fuel cells modeling, control and applications*, CRC press.
- Hashemi, F., Rowshanzamir, S. and Rezakazemi, M. (2012) 'CFD simulation of PEM fuel cell performance : Effect of straight and serpentine flow fields', *Mathematical and Computer Modelling*. Elsevier Ltd, 55(3–4), pp. 1540–1557.
- Havaej, P. et al. (2018) 'A numerical modeling study on the influence of catalyst loading distribution on the performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 43(21), pp. 10031–10047.
- Heidary, H., Jafar Kermani, M. and Khajeh-Hosseini-Dalasm, N. (2016) 'Performance analysis of PEM fuel cells cathode catalyst layer at various operating conditions', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 41(47), pp. 22274–22284.
- Heidary, H., Kermani, M. J. and Dabir, B. (2016) 'Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 124, pp. 51–60.
- Jeon, D. H. et al. (2008) 'The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance', *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(3), pp. 1052–1066.
- Jourdani, M., Mounir, H. and Marjani, A. (2017) 'Three-Dimensional PEM Fuel Cells Modeling using COMSOL Multiphysics', 11(4), pp. 427–442.
- Jung, H. M. et al. (2004) 'Numerical analysis of a polymer electrolyte fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(9), pp. 945–954.

- Kahveci, E. E. and Taymaz, I. (2014) 'ScienceDirect Experimental investigation on water and heat management in a PEM fuel cell using response surface methodology', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 39(20), pp. 10655–10663.
- Kahveci, E. E. and Taymaz, I. (2018) 'Assessment of single-serpentine PEM fuel cell model developed by computational fluid dynamics', *Fuel*. Elsevier, 217(December 2017), pp. 51–58.
- Kerkoub, Y. et al. (2018) 'Channel to rib width ratio in fl uence with various fl ow fi eld designs on performance of PEM fuel cell', *Energy Conversion and Management*. Elsevier, 174(May), pp. 260–275.
- Khazaei, I. (2013) 'Effect of placing different obstacles in flow fields on performance of a PEM fuel cell: Numerical investigation and experimental comparison', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 49(9), pp. 1287–1298.
- Khazaei, I., Ghazikhani, M. and Mohammadiun, M. (2012) 'Sharif University of Technology Experimental and thermodynamic investigation of a triangular channel geometry PEM fuel cell at different operating conditions', *Scientia Iranica*. Elsevier B.V., 19(3), pp. 585–593.
- Kone, J. P. et al. (2018) 'CFD modeling and simulation of PEM fuel cell using OpenFOAM', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 145, pp. 64–69.
- Kreesaeng, S., Chalermisinsuwan, B. and Piumsomboon, P. (2015) Effect of Channel Designs on Open-Cathode PEM Fuel Cell Performance: A Computational Study, *Energy Procedia*. Elsevier B.V.
- Kuo, J. and Chen, C. (2007) 'The effects of buoyancy on the performance of a PEM fuel cell with a wave-like gas flow channel design by numerical investigation', 50, pp. 4166–4179.
- Kuo, J. K., Yen, T. S. and Chen, C. K. (2008) 'Improvement of performance of gas flow channel in PEM fuel cells', *Energy Conversion and Management*, 49(10), pp. 2776–2787.
- Li, W. et al. (2017) 'Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEMFCs', *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 195, pp. 278–288.
- Liu, X. et al. (2006) 'Three-dimensional transport model of PEM fuel cell with straight flow channels', *Journal of Power Sources*, 158(1), pp. 25–35.
- Lobato, J. et al. (2010) 'Three-dimensional model of a 50 cm² high temperature PEM fuel cell . Study of the flow channel geometry influence', 35, pp. 5510–5520.
- Loganathan, C. et al. (2014) 'Numerical Studies on PEM Fuel Cell with Different Landing to Channel Width of Flow Channel', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 97, pp. 1534–1542.
- Maiyalagan, T. and Pasupathi, S. (2010) Components for PEM Fuel Cells: An Overview, *Materials Science Forum*.
- Mehta, V. and Cooper, J. S. (2003) 'Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing', *Journal of Power Sources*, 114(1), pp. 32–53.

- Monsaf, T., Moussa, B. and Youcef, S. (2017) 'ScienceDirect Unsteady three-dimensional numerical study of mass transfer in PEM fuel cell with spiral flow field', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 42(2), pp. 1237–1251.
- Özdoğan, M. 2018. Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt pillerinin performans karakteristiklerinin sayısal incelenmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Öztürk, H. 2013. Yenilenebilir Enerji Kaynakları, 1.Cilt. Birsen Yayınevi, 1-428.
- Rezaie, N., Arefian, A., Kermani, M., Noughabi, A., Abdollahzadeh, M. (2017) 'Effect of flow field with converging and diverging channels on proton exchange membrane fuel cell performance', *Energy Conversion and Management*, 152(2017), pp. 31–44.
- Rezazadeh, S. and Ahmadi, N. (2015) 'Numerical investigation of gas channel shape effect on proton exchange membrane fuel cell performance', *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 37(3), pp. 789–802.
- Schwarz, D. H. and Djilali, N. (2007) 'Effects of Transport Limitations'.
- Shen, J. et al. (2018) 'Performance investigation of PEMFC with rectangle blockages in Gas Channel based on field synergy principle', *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. Heat and Mass Transfer.
- Soong, C. Y. et al. (2005) 'Analysis of reactant gas transport in a PEM fuel cell with partially blocked fuel flow channels', *Journal of Power Sources*, 143(1–2), pp. 36–47.
- Taymaz, I. and Benli, M. (2010) 'Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell', *Energy*. Elsevier Ltd, 35(5), pp. 2134–2140.
- Ticianelli, E. A., Berry, J.G., Srinivasan S. (1988) 'Dependence of performance of solid polymer electrolyte fuel cells with low platinum loading on morphologic characteristics of the electrodes', *J. Electroanal. Chem.*, 251(2), pp. 275–295.
- Tiss, F., Chouikh, R. and Guizani, A. (2014) 'A numerical investigation of reactant transport in a PEM fuel cell with partially blocked gas channels', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 80, pp. 32–38.
- Toghyani, S. et al. (2019) 'Optimization of operating parameters of a polymer exchange membrane electrolyzer', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 44(13), pp. 6403–6414.
- Toghyani, S., Afshari, E. and Baniasadi, E. (2018) 'Three-dimensional computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane electrolyzer with new flow field pattern', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Springer Netherlands, 5, pp. 1–9.
- Turkmen, A. C. and Celik, C. (2018) 'The effect of different gas diffusion layer porosity on proton exchange membrane fuel cells', *Fuel*, 222(November 2017), pp. 465–474.

- Velisala, V. and Srinivasulu, G. N. (2018) 'Numerical Simulation and Experimental Comparison of Single , Double and Triple Serpentine Flow Channel Configuration on Performance of a PEM Fuel Cell', *Arabian Journal for Science and Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 43(3), pp. 1225–1234.
- Wang, L. et al. (2003) 'A parametric study of PEM fuel cell performances', *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(11), pp. 1263–1272.
- Wang, X. et al. (2012) 'Numerical analysis on performances of polymer electrolyte membrane fuel cells with various cathode flow channel geometries', 7, pp. 3–11.
- Wang, X. D. et al. (2008) 'Local transport phenomena and cell performance of PEM fuel cells with various serpentine flow field designs', *Journal of Power Sources*, 175(1), pp. 397–407.
- Yang, Y., Tsai, K. and Chen, C. (2013) 'The Effects of the PEM Fuel Cell Performance with the Waved Flow Channels', 2013.
- Zhang, J. (2008) *PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers: Fundamentals and applications*, *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications*.

ÖZGEÇMİŞ

Safiye Nur Özdemir, 8 Şubat 1992’de Ordu’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ordu’da tamamladı. 2010 yılında Başöğretmen Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2011 yılında başladığı Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü 2016 yılında bitirdi. 2017 yılında Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Sakarya Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Enerji Anabilim Dalı’nda devam etti. 2017 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.