



**FARKLI AKIŞ ALANI TASARIMLARININ YAKIT  
PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL  
VE SAYISAL İNCELENMESİ**

**Kadir GELİŞ**

**Doktora Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN**

**Eş Danışman: Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN**

**2019**

**Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**DOKTORA TEZİ**

**FARKLI AKIŞ ALANI TASARIMLARININ YAKIT PİLİ PERFORMANSINA**  
**ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

**Kadir GELİŞ**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN**  
**Eş Danışman: Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**  
**2019**  
**Her hakkı saklıdır**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**FARKLI AKIŞ ALANI TASARIMLARININ YAKIT PİLİ PERFORMANSINA**  
**ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Bayram ŞAHİN ve Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN danışmanlığında, Kadir GELİŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 03 / 05 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Oy birliği ile (7/7)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Kenan YAKUT	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Kadir BAKIRCI	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Tuba ÖZNÜLÜER ÖZER	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Eda Feyza AKYÜREK	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
**Enstitü Müdürü**

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

03 / 05 / 2019

Kadir GELİŞ

# ÖZET

DOKTORA TEZİ

## FARKLI AKIŞ ALANI TASARIMLARININ YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Kadir GELİŞ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Eş Danışman: Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN

Bu tez kapsamında yakıt pillerinin ağırlıkça %80 ini oluşturan bipolar plakalar üzerindeki akış kanallarının iyileştirilmesi ve geometrik optimizasyonu üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan Membran Elektrot Grubu (MEA) tez kapsamında hazırlanarak tüm deneylerde kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında; literatürde güncel olarak kullanılan tekli serpantin tipi akış alanına sahip yakıt pili imal edilmiş ve imalatı yapılan yakıt pili 70 °C pil sıcaklığı, 1 atm basınç, %100 nemlendirme ve 0.25 lt/dk şartlarında test edilmiştir. Aynı geometri sayısal olarak çözümlenerek deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sayısal model doğrulanmıştır. Geleneksel tekli serpantin tipi akış alanına sahip yakıt pili performansını iyileştirmek üzere 4 adet özgün akış alanına sahip model tasarlanarak öncelikle sayısal, sonra da deneysel olarak test edilmiştir. Elde edilen performansı en yüksek tasarım üzerinde geometrik parametrelerin etkisini sayısal olarak araştırmak üzere; kanal yüksekliği, kanal genişliği ve akış alanı/temas yüzeyi oranı; Yanıt Yüzey Yöntemi ile analiz edilmiştir. Akım yoğunluğunu maksimum, basınç düşümünü minimum yapacak hedef fonksiyonlara göre optimum kanal geometrisi elde edilmiştir. Elde edilen bu geometrinin pil sıcaklığı ve debisi değiştirilerek performansı deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında tasarımı yapılan ve optimize edilen akış alanına sahip yakıt pillerinde geleneksel tek serpantin tipli yakıt piline göre akım yoğunluğu deneysel olarak %22.9 artmıştır.

**2019, 164 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** akış alanı tasarımı, pem yakıt pili, bipolar plaka, yanıt yüzey yöntemi, basınç düşümü

## ABSTRACT

Ph.D

### EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT FLOW FIELD DESIGN ON FUEL CELL PERFORMANCE

Kadir GELİŞ

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bayram ŞAHİN

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN

In this thesis, a study was carried out on the optimization of numerical, experimental and geometric parameters with regard to flow channels on bipolar plates which constitute 80% by weight of the fuel cell. During the design and experiments, Membrane Electrode Group (MEA) was prepared in our laboratory and the same MEA was used in all experiments. Within the scope of experimental study; the fuel cell with single serpentine type flow field, which is currently used in the literature, was manufactured. That fuel cell was tested at the fuel cell temperature of 70 °C, 1 atm pressure, 100% humidification and a flow rate of 0.25 lt/min. The same geometry was analyzed numerically and the numerical model was verified comparing the results with experimental data. In order to improve the performance of the fuel cell with conventional single-serpentine flow field, four unique flow fields were designed and firstly tested numerically and then experimentally. The effect of the geometric parameters on the most efficient design to be investigated numerically, the channel height, the channel width and the flow area/contact surface ratio were analysed using Response Surface Methodology. The optimum channel geometry was obtained for the target functions which would make the maximum current density and minimum pressure drop. The performance of this geometry was determined experimentally by changing the fuel cell temperature and flow rate. The current density in fuel cells having the flow field designed and optimized with the scope of this study has increased by 22.9% compared to the traditional single serpentine type fuel cell.

**2019, 164 page**

**Keywords:** flow field design, pem fuel cell, bipolar plate, response surface methode, pressure drop

## TEŞEKKÜR

Akademik çalışmalarımın her aşamasında desteklerini benden esirgemeyen, hem kişilik hem de bir akademisyen olarak hep örnek olarak gördüğüm değerli danışmanım Prof. Dr. Bayram ŞAHİN'e saygı ve minnetle en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yine tez çalışmalarım sırasında bana her türlü laboratuvar imkanı sağlayıp tecrübelerini benden esirgemeyen değerli Eş Danışmanım Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN'a ,

Tez izleme komite üyelerim Doç.Dr. Tuba ÖZNÜLÜER ÖZER ve Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY'a,

Laboratuvar desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü ve Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Makine ve Metal Teknolojileri Bölümüne,

Laboratuvar tecrübelerini paylaştığı için Arş. Gör. Ayşenur ÖZTÜRK'e,

Çalışma arkadaşlarım Dr.Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK, Arş. Gör. İbrahim ATEŞ, Arş. Gör. Emre MANDEV, Arş. Gör. Aytuğ Özer'e manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın sayısal kısmı Atatürk Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ tarafından temin edilen Fluent CFD yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir, bu konudaki desteklerinden dolayı kendilerine teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her safhasında benden manevi desteklerini esirgemeyen hayat arkadaşım Atike'ye, duaları ile hep yanımda olan kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

**Kadir GELİŞ**  
**Mayıs / 2019**

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iv
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	v
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	x
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Yakıt Pilleri .....	3
1.1.1. Yakıt Pili Nedir? .....	3
1.1.2. Yakıt Pili Çeşitleri.....	4
1.1.3. PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi.....	6
1.1.4. PEM Yakıt pili Bileşenleri .....	8
1.2. Yakıt Pillerinin Teorik Analizi.....	14
1.2.1. Yakıt Pili Termodinamiği .....	14
1.2.2. Sıcaklık ve Basıncın Etkisi.....	16
1.2.3. Yakıt Pili Verimi .....	19
1.2.4. PEM Yakıt Pili için ideal Performans .....	20
1.2.5. Yakıt Pilleri için Önemli Eşitlikler .....	22
1.2.6. PEM Yakıt Pili Elektrokimyası.....	26
1.2.7. Yakıt Piliindeki Kayıplar .....	28
1.3. Yakıt Pili Hidrodinamiği.....	30
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	33
2.1.Çalışmanın Amacı .....	61
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	63
3.1. Materyal .....	67
3.1.1.MEA Hazırlama .....	67
3.1.2. İmalatı Yapılan Yakıt Pilleri .....	70
3.1.3.Yakıt Pili Test İstasyonu .....	73
3.2. Yöntem.....	75
3.2.1.Matematiksel Model.....	75
3.2.2.Sayısal Analiz.....	83
3.2.3.Deneysel Yöntem .....	98
3.2.4. Geometrik Optimizasyon (YYY).....	99
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....	102



4.1.Sayısal Çözümleme Sonuçları.....	105
4.1.1.Akım Yoğunluğu Dağılımı .....	106
4.1.2.Basınç Dağılımı.....	108
4.1.3.Hidrojen Kütle Kesri Dağılımı.....	110
4.2.Yakıt Pili Deneysel Performans Sonuçları.....	111
4.3.Sayısal ve Deneysel Sonuçların Kıyaslanması .....	112
4.4.Geometrik Parametrelerin Optimizasyonu (YYY) .....	113
4.4.1. $I_{ort}$ için Yanıt Yüzey Regresyonu .....	118
4.4.2. $\Delta P$ için Yanıt Yüzey Regresyonu .....	120
4.4.3. $\Delta P$ ve $I_{ort}$ için Model Doğrulama .....	122
4.4.4. $\Delta P$ ve $I_{ort}$ için Optimizasyon (0.6 V için).....	123
4.5. Optimum Kanal Geometrisine Sıcaklık ve Debinin Etkisinin Deneysel İncelenmesi .....	126
4.6.Bulguların Analizi.....	128
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>130</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>139</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>153</b>
EK-1 Mol Kesirlerinin Hesaplanması.....	153
EK-2 Sonuçların Eleman Sayısından Bağımsızlık Testi.....	158
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>162</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Amper
D	Difüzyon Katsayısı ( $m^2/s$ )
E	Toplam Enerji
e	Elektron yükü (Coulomb sabiti) ( $1.602 \times 10^{-19} C$ )
F	Faraday Sabiti ( $9.6487 \times 10^7 C/kmol$ )
G	Gibbs serbest enerji (kJ/mol)
H	Entalpi (kJ/kg)
i	Akım yoğunluğu ( $A/m^3$ )
J	Transfer akım yoğunluğu ( $A/m^3$ )
KE	Kinetik Enerji
P	Basınç (Pa)
PE	Potansiyel Enerji
$Q_g$	Giren Isı
$Q_ç$	Çıkan Isı
R	Evrensel Gaz Sabiti ( $8314 J/kmol.K$ )
R	Hacimsel Taşınım Akımı ( $A/m^3$ )
T	Sıcaklık
S	Hacimsel Kaynak Terimi
$S_k$	Kütle Kaynak Terimi
$S_t$	Isı Kaynak Terimi
U	İç Enerji (kJ/kg)
u	Hız (m/s)
V	Hücre voltajı (Volt)
$V_{oc}$	Açık Devre Voltajı (Volt)
$V_m$	Molar Hacim
$W_g$	Giren iş
$W_ç$	Çıkan iş
$\epsilon$	Gözeneklilik
$\sigma$	Elektriksel iletkenlik ( $ohm.m$ ) <sup>-1</sup>

$\phi$	Elektriksel potansiyel ( Volt)
$j$	Hacimsel akım yoğunluğu ( $A/m^3$ )
$j^{ref}$	Hacimsel referans akım yoğunluğu ( $A/m^3$ )
$[ ] , [ ]_{ref}$	Tür konsantrasyonu, referans değer ( $kg.mol/m^3$ )
$\gamma$	Konsantrasyon üssü
$\alpha$	Taşıma katsayısı
$\eta$	Verim
$\Delta$	Değişim
$^\circ$	Derece
$\delta$	Tepkime yüzeyleri ve hücre merkezi arasındaki ortalama uzaklık (m)

### **Kısaltmalar**

ANOVA	Varyans Analizi
AYP	Alkali Yakıt Pili
CNC	Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
DMYP	Doğrudan Metanol Yakıt Pili
EKYP	Erimiş Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
GDL	Gaz Difüzyon Tabakası
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HT PEMFC	Yüksek Sıcaklıklı Proton Geçirgen Membran Yakıt Pili
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
LBM	Boltzmann Yöntemi
MEA	Membran Elektrot Grubu
PEM	Proton Geçirgen Membran
PEMFC	Proton Geçirgen Membran Yakıt Pili
PBI	Polibenzimidazol
RH	Bağıl Nem
YYY	Yanıt Yüzey Yöntemi
UDF	Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar
3D	Üç Boyutlu

2D	İki Boyutlu
1D	Bir Boyutlu

### **İndisler**

an	anot
kat	katot
mem	membran
ref	referans
sol	katı



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1.Yakıt pili yığını ve tekli hücre gösterimi .....	3
Şekil 1. 2.Yakıt pili temel çalışma prensibi .....	6
Şekil 1. 3. Yakıt pili sistematiği .....	7
Şekil 1. 4. PEM yakıt pili bileşenleri .....	8
Şekil 1. 5. PEM yakıt pili yapısı .....	9
Şekil 1. 6. MEA katmanları.....	10
Şekil 1. 7. MEA yapısı içerisinde katalizörün gösterimi .....	11
Şekil 1. 8. Bipolar plaka imalatı için kullanılan malzemeler .....	13
Şekil 1. 9. Sistem, çevre ve sınır tanımlaması.....	14
Şekil 1. 10. Yakıt pilinin kontrol hacmi olarak gösterilmesi .....	15
Şekil 1. 11. Yakıt pili için enerji girdi ve çıktıları .....	19
Şekil 1. 12. Yakıt pili ideal ve gerçek voltaj-akım karakteristiği.....	29
Şekil 1. 13. Literatürde sıkça kullanılan akış alanı tipleri.....	31
Şekil 3. 1.Çalışmanın aşamaları .....	64
Şekil 3. 2.Yakıt pili performansını etkileyen parametreler .....	65
Şekil 3. 3.MEA hazırlamada ana işlem basamakları.....	69
Şekil 3. 4.Membran esaslı metot ile hazırlanan MEA kesiti.....	69
Şekil 3. 5.MEA hazırlamada kullanılan ekipmanlar .....	70
Şekil 3. 6.Kanal tasarımlarının imal edildiği CNC Freze .....	71
Şekil 3. 7.İmalatı yapılan bipolar plakaların teknik resmi .....	71
Şekil 3. 8.Tasarlanan yakıt pilinin resmi.....	71
Şekil 3. 9.İmalatı yapılan 5 modelin resmi .....	72
Şekil 3. 10.Henatch <sup>TM</sup> marka (max 600 W) yakıt pili test istasyonu .....	74
Şekil 3. 11.Test istasyonunun kısımları .....	74
Şekil 3. 12.Test istasyonu nemlendirme ünitesi.....	75
Şekil 3. 13. <b>Ømem</b> ve <b>Øsol</b> için sınır şartlarının şematik gösterimi.....	79
Şekil 3. 14.Ansys ekranına fluent çözücüsünün yerleştirilmesi.....	84
Şekil 3. 15. PEM yakıt pilinin fiziksel modeli.....	85
Şekil 3. 16.Membran elektrot grubu fiziksel bileşenleri .....	85
Şekil 3. 17.Akış alanı / temas yüzeyi oranı .....	86
Şekil 3. 18.PEM yakıt pili için ortak geometrik ölçüler .....	87

Şekil 3. 19.Modellere ait akış alanı görüntüleri .....	89
Şekil 3. 20.Model 1 için genel çözüm ağı görünümü .....	90
Şekil 3. 21.Kübik mesh yapısı içeren bileşenler .....	91
Şekil 3. 22.Gaz akış kanalının çözüm ağı yapısı.....	92
Şekil 3. 23.Çözüm ağı (meshing) sayfasında tanımlanan yüzey isimleri .....	93
Şekil 3. 24.Çözüm algoritması akış şeması.....	95
Şekil 3. 25.Yakıt Pili Test İstasyonu Devre Şeması.....	98
Şekil 4. 1.Deneysel Sonuçların literatürdeki benzer deneyler ile kıyaslanması .....	102
Şekil 4. 2.Sayısal sonucun doğrulanması.....	104
Şekil 4. 3.Sayısal çözümleme sonuçlarının kıyaslamalı polarizasyon eğrisi.....	105
Şekil 4. 4.Modeller için Akım Yoğunluğu Dağılımı (0.6 V).....	106
Şekil 4. 5.Modeller için basınç dağılımı (0.6 V).....	108
Şekil 4. 6.Modeller için Hidrojen Kütle Kesri dağılımları (0.6 V).....	110
Şekil 4. 7.Modellerin deneysel performans sonuçları .....	111
Şekil 4. 8.Model 1(a),Model 2(b), Model 3(c), Model 4(d) ve Model 5 (e) için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.....	112
Şekil 4. 9. Optimum dizaynı elde etmek için tasarlanan geometriler .....	114
Şekil 4. 10. $I_{ort}$ için deney numaralarına göre kalıntı değerleri (0.6 V için) .....	119
Şekil 4. 11. $\Delta P$ için deney numaralarına göre kalıntı değerleri (0.6 V için) .....	121
Şekil 4. 12. $\Delta P$ yi minimum, $I_{ort}$ 'u maksimum yapan bileşke optimizasyon eğrileri (0.6 V için).....	124
Şekil 4. 13.Optimum kanal geometrisi için deneysel doğrulama.....	125
Şekil 4. 14. 0.1 lt/dk(a), 0.2 lt/dk(b) ve 0.3 lt/dk(c) debi değerinde farklı sıcaklıkların deneysel polarizasyon eğrileri.....	126
Şekil 4. 15. 60 °C (a), 65 °C (b) ve 70 °C (c) pil sıcaklığında farklı debiler için deneysel polarizasyon eğrileri.....	127
Şekil 4. 16.Modellerin sayısal ve deneysel akım yoğunluğu dağılımı (0.6 V için) .....	129
Şekil Ek 2. 1.Sonuçların eleman sayısından bağımsızlık testi.....	159
Şekil Ek 2. 2.Akım yoğunluğunun iterasyon sayısı ile değişimi .....	160
Şekil Ek 2. 3. Eleman boyutunun belirlenmesi için kullanılan geometri.....	160
Şekil Ek 2. 4.Çözüm Ağı Yapısı .....	161

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1.Yakıt pili çeşitlerinin kıyaslanması.....	5
Çizelge 1. 2. Farklı Yakıt Pilleri için Anot ve Katot Reaksiyonları .....	5
Çizelge 1. 3. Sıcaklığın teorik hücre potansiyeline etkisi .....	17
Çizelge 1. 4. Farklı sıcaklık ve basınçlardaki teorik hücre potansiyeli.....	19
Çizelge 1. 5. PEM yakıt pili için Anot Katot Reaksiyonları .....	20
Çizelge 3. 1.Tekli yakıt pili imalatı için kullanılan malzeme özellikleri .....	65
Çizelge 3. 2.Deneysel İşletme Parametreleri .....	66
Çizelge 3. 3.MEA hazırlamada kullanılan malzeme özellikleri .....	68
Çizelge 3. 4.İmalatı yapılan kanallara ilişkin teknik veriler .....	73
Çizelge 3. 5.PEM yakıt pili analizinde kullanılan korunum denklemleri ve kaynak terimleri.....	77
Çizelge 3. 6.Çözümlemelerde kullanılan iş istasyonunun teknik özellikleri .....	83
Çizelge 3. 7.Tasarımı yapılan kanallara ilişkin geometrik boyutlar .....	86
Çizelge 3. 8.Yakıt pili fiziksel modelini oluşturan parçalar ve özellikleri.....	88
Çizelge 3. 9.Çözüm ağı(meshing) sayfasında tanımlanan yüzeyler ve yüzey isimleri...	92
Çizelge 3. 10.Çalışmada kullanılan Yakınsama faktörü değerleri.....	96
Çizelge 3. 11.Yakınsama Kriterleri.....	96
Çizelge 3. 12.PEM yakıt pili elektrokimyasal parametreleri .....	97
Çizelge 4. 1.Deneysel olarak kıyaslama yapılan referanslar.....	103
Çizelge 4. 2. Çalışmada incelenen geometrik parametreler ve değerleri.....	115
Çizelge 4. 3.Deney Planı.....	116
Çizelge 4. 4. Hesaplanan karakteristik büyüklükler (0.6 V için).....	117
Çizelge 4. 5. Regresyon Analizi sonucunda elde edilen $I_{ort}$ ve $\Delta P$ denklemleri .....	117
Çizelge 4. 6. $I_{ort}$ için ANOVA Tablosu.....	118
Çizelge 4. 7. $I_{ort}$ için Model Özeti .....	118
Çizelge 4. 8. $\Delta P$ için ANOVA Tablosu .....	120
Çizelge 4. 9. $\Delta P$ için Model Özeti.....	120
Çizelge 4. 10. Akım Yoğunluğu için doğrulama Sonuçları .....	122
Çizelge 4. 11. Basınç Düşümü için doğrulama sonuçları .....	122
Çizelge 4. 12. $\Delta P$ ve $I_{ort}$ için Optimizasyon .....	123
Çizelge 4. 13. Optimizasyon Çözümü .....	123

Çizelge 4. 14. Çoklu Yanıt Tahmini .....	123
Çizelge 4. 15.Modellerin 0.6 V değerinde akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu değerleri .....	128
Çizelge 4. 16.Akım yoğunluğu %Sayısal Artış, % Deneysel Artış ve % Fark Değerleri(0.6 V) .....	128
Çizelge Ek 1. 1.Anot, katot debi ve kütle kesirleri .....	157
Çizelge Ek 2. 1.Akım yoğunluğunun eleman sayısına bağlı olarak değişimi.....	158





### 1. GİRİŞ

Enerji kaynakları genel olarak yenilenemez ve yenilenebilir kaynaklar olmak üzere ikiye ayrılır. Klasik kaynaklar petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğadaki doğal süreçler içinde oluşabilen, doğaya zarar vermeyen ve yenilenebilir özelliğe sahip enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biokütle enerjisi, dalga enerjisi ve hidrojen gazından elde edilen enerjilerdir.

Teknolojinin gelişmesi ile artan talepler ve aşırı artan nüfustan dolayı meydana gelen enerji açığı fosil yakıtların kullanılmasıyla ortadan kaldırılmaya çalışılmış fakat fosil yakıt rezervlerinde azalmaya sebep olmuştur. Tükenmeye yüz tutmuş fosil yakıtlar ve aşırı çevre kirlenmesi insanları yeni enerji üretim yöntemlerine yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji yöntemleriyle hem çevre kirliliğini engellemeye hem de fosil yakıtlara alternatif bulmaya çalışılmaktadır. Fosil yakıtların tüketilmesi ile oluşan asit yağmurları, ozon tabakasının delinmesi, havadaki oksijen miktarının düşmesi, iklimlerin değişmesi, petrol kaynaklı savaşların meydana gelmesi, suların kirlenmesi ve sera gazları oluşumu çevreyi olumsuz etkilemektedir. Hem fosil yakıtların çevresel etkilerinin azaltılması hem de enerji ihtiyacının her geçen gün artması ile birlikte yeni ve yenilenebilir enerji teknolojileri için Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu elektrik üretmek için hidrojeni kullanan polimer elektrolit membran (PEM) yakıt pilleri, özellikle taşımacılıkta içten yanmalı motorlar yerine çevre dostu olarak kullanabilmek için geliştirilmeye çalışılmaktadır. PEM yakıt pilleri, yüksek verimi, düşük sıcaklıklarda kullanılabilmeleri, sessiz çalışmaları ve çevre dostu olmalarından ötürü, geleceğin enerji üretim cihazlarıdır.

Yakıt pillerinin yaygınlaşp temiz enerji elde edilebilmesinin önündeki en büyük engel; bileşenlerin maliyetleri ve yakıt pillerinin güç yoğunluğunun yetersiz olmasıdır. Yakıt pilleri ile enerji üretiminin önündeki bir diğer kısıtlama ise yakıtın bulunabilirliği ve depolanmasıdır. Hidrojen yakıtı ile ilgili depolanma ve elde etme yöntemlerine ilişkin problemlerin çözülmesi durumunda yakıt pillerinin kullanımı ciddi anlamda yaygınlaşacaktır (Bayrak, 2011).

## 1. GİRİŞ

---

Bu çalışma kapsamında da gelecekte kullanımı hızla yaygınlaşacağı düşünülen, uygulama alanları giderek artan PEM yakıt pilleri üzerine çalışma yürütülmüştür. Çalışma 3 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, akış alanı olarak literatürde var olan tekli serpantin tipi model imal edilmiştir. Bipolar plaka malzemesi olarak 10 mm kalınlığında grafit plaka kullanılmış ve aktif alan boyutları 4 cm x 4 cm olarak seçilmiştir. İlk iki aşama için imalatı yapılan akış alanlarının kanal genişliği 1.5 mm, kanal derinliği 1 mm dir. İlk olarak tekli serpantin tipi kanal tasarımı imal edilerek deneysel performans testlerine tabi tutulup; sonuçların literatürle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma şartları 70 °C pil sıcaklığı, 70 °C nemlendirme sıcaklığı, 0.25 lt/dk oksijen debisi ve 0.25 lt/dk hidrojen debisi olarak seçilmiştir. Tekli serpantin tipi akış alanına sahip yakıt pili için deneysel performans tamamlandıktan sonra aynı tasarım sayısal olarak çözümlenmiş ve doğrulanmıştır. Daha sonra 4 adet özgün kanal tasarımı yapılarak, bu modeller sayısal olarak çözümlenmiştir. Bütün sayısal çözümlerinin tamamında aynı sınır şartları, referans değerler ve çözüm metodu uygulanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında; sayısal çözümleri yapılan modellerin imalatı yapılmış ve deneysel yakıt pili performans testleri yapılmıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmaların birbiri ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise; hem birinci aşama hem de ikinci aşamada akım yoğunluğunun maksimum, basınç düşümünün ise minimum olduğu kanal tasarımı Model 3 olarak belirlenmiştir. Model 3 için yanıt yüzey yöntemi kullanılarak deney planı oluşturulmuş ve deney planı kapsamında oluşturulan geometriler sayısal olarak çözümlenmiştir. Sayısal çözümler neticesinde optimum kanal geometrisi için kanal genişliği 1.5 mm, kanal derinliği 1.5 mm ve akış alanı/temas yüzeyi oranı 1.24 olarak belirlenmiştir. Sayısal çözümler sonucunda elde edilen optimum kanal geometrisi imal edilmiş, deneysel olarak doğrulanmış ve 3 debi (0.1-0.2-0.3 lt/dk), 3 sıcaklık (60-65-70°C) değerinde deneysel performans testleri yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

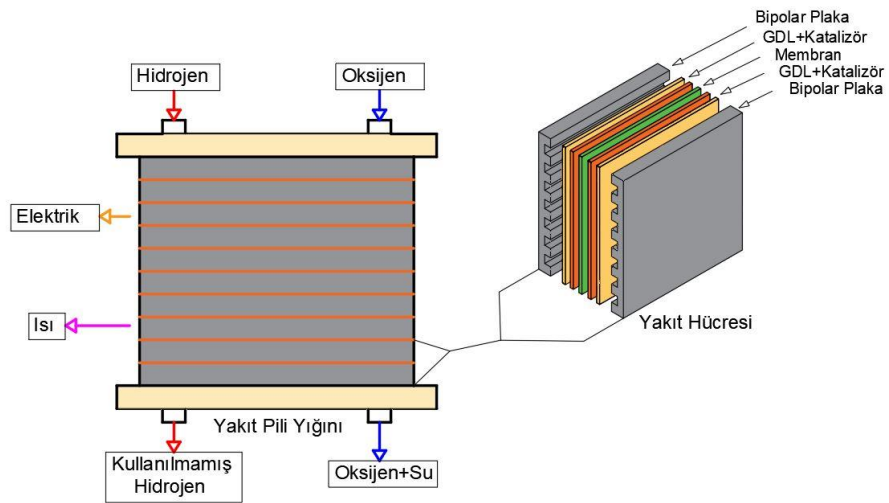
## 1.1. Yakıt Pilleri

### 1.1.1. Yakıt Pili Nedir?

Yakıt pilleri yakıtı ve oksitleyiciyi yanma olmaksızın elektrokimyasal bir tepkime ile doğrudan elektrik ve ısı enerjisine dönüştüren bir araçtır. Yüksek verimlilik ve düşük emisyon değerlerine sahiptirler. Çalışma prensipleri gereği sürekli yakıtla beslenmeye ihtiyaç duyarlar (Bayrak, 2011).

Yakıt pillerindeki elektrokimyasal reaksiyonu hızlandırmak için katalizör kullanılmaktadır. Kullanılacak katalizör yakıt pilinin tipine, malzeme özelliklerine ve istenilen güç yoğunluğuna göre değişiklik gösterebilmektedir. İstenilen güç değerine göre yakıt pili yığınları oluşturulması gerekebilmektedir. Yakıt pili yığınları birçok hücrenin birbiri ardına seri ya da paralel bağlanması ile elde edilirler. Hücrenin aktif alanının büyüklüğü; hücreden elde edilebilecek akım miktarını belirlerken, yakıt pili yığını oluşturulmasında kullanılan hücre sayısı da yakıt pilinin çalışma voltajı ve maksimum gücünü oluşturur.

Fosil yakıtlar geleneksel yöntemler ile elektriğe dönüştürülürken birçok ara basamak vardır, fakat yakıt pillerinde kimyasal enerji tek bir seferde elektrokimyasal çevrim ile elektrik enerjisine çevrilir. Bu sebeple yakıt pillerinin verimleri yüksektir (Erdener et al., 2013). Şekil 1.1 de yakıt pili yığını ve tekli hücre gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Yakıt pili yığını ve tekli hücre gösterimi

### 1.1.2. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pillerinin en yaygın sınıflandırması: yakıt pilinin içinde kullanılan elektrolitin tipine göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmaya göre 6 tür yakıt pili bulunmaktadır (Kılıçoğlu, 2008).

Bunlar;

1. Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) Yakıt pili
2. Doğrudan Metanol Yakıt pili (DMYP)
3. Alkali Yakıt pili (AYP)
4. Fosforik Asit Yakıt pili (FAYP)
5. Erimiş Karbonat Yakıt pili (EKYP)
6. Katı Oksitli Yakıt pili (KOYP)

Yakıt pili çeşitlerini birbirlerinden ayıran en önemli özellikler aşağıda listelenmiştir.

- Elektrolit
- Çalışma Sıcaklığı
- Elektriksel verim
- Yakıt/oksitleyici
- Maliyet
- Kullanım Alanı

### Yakıt pili çeşitlerinin kıyaslaması

Literatürde mevcut her bir yakıt pilinin farklı anot ve katot reaksiyonları, çalışma sıcaklıkları ve dikkat edilmesi gereken hususları vardır. Yakıt pili çeşitlerini birbirinden ayıran temel özellikler aşağıdaki Çizelge 1.1 de, farklı yakıt pili çeşitleri için anot ve katot reaksiyonları Çizelge 1.2 de sunulmuştur.

## 1. GİRİŞ

**Çizelge 1. 1.**Yakıt pili çeşitlerinin kıyaslanması (Köseler, 2009)

Yakıt Pili	Elektrolit	Elektrolitteki Taşıyıcı	Katalizör	Çalışma Sıcaklığı	Yakıt Oksitleyici	Uygulama Alanları
<b>Polimer Elektrolit Membran (PEM)</b>	Polimer Membran	H <sup>+</sup>	Pt	Oda Sıcaklığı-80	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ,Hava	Ulaşım Araçları, Askeri Sistemler
<b>Direkt Metanol</b>	Polimer Membran	H <sup>+</sup>	Pt- Ru	Oda Sıcaklığı-130	CH <sub>3</sub> OH/ O <sub>2</sub> ,Hava	Küçük Elektrikli Araçlar
<b>Fosforik Asit</b>	Sıvı Fosforik Asit	H <sup>+</sup>	Pt	160-220	Doğalgaz, Biyogaz, H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ,Hava	Ticari Uygulamalar
<b>Alkali</b>	Potasyum Hidroksit Çözeltisi	OH <sup>-</sup>	Poroz Nikel	Oda Sıcaklığı-250	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ,Hava	Uzay Araştırmaları
<b>Erimiş Karbonat</b>	Alkali Karbonatlar	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Pt	620-660	Doğalgaz, Biyogaz, Kömür Gazı, H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ,Hava	Elektrik Santralleri
<b>Katı Oksit</b>	Erimiş Alkali Metal Karışımı	O <sup>-2</sup>	Raney Ni	800-1000	Doğalgaz, Biyogaz, Kömür Gazı, H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> ,Hava	Ticari Uygulamalar Sanayi Uygulamaları Elektrik Santralleri

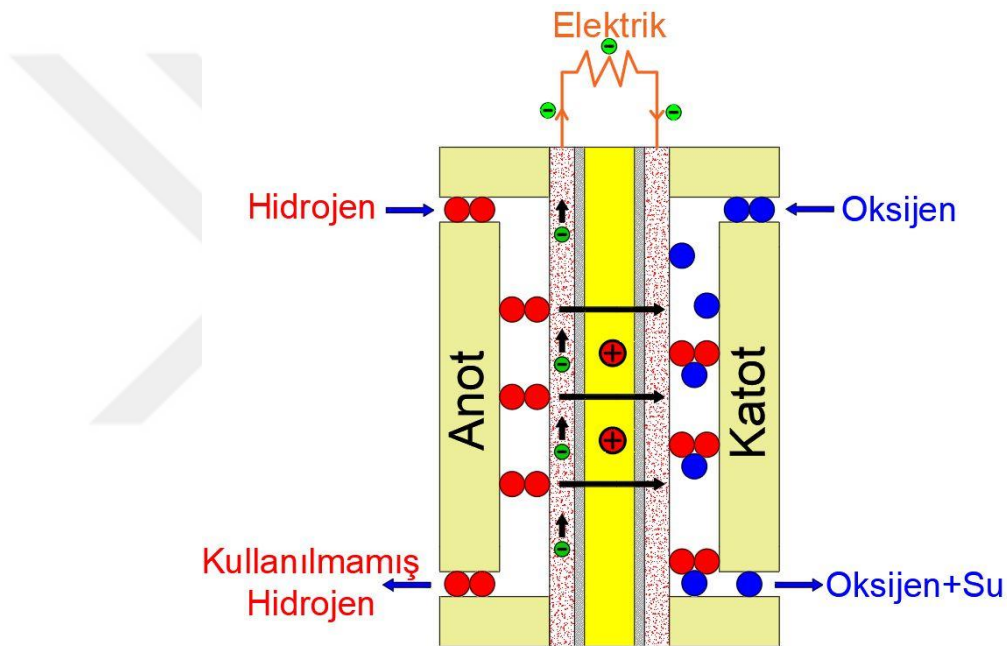
Farklı yakıt pili çeşitleri için gerçekleşen anot ve katot reaksiyonları Çizelge 1.2 de verilmiştir.

**Çizelge 1. 2.** Farklı Yakıt Pilleri için Anot ve Katot Reaksiyonları

Yakıt Pili	Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
Polimer Elektrolit Membran	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alkali	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$
Fosforik Asit	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Erimiş Karbonat	$H_2 + CO_3^{-2} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{-2} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{-2}$
Katı Oksit	$H_2 + O^{-2} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{-2} \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^{-2} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{-2}$
Doğrudan Metanol	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	$6H^+ + 6e^- + O_2 \rightarrow 3H_2O$

### 1.1.3. PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi

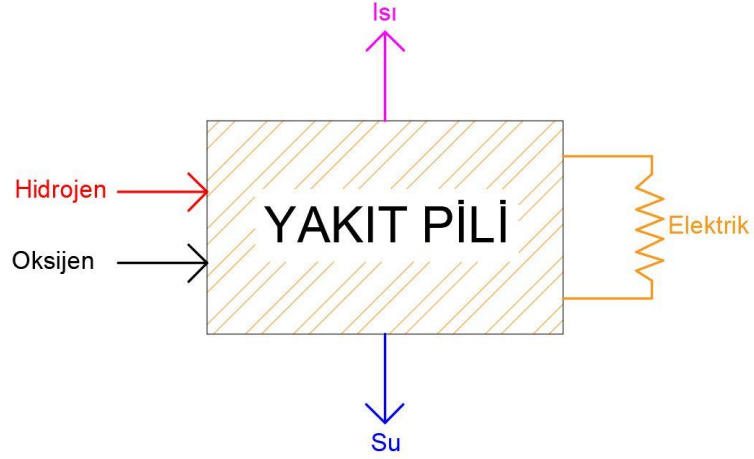
Bir yakıt pilinde anot tarafından gaz yakıtlar, katot tarafından ise oksitleyici gazlar verilir. Anot kısmında yükseltgenme, katot kısmında ise indirgenme reaksiyonları gerçekleşir. Toplam reaksiyon sonucunda ürün olarak su, ısı ve elektrik çıkar. Elektrotlar arasında bulunan elektrolitte ise anottan katoda doğru bir iyon geçişi gerçekleşir (Karaoğlan and Kurulay, 2014). Şekil 1.2 de yakıt pili için temel çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 1. 2.Yakıt pili temel çalışma prensibi

PEM yakıt pilleri yüksek verim, düşük sıcaklıkta çalışma, yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlatma ve sistem sağlamlığı nedeniyle hareketli ve sabit uygulamalar için sıfır emisyonlu güç kaynağı olarak umut vaad eden bir adaydır (Li and Sabir, 2005).

PEM yakıt pillerine hidrojen ve oksijen girer; ısı, su ve elektrik açığa çıkar. Şekil 1.3 te yakıt pili sistematığı sunulmuştur.



**Şekil 1. 3.** Yakıt pili sistematığı

Yakıt pilinin anot kısmında oluşan reaksiyon (hidrojen):



(Hidrojen yükseltgenme reaksiyonu)

Yakıt pilinin katot kısmında oluşan reaksiyon (oksijen);



(Oksijenin indirgenme reaksiyonu)

Tüm hücrede gerçekleşen toplam reaksiyon:

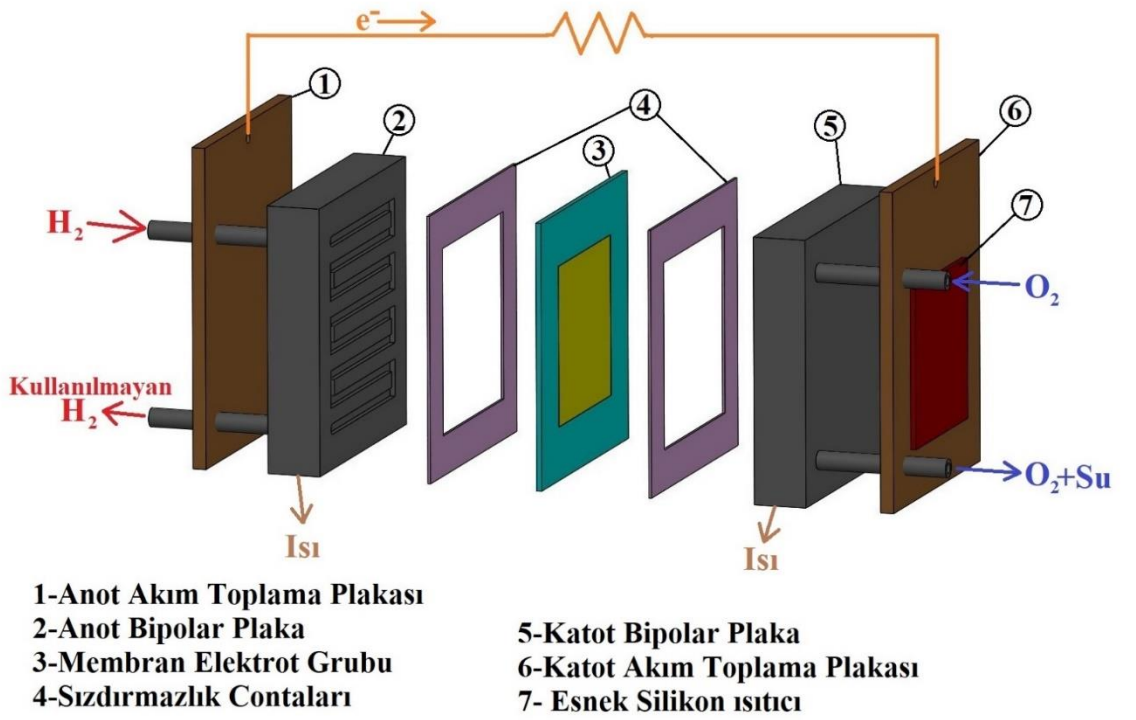


şeklindedir.

Bu reaksiyonlar çeşitli ara basamaklar içerebilir. Bu ara reaksiyonlara ilerleyen bölümlerde yer verilecektir, fakat bu ana reaksiyonlar yakıt pili içindeki ana süreçleri tam olarak tanımlamaktadır.

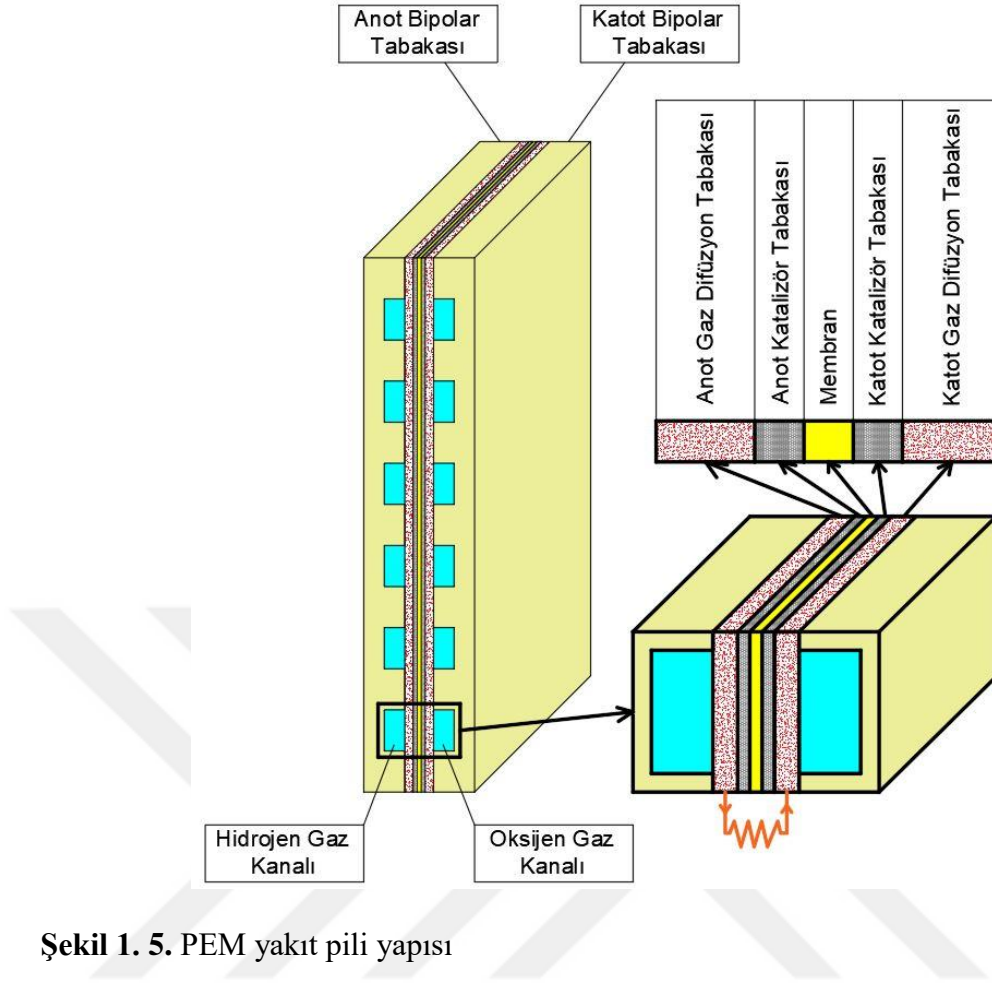
## 1.1.4. PEM Yakıt Pili Bileşenleri

PEM Yakıt pili bileşenleri Polimer Elektrolit Membran(PEM), Gaz difüzyon tabakası(GDL), Katalizör, Elektrotlar ve Bipolar plaka olmak üzere bu temel parçalardan oluşur. Gaz difüzyon katmanı, polimer elektrolit membran ve sızdırmazlık elemanları gibi iki bipolar plaka arasında kalan ince elemanlar grubuna Membran Elektrot Grubu (MEA) denir. Şekil 1.4'te bir yakıt pilinin bileşenleri, Şekil 1.5'te PEM yakıt pilinin yapısı şematize edilmiştir.



Şekil 1. 4. PEM yakıt pili bileşenleri

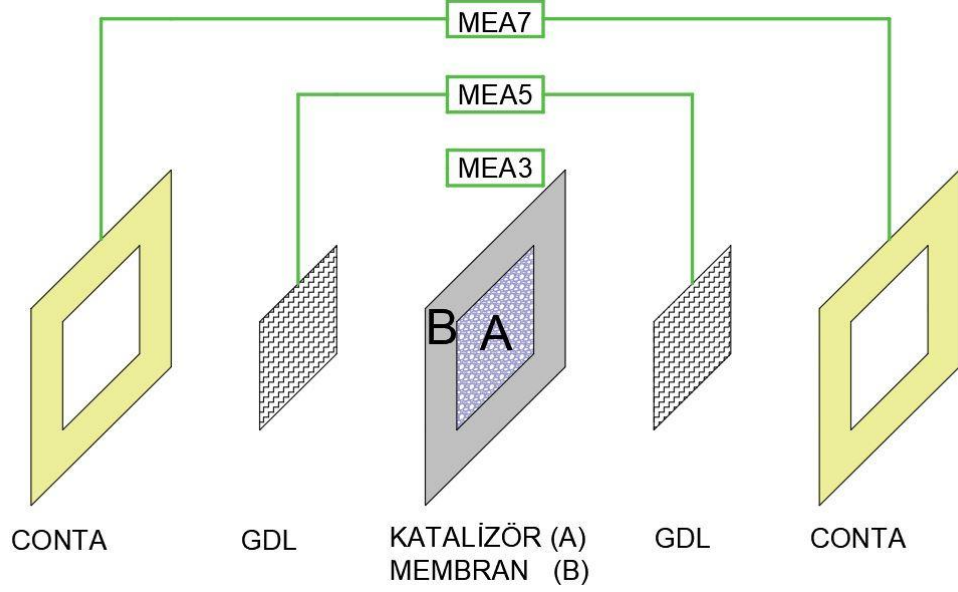




Şekil 1. 5. PEM yakıt pili yapısı

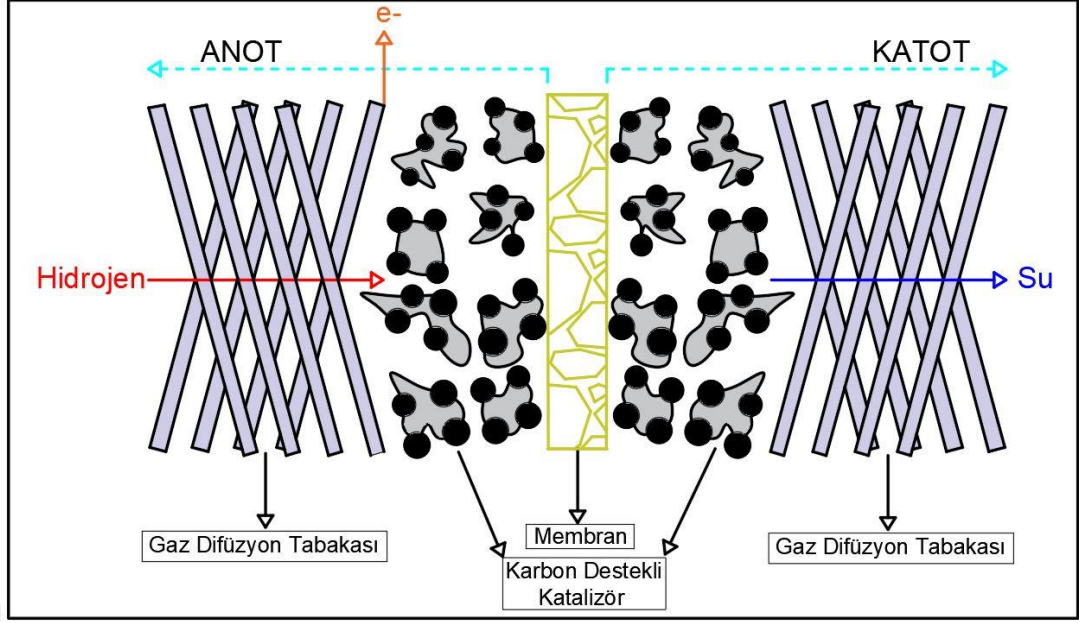
## Membran Elektrot Grubu

İki bipolar plaka arasında bulunan; Membran, Katalizör ve Gaz difüzyon tabakalarından oluşan bileşene Membran Elektrot grubu denir. Anot tarafından beslenen  $H_2$  katalizör sayesinde  $H^+$  iyonları ve elektrona ayrışır, oluşan  $H^+$  iyonları proton geçirgen membran sayesinde katot tarafına ilerlerken geçişi engellenen elektronlar gaz difüzyon tabakası sayesinde bipolar plakaya, bipolar plakadan ise dış devreye aktarılır. Bu esnada katoda ulaşan hidrojen iyonları  $O_2$  ile birleşerek su oluşturur. Piyasada 3 katmanlı, 5 katmanlı ve 7 katmanlı olmak üzere çeşitli tasarımlarda MEA lar bulunmaktadır. Şekil 1.6'da farklı MEA katmanlarına ilişkin bir görsel paylaşılmıştır.



**Şekil 1. 6.** MEA katmanları

Katalizör tabakası gaz difüzyon tabakası ile membran arasında yer alan kısımdır. Katalizör tabakasına aynı zamanda aktif tabaka da denilmektedir. PEM yakıt pili gibi düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri katalizör olarak Pt, Ru, Pd gibi değerli metalleri kullanırlar. Katalizör olarak platin veya platin alaşımları en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Platin katalizörler, PEM yakıt pillerinde uzun dönemli yüksek performans sağlamaktadırlar. Platin katalizörlerin en büyük dezavantajı pahalı olmalarıdır. Maliyet konusu PEM yakıt pillerinin yaygınlaşmasına engel teşkil etmektedir. Maliyeti yüksek platin katalizörlerde nano boyutlu platin yüksek yüzey alanına ve elektriksel iletkenliğe sahip karbonla desteklenir. Bu dağılım platinin yüzey alanını artırarak katalizör verimini artırır ((Öztürk (2016); Kaya et al. (2017)). Şekil 1.7 de MEA yapısı içerisinde katalizörün gösterimi verilmiştir.



**Şekil 1. 7.** MEA yapısı içerisinde katalizörün gösterimi

Gaz difüzyon tabakasının temel görevi reaksiyon gazlarının katalizör tabakasına ulaşmasını sağlamak, reaksiyon sonucu oluşan suyun ve ısının uzaklaşmasını sağlamak, katalizör tabakası ile bipolar plaka arasında elektriksel bağlantıyı sağlamaktır. Gaz difüzyon tabakası elektriksel olarak iletken bir yapıya sahiptir. Gaz difüzyon tabakası aynı zamanda membran elektrot grubuna mekanik bir destek de sağlamaktadır. Gaz difüzyon tabakalarının görevlerini yerine tam olarak getirmesi için porozite, elektriksel iletkenlik ve termal iletkenlik değerlerinin uygun olması gerekmektedir. Uygulamada katalizör partikülleri gaz difüzyon tabakasının üzerine dağıtıldığından dolayı katalizör boyutu ile gaz difüzyon tabakasının gözenek boyutu uyumlu olmalıdır.

Yakıt pili sisteminde membranın iyonik iletişimi sağlamak ve reaksiyona giren iki gazı ayırmak gibi iki temel görevi vardır. Bu temel görevleri yerine getirirken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Membranın kuruması proton iletkenliğini düşürürken, aşırı nemlendirme ise kanallarda su taşmasına sebep olmaktadır, bu durumda kanalların tıkanıp gaz geçişine engel olmakta yani reaksiyonun durmasına sebep olmaktadır (Yılmaz, 2006).

### **Bipolar plakalar**

Bipolar plakalar reaktif bölgeye yakıt ve oksitleyici sağlayan, üretilen akımı toplayan ve hücre içerisindeki mekanik desteği sağlayan hayati bir bileşendir. Bipolar plakalar yakıt pili ağırlığının %60 tan fazlasını ve toplam maliyetin yaklaşık olarak %30 unu oluştururlar. Bu nedenle yakıt pilinin hacmi ve maliyeti, akış alanının yerleşim düzeni ve hafif malzemelerin kullanımı önemlidir. Yüksek performans ve ekonomik avantajlar elde etmek amacıyla yukarıda bahsedilen işlevleri verimli bir şekilde gerçekleştirmek amacıyla bipolar plakalar için farklı malzeme kombinasyonları, akış alanı düzenleri ve imalat teknikleri geliştirilmiştir (Li and Sabir, 2005).

Bipolar plakalar yakıt pillerinin ana parçalarından bir tanesidir. Bipolar plakalar üzerindeki akış alanı elektrot yüzeyi üzerine homojen bir gaz dağılımı sağlamalı, sistemde oluşan suyu düzgün bir şekilde tahliye etmeli ve sistemde minimum basınç kaybı oluşturmamalıdır.

Bipolar plakaların yakıt pili içindeki görevleri aşağıda sıralanmıştır ((Damian-Ascencio et al (2017);(M. Li et al. (2004))

- Oksijen ve yakıtın aktif alan üzerine düzgün dağılımını sağlamak
- Aktif alandan ısının atılmasını sağlamak
- Ortamdaki suyu akış kanalları ile tahliye etmek
- Hücreden hücreye akımın iletilmesini sağlamak
- Gaz ve yakıtın sızıntısını önlemek
- Yakıt hücrelerini birbirinden ayırmak
- Hücrenin anot kısmını katot kısmına bağlamak

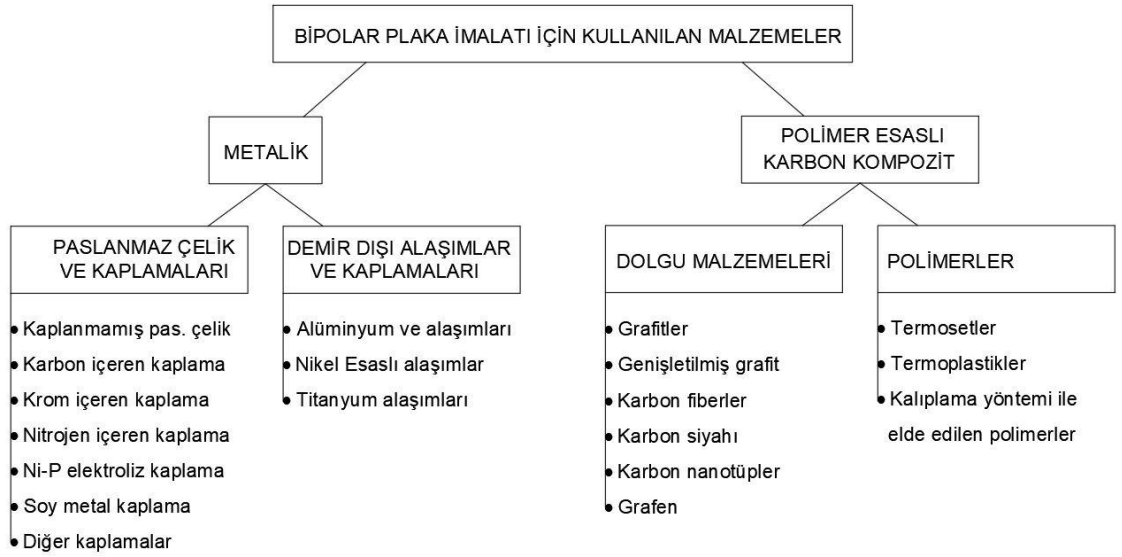
Yukarıdaki maddelerden de anlaşılacağı gibi bir yakıt pili içerisinde bipolar plakaların önemli görevleri vardır. Yeni bir yakıt pili tasarlanıyorken bipolar plaka için malzeme seçimi yapılacaksa şu kriterler esas alınır (Silva et al., 2006).

- İyi Elektrik ve ısı iletimi
- Düzgün Gaz Geçirimi
- Yeterli Mekanik dayanıklılık ve kimyasal kararlılık

## 1. GİRİŞ

- İmalat yöntemlerine uygunluk ve ucuzluk
- Korozyona karşı dayanıklılık
- Düşük yoğunluk

Taherian; PEM yakıt pilleri bileşenlerinden olan bipolar plakalar üzerine yapılmış olan çalışmaları derlemiş, derlemelerinde bipolar plakaların öneminden ve görevlerinden bahsetmişlerdir. Derlemenin içeriği bipolar plakalarda kullanılan materyaller, bipolar plaka üretimi ve materyal seçimi olmuştur. Şekil 1.8’de Taherian’ın yapmış olduğu derleme sonucunda bipolar plaka olarak kullanılan malzemeler listelenmiştir (Taherian, 2014).



Şekil 1. 8. Bipolar plaka imalatı için kullanılan malzemeler

### Sızdırmazlık Contaları

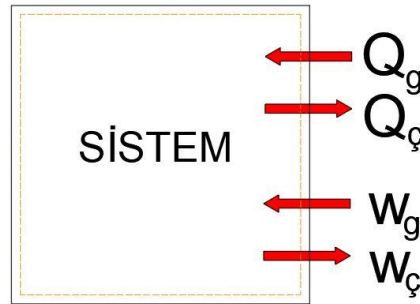
Membran Elektrot grubu ve bipolar plakalar arasında kullanılan genelde silikon, teflon, polyamit gibi malzemelerden imal edilen elemandır. Genel olarak membran boyutu aktif alanın boyutundan büyük olduğu için contalar hem sızdırmazlığı sağlamak için hem de aktif alan dışındaki elektrik yalıtımını sağlamak için önemli bir görev üstlenmişlerdir.

## 1.2. Yakıt Pillerinin Teorik Analizi

### 1.2.1. Yakıt Pili Termodinamiği

Yakıt pillerinin performans analizlerini yapabilmek için enerjinin korunumu ve entropi kavramlarından faydalanmanız gerekmektedir. Termodinamiğin birinci yasası veya diğer adıyla enerjinin korunumu ilkesi enerjinin değişik biçimleri arasındaki ilişkileri ve genel olarak enerji etkileşimlerini incelemek için sağlam bir temel oluşturur. Termodinamiğin birinci yasası deneysel gözlemlere dayanarak, enerjinin var veya yok edilemeyeceğini, ancak bir biçimden diğerine dönüşebileceğini vurgular. Isı ve iş yönlü nicelikler olduğundan dolayı etkileşimleri tarif edilirken yönlerini ve şiddetlerini belirtmek doğru olacaktır. Bunu yapmak için işaretlere dikkat edilmelidir. Sisteme olan ısı geçişi ve sistem tarafından yapılan iş pozitif, sistemden olan ısı geçişi ve sisteme gereken iş negatiftir. Isı ve iş yönlerinin kullanımı daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 1.9 da gösterilmiştir (Kaya et al. (2017);Çengel and Boles (2008))

ÇEVRE



Şekil 1. 9. Sistem, çevre ve sınır tanımlaması

Bu ilişki denklem halinde yazılırsa,

$$\delta Q - \delta W = dE \quad (1.4)$$

Yukarıdaki denklemde (Q) sisteme giren ısıyı, (-W) sistemde yapılan işi ve E ise sistemin toplam enerjisini verir.(Q) ve (W) yola bağlı fonksiyonlardır, yani değerleri ilk ve son hale değil hal değişiminin nasıl gerçekleştiğine bağlıdır. Bu nedenle  $\delta Q$  ve  $\delta W$

## 1. GİRİŞ

şeklinde gösterilirler, yola bağılıdır. Enerji ise yoldan bağımsızdır. Denklem 1.4'ün integrali alınır,

$$\int (\delta Q - \delta W) = \int dE \quad (1.5)$$

$$Q - W = E \quad (1.6)$$

Kapalı sistemler için enerji değişimi; iç enerji (U), Kinetik Enerji (KE) ve potansiyel Enerji (PE) toplamına eşittir.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (1.7)$$

Açık sistemler için toplam enerjiye bir terim daha eklenir. Bu terim akışkanın üzerine yapılan işi temsil eder ve PV olarak bilinir. Burada P basınç, V akışkanın hacmini temsil eder. İç enerji ile PV işinin toplamına entalpi denir, entalpi aşağıdaki denklem ile sağlanır.

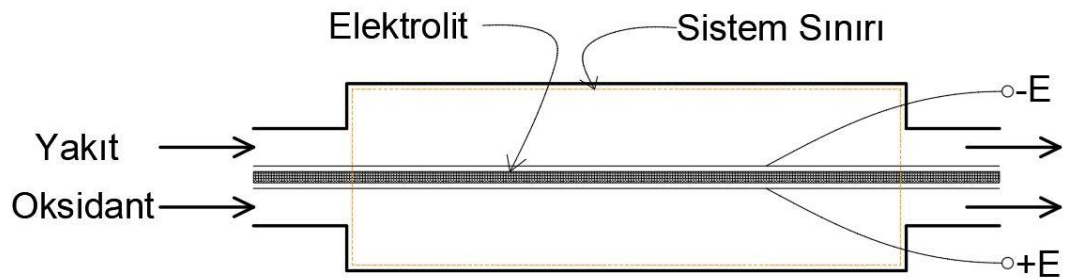
$$H = U + PV \quad (1.8)$$

Sabit bir kontrol hacmi için  $\Delta KE$  ve  $\Delta PE$  sifira eşit olması durumunda 1. Kanuna göre entalpideki değişim;

$$Q - W = \Delta H \quad (1.9)$$

olur.

Termodinamik analiz için bir yakıt pilinin kontrol hacmi olarak gösterilmesi Şekil 1.10'da verilmiştir.



Şekil 1. 10. Yakıt pilinin kontrol hacmi olarak gösterilmesi (Kaya et al., 2017)

## 1. GİRİŞ

---

Termodinamiğin ikinci kanunu entropiyi tanımlar. Entropi bir sistemin düzensizliğinin ölçüsü olarak tanımlanabilir. Bir sistemde entropi oluşmuyorsa o sistem tersinirdir, yani idealdir. Tersinir bir sistemde ısı ve iş oluşumu söz konusu değildir. Tersinmez sistemler ise gerçek sistemlerdir, genişleme, sürtünme, ısı kaybı ve sıcaklık farklarından doğan ısı kaybı nedeniyle entropi oluşur. Isı transferi içeren prosesler sonlu sıcaklık farkları veya sıcaklık gradyeninin minimize edilmesiyle tersinir hale getirilebilir. Entropi bu tersinir ısı transferine bağlı olarak şu şekilde tanımlanabilir;

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{ters} \quad (1.10)$$

Entropideki değişim sadece sistemin ilk ve son yapısına bağlıdır ve yukarıdaki denklemin integre edilmesi ile bulunur;

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{ters} \quad (1.11)$$

Tersinir ısı transferi oluşan bir sistem için sabit sıcaklıkta entropi aşağıdaki denklemlerle açıklanır

$$\Delta S = \frac{Q_{ters}}{T_0} \quad (1.12)$$

### 1.2.2. Sıcaklık ve Basıncın Etkisi

#### Sıcaklığın Etkisi

Gibbs serbest enerjisi sıcaklık ve basınçla değişebilmektedir. İstenilen bir sıcaklık ve basınçta teorik pil potansiyelini hesaplayabilmek için aşağıdaki denklemler kullanılır (Barbir, 2005).

#### Sıcaklığın Etkisi

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1.13)$$

ve



## 1. GİRİŞ

$$E = \frac{-\Delta G}{n.F} \quad (1.14)$$

denklemleri bilinmektedir.

Gibbs serbest enerjisi denklemi, enerji denkleminde yerine yazıldığında;

$$E = \left( \frac{\Delta H}{n.F} - \frac{T\Delta S}{n.F} \right) \quad (1.15)$$

denklemleri elde edilir.

Denklemlerde  $\Delta H$  ve  $\Delta S$  sıcaklığa bağlı fonksiyonlardır. İstenilen herhangi bir sıcaklık için teorik hücre potansiyeli hesaplanabilir. Sıcaklık arttıkça teorik hücre potansiyeli azalmaktadır. Çizelge 1.3 te 4 farklı sıcaklık için teorik hücre potansiyelleri verilmiştir.

**Çizelge 1. 3.** Sıcaklığın teorik hücre potansiyeline etkisi (Barbir, 2005).

T(K)	dH	$\Delta G$	dS	E <sub>th</sub> (V)
298.15	-286.02	-237.34	-0.16328	1.230
333.15	-284.85	-231.63	-0.15975	1.200
353.15	-284.18	-228.42	-0.15791	1.184
373.15	-283.52	-225.24	-0.15617	1.167

### Basıncın Etkisi

İzotermal bir proses için temel termodinamik bilgisi ile Gibbs serbest enerjisindeki değişim şöyle yazılabilir

$$dG = V_m dP \quad (1.16)$$

Yukarıdaki denklemde  $V_m$ ; molar hacim ( $m^3/mol$ ), P; basınç (Pa)'dır.

$$\text{İdeal gazlar için } PV_m = RT \quad (1.17)$$

dir.

## 1. GİRİŞ

---

1.16 denkleminde 1.17 denklemini yerine yazılırsa;

$$dG = RT \left( \frac{Dp}{P} \right) \quad (1.18)$$

olur ve integrali alındığında;

$$G = G_0 + RT \times \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (1.19)$$

olur.

Burada  $G_0$  standart sıcaklık ve basınçta ( $25^\circ\text{C}$  ve  $1 \text{ atm}$ ) Gibbs serbest enerjisidir.  $P_0$  ise referans veya standart basınçtır.

Herhangi bir kimyasal reaksiyon için;



Gibbs serbest enerjisindeki değişim ürünler ile girenler arasındaki farktır.

$$\Delta G = cG_C + dG_D - aG_A - bG_B \quad (1.21)$$

Eşitlik 1.21'i eşitlik 1.19'da yerine koyarsak;

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \times \ln \left[ \frac{\left( \frac{P_C}{P_0} \right)^c \cdot \left( \frac{P_D}{P_0} \right)^d}{\left( \frac{P_A}{P_0} \right)^a \cdot \left( \frac{P_B}{P_0} \right)^b} \right] \quad (1.22)$$

Bu eşitlik Nerst eşitliği olarak da bilinir. Burada P reaksiyona giren gazların basıncı,  $P_0$  ise referans basıncı göstermektedir.

PEM yakıt pilleri için Nerst eşitliği;

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \times \ln \left[ \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}} \right] \quad (1.23)$$

şeklinde yazılır.

## 1. GİRİŞ

Eşitlik 1.15, eşitlik 1.23'te da yerine yazılırsa,

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \times \ln \left[ \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right] \quad (1.24)$$

elde edilir (Barbir, 2005; Bilgili, 2011).

Çizelge 1.4 te farklı basınçlardaki teorik hücre potansiyeli verilmiştir. Bu çizelgeden anlaşılacağı üzere basınç arttıkça hücre potansiyeli artmaktadır.

**Çizelge 1. 4.** Farklı sıcaklık ve basınçlardaki teorik hücre potansiyeli

T(K)	Atm.	200 kPa	300 kPa
298,15	1,230	1,243	1,251
333,15	1,200	1,215	1,223
353,15	1,184	1,200	1,209

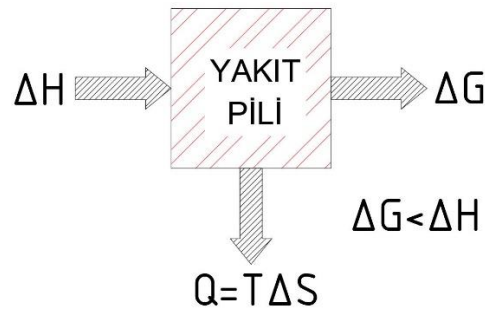
### 1.2.3. Yakıt Pili Verimi

*Termal Verimlilik* =  $\frac{\text{Kullanılan Yararlı Enerji}}{\text{Yakılan Yakıtın Kimyasal Enerjisi}}$  olarak tanımlanmaktadır. Yani

$$\eta = \frac{\text{Yararlı Enerji}}{\Delta H} \quad (1.25)$$

olarak verilebilir.

Bir yakıt pili düşünüldüğünde verimi Gibbs serbest enerjisindeki değişimden elde edilebilir.



**Şekil 1. 11.** Yakıt pili için enerji girdi ve çıktıları

## 1. GİRİŞ

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (1.26)$$

$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$  denklemi için;

$$\Delta G = 56635 \text{ kcal/mol}$$

$$\Delta H = 68269 \text{ kcal/mol dur.}$$

$$\eta = 0,83$$

$$\eta = \frac{\text{Yararlı Enerji}}{\Delta H} = \frac{\text{Yararlı Güç}}{\frac{\Delta H}{\eta}} = \frac{V_{gerçek} \times Akım}{\frac{V_{ideal} \times Akım}{0,83}} = \frac{0,83 \times V_{gerçek}}{V_{ideal}} \quad (1.27)$$

Özet olarak; yakıt pilinin hangi şartlarda işletildiği önemli bir konudur, bu nedenle bir yakıt pili sisteminin performansı hakkında yorum yapabilmek için o sistemin ideal performansını bilmek gerekmektedir. İdeal performans hesaplandıktan sonra işletme esnasında bazı kayıplar meydana gelmektedir, bu kayıplar ideal performanstan çıkarılarak işletme performansı bulunabilir (Kaya et al., 2017).

### 1.2.4. PEM Yakıt Pili için ideal Performans

Polimer Elektrolit membran için anot ve katot reaksiyonu aşağıdaki Çizelge 1.5'te verilmiştir.

**Çizelge 1. 5.** PEM yakıt pili için Anot Katot Reaksiyonları

Yakıt Pili	Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
Polimer Elektrolit Membran	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Elektrokimyasal reaksiyonlar yakıt pillerinin ideal performansını doğrudan etkilerler. PEM gibi düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri katalizör olarak Pt, Ru, Pd gibi değerli metalleri kullanırlar. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri değerli metal katalizörlerle çalışmayabilirler, yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri bu metaller yerine Fe, Ni gibi metalleri katalizör olarak kullanırlar. Ayrıca katalizör olarak Pt kullanan yakıt pillerinde kullanılan yakıtların yüksek saflıkta olması tavsiye edilir, aksi durumda yakıt

## 1. GİRİŞ

---

içerisinde bulunan CO, Pt ile bağ yaparak Pt'un aktivitesini zehirler ve katalizörün aktivasyon özelliğinin kaybolmasına sebep olur. Düşük sıcaklıkta işletilen bir yakıt pilinde katalizör olarak Pt kullanılması durumunda net reaksiyon;



Bir yakıt pilinin ideal performansı Nerst potansiyeli ile belirlenir. Nerst potansiyeli aşağıdaki denklemle belirlenir;

$$E = E^0 + \frac{RxT}{nxF} \times \ln \left( \frac{P_A^a \times P_B^b}{P_C^c \times P_D^d} \right) \quad (1.31)$$

Yakıt pillerinde oluşan net reaksiyonlara göre Nerst potansiyel denklemleri aşağıda verilmektedir.



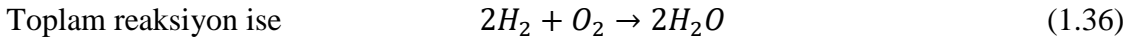
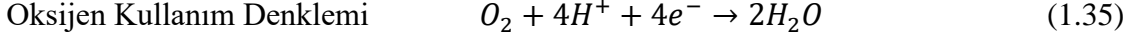
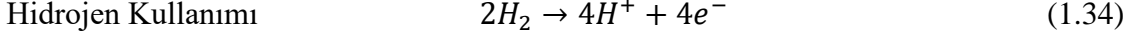
Bu reaksiyon sonucu sistemde her hidrojen molekülü başına iki elektron (2e-) üretilmektedir. Hidrojeni yakıt olarak kullanan PEM yakıt pili sisteminde oluşan Nerst potansiyel denklemi şöyledir:

$$E = E^0 + \frac{RxT}{2xF} \times \ln \left( \frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \right) + \frac{RxT}{2xF} \times \ln(P_{O_2}^{1/2}) \quad (1.33)$$

Bu denklemlerde E: denge potansiyeli; E<sub>0</sub>: ideal potansiyeli; T sıcaklık(K); R gaz sabiti; F Faraday sabiti ve n: reaksiyonlarda ortaya çıkan elektron sayısı olarak tanımlanmaktadır.

### 1.2.5. Yakıt Pilleri için Önemli Eşitlikler

Bu bölümde yakıt pili ile ilgili bazı teorik eşitlikler ve açıklamalara değinilecektir. PEM tipi yakıt pili için temel reaksiyonlar şu şekildedir.



Bu reaksiyonun tamamlanması sonucunda  $4xF$  kadar yük oluşur. Pratikte sisteme teorik oksijen ve hidrojen miktarından fazlası beslenmelidir.

Aşağıda oksijen kullanım miktarı, hava besleme ve çıkış miktarı, hidrojen kullanım miktarı, hidrojen enerji içeriği, su üretim oranı ve ısı üretim miktarlarının hesaplanmasına yönelik eşitlikler ve açıklamalara değinilmiştir.

### Oksijen ve Hava Kullanım Miktarlarının Hesaplanması

Yukarıda oksijen kullanım denklemi  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$  olarak verilmişti. Bu denklemde 1 mol oksijen ile 4 elektron üretilmektedir. O zaman;

$$Yük = 4xF \times O_{2\_miktar} \quad (1.37)$$

Bu denklem zamana bölünüp yeniden düzenlenirse;

$$O_{2\_kul} = \frac{I}{4xF} \text{ mol/s} \quad (1.38)$$

olur. Yapısında  $n$  tane hücre olan bir yakıt pili yığını için bu değer şöyle olur;

$$O_{2\_kul} = \frac{I \times n}{4xF} \text{ mol/s} \quad (1.39)$$

olur.

## 1. GİRİŞ

---

Eğer yakıt pili yığınındaki her bir hücrenin ortalama hücre voltajı  $V_c$  ise o zaman güç denklemi aşağıdaki gibi açıklanır.

$$P_e = V_c \times I \times n \quad (1.40)$$

ve akım,

$$I = \frac{P_e}{V_c \times n} \quad (1.41)$$

olur. Oksijen kullanım miktarını veren eşitliği yeniden düzenlemek gerekirse;

$$O_{2\_kul} = \frac{P_e}{4 \times V_c \times F} \text{ mol/s} \quad (1.42)$$

haline gelir. mol/s birimi kg/s birimine çevirmek için denklem düzenlenirse

$$O_{2\_kul} = \frac{32 \times 10^{-3} P_e \text{ kg}}{4 \times V_c \times F \text{ s}} = 8,29 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \quad (1.43)$$

haline dönüşür.

Eğer sistemde oksijen değil de hava kullanılıyorsa Havanın içindeki oksijen oranı %21 ve havanın molekül ağırlığı 28,97 kg/mol olarak alınıp ilgili denklemde yeniden hesap yapılırsa, kullanılması gereken havanın kütleli debisi hesaplanmış olur.

$$Hava_{kul} = \frac{28,97 \times 10^{-3} \times P_e}{0,21 \times 4 \times V_c \times F} = 3,57 \times 10^{-7} \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \quad (1.44)$$

Teorik olarak yukarıdaki formülden hesaplanan hava beslenirse; katot tarafından çıkan hava içerisinde hiç oksijen kalmayacaktır. Fakat pratikte teorik olarak gerekli hava miktarından fazlası kullanılmaktadır.  $\lambda$  stokiyometrik hava oranı olarak verilecek olursa, yukarıdaki denklem yeniden düzenlenerek genel bir denklem elde edilebilir

## 1. GİRİŞ

---

$$Hava_{kul} = 3,57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \quad (1.45)$$

Yukarıdaki denklemde verilen kütleli debi değeri m<sup>3</sup>/h cinsinden istersek 3050 ile, L/ dk cinsinden istersek 5,1 x 10<sup>4</sup> ile çarpmak gerekmektedir (Kaya et al. 2017)

### Hidrojen Kullanım Miktarlarının Hesaplanması

Hidrojen kullanım miktarı da oksijen kullanım miktarına benzer şekilde hesaplanmaktadır. İki hesabı birbirinden ayıran tek nokta hidrojen molekülünden iki elektron oluşmaktadır.

$$H_{2\_kul} = \frac{I \times n}{2 \times F} \text{ mol/s} \quad (1.46)$$

olur. Buradan;

$$H_{2\_kul} = \frac{P_e}{2 \times V_c \times F} \text{ mol/s} \quad (1.47)$$

haline gelir. Hidrojenin kütlesi 2,02 g/mol alınırsa stokiometrik şartlarda;

$$H_{2\_kul} = \frac{2,02 \times 10^{-3} P_e}{2 \times V_c \times F} = 1,05 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \quad (1.48)$$

olur. Kullanılan yakıtın saf değil de CO içermesi durumunda sonuçlar karışımdaki CO'ın kısmi basıncına göre değişiklik gösterecektir.

### Su Üretim Miktarı

PEM yakıt pillerinde iki elektron başına 1 mol su üretilmektedir. Oksijen kullanım miktarı hesabında anlatılan

$$O_{2\_kul} = \frac{P_e}{4 \times V_c \times F} \text{ mol/s} \quad (1.49)$$

formülü kullanılarak;



## 1. GİRİŞ

---

$$Su_{\text{üretimi}} = \frac{P_e}{2 \times V_c \times xF} \text{ mol/s} \quad (1.50)$$

denklemini elde edilir. Suyun molekül ağırlığı  $18,02 \times 10^{-3}$  kg/mol olduğundan denklem yeniden düzenlenirse;

$$Su_{\text{üretimi}} = 9,34 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s} \quad (1.51)$$

elde edilir. Bu değer PEM yakıt pili için su üretim miktarının stokiyometrik orana yakın olduğunu göstermektedir. Eğer beslenen hidrojen içerisinde CO varsa o zaman durum biraz değişmektedir ve su üretimi azalmaktadır (Kaya et al., 2017).

### Üretilen Isı Miktarı

Yakıt pilleri çalıştıkları zaman ısı ve elektrik üretirler. Eğer yakıt pilleri hiç kayıpsız çalışmış olsalardı üretmiş oldukları voltaj değerleri sistemden üretilen suyun fazına göre değişiklik göstermektedir. Eğer yakıt pilinde üretilen su sıvı fazda ise üretilen voltaj değeri 1,48 V, eğer sistemde üretilen su gaz fazında ise 1,25 V değerindedir. Gerçek çalışma şartları altında üretilen voltaj ile ideal voltaj değerleri arasında farklılıklar vardır, ideal ve gerçek voltaj arasındaki bu fark bize elektrik enerjisine çevrilemeyen kısım hakkında bilgi verir. Teorik olarak bu değer bize ısıya dönüşen enerji miktarını verir (Kaya et al., 2017).

Bu reaksiyon sonucunda sıvı formda ortaya çıkan su miktarı çok azdır. Bunun diğer anlamı enerji yakıt pilini elektrik, duyarlı ısı ve su buharının gizli ısısı olarak terk etmektedir.

Yapısında n tane hücre bulunan yakıt pili yığınının ürettiği ısı şu şekilde hesaplanabilir.

$$IsI_{\text{üretilen}} = n \times I \times (1,25 - V_c) \times W \quad (1.52)$$

Üretilen elektriksel güç anlamında ise denklem aşağıdaki hali alır;

$$IsI_{\text{üretilen}} = P_e \times \left( \frac{1,25}{V_c} - 1 \right) \times W \quad (1.53)$$

## 1. GİRİŞ

---

Güç denklemi ise şöyle elde edilir:

$$P_e = n x I x V_c \quad (1.54)$$

Elektriksel iş denklemi şu şekilde verilmektedir:

$$W_{elk} = n x F x E \quad (1.55)$$

### 1.2.6. PEM Yakıt Pili Elektrokimyası

PEM yakıt pilinin anot ve katot yüzeyinde eş zamanlı gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verilmektedir:

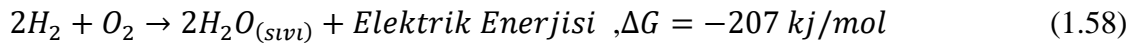
Anot yüzeyinde gerçekleşen yarı hücre reaksiyonu aşağıda verilmektedir:



Katot yüzeyinde gerçekleşen yarı hücre reaksiyonu



Tüm hücrede gerçekleşen toplam reaksiyon



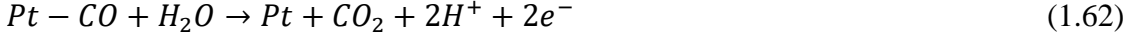
Anotta meydana gelen hidrojenin parçalanma reaksiyonu çok basamaklıdır ve farklı katalizörler kullanıldığı zaman farklı şekillerde gerçekleşir. Katalizör olarak platin kullanılması durumunda reaksiyon mekanizmasının özeti aşağıda sunulmuştur. İlk olarak hidrojen platin yüzeyine adsorblanır ve daha sonra bir proton ve elektron açığa çıkar.



## 1. GİRİŞ

---

Eğer hidrojen saf değil ve içerisinde istenmeyen CO varsa bu durum platin katalizörün zehirlenmesiyle sonuçlanır, bu durumda platin katalizör özelliğini yitirir veya CO gazı da aşağıdaki reaksiyona göre elektro-katalitik olarak oksidasyona uğrayarak CO<sub>2</sub> gazı, proton ve elektron ürünlerini açığa çıkarır.



Yakıt pilleri geniş bir sıcaklık aralığında ısı makinelerinden çok daha verimlidir. Bu yakıt pillerinin temel üstünlüklerinin birisidir. Bilindiği üzere bir reaksiyonda toplam enerji, Gibbs serbest enerji değişimi ve toplam entropi değişiminden oluşur (Oral 2005).  $\Delta H$  reaksiyon entalpi değişimi,  $\Delta G$  Gibbs serbest enerji değişimi,  $\Delta S$  reaksiyon sırasındaki entropi değişimi, T ise reaksiyon sıcaklığı olmak üzere ;

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1.63)$$

Gibbs serbest enerji değişimi; yakıt pilinde elektron hareketi ile yapılan elektriksel işi ifade etmektedir. Buna göre yapılan iş ( $W_e$ ); reaksiyondaki elektron sayısı(n), Faraday sabiti ve ideal elektriksel gerilime bağlı olarak ifade edilmektedir.

$$W_e = \Delta G = -nxFxE \quad (1.64)$$

Gibbs serbest enerji değişimi standart şartlar için (25°C ve 1 atm)  $\Delta G^\circ$  ile ifade edilir.

$$\Delta G^\circ = -nxFxE^\circ \quad (1.65)$$

Genel bir reaksiyon yazmak gerekirse



Reaksiyona ait Gibbs serbest enerji değişimi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

## 1. GİRİŞ

---

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \times \ln \left( \frac{P_A^a \times P_B^b}{P_C^c \times P_D^d} \right) \quad (1.67)$$

Standart şartlardaki Gibbs enerji değişimine bağlı bu denklemde; R ideal gaz sabiti, P<sub>A</sub>, P<sub>B</sub>, P<sub>C</sub>, P<sub>D</sub> reaksiyona giren ve çıkan gazların kısmi basınçlarıdır.

Yukarıdaki genel denklem PEM yakıt piline uyarlanırsa reaksiyon;



Olur. Bu reaksiyona ait Gibbs enerji denklemi ise aşağıdaki şekilde oluşur:

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \times \ln \left( \frac{P_{H_2} \times P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1.69)$$

Yakıt pili teorik verimi ve teorik elektrokimyasal yakıt pili verimi ise aşağıdaki denklemlerle verilmektedir:

$$\eta_{yp,t} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (1.70)$$

$$\eta_{e,t} = \frac{E}{E^0} \quad (1.71)$$

### 1.2.7. Yakıt Pilindeki Kayıplar

Hücre voltajının azalması ile ilgili başlıca kayıplar şunlardır: (Yaslan, 2014; Çalışır 2013). Şekil 1.12 de yakıt pili ideal ve gerçek voltaj-akım karakteristiği verilmiştir.

#### Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon enerjisi hücrede meydana gelen reaksiyonların sürdürülebilmesi için gerekli enerjidir. Üretilen gerilimin bir kısmı elektrottan elektrota transfer sırasında oluşan kimyasal reaksiyon sırasında kaybolur. Kaybolan bu gerilime aktivasyon kayıpları denir ve aktivasyon kaybı doğrusal değildir.

### Yakıt Geçişleri ve iç akım Kayıpları

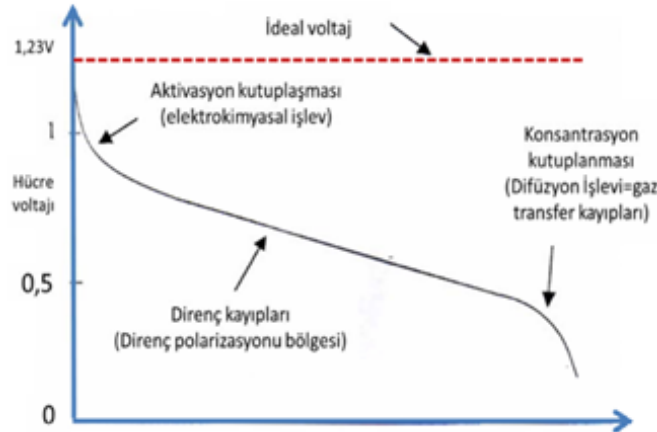
Gerilim düşüşünün bir diğer nedeni ise atık yakıtın ve elektrotların elektrolitten geçmesidir. Normal şartlar altında elektrolitin sadece iyon geçişine müsaade etmesi gerekmektedir fakat bu pratikte iyon geçişinin yanında az da olsa gaz ve elektrot geçişi ile de sonuçlanmaktadır. Yakıt geçişi ve iç akım kayıplarının en önemli olduğu yakıt pili türü Doğrudan metanollü yakıt pilleridir, diğer yakıt pillerinde bu geçişler ihmal edilebilecek seviyededir.

### Omik Kayıplar

Omik kayıplar yakıt hücresinin değişik bileşenlerinin dirençlerinin bir bileşkesidir. Omik kayıplara gerilim düşüşü kayıpları da denilmektedir. Omik kayıpların birçok sebebi vardır. Bunlardan birisi elektronların akışı boyunca izlediği yoldan dolayı oluşan iç dirençlerdir. Omik kayıpların diğer bir sebebi ise hidrojen iyonlarının membrandan geçişine gösterilen dirençtir. Omik kayıplar nedeniyle oluşan gerilim düşüşü akım yoğunluğuyla orantılıdır ve doğrusaldır.

### Konsantrasyon Kayıpları

Bu kayıplar elektrotlarda hidrojen ve oksijen gazlarının konsantrasyonlarının azalmasından meydana gelmektedir. Konsantrasyondaki değişim elektrot yüzeylerine yeterli miktarda reaktanın taşınmaması anlamına gelmektedir. Konsantrasyon kayıplarının diğer bir isimlendirmesi ise kütle transfer kaybıdır. Literatürde konsantrasyon etkileri Nernst denklemi ile modellendiği için bu kayıplara “Nernstian” diyenlerde bulunmaktadır.



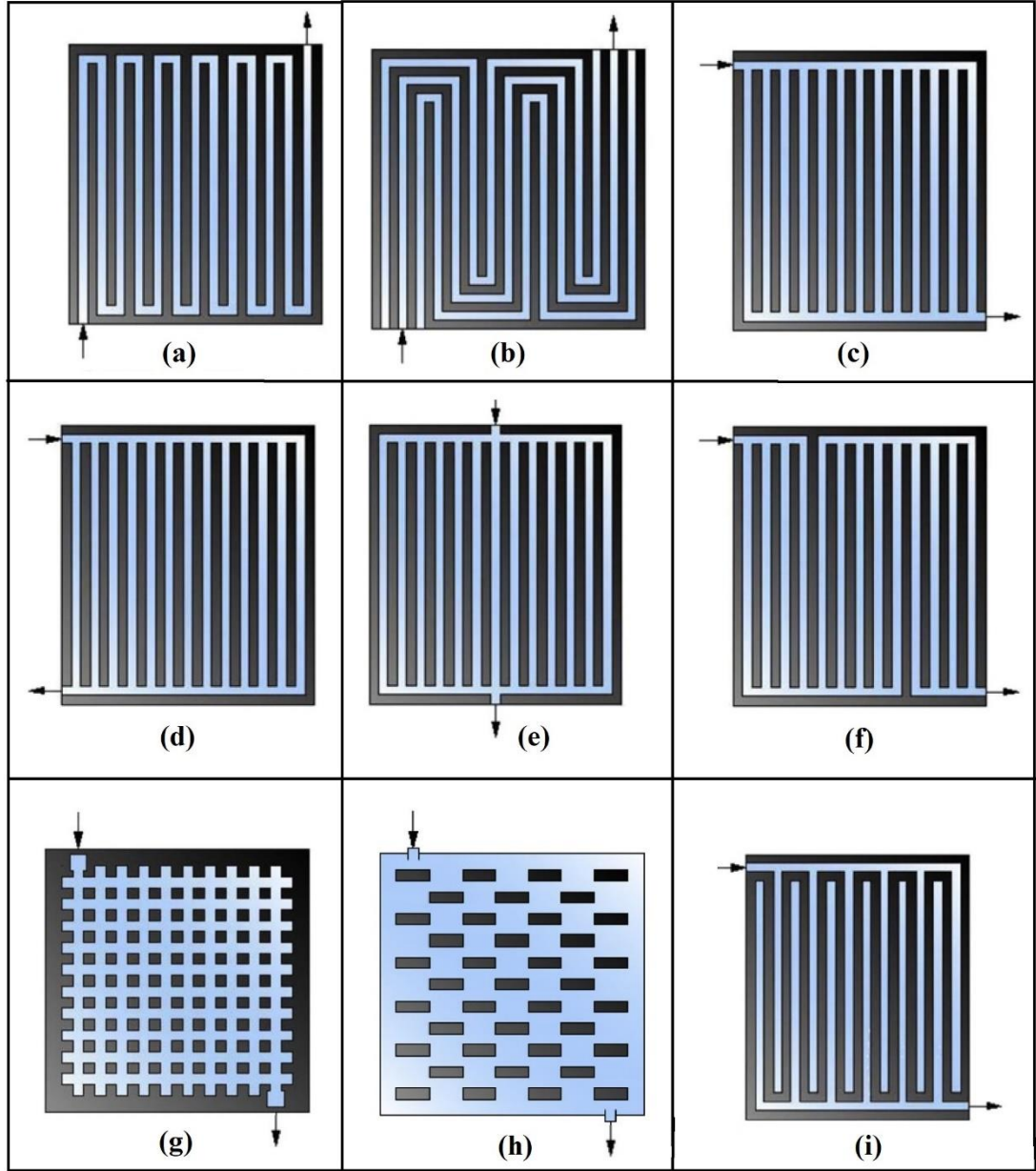
Şekil 1. 12. Yakıt pili ideal ve gerçek voltaj-akım karakteristiği (Yaslan, 2014)

Bu kayıplardan dolayı yakıt pili gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$V_c = E - \Delta V_{aktivasyon} - \Delta V_{omik} - \Delta V_{konsantrasyon} \quad (1.72)$$

### 1.3. Yakıt Pili Hidrodinamiği

Bipolar plakalar yakıt pillerinin temel bileşenlerinden birisidir, çünkü bipolar plakalar sistemin performanslı çalışması için farklı görevleri yerine getirmektedir. Bu işlevlerin bazıları fiziksel, kimyasal ve akışkanlar dinamiği olgularıyla ilişkilendirilse de akış alanı geometrisi ile yakından ilgilidir. Akış alanı tasarımları üretilen güç yoğunluğunun optimize edilmesi için çok önemlidir. Literatürde tasarlanmış farklı akış alanlarının farklı çalışma koşullarında avantajlı ve dezavantajlı oldukları durumlar söz konusudur (Li and Sabir, 2005; Manso et al., 2012). Şekil 1.13'te literatürde sıklıkla kullanılan akış alanı tipleri verilmiştir.



Şekil 1.13. Literatürde sıkça kullanılan akış alanı tipleri (Manso et al. 2012)

Şekil 1.13 te harflerle verilen akış alanı tiplerinin literatürdeki adlandırılması aşağıda maddeler halinde sunulmuştur;

- a) Tekli serpantin tipi akış alanı
- b) Çoklu serpantin tipi akış alanı
- c) Paralel tip akış alanı
- d) U – paralel tip akış alanı
- e) Simetrik U tipi akış alanı
- f) Seri-paralel tip akış alanı
- g) Kanatçık tipi akış alanı

## 1. GİRİŞ

---

- h) Kaskat tipi akış alanı
- i) Birbirine kenetlenmiş(interdigitated) akış alanı

Literatürde yukardaki şekilde tasnif edilmiş akış alanları tipleri haricinde özgün tasarım sunan araştırmacılar da olmuştur. Son yıllarda canlılardan ve doğadan esinlenerek tasarlanan akış alanı tasarımlarına, spiral serpantin akış alanlarına, metal köpük akış alanlarına, akış hattına uygulanan blokajlama ve trapezoidal akış alanı çalışmalarına da rastlanmıştır. Bununla birlikte literatürde tasnif edilen akış alanı tasarımları haricindeki çalışmaların sayısal ağırlıklı olduğu söylenebilir. Akış alanı olarak tasarlanan geometrilerin günümüz teknolojiyle üretilebilir şartlarda olması ve deneysel doğrulamalarla desteklenmesi önemli bir konudur.





### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Rahgoshay ve arkadaşları PEM tipi yakıt pili yığınlarının verimli çalışmasının büyük ölçüde soğutma sistemine bağlı olduğunu belirterek sistemdeki sıcaklığın uniform olarak dağılmaması PEM yakıt pilinin ömrünü azaltacağını, dengesiz bir elektrokimyasal reaksiyon oluşumuna sebep olacağını vurgulamışlardır. Çalışmalarında Serpantin ve paralel tipte soğutma plakaları dizayn edilerek bu iki plaka Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı kullanılarak simüle edilmiş ve kıyaslanmıştır. Soğutucu kanal dizaynları birbiri içerisinde kıyaslanırken soğutucu kanal varken ve yokken ki durumlarda basınç düşümü, minimum ve maksimum sıcaklık gradyeni gibi fiziksel parametrelere göre mukayese edilmiştir (Rahgoshay et al., 2017).

Ghasemi ve arkadaşları yakıt pillerinde su ve ısı yönetiminin performans açısından çok önemli olduğunu belirterek, uygun soğutma tasarımı ile yakıt pili performansının iyileştirilebileceğini söylemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda serpantin tipi akış alanına sahip PEM Tipi yakıt pili üzerine 6 farklı soğutucu kanal tasarımı yaparak, bu tasarımların pil performansına etkisini incelemişlerdir. Sonuçlarında soğutucu kanal tasarımlarının yakıt pili sıcaklık gradyenine etkisi ve tasarımların basınç düşümleri incelenmiştir (Ghasemi et al., 2017).

Chavan ve Talange PEM yakıt pilinin fiili performanslarını çalışma koşulları aracılığıyla doğrudan bulabilmenin kolay olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında PEM yakıt pilinin dinamik davranışını tespit etmek amacıyla kara kutu yaklaşımı (black box approach) ile model önermişlerdir. Önerdikleri modeli sonuç doğrulama için 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip bir PEM yakıt pilinde sunulan sonuçlar ile kıyaslamışlardır ve önerdikleri bu modelin farklı çalışma koşulları altında PEM yakıt pilinin polarizasyon davranışını tahmin etmek için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Chavan and Talange, 2018).

Chavan ve Talange PEM yakıt pillerinin performansını belirlemek için literatürde birçok matematiksel model olduğunu belirtmişlerdir. Tüm bu modellerin karmaşık olduğunu ve modelleme yapabilmek için çok miktarda veriye ihtiyaç duyduklarını vurgulamışlardır. Çalışmalarında PEM yakıt pillerinin farklı çalışma koşulları altında

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

performanslarını değerlendirmek için basit ama gerçekçi bir Matlab Simulink modeli önermişlerdir. Önermiş oldukları model sonuçlarını literatürdeki 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip bir PEM pilinin performans sonuçlarıyla kıyaslamışlardır (Chavan and Talange, 2017).

Göbbling ve arkadaşları kuru katot kaynağı olan ve katodun dışarıdan nemlendirildiği bir PEM yakıt pilinin özel durumları üzerine çalışmışlardır. Çalışma suyun akış alanı içerisindeki yerini tespit etmeye yönelik teorik bir model önermektedir. Önerdikleri bu modelin doğruluğunu aynı şartlarda işlettikleri bir yakıt pilinden nötron görüntüleri alarak doğrulamışlardır ve elde ettikleri sonuçlar önermiş oldukları teorik model ve görselleştirme sonuçlarının uyum içerisinde olduğunu göstermiştir (Göbbling et al., 2016).

Khazae ve arkadaşları 11 kw lık üçgen kanal geometrisine sahip PEM yakıt pilinin ekserji analizini deneysel değerler kullanarak yapmışlardır. Oksijenin giriş sıcaklığı, hidrojenin giriş sıcaklığı, pil sıcaklığı, giriş basıncı, oksijen debisi, hidrojen debisi gibi parametrelerin polarizasyon eğrileri üzerindeki etkilerini ve normal koşullar altında tersinmezlikleri araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, oksijen ve hidrojenin giriş sıcaklığı, pil sıcaklığı ve giriş basıncının artması ile ekserjik verimin artırılabilceğini ve hücrenin tersinmezliklerinin azaltılabileceğini göstermiştir (Khazae et al., 2012).

Kahraman ve Orhan PEM tipi yakıt pilleri için akış alanı tasarlama ile ilgili hususları ve kısıtlamaları incelemişlerdir. Bunun için hali hazırda mevcut olan akış alanı konfigürasyonlarını kapsamlı bir şekilde detaylandırmışlardır. Ayrıca akış alanı plakaları için kullanılan yaygın malzemeleri ve malzeme özelliklerini araştırmışlardır (Kahraman and Orhan, 2017).

Li ve Sabir PEM tipi yakıt pilindeki bipolar plakalar üzerine dizayn edilen farklı akış alanı tiplerini içeren makaleleri derlemiş ve bu makaleleri sınıflandırmışlardır. Akış alanlarını pim tipi, serpantin tipi, düz kanal tipi ve birbirine geçirilmiş (interdigitated) kanallar olarak tasnif etmişlerdir. Bipolar plakaların yakıt pillerindeki en önemli parçalarından birisini olduğunu vurgulayarak, bipolar plakaların tasarımıdaki gelişmelerin PEM yakıt pillerinin ticarileşmesi için belirlenen maliyet ve performans hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabileceği sonucuna varmışlardır (Li and Sabir, 2005).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Antunes ve arkadaşları karbon esaslı bipolar plaka kullanan makaleleri incelemişlerdir. PEM yakıt pili teknolojisinin bipolar plaka performansına bağlı olduğunu, bipolar plaka performansının nihai özelliklerinin ise kullanılan malzemeler ile ilişkili olduğuna dikkat çekmişlerdir. İnceledikleri makaleler sonucunda; Doğru malzeme seçiminin başarılı bir proje başlatmak için temel bir araç olduğu sonucuna varmışlardır. (Antunes et al., 2011).

Bachman ve arkadaşları serpantin tipi akış alanına sahip bir PEM yakıt pili üzerinde deneysel araştırmalar yapmışlardır. Serpantin akış kanallarının boyunun uzunluğu ile basınç düşümü, reaktif gazın konsantrasyon değişimi ve kanal içerisindeki slug oluşumu arasında ilişki kurmaya çalışmışlardır. Kanal uzunluğunun performans üzerinde anlamlı bir etkisinin olup olmadığını belirlemek için bir varyans analizi yapmışlardır. 25 cm lik kanalın 5 cm lik kanala göre %18 daha yüksek maksimum güç yoğunluğuna ve %87 daha yüksek maksimum akım yoğunluğuna ulaştığı sonucuna varmışlardır (Bachman et al., 2012).

Bachman ve arkadaşları serpantin ve paralel akış alanı tasarımlarının bir arada kullanıldığı yeni bir fikir sunmuşlardır. Sunmuş oldukları tasarımda çıkış basıncını kontrol eden bir PEM yakıt pili üretilmiştir. Bu tasarım için farklı çıkış basınçları ve katot üzerindeki farklı stokiyometri değerleri göz önünde bulundurularak polarizasyon eğrileri çizilmiştir. Çalışmanın sonucunda optimal çıkış basıncında çapraz akışa sahip paralel akış alanı %24 iyileşme sağlamıştır (Bachman, 2012).

Shimpalee ve arkadaşları PEM yakıt pillerindeki reaktant türlerinin konsantrasyonundaki dağılımlar yerel akım yoğunluğu, sıcaklık ve su içeriğinin PEMFC alanı üzerindeki dağılımların nasıl olacağını belirlediğini belirtmişlerdir. Bu dağılımların kanallarda sel ve MEA dehidrasyonu gibi etkilere yol açarak yakıt pilinin farklı bölgelerinde strese neden olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında bipolar plakalar üzerine farklı üretim yöntemlerinin(örneğin damgalama, elektrokimyasal aşındırma, hidro biçimlendirme vb) kanal performansını nasıl etkilediğini araştırmışlardır (Shimpalee et al., 2011).

Chen ve Wu yer çekiminin yakıt pili performansını araştırmak üzere kanalın yön ve açısını değiştirerek farklı nemlendirme koşullarına karşılık gelen polarizasyon

eğrilerini elde etmişlerdir. Katot ve anodun yerleşme pozisyonuna, pil sıcaklığına, katot ve anot gazlarının nemlendirme sıcaklığına göre 4 farklı deneysel sonuç grubu elde etmişlerdir. Sonuçlar, PEM yakıt pili anot yukarı doğru yerleştirildiğinde PEM yakıt pili katot kanalı içerisindeki sıvı suyu boşaltmak için avantajlı duruma geçtiğini aksi durumda yer çekimi suyun tahliyesinde olumsuz etki oluşturduğu gözlemlenmiştir (Chen and Wu, 2010).

Kahveci ve Taymaz su ve ısı yönetiminin hidrojen akış hızı, oksijen akış hızı, pil sıcaklığı ve nemlendirme sıcaklıklarının kontrol altında tutularak sağlanabileceğini vurgulamışlardır. Bu amaçla 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip PEM yakıt pilini bahsi geçen parametreleri değiştirerek deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında; deney sayısını optimize etmek için Yanıt Yüzey Metodunu (RSM) kullanmışlardır. Çeşitli faktörlerin yakıt pili maksimum güç yoğunluğuna etkilerini ve katkılarını hesaplamak için ANOVA (Varyans Analizi) analizlerini kullanmışlardır (Kahveci and Taymaz, 2014).

Kanani ve arkadaşları tekli serpantin tipi akış alanı geometrisine PEM yakıt pilinin çalışma koşullarını optimize etmek üzere 4 adet parametreyi değiştirmişlerdir. Yakıt pilinden elde edilen güç çıktısı ile bu dört parametreyi ilişkilendirmek üzere yanıt yüzey yöntemi kullanmışlardır. Bu istatistiksel yöntemi kullanarak hedef fonksiyon ile parametreler arasında ikinci dereceden bir ilişki sunan denklem elde etmişlerdir. Elde ettikleri modelin öngörülerini deneysel testlerle doğrulamış ve deneysel verilerle uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir (Kanani et al., 2015).

Barati ve arkadaşları farklı başlık açılarındaki kanatçıkların yakıt pili performansına olan etkisini araştırmak üzere 2 boyutlu sayısal bir model geliştirmişlerdir. Akış kanalları içerisine yerleştirilen kanatçıkların etkisi ile performans arasında ilişki kurmak üzere yanıt yüzey yöntemi kullanmışlardır. Sonuç olarak blok yüksekliğinin ve hidrojen debisinin performansı etkileyen en önemli faktör olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Barati et al., 2018).

Roudbari ve arkadaşları katalizör üzerine yapılan platin yüklemesinin performansa olan etkisini araştırmak üzere bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmayı yürütmek üzere merkezi kompozit tasarım kullanarak yanıt yüzey yöntemi ile deney

tasarımı yapmışlardır ve bu deney tasarımı sonucunda elde ettikleri en yüksek verim  $29.63 \text{ mW/cm}^2$  olmuştur (Roudbari et al., 2019).

Han ve arkadaşları PEM yakıt pili için optimum operasyon şartlarını araştırmak üzere çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında sistemden türetilen pratik modelleri sistemin verimliliğini en üst düzeye çıkartmak için formüle etmişlerdir. Sistem bileşenlerinin çoğu için ampirik ve yarı deneysel modeller; yapay sinir ağları ve deneysel denklemlere dayalı olarak geliştirilmiştir. Ayrıca, çalışma parametrelerinin sistem verimliliği üzerindeki etkilerini açıklamak için duyarlılık analizi yapılmıştır, daha sonra çeşitli sistem yüklerinde en uygun çalışma koşulları aranmıştır. Optimizasyon sonuçları, sistemin en kötü ve en iyi çalışma koşulları arasında %1,2-5,5 arasında verim değişikliği oluştuğunu göstermiştir (Han et al., 2016).

J.Wang akış alanı tasarımlarını araştırmak üzere yapılmış çalışmalarını derlemiştir. Akış alanı tasarımları ve teorik modellerin geliştirilmesi ile ilgili kavram ve kriterlerdeki ana konuları analiz etmiştir. Çalışmada akış alanı tasarımlarının neden entegre performans, akış koşulları, yapı ve elektrokimyasal süreçler için stratejik bir çözüm olduğu konusuna odaklanılmıştır. Son olarak, eşit olmayan akış dağılımının yanı sıra yakıt pillerinin performans düşüşünün üstesinden gelmek için gerekli olan kriterleri ve önlemleri ele almıştır (Wang, 2015).

Manso ve arkadaşları akış alanı tasarımında geometrik parametrelerin yakıt pili performansına etkisini araştıran makaleleri incelemişlerdir. PEM tipi yakıt pillerinin performansları çalışma koşulları, hücre içi taşınım olayları ve elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği ve aynı zamanda bileşenlerin özellikleri gibi birçok faktöre bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Farklı akış alanı türleri, akış yönü, kanal uzunluğu ve sayısı, gaz akış yönünde engel kullanımının etkisi gibi başlıkları ele alarak makaleleri tasnif etmişlerdir. Sonuç olarak; Bipolar plakalar üzerine işlenmiş akış kanallarının performansa ciddi etkisi olduğunu ve verimli akış kanalları tasarlanmasının üzerinde çalışılması gerektiği sonucuna varmışlardır (Manso et al., 2012).

Alaefour ve arkadaşları akış alanı düzeninin MEA kondisyonuna etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalarında hem anot hem de katot tarafında serpantin tipi akış alanı düzenleri ile koşullandırılmış MEA ların düz paralel akış alanı düzenleri ile

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

şartlandırılmış MEA lardan daha %12 daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir (Alaefour et al., 2018).

Velisala ve Srinivasula tekli, çiftli ve üçlü serpantin akış alanı konfigürasyonlarının PEM yakıt pilinin performansına etkisini hem sayısal hem de deneysel olarak araştırmışlardır. İlk olarak tekli, ikili ve üçlü modelleri 3 D olarak Ansys Fluent CFD yazılımını kullanarak simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Sayısal simülasyonlar sonucunda yakıt pili performansı, basınç dağılımı, hidrojen kütle oranı, oksijen aktivitesi, akım yoğunluğu dağılımı ve membran su içeriği gibi önemli parametreleri sunmuşlardır. Daha sonra sayısal öngörülerini doğrulamak için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Son olarak sayısal ve deneysel olarak elde edilen performans eğrilerini karşılaştırmış ve tekli serpantin tipi kanalın elektrokimyasal performansının ikili ve üçlü kanal tasarımlarından daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir (Velisala and Srinivasulu, 2018).

Wen ve arkadaşları PEM yakıt pilinin etkinliğini artırmak için metal bipolar plaka üzerine baklava dilimine benzeyen, kesişen bir akış alanı önermişlerdir. Akış kanalının ayrıntılı kısımlarını optimize etmek için Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımını kullanmışlardır. Akış alanının optimizasyon parametrelerini; polarizasyon eğrisi, akım yoğunluğu dağılımı, oksijen dağılımı ve su kütlesi dağılımı olarak belirlenmiştir. Tasarlamış oldukları yeni akış alanının etkinliğini belirlemek için tekli serpantin modelini baz almışlardır. Sonuçlar optimal çalışma parametrelerinden; hidrojen debisinin 300 mL/dk, havanın debisinin 500 ml/dk ve çalışma sıcaklığının 80 derece olduğunu göstermiştir. Bu çalışma şartları altında önermiş oldukları modelin tekli serpantin tipi kanal tasarımı performansından daha iyi olduğunu göstermiştir (Wen et al., 2018).

Chowdhury ve Akansu tekli serpantin tipi akış alanına sahip bir PEM yakıt pilini deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada bipolar plaka üzerindeki kanalların derinliğini giriş ve çıkış uzunluğu boyunca yakınsak / ıraksak akış etkisi oluşturacak şekilde dizayn etmişlerdir. Bu tasarımlardan elde ettikleri sonuçları 1 mm ve 2 mm sabit kanal derinliğine sahip kanallar ile kıyaslamışlardır. Deneysel sonuçlar, hem yakınsak hem de ıraksak akış alanlarının konvansiyonel akış alanlarından %19.227 oranında daha iyi güç elde ettiğini göstermişlerdir. Bu sebeple yakınsak ve ıraksak tasarımların yakıt pili performansını artırabileceğini savunmuşlardır (Chowdhury and Akansu, 2017).

Nie ve arkadaşları bipolar plakaların PEM yakıt pillerinin anahtar bileşenleri olduğunu savunarak, bipolar plakalar üzerindeki akış kanallarının uygun şekilde tasarlanması gerektiğini söylemişlerdir. Çalışmalarında tasarlamış oldukları akış alanına ilişkin sayısal ve deneysel verileri, akış kanalındaki basınç ve hız dağılımlarını incelemişlerdir. İnceledikleri akış aralığı için hesaplanan ve ölçülen basınç düşümleri oldukça uyumludur. Sonuçlar, basıncın giriş hattından çıkış hattına doğru diyagonal şekilde düştüğünü göstermiştir (Nie et al., 2009).

Cooper ve arkadaşları birbirine kenetlenmiş(interdigitated) akış alanı tasarımı için kanal uzunluk ve genişliğinin performans artışına olan etkisini araştırmak üzere çalışma yapmışlardır. Çalışmanın deneysel kısmında yapmış oldukları tasarımların net güç yoğunluğuna olan etkilerini bulmuşlardır. Farklı en/ boy oranlarına sahip kanallarda değişik stokiyometrilere deney yapmışlar ve kanalların nötron radyografisini çekmişlerdir. Almış oldukları nötron radyografisi sonuçları ile stokiyometri, kanal en/boy oranı ve su oluşumu arasında ilişki kurarak çıkarımlarda bulunmuşlardır (Cooper et al., 2017).

Y. Wang ve arkadaşları PEM yakıt pilleri için katot akış alanı tasarımı yapmışlardır. Çalışmalarında katot akış alanı için yeni bir tasarım önermişler ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Önerdikleri kanal; ana kanallar ve alt kanallar şeklinde paralel bir akış alanı tasarımıdır. Ana kanal girişleri membranı nemlendirmek ve yüksek proton iletkenliğini korumak için nemli hava ile beslenirken, alt kanal girişi akış kanalından su ayrılmasını artırmak için kuru hava ile beslenmiştir. Tasarlamış oldukları bu kanalın maksimum güç yoğunluğu geleneksel tasarıma kıyasla %13,2 iyileşme sağlamıştır (Wang et al., 2017).

Seyhan ve arkadaşları 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip PEM tipi yakıt pilleri bipolar plakaları üzerine sinüzoidal dalgalanmalara sahip bir akış alanı tasarlamışlardır. Deneyler 3 farklı genlik (0,25-0,75mm) ve üç farklı pil sıcaklığına göre incelenmiştir. Bu deneysel tasarımlara göre yapay sinir ağları kullanılarak çıkış akımının tahmin edilmesi düşünülmüştür. Sonuçlar, en düşük genliğe sahip kanalın en iyi performansı sunduğunu ve %20.15 artışa sebep olduğunu göstermiştir. Geliştirilen bu ANN modelinin hem gerekli deneylerin sayısını azaltmak hem de optimum giriş parametreleri belirlemek için kullanılabileceğini söylemişlerdir (Seyhan et al., 2017) .

Cooper ve arkadaşları daha yüksek enerji yoğunluğu elde etmek amacıyla kanal genişliği ve derinliği boyutlarını çeşitli koşullarda yakıt pili performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı kanal tasarımlarının kanal boyutlarına etkisini incelemek için birbirine kenetlenmiş (interdigitated) ve paralel akış alanı tasarımlarını kıyaslamışlardır. Sonuçlar net sistem güç yoğunluğu için 1.5 anot ve 2.0 katot sitokiyometrisi için hidrolik çapın 0.4 mm olması gerektiği yönündedir. Elde ettikleri sonuçlar paralel ve birbirine kenetlenmiş (interdigitated) akış alanı tasarımcıları için rehber niteliğindedir (Cooper et al., 2016).

Hsieh ve arkadaşları PEM yakıt pillerinin katodundaki farklı akış alanları için basınç düşüşünün zamana bağlı ölçümleri, farklı çalışma koşullarında kütle akış hızları ve akım dağılımı üzerine çalışmışlardır. Sonuçlar inceledikleri dört farklı akış alanı arasında birbirine kenetlenmiş(interdigitated) akış kanalının diğer üç kanala kıyasla en büyük basınç düşüşüne ve en az etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Hsieh et al., 2011).

Taccani ve Zuliani akış alanı tasarımının yüksek sıcaklıklı PEM yakıt pillerinin genel performansına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla 3 farklı kanal geometrisi inceleyerek serpantin ve paralel tipli kanal geometrilerin kıyaslamışlardır. Sonuçlar serpantin tipi geometrinin pil boyunca daha yüksek basınç düşümü meydana getirmesine rağmen daha yüksek bir performans verdiğini göstermiştir (Taccani and Zuliani, 2011).

Yan ve arkadaşları farklı akış alanı tasarımları için optimum katot akış hızını belirlemek üzere deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada birbirine kenetlenmiş (interdigitated) akış alanı tasarımlarının geleneksel akış alanı tasarımlarına göre daha düşük yakıt kullanımı ile aynı performansa ulaşabileceği sonucuna varmışlardır (Yan et al., 2006).

Hu ve Cao serpantin tipi akış alanına sahip bir PEM yakıt pili üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında kanal derinliğinin etkisini incelemek için 0.6 mm, 1.1 mm, 2 mm ve 2.5 mm derinliği sahip 4 farklı tasarım yapmışlardır. Bu dört tasarım için polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal empedans spektrumlarını test ve analiz etmişlerdir. Değişen kanal derinliği ile kanal içerisinde oluşan su damlacığının etkisini



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

gözlemleyebilmek amacıyla yakıt pilinin bir tarafını polikarbonat levha kullanarak şeffaf yapmışlardır (Hu and Cao, 2016).

Muthukumar ve arkadaşları yakıt pillerinin performanslarının çalışma parametreleri ve tasarım parametrelerinden etkilendiğini belirterek farklı kanal genişliği ve yüksekliğinde yakıt pili performansını sayısal olarak çözümlenmişlerdir. Sabit bir kanal uzunluğu için kanalın derinlik ve genişliği 0.5x0.5, 1x1, 1.5x1.5 ve 2x2 mm olacak şekilde kanallar açarak elde ettikleri polarizasyon eğrilerini kıyaslamışlardır. Sonuçlardan; 0.5x0.5 mm kanal genişliğine sahip olan tasarımın diğerlerine göre yüksek bir akım yoğunluğu ve yüksek güç yoğunluğu oluşturduğu bulunmuştur (Muthukumar et al., 2014).

Pei ve arkadaşları yakıt pillerinde reaktantın giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı ile su taşması arasında ilişki kuran makaleleri incelemişlerdir. Bu derlemede öncelikli olarak basınç düşümüne etki eden faktörler incelenmiş ve basınç düşümünü tahmin eden bernoulli denklemi, iki fazlı akış çarpanı, Darcy kanunu ve yapay zeka denklemlerinin uygulama yerlerini kıyaslamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada; Su taşmasını teşhis etmek için basınç düşümünün kullanılabileceğini söylemiş ve derleme sonuçlarında bu teorik denklemlerin kullanılma yerlerine ilişkin tavsiyelerde bulunmuşlardır (Pei et al., 2016).

Aslam ve arkadaşları su taşması ve membran kurumasının PEM yakıt pillerinin performansını ve dayanıklılığını etkileyen iki ana unsur olduğunu vurgulamış ve bu unsurların MEA içindeki su doygunluğu ve sıcaklık arasındaki etkileşimlerle ilişkili olduğunu savunmuşlardır. Çalışmalarında su doygunluğu ve sıcaklık arasında ki ilişkiye dair daha fazla bilgi edinmek için şeffaf bir PEM yakıt pilinde sıvı su ve sıcaklık dağılımları, yüksek çözünürlüklü dijital ve termal kameralar kullanılarak görüntülenmiştir. Sonuçlar, araştırılan yakıt pili için katot tarafında MEA boyunca daha fazla sıvı su ve daha homojen sıcaklık dağılımının katot akış hızı azaldıkça elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, yakıt pili performansının azalan hava akış oranı ile arttığı bulunmuştur (Aslam et al., 2018).

Y. Li ve arkadaşları PEM yakıt pillerinde katot kısmının basınç düşümünün akış kanalındaki yakıt miktarı ile ilgili olduğunu ve basınç düşümü değerinin su yönetimi ile

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında yakıt piline giren gazın basıncı, empedans, pil sıcaklığı, nemlendirme ve basınç düşüşü ile su yönetimi arasında ilişki kurmuşlardır (Y. Li et al., 2018).

Kahraman ve arkadaşları ağaç yapraklarının damarlarından esinlenerek basınç düşüşünü en aza indirmeyi ve reaktan gazları difüzyon tabakası üzerine en iyi şekilde dağıtmayı hedefleyen bir tasarım üzerine odaklanmışlardır. Optimum akış alanı tasarımının en düşük enerji kaybı, düzgün kütle dağılımı ve giriş çıkış arasındaki en düşük basınç kaybını sağlaması gerektiğini vurgulamışlardır. Tasarladıkları bu kanal içerisine yarı silindirik bloklar yerleştirerek kanal performansını artırmaya çalışmışlardır. Sonuçlar tasarladıkları kanalın 0.4 V luk çalışma voltajında serpantin tipi tasarıma göre %42,1 lik bir performans artışı sergilediğini göstermiştir (Kahraman et al., 2017).

Akhtar ve arkadaşları PEM yakıt pilinin akış kanallarındaki su damlacıklarının kinetik ve taşıma mekanizmalarını incelemişlerdir. Grafit plaka üzerine işlenen kanal geometrilerinde farklı çalışma debileri için basınç düşüşü değerleri ölçülmüştür. Akış kanallarındaki su damlacığının hareketi için gereken minimum hava akışı tanımlanmıştır. Elde edilen deneysel bulgulardan yakıt pilinin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli basınç farkları ile kondensat kaldırma kapasiteleri göz önünde bulundurularak akış alanlarının geliştirilebilmesi için öneriler çizilmiştir (Akhtar et al., 2009).

Barbir ve arkadaşları PEM yakıt pilleri için katot tarafındaki basınç düşüşünün pil performansına etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçların pil performansını artırmaya yönelik eylemler hakkında karar verici olarak kullanılabileceğini söylemişlerdir. Sonuçlar kanal içi debinin artışıyla basınç düşüşünün arttığını, zamana bağlı olarak kanalda basınç düşüşünün değişkenlik gösterebileceğini öngörmektedir (Barbir et al., 2005).

Lim ve arkadaşları akış alanı tasarımının su yönetimi ve reaktan dağılımı üzerine çalışma yapan makaleleri incelemişlerdir. Derlemelerinde yakıt pillerinin performansının çalışma koşulları, akış alanı tasarımı, manifold tasarımı ve membran performansı dâhil olmak üzere birçok faktörden etkilendiğini; İstenilen yakıt pili performansına ulaşmak için reaktiflerin gaz difüzyon tabakası üzerine tekdüze bir şekilde dağılması gerektiğini ve bu şekilde elektrokimyasal reaksiyonların katalizör tabakasına etkili bir şekilde

yayılacağını belirtmişlerdir. Tasarımı yapılan akış alanlarının aynı zamanda su taşmasına engel olacak bir dizayn oluşturması gerektiğini savunmuşlardır (Lim et al., 2016).

W. Li ve arkadaşları PEM yakıt pillerinin performans ve çalışma stabilitesinin membran elektrot takımındaki su taşıma ve birikme davranışları ile yakından ilişkili olduğunu savunmuşlardır. Bu nedenle akış kanallarında optimal bir su yönetimi arzu edildiğini vurgulamışlardır. Bu teorik altyapıyı anlamak için serpantin tipi kanala farklı yüksekliklere sahip dalga tipi yükselticiler oluşturmuşlar ve elde ettikleri sonuçları düz serpantin tipi kanala sahip PEM yakıt pili performansı ile kıyaslamışlardır. Yapmış oldukları bu sayısal ve deneysel çalışma sonucunda dalga tipi blokajlar yerleştirilen kanalın performansının düz serpantin tipi kanal göre %17.8 artışa sebep olduğunu söylemişlerdir (Li et al., 2017).

Banerjee ve arkadaşları basınç düşüşünün reaktant gazların kanallarındaki sıvı suyun varlığını belirlemek için iyi bir teşhis aracı olduğunu kabul etmişlerdir. Kanallardaki sıvı suyun varlığının kütle aktarım direncini artırdığını ve bu nedenle pil performansını artırdığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında farklı çalışma koşullarında basınç düşüşü ve hücre voltajı arasında ilişki kurmak için deneyler gerçekleştirmişlerdir (Banerjee et al., 2014).

Wawdee ve arkadaşları akış alanı içerisinde su yönetimini geliştirmek amacıyla eğimli kanallar tasarlamışlardır ve bu tasarımlarını eğim olmayan dikdörtgen kanal ile kıyaslamışlardır. Eğimin aşağı yönlü ya da yukarı yönlü olması durumlarını su tahliyesi ile ilişkilendirerek çıkarımlarda bulunmuşlardır (Wawdee et al., 2015).

Wang ve arkadaşları gözenekli bir hidrofilik su taşıma plakasını (Water Transport Plate ) PEM tipi yakıt pillerinde su yönetimini geliştirmek için bipolar plaka olarak kullanmışlardır. Su taşıma plakalarının elektriksel iletkenliği, gaz blokaj özelliği, su geçirgenliği ve ıslanabilirliği karakterize edilmiştir. Su taşıma plakalı yakıt pilleri geleneksel katı plakalara sahip yakıt pilleriyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde performans artışı gözlemlenmiştir. Yapmış oldukları deneylerin sonucunda hidrofilik su taşıma plakalarının yakıt pilinin katot kısmında kullanımının su yönetimi iyileştirmesinde umut verici olduğunu göstermiştir (Wang et al., 2017).

Rahimi-Esbo ve arkadaşları akış kanallarının gözlemlenebildiği bir yakıt pili tasarlamış, tasarladıkları transparan yakıt pilinin tasarım, üretim, montaj ve test aşamalarını içeren bir çalışma sunmuşlardır. Transparan bir yakıt pili tasarlama ve üretmenin özel teknikler gerektirdiğini söylemişlerdir. Çalışmalarında ilk olarak akış alanını sayısal olarak tasarlayıp elde ettikleri sonuçlara göre transparan bir yakıt pili tasarlamışlardır. Yakıt pilinin çıkış hattına kontrollü bir valf yerleştirerek bu valfin açılış kapanış süresiyle yakıt pili performansı ve su oluşumu arasında ilişki kurmuşlardır (Rahimi-Esbo et al., 2017).

Carton ve arkadaşları PEM yakıt pilleri için su taşmasını içeren detaylı bir literatür taraması yapmış, gaz difüzyon tabakası ile damlacık oluşumu, hareketi ve etkileşimi kapsamlı olarak incelenmiştir. Yaptıkları deneysel çalışmada bipolar plakalar üzerindeki mini kanallarda damlacık oluşumunu yüksek hızlı (CCD) kamera ile gözlemlemiş, elde ettikleri bu verileri hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak çift fazlı model ile doğrulamışlardır (Carton et al., 2012).

Spernjack ve arkadaşları paralel, serpantin ve birbirine kenetlenmiş (interdigitated) akış alanı tasarımları için su içeriği ve akış dinamiklerini karakterize etmişlerdir. Tasarladıkları yakıt pili modülünün bir tarafı transparandır. Transparan olan bu kısımdan eş zamanlı olarak kamera görüntüleri ve nötron görüntüleri almışlardır. Nötron görüntüleme kullanarak ölçülen hücre içindeki su içeriği, optik verilerle ve hücre çıkışındaki zamansal varyasyonlarla ve basınç farkıyla ilişkilendirilmiştir (Spernjak et al., 2010).

Lilavivat ve arkadaşları PEM yakıt pillerinin farklı bölgelerinde oluşan akım yoğunluğunu ölçmek için sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel metotta farklı bölgelerin akım yoğunluğu ölçmek için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları bu yaklaşım sayesinde reaktif akışı aksatmadan yakıt pili içerisinde akım dağılımını haritalama yapmışlardır. Akım yoğunluğu dağılımından elde ettikleri sonuçları ve CFD çözümlerinden elde edilen elektrokimyasal sonuçları yakıt pilindeki su taşınımalarını analiz etmek için kullanmışlardır (Lilavivat et al., 2015).

Luo ve Liu birbirine kenetlenmiş (interdigitated) akış alanına sahip PEM tipi yakıt pilinde giriş hattının yerel akım yoğunluğunu, çıkış hattının yerel akım yoğunluğu ve

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

toplam alanın ortalama akım yoğunluğunu ölçmüşlerdir. Deney sonuçları, çıkış hattının akım yoğunluğunun giriş hattının akım yoğunluğundan önemli ölçüde düşük olduğunu göstermiştir (Luo and Liu, 2014).

Alaefour ve arkadaşları akış alanları ve MEA tasarlanırken akım yoğunluğu dağılımının çok önemli bir parametre olduğunu vurgulamış ve 3lü serpantin akış alanına sahip PEM yakıt pilindeki akım yoğunluğu dağılımını segmentli bipolar plaka ve baskılı devre kartı tekniği kullanarak ölçmüşlerdir. Aynı zamanda, stokiyometri oranları, giriş nem seviyeleri, hücre basıncı ve sıcaklık gibi ana çalışma koşullarının akım yoğunluğu dağılımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. MEA üzerindeki yerel akım yoğunluğu dağılımının akış düzenlemesinin konfigürasyonu ile birlikte yakıt pili çalışma koşullarından doğrudan etkilendiği gözlemlenmiştir (Alaefour et al., 2012).

Higier ve Liu çalışmalarında serpantin tipi akış alanına sahip pem tipi bir yakıt pilinin tasarım optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Tasarladıkları serpantin tipi akış alanının farklı bölgelerinden yerel akım yoğunluğu ölçümleri olarak farklı çalışma parametrelerinde işletilen yakıt pillerine rehberlik etmeyi amaçlamışlardır ve sonuç olarak serpantin tipi akış alanına sahip pem yakıt pillerinin performanslarının yüksek oranda işletme parametrelerine bağlı olduğunu belirlemişlerdir (Higier and Liu, 2010).

Carton ve Olabi bir akış plakası olarak açık gözenekli hücresel köpük malzemesi için üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli geliştirmiştir ve elde edilen sonuçlar çift kanallı akış alanına sahip deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bu çalışma PEM yakıt pilleri geleneksel akış plaka malzemelerine bir alternatif arayışı için incelenmiştir. Model, simüle edilmiş I-V eğrileri sonuçlarını deney sonuçlarına göre karşılaştırarak doğrulanmış ve sınırlamaları tanımlanmıştır. Geliştirilen model sonuçları hem simülasyon sonuçlarında hem de deneysel sonuçlarda daha iyi performans göstermiştir (Carton and Olabi, 2017).

Salva ve arkadaşları PEM yakıt pili için geliştirilen tek boyutlu analitik modelin deneysel doğrulamasını sunmuşlardır. Analitik model; 3, 5, 7 hücrenin oluşturduğu bir yığın için deneysel doğrulamayı içermekte ve N hücreden oluşan bir yığını simüle etmek için geliştirilmiştir. İyi bir sonuç elde edebilmek için deneysel doğrulama iki farklı değişkenle yapılmıştır. Polarizasyon eğrileri ve yığın sıcaklık dağılımı doğrulama

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

değişkenleri olarak seçilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmak için katot stokiyometrisi, anot ve katot nemliliği ve çalışma basıncı gibi ana çalışma koşullarını değiştiren deneyler yapılmıştır (Salva et al., 2016).

Krastev ve arkadaşları yüksek sıcaklık polimer elektrolit membran yakıt pilinin (HT PEM FC) performansının sayısal ve deneysel karakterizasyonunu araştırmışlardır. Sayısal simülasyonu doğrulamak için tek hücreli deneysel veri seti oluşturmuşlardır. Hem sayısal hem de deneysel incelemelerin sonuçları, ticari HT PEM yakıt pillerinin performansıyla karşılaştırılarak sayısal yöntemin doğruluğunu daha net bir şekilde mukayese edilmiş ve deneysel düzeneğin tutarlılığını kanıtlamışlardır (Krastev et al., 2014).

Santamaria ve arkadaşları birbirine kenetlenmiş (interdigitated) bir akış alanına sahip PEM yakıt pilinde artan kanal uzunluğunun gazların dağılımı ve hücre performansına olan etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla akış kanalı genişliği 1 mm olan 5cm x 25 cm boyutlarında sayısal bir model oluşturmuşlardır. Sonuçlar kanal derinliği az olan pilde kanal derinliği fazla olan pile göre daha homojen dağılım elde edildiğini göstermiştir. Sayısal modeli doğrulamak amacıyla aynı çalışma koşulları altında deneysel bir test pili tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlarda derinliği daha kısa olan kanalın hem daha yüksek maksimum güç hem de daha yüksek akım yoğunlukları oluşturduğunu doğrulamıştır (Santamaria et al., 2013).

Ashrafi ve arkadaşları paralel akış alanı tasarımına sahip PEM yakıt pillerinin iki fazlı akış homojenliğini geliştirmek üzere çalışma yapmışlardır. Bu nedenle öncelikli olarak optimum çalışma parametrelerini belirlemek üzere bir dizi deney yapmışlardır. Deneysel sonuçlar yüksek katot stokiyometri oranlarında güç ve verimin sabit olduğunu, ancak büyüklüklerin düşük olduğunu göstermiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre katot stokiyometrisi düşük oldukça yakıt pilinin kararlı hale daha çabuk geldiğini göstermiştir. Çalışmanın devamında paralel akış kanallarındaki iki fazlı akışı simüle etmek için bir 3D sayısal model önerilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır (Ashrafi et al., 2018).

Afshari ve arkadaşları akış alanı yöneliminin PEM yakıt pilindeki su yönetimi üzerindeki etkisine yönelik sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında tekli serpantin akış alanına sahip PEM yakıt piline yer çekiminin etkisini iki fazlı, 3 boyutlu

sayısal olarak modellemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları deneysel olarak doğrulamışlardır. Yakıt pilinin farklı pozisyonları için oluşan su damlacıklarının yerini, yakıt pili performansına olan etkilerinin ve basınç düşüşünün etkisini araştıran bu çalışma yakıt pillerinin konumu ve yönü ile performans arasında detaylı ilişki kurmaktadır (Afshari et al., 2017).

Y. Wang ve arkadaşları paralel akış alanına sahip PEM yakıt pilinin katot akış alanına bir alt kanal yerleştirerek optimizasyon çalışması yapmışlardır. Ana kanalı nemli hava ile beslenirken, alt kanal kuru hava ile beslenmiştir. Ana kanal ve alt kanal girişlerinden havanın akış hızı miktarını değiştirerek, bu parametrenin yakıt pili performansına olan etkisini üç boyutlu, iki fazlı bir yakıt pili modeli kullanarak sayısal çözümleme yapmışlardır. Sonuçlar üst ve alt kanaldan beslenen hava hızının yakıt pili performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir (Wang et al., 2017).

Abdollahzadeh ve arkadaşları paralel ve birbirine kenetlenmiş (interdigitated) akış alanı tasarımlarının optimum çalışma parametrelerini tespit etmeye çalışmış ve bu iki kanal tasarımını birbiriyle kıyaslamıştır. Çalışmalarında geri beslemenin etkisini sayısal bir model üzerinde iki fazlı olarak çözümlemişlerdir. Basınç farkı, çalışma sıcaklığı, farklı geometrik parametreler, gaz difüzyon tabakasının kalınlığı, gözeneklilik ve ıslatılabilirlik gibi çeşitli parametreleri inceleyen detaylı bir çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sayısal simülasyon sonuçlarını literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırmış ve çok az farklılık olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak her bir parametreye ilişkin polarizasyon eğrilerini, güç yoğunluklarını, yerel akım yoğunluklarını ve aynı zamanda katalizör yüzeyindeki doygunluk derecelerini sunmuşlardır (Abdollahzadeh et al., 2014).

Mancusi ve arkadaşları PEM yakıt pillerinde yüksekliği değişen bir kanal tasarımı için suyun davranışını çift fazlı olarak simüle etmişlerdir. Sayısal çözümleri 3 boyutlu ve 2 boyutlu olarak çözümlemişlerdir. Sonuçlar aşağı akış yönünde kanalın yüksekliğinin azaltılması durumunda; artan hava akımı hızı nedeniyle suyun tahliyesini artırdığını göstermiştir (Mancusi et al., 2014).

Cao ve arkadaşları üç boyutlu, iki fazlı, izoterm olmayan PEM yakıt pili modeli üzerinde sayısal olarak çalışmışlardır. Model, su ve termal olaylar arasındaki etkileşimi, gaz difüzyon tabakasının anizotropik karakterlerinin etkilerini, akış alanının farklı sınır

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

sıcaklıklarını ve gazların nemlendirilmesinin etkisini araştırmaktadır. Çalışmada farklı durumların sonuçları kıyaslanmış sıcaklık dağılımının su doygunluğunu etkilediği sonucuna varılmıştır (Cao et al., 2013).

Nie ve Chen bir PEM elektroliz hücresinin anot tarafındaki akış alanında üç boyutlu iki fazlı su/oksijen akışı için sayısal simülasyon çalışması yapmışlardır. Yapmış oldukları çözümler sonucunda hız, basınç ve hacim kesir dağılımları elde edilerek sonuçlar kısmında değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Basıncın giriş portundan çıkış portuna diyagonal olarak azaldığı tespit edilmiştir (Nie and Chen, 2010).

X.D. Wang ve arkadaşları PEM yakıt pillerinde katot akış alanı tasarımının katalizör katmanına ulaşan gazların hızlarını ve hücreden suyun uzaklaştırılma oranını belirlediğini düşünerek tekli serpantin akış alanı tasarımı içeren bir yakıt pilinin katot akış alanını optimize etmek üzere çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında üç boyutlu, iki fazlı, izotermal olmayan yakıt pillerini sayısal olarak modellemişlerdir. Katot akış kanalı verimliliğini artırmak amacıyla kanalın yüksekliğini kademeli olarak artırma/ azaltma yöntemini kullanmışlardır. Sayısal çözümler sonucunda tasarladıkları optimum kanal düz kanallı yakıt pillerine göre %11.9 daha yüksek performans sergilemiştir (Wang et al., 2010).

Heidary ve arkadaşları PEM yakıt pillerinin akış kanalları boyunca kısmi veya tam blokaj yerleştirmenin etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Akış kanalındaki blokajın akışı gaz difüzyon tabakasına yönlendirdiğini ve katalizör katmanına daha çok kütle aktarımı gerçekleştiğini belirterek; kısmi blokaj durumunda kanal akışının sadece bir kısmının tıkanıp, tam blokaj durumunda ise gazın tek geçiş yolunun Gaz difüzyon tabakası olduğunu söylemişlerdir. Elde ettikleri sayısal sonuçlar; tam blokaj durumunda daha yüksek basınç düşüşü olmasına rağmen, net elektrik gücünde kısmi blokajdan daha iyi performans sonuçları elde edildiği yönündedir (Heidary et al., 2016).

Bilgili ve arkadaşları PEM yakıt pilleri için gaz akış kanalları içerisine yerleştirilen engellerin kanal içerisindeki laminer akışı bozabileceğini düşünmüşlerdir. Bu engellerin gaz kanallarının çıkışına doğru yerleştirilmesiyle kanal içerisindeki hidrojen ve oksijen tüketimine bağlı konsantrasyon kayıplarının azalacağını savunmuşlardır. Bu amaçlar doğrultusunda 3 boyutlu olarak tek kanallı bir model



geliştirerek sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Bu simülasyonlar, belirtilen koşullardaki engellerin etkilerini netleştirmek için farklı çalışma koşullarında (stokiyometri, bağıl nem ve sıcaklık) gerçekleştirilmişlerdir. Simülasyonlar gaz akış kanallarındaki engellerin kanal boyunca konsantrasyon dağılımını ve reaktif gazların gaz difüzyon tabakasından taşınmasını sağladığını göstermiştir (Bilgili et al., 2015).

Tiss ve arkadaşları gaz difüzyon tabakası üzerine reaktif gazların dağılımını artırmak amacı ile akış kanalı içerisine kısmi bloklar yerleştirilmiş sayısal bir model sunmuşlardır. Tasarımlarında akış kanalı içerisine yükseklikleri değişen bloklar yerleştirmişlerdir ve bir eğim açısı hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlar gaz kanalında bulunan kısmi blokların PEM yakıt pillerinin performansını geliştirdiğini göstermektedir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır (Tiss et al., 2014).

Obayopo ve arkadaşları akış alanında reaktif gaz dağılımını iyileştirmeyi amaçlayan kanal akışının enine yerleştirilmiş pim kanatçıklar kullanarak sayısal bir araştırma yapmışlardır. Oluşan ek basınç düşümünü engellemek için küçük hidrolik çapa sahip bir kanatçık konfigürasyonu kullanmışlardır. İncelenen parametreler ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu ile entegre edilmiş bir matematiksel optimizasyon kodu kullanılarak optimize edilmiştir. Çözümleme neticesinde kanal akışına yerleştirilen kanatçıkların yakıt pili performansını önemli ölçüde geliştirdiğini ve basınç düşüşü için optimal pim geometrisinin mevcut olduğunu göstermiştir (Obayopo et al., 2012).

Ekiz ve arkadaşları tek hücreli bir PEM yakıt pilini Comsol Multiphysics programını kullanarak iki boyutlu modellemişlerdir. Akış kanalına farklı yapıda engeller koyarak reaktif gazların reaksiyona zorlanması amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sonunda giriş hızının artırılması, çıkış basıncının artırılması, katot kısmına anottan daha fazla oksidant beslenmesi ve kanal boyunca bulunan engellerin derinliğinin artırılması yakıt pili performansını artırmıştır (Ekiz et al., 2011).

Chevalier ve arkadaşları PEM yakıt pili kanalı boyunca yeni bir boyutsuz 2D kararlı durum akım yoğunluğu dağılım modeli sunmuştur. Bu model, PEM yakıt pili katodunda, kanal boyunca hava konsantrasyonunun azalması, gaz difüzyon tabakası yoluyla kütle aktarımı, membran üzerinden yük aktarımı ve katalizör tabakasında elektrokimyasal transfer gibi dört temel fenomeni içermektedir. Önerdikleri modeli

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

literatürde verilen akım yoğunluğu dağılımının deneysel ölçümleri ile kıyaslamış ve sonuçların literatürle uyumlu olduğunu gözlemlemiştir (Chevalier et al., 2018).

Chowdhury ve arkadaşları PEM yakıt pillerindeki kanal geometrisini analiz etmek için 73 durumu analiz etmişlerdir. Üç boyutlu izotermal olmayan tek fazlı akış için matematiksel model geliştirmişlerdir. Optimizasyon analizlerini 0.4 V ve 1 mm kanal derinliğinde yapmışlardır. Sayısal sonuçlar basınç düşüşünün kanal genişliği ile daha ilişkili olduğunu ve anot basınç düşüşünün katot basınç düşüşünden daha önemsiz olduğunu öngörmüştür. Kanal basınç düşüşü ve akım yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda optimizasyon analizleri kanal genişliği/temas genişliğinin 1 mm/1mm olduğunu göstermiştir (Chowdhury et al., 2018).

Çağlayan ve arkadaşları 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip yüksek sıcaklıklı bir PEM yakıt pili için üçlü karışık serpantin akışlı, üç boyutlu, izotermal olmayan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Model, basınç, kanal boyunca sıcaklık dağılımı ve membran üzerindeki akım yoğunluğu dağılımını tahmin etmiştir. Model sonuçları 0,45 V ve 0,60 V olmak üzere iki farklı çalışma gerilimi ile elde edilmiştir. Sonuçta ortalama akım yoğunlukları sırasıyla 0.313 A/cm<sup>2</sup> ve 0.224 A/cm<sup>2</sup>'dir. Katot bölgesindeki basınç düşüşünün 6500 Pa olduğu tahmin edilirken izotermal olmayan model için 6400 Pa olduğu bulunmuştur (Caglayan et al., 2018).

Ghanbarian ve arkadaşları yakıt pili performansını en üst düzeye çıkartmak için anahtar stratejilerden birisinin uygun akış alanı modelinin oluşturulması olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında PEM yakıt pilleri için paralel serpantin akış alanının en uygun tasarımı için bir prosedür geliştirmişlerdir. Kanal genişliği, kanal yüksekliği, iki bitişik kanal arasındaki mesafe ve kanal dönüşleri gibi parametreler göz önünde bulundurulmuş ve bu tasarım parametreleri kapsamındaki tüm olası akış alanı konfigürasyonları tanımlanmıştır. Bir sonraki adımda tüm olası akış alanı konfigürasyonlarına altı tane kısıtlayıcı filtre uygulanmıştır. Son adımda, kalan durumlar için simülasyonlar yapılmıştır (Ghanbarian et al., 2018).

Kahveci ve Taymaz PEM yakıt pillerinin serpantin akış alanları ile performansını araştırmak için üç boyutlu tek fazlı bir model oluşturmuşlardır. Model 333-353 K sıcaklık, 1-3 atm basınç, 0.3-0.6 gaz difüzyon tabakası gözenekliliği ve %10-%100

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

anot/katot nemliliği aralığında çalışmışlardır. Bu değişken parametrelere göre pilin akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu elde edilmiştir. Maksimum güç yoğunluğunun 0.6 GDL gözenekliliği,  $RH_a = \%100$  ve  $RH_c = \%10$  ve 3 atm basınç değerlerinde sağlandığı görülmüştür. Ayrıca elde edilen simülasyon sonuçları literatürde bildirilen deneysel veriler ile kıyaslanmış ve model ile deney sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir (Kahveci and Taymaz, 2018).

Movahedi ve arkadaşları PEM yakıt pillerinin sıkıştırma basıncı altında birbirine kenetlenmiş (interdigitated) akış alanı tasarımı ile performansı arasında ilişki kuran sayısal bir çalışma yapmıştır. Yakıt pili üzerindeki sıkıştırma basıncının neden olduğu yer değiştirme ve deformasyon etkisini incelemek için üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Gaz difüzyonu tabakası gözenekliliği, geçirgenlik, kalınlık, poisson oranı ve yoğunluk gibi farklı parametrelerin anot ve katot tarafındaki gaz kanallarına ve yakıt pili performansına etkisi incelenmiştir. Elde ettiği sonuçlar optimum sıkma basıncının yakıt pilindeki sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Movahedi et al., 2018).

Alizadeh ve arkadaşları PEM yakıt pillerinde reaktant gazların dağılımı, akım yoğunluğu dağılımı, sıcaklık dağılımı ve su konsantrasyonunun önemli olduğunu; bu parametrelerin muntazam olmaması durumunda MEA'nın ömrünün kısalmayacağını vurgulamışlardır. Çalışmalarında yeni bir kademeli serpantin akış alanı tasarlamışlardır. Tasarlamış oldukları kanalı sayısal olarak simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarının literatürle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, önerilen akış alanının düzgün bir su yönetiminin yanı sıra düzgün bir akım yoğunluğu ve lokal stokiyometri ürettiğini göstermiştir (Alizadeh et al., 2017).

Baricci ve arkadaşları otomotiv uygulamaları için düşük platin yüklemeli bir PEM yakıt pilindeki oksijen taşınımını analiz etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanmışlardır. Analiz; düz kanal, serpantin kanal ve birbirine kenetlenmiş (interdigitated) kanal tasarımlarının karşılaştırmasını içermektedir (Baricci et al., 2017).

Chen ve arkadaşları literatürde mevcut olan serpantin tipi, paralel tip, birbirine kenetlenmiş (interdigitated) tip akış alanı tasarımlarını incelemiş ve her bir tipi kanal tasarımının avantaj ve dezavantajları olduğundan bahsetmiştir ve hibrit akış alanı

tasarımlarının çok sayıda akış alanı tasarımının avantajını birleştirebileceğini aynı zamanda dezavantajlarını en aza indirebileceğini söylemişlerdir. Çalışmalarında serpantin tipi akış alanına sahip bir tasarımın bir boru bağlantısıyla birbirine kenetlenmiş (interdigitated) tasarıma dönüştürülebileceği bir kanal geliştirerek basınç farkını kontrol edebileceklerini savunmuşlardır. Yapmış oldukları sayısal çalışma ile basınç farkı ile yakıt pili performansı arasında ilişki kurmuşlardır. Elde ettikleri sonuçları kurmuş oldukları deneysel set ile doğrulamışlardır. Sonuç olarak akış alanı tasarlarken basınç farkının önemli bir husus olduğuna değinerek sonuçların hibrit akış alanı tasarlayanlar için değerli bilgiler içerdiğini söylemişlerdir (Chen et al., 2017).

Damian-Ascencio ve arkadaşları ağaç benzeri akış alanı kanallarına sahip PEM yakıt pilinin üç boyutlu sayısal modellemesini sunmuşlardır. Farklı ağaç yapraklarına benzer 4 farklı model tasarlamışlardır. Model; kütle, momentum, enerji ve elektrokimyasal denklemlerin tam bir çözümünü ele almaktadır. Sayısal olarak çözümledikleri model konfigürasyonlarının entropi üretimini hesaplamışlardır. Daha düşük entropi üretiminin daha yüksek akım yoğunluğu üretimini demek olduğunu tespit etmişlerdir (Damian-Ascencio et al., 2017).

Haghighy ve arkadaşları PEM tipi yakıt pilini sayısal olarak çözümlenmişlerdir. Çalışmalarında tekli serpantin tipi bir kanal tasarımı yaparak 3 boyutlu bir model oluşturmuşlardır. Oluşturmuş oldukları modelde tek fazlı olarak kütle, momentum ve elektrokimyasal denklemler sonlu elemanlar yöntemine dayanan hesaplamalı akışkanlar dinamiği(CFD) yazılımı kullanılarak, kararlı durum koşulu için eşzamanlı olarak çözülmüştür. Modeli doğrulamak için sayısal sonuçlar fabrikasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çözümlenen model sonuçları deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir (Haghighy et al., 2017).

Heidary ve arkadaşları akış kanalları içerisindeki suyun tıkanması ile pil performansının değişeceğini belirtmişlerdir. Bu amaçla, paralel akışa alanına sahip PEM yakıt pili içerisinde kademeli ve sıralı blokaj konfigürasyonlarının etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçları blokajsız bir kanala sahip PEM yakıt pili ile kıyaslamışlardır. Sonuçlar blokaj oluşturmanın maksimum gücü %11 artırdığını göstermiştir. Son olarak da bu çalışmanın sonuçlarını daha önceki yapmış oldukları deneysel çalışma ile de kıyaslayarak doğrulamışlardır (Heidary et al., 2017).

Hou ve arkadaşları PEM yakıt pilinin katot kısmında oluşan suyu gidermek için çalışmalar yapmışlardır. Geliştirmiş oldukları model U şeklinde keskin kenarlı serpantin akış alanına sahip yakıt pili ve keskin kenarlı olmayan U şeklinde serpantin akış alanlı yakıt pildir. Bu iki model aynı çalışma koşullarında simüle edilmiş ve zamana bağlı olarak oluşan su damlacıklarının yeri ve konumları kıyaslanmıştır. Sonuç olarak kanal geometrisinin suyun kanaldan uzaklaşması ile ilişkisini inceleyerek, kanal malzemesinin hidrofilik / hidrofobik olmasının da su hareketi ile ilişkisi olduğu sonucuna varmışlardır (Hou et al., 2017).

Jia ve Liu PEM yakıt pillerinde yerel akım yoğunluğu dağılımının genel pil performansına etkisinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Dengesiz akım yoğunluğu dağılımının katalizörün ve membranın bozulmasını hızlandıracağını, böylece bir PEM yakıt pilinin ömrünü ve dayanıklılığını azaltacağını savunmuşlardır. Akım yoğunluğu dağılımının iyileştirilmesi üzerine sayısal bir model geliştirmişlerdir ve bu geliştirmiş oldukları model sonuçlarını daha önceki bir çalışmalarında yapmış oldukları deneysel sonuçlar ile doğrulamışlardır (Jia and Liu, 2017).

Kahveci ve taymaz üçlü serpantin akış alanına sahip, üç boyutlu, tek fazlı PEM yakıt pili modelini sayısal olarak çözmüşlerdir. Çalışmalarında reaktant gazların nemlendirilmesinin yakıt pili performansına etkisini araştırmışlardır. Model denklemlerini Gambit ve Ansys fluent yazılımını kullanarak çözmüşlerdir. Simülasyon sonuçları I-V ve I-P eğrileri dahil olmak üzere polarizasyon eğrilerini içermektedir. Sonuçlar, katot ve anot bağlı nemi arttıkça daha düşük çalışma voltajları için daha yüksek performans elde edilebildiğini göstermiştir. Ayrıca, polarizasyon eğrilerinin analizi PEM yakıt pillerinin performansı reaktif gazların nemlendirilmesiyle iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır (Kahveci and Taymaz, 2017).

Kim ve arkadaşları Forchheimer'in atalet etkisinin ilk kez 3 boyutlu karmaşık akış alanlarındaki sıvı su davranışı ve kütle taşınımının altında yatan sebepleri aydınlatmak amacıyla PEM yakıt pillerinin üç boyutlu kompleks akış alanlarının iki aşamalı bir modelini geliştirmişlerdir. Forchheimer 'in atalet etkisinin akış alanından su uzaklaştırılmasını artırdığı, ara yüzey sıvıları ve kütle taşınımını artıran bölmeler etrafında ek akış direnci oluşturduğu bulunmuştur. Sonuç olarak klasik akış alanlarına

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

sahip PEMFC lere kıyasla 3D kompleks akış alanlı PEMFC lerde yüksek akım yoğunluğu ve operasyonel stabilitede önemli gelişmeler beklemektedirler (Kim et al., 2017).

Lim ve arkadaşları geleneksel ve modifiye paralel akış alanı tasarımlarını hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında farklı tasarımların akış alanı boyunca; akış kanallarındaki basınç ve hız değişimlerini ve farklı akış alanlarındaki basınç düşüşü karşılaştırması gibi karakteristik özellikleri sunmuşlardır. İyi bir tasarımın kanallar arasında ideal reaktif dağılıma ve dağıtılmış bir basınç düşüşüne neden olacağı sonucuna varmışlardır (Lim et al., 2017).

Tamerabet ve arkadaşları spiral akış alanı tasarımına sahip PEM tipi yakıt pili üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında kanal genişliğinin etkileri, spiral kanalın dönüş sayısı ve akış yönü etkilerini araştırmak üzere bir FORTRAN programı geliştirmişlerdir. Çalışmanın sonunda spiral sayısının artmasının reaktantların dağılımını homojenleştirdiğini belirtmişlerdir (Tamerabet et al., 2017).

Sajid Hossain ve arkadaşları reaktanların hücre içerisinde muntazam bir şekilde dağıtılması amacıyla paralel tip akış alanına sahip PEM yakıt pillerinin akış alanlarını modifiye etmişlerdir. Araştırmalarında paralel akış alanı tasarımının akış düzgünlüğü ve dağılım düzenine odaklanmışlardır. 2D hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak katot akış alanı boyunca süreklilik ve momentum denklemlerini çözmüşlerdir. Sunulan tasarımların geleneksel tasarımlara göre aktif alan üzerine daha iyi gaz dağılımı sağladığı tespit edilmiştir (Sajid Hossain et al., 2017).

Singdeo ve arkadaşları yeni bir akış alanı tasarımı önermişlerdir ve bu akış alanının uygulamaları ve kullanılabilirliğini araştırmak için yüksek sıcaklıklı bir PEM yakıt pilinde değerlendirmişlerdir. Önerdikleri geometri çoklu serpantin akış alanının bazı özelliklerini muhafaza ederken nispeten tekdüze reaktant ve ürün dağılımına ulaşmak amacıyla modifiye edilmiştir. Önerilen akış alanının etkinliğini analiz etmek için üç boyutlu bir CFD modeli geliştirilmiştir. Elde ettikleri sayısal verileri doğrulamak için deneysel bir set kurmuşlardır. Ayrıca CFD modelinden elde edilen elektrot üzerindeki akım yoğunluğu dağılımını doğrulamak için düşük maliyetli bir akım dağılımı haritalama cihazı geliştirmişlerdir. Modelleme ve deneysel sonuçlar arasında akım yoğunluğunun mekaniksel dağılımında %4 lük bir hata tespit etmişlerdir. Önermiş oldukları modelin

serpantin tipi kanala göre daha yüksek homojen dağılım sağladığını ve 0.57 V da %27 daha yüksek akım yoğunluğu elde ettiğini hesaplamışlardır (Singdeo et al., 2017).

Zehtabiyan ve arkadaşları yeni akış alanı tasarımı önermişlerdir. Bu yeni tasarım sıralı olarak yakınsak ve ıraksak kanallardan oluşur. Çalışmada önerdikleri bu yeni kanal tasarımının performansını değerlendirmek üzere kanaldaki basınç dağılımını, kanal boyunca hızları, gaz konsantrasyonlarını, akım yoğunluğu dağılımını ve polarizasyon eğrilerini sunmuşlardır. Sayısal olarak çözümledikleri bu modelin doğrulamasını yaparak, sonuçların literatürle uyumunu sunmuşlardır (Zehtabiyan-Rezaie et al., 2017).

Arun Saco ve arkadaşları büyük ölçekli(225 cm<sup>2</sup>) bir PEM yakıt pili için optimum basınç düşüşü ve su yönetimi açısından kapsamlı bir sayısal çalışma yürütmüşlerdir. Bu sayısal çalışma 4 farklı akış alanı tasarımını içermektedir. Çalışmada PEMFC yakıt pili üç boyutlu akış, kütle, momentum, enerji, türler ve elektrokimyasal denklemler gibi yönetim ilkelerini çözerek simüle edilmiştir (Arun Saco et al., 2016).

Çağlayan ve arkadaşları 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip yüksek sıcaklıklı PEM yakıt pili için 3 boyutlu bir model oluşturmuşlardır. Modelde fosforik asit katkılı polibenzimidazol (PBI) membranlı üçlü karma serpantin akış kanalı tekli hücre kullanılmıştır. Sistem için kararlı durum, izotermal, tek fazlı varsayımlar tanımlanmıştır. Model çalışma sıcaklığının hücre performansı üzerindeki etkisini araştırmak için 100 ila 180 °C arasında değişen farklı sıcaklıklarda simüle edilmiştir. Operasyon sıcaklığı arttıkça yakıt pili performansında iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır (Caglayan et al., 2016).

Ghanbarian ve Kermani PEM yakıt pillerinin üç boyutlu ve tek fazlı olarak sayısal modelini çözümlemişlerdir. Tasarladıkları modelde akış kanallarına engeller yerleştirerek yakıt pili performansını artırabileceklerini söylemişlerdir. Bu amaçla kanal tek bir akış kanalı içerisine kare, yarım daire ve yamuk engeller yerleştirerek engelsiz model ile kıyaslamışlardır. Hesaplamalarını 333 K, 100 kPa, 0.2-0.8 V aralığında gerçekleştirmişlerdir. Akımın yüksek yoğunluklu olduğu bölgelerde akışın iki faza dönüştüğü tahmin edilmiştir. (0.4 V dan az pil voltajlarında) . Yapmış oldukları çalışma ile kanal içerisinde yerleştirilen blokajlar sayesinde net güçte %25 bir artış sağlanabileceği sonucuna varmışlardır (Ghanbarian and Kermani, 2016).

Khazae ve Sabadban PEM yakıt pillerinin performansının bağıl nem, çalışma basıncı, kanal sayısı ve reaktif gazların akış yönü gibi parametrelere bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında su yönetimi ve performansı araştırmak üzere dikdörtgen kesitli tek serpantinli ve 4 serpantinli akış alanı tasarımlarını paralel, ters ve çapraz akışlı olacak şekilde Fluent programında simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır (Khazae and Sabadban, 2016).

Osanloo ve arkadaşları kare boru profil şeklinde tasarlamış oldukları 3 farklı PEM yakıt pili modelini sayısal olarak modellemişlerdir. Süreklilik, momentum, enerji ve türlerin konsantrasyonu denklemlerini çözmek için ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı kullanmışlardır. Sayısal modelden elde edilen polarizasyon eğrileri deneysel verilerle doğrulanmış ve ilgili güç yoğunlukları geleneksel PEM yakıt pilleri modelleri ile kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak farklı geometrilerin daha yüksek güç yoğunlukları elde edebileceği, kare boru şeklindeki tasarımların PEM yakıt pillerinin verimliliğini artırırken maliyeti de azaltabileceğini öngörmüştür (Osanloo et al., 2016).

Rahimi ve arkadaşları PEM yakıt pillerinde reaktant gazların dağılımı, akım yoğunluğu dağılımı, sıcaklık dağılımı ve su konsantrasyonunun performansı etkileyen önemli parametreler olduğunu söyleyerek bu parametreleri membran boyunca suyun yerel taşınımı ve yerel reaktif tüketimi ile ilişkili olduğunu vurgulamışlardır. Bahsi geçen konuların iyi bir kanal tasarımı ile optimize edilebileceğini savunmuşlardır. Çalışmalarında tekli ve çoklu serpantin tipi akış alanları tasarlayarak sayısal olarak çözümlenmişlerdir. Tasarladıkları kanalları alan bazlı akım yoğunluğu, reaktant gazların kütle oranı, su dağılımı, basınç ve sıcaklık gibi parametreleri ele alarak yakıt pili performanslarını polarizasyon eğrileri ile değerlendirmişlerdir (Rahimi-Esbo et al., 2016).

Rostami ve arkadaşları tekli serpantin tipi bir akış alanı geometrisine sahip PEM Tipi yakıt pilinde kanal genişliğinin etkisini sayısal bir model üzerinde araştırmışlardır. Elde ettikleri polarizasyon eğrilerini deneysel sonuçlar ile kıyaslamış, voltaj- akım yoğunluğu ve voltaj-oksijenin molar konsantrasyonları eğrilerini elde etmişlerdir. Performans karakterizasyonu yapmanın dışında kanal genişliğini değiştirmenin basınç düşümüne etkisini de incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın sonucu kanal



genişliğinin elektriksel performans ve basınç düşümüne etkisini içermektedir (Rostami et al., 2016).

Ben Amara ve Ben Nasrallah su yönetiminin PEM yakıt pili ile ilgili problemlerden birisi olduğunu, yakıt pillerinde nem performansının önemli olduğunu ve protonların verimli bir şekilde taşınabilmesi için zarın yeterince nemlendirilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Bununla birlikte, sıvı su oluşumunun elektrotların gazın taşınmasını engelleyebileceğini ve bloke edebileceğini yinelemişlerdir. Bu problemleri araştırmak amacıyla akış kanalları içerisinde oluşan suyun damlacık davranışını Shan-Chen Pseudo-potansiyel modeline dayanan kafes Boltzmann yöntemi (LBM) kullanarak simüle etmişlerdir. Aynı zamanda ıslanabilirliğin damlacık yer değiştirme davranışı üzerindeki etkilerini de araştırmışlardır (Ben Amara and Ben Nasrallah, 2015).

Tijani ve arkadaşları iyi tasarlanmış ve optimize edilmiş bir bipolar plaka verimli bir PEM yakıt pili üretmek için ana unsur olduğunu savunmuşlardır. Çalışmalarında optimal bir akış alanı tasarlamak için sayısal modeller oluşturulmuş ve daha sonra sergiledikleri hidrodinamik özellikler, hız alanı ve basınç gradyanlarını değerlendirmek için sayısal olarak simüle etmişlerdir. Sonuçlar çalışma koşulları altında basınç gradyanının girişten çıkışa doğru bipolar plaka boyunca çapraz olarak azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte basınç gradyanlarının keskinliği veya düzgünlüğü bipolar plakaların tasarımına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Tijani et al., 2015).

Vasifshenas ve arkadaşları PEM yakıt pilleri ile ilgili yeni bir bileşik akış alanı tasarımının yakıt pili performansına etkisini araştırmak amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımını kullanarak sayısal çözümleme yapmışlardır. Tasarladıkları yeni model paralel ve serpantin tipi tasarımların birleşimini içermektedir. Sonuçları reaktant akış alanları için akım yoğunluğu, su kütlesi ve mol franssiyonlarını içermektedir. Sonuçların karşılaştırılması reaktif gazların yüzey üzerine dağıldığı yolun önemli olduğunu göstermiştir. Bu birleşik akış alanı tasarımının su taşması olayını önlemek için umut vaat eden bir gelişme olduğunu söylemişlerdir. Bu nedenle yüksek akım yoğunluğu elde etmek için geliştirdikleri tasarımın kullanılmasını şiddetle tavsiye etmişlerdir. (Vazifshenas et al., 2015).

Arvay ve arkadaşları PEM yakıt pilleri için doğadan ilham alan akış alanı tasarımlarını detaylı olarak incelemişlerdir. Bu tasarımların su sızıntısı olmayan reaktif gazların etkin dağılımı ile dramatik performans iyileşmeleri gösterme potansiyeline sahiptir. Yapmış oldukları incelemeler bir akış alanının optimizasyonu dengeli reaktif gaz dağılımı, su yönetimi, elektron taşınması, basınç düşümü ve üretim kolaylığı gerektirdiği sonucunu oluşturmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımlarının doğadan ilham alan akış alanı tasarımlarını değerlendirmek için faydalı bir araç olduğunu söylemişlerdir. Bunun yanı sıra sayısal sonuçların deneysel çalışmalar ile doğrulanana kadar dikkatli kullanılması gerektiğini önermişlerdir (Arvay et al., 2013).

Ramos-Alvarado ve arkadaşları simetrik gaz dağıtım kanalları kullanarak tek bir PEM yakıt pillerinin performansını test etmeye yönelik sayısal model geliştirmişlerdir. Literatürde elektronik ekipmanların soğutulması için kullanılan 3 farklı deseni alıp bipolar plakalar üzerine modellemişlerdir, literatürden aldıkları modellerden bir tanesi serpantin tipi akış alanıdır. Ayrıca, akış modellerinin hidrolik performansı, basınç düşüşü ve pompalama gücü değerlendirilerek incelenmiştir. Çalışmanın ilk kısmı temel simetrik akış kanallarını kullanmanın avantajlarını ortaya koymuştur. İkinci kısım ise entropi minimizasyon kriterini kullanarak modellerin optimizasyonunu içermektedir (Ramos-Alvarado et al., 2012).

Roshandel ve arkadaşları akış alanı tasarımı ve kanal konfigürasyonlarının optimizasyonu ile yakıt pili performansındaki gelişmeler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bireysel bilgisayar kodu kullanarak Navier Stokes denklemlerine dayalı üç boyutlu, çok bileşenli bir akış dağılım modeli sunmuşlardır. Sayısal sonuçlar önceki yayınlarında verilen deneysel sonuçlarla mükemmel uyum sağlamıştır. Bu çalışmada yapraktaki mevcut biyolojik akışkan akış şekillerinden esinlenen yeni bir bipolar levha tasarımı sunulmuş ve analiz edilmiştir. Araştırmadaki ana tasarım kriterleri, akış alanı boyunca düzgün hız dağılımı, daha homojen molar yayılma ve farklı voltajlarda daha yüksek akım yoğunluğu elde etmeye dayanmaktadır (Roshandel et al., 2012).

Choi ve arkadaşları serpantin akış alanı geometrisine sahip bir PEM yakıt pillerinin karakterizasyonu, basınç düşüşü, yoğunlaşan suyun deşarjı, elektrik voltajının maksimizasyonu ve tüm yüzey üzerindeki akım yoğunluğu performansının artırılması üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Serpantin tipi akış alanı için 3 farklı kanal

yüksekliği ve genişliği için sayısal çözümler yaparak kanal optimizasyonu yapmışlardır (Choi et al., 2011).

Dokkar ve arkadaşları PEM yakıt pillerinde kütle taşınımı ve elektrokimyasal kinetik arasındaki üç boyutlu etkileşimleri ortaya çıkartmak için tek fazlı sayısal bir model önermişlerdir. Katot kanalındaki üç boyutlu akış ve taşınım olaylarının akış alanındaki elektrokimyasal süreci nasıl etkilediğine dair temel bir anlayış elde edilmesine vurgu yapmışlardır. Çözümlemiş oldukları sayısal model deneysel olarak ölçülen polarizasyon eğrileri ile doğrulamışlardır. Model sonuçları, reaksiyon bölgelerindeki oksijen konsantrasyonunun, artan yakıt pili gücüne yol açan basınç artışından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir (Dokkar et al., 2011).

Falcao ve arkadaşları farklı parametrelerin yakıt pili performansı üzerindeki etkisinin anlaşılmasını sağlamak için tasarım ve sayısal optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Tasarlamış oldukları tekli serpantin tipi yakıt pilini 1 boyutlu ve 3 boyutlu olarak çözümlenmişlerdir. Bir boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçları kıyaslandığında akış analizlerinin benzerlik gösterdiği fakat çözüm sürelerinin çok farklılıklar gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Aynı sınır şartlarındaki çözümler 3 boyutlu model için 24 saat iken 1 boyutlu model için 5 dakika civarındadır. Sonuçlar 1D modelin PEMFC lere optimal çalışma koşullarını ve birkaç önemli fiziksel parametrenin yakıt pili performansına etkilerini tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermiştir (Falcão et al., 2011).

Manso ve arkadaşları sayısal olarak PEM yakıt pillerinin serpantin akış alanı tasarımında kanal boy/kesit ve kanal en/boy oranının performansa olan etkisinin araştırmışlardır. 10 farklı tasarımda kanal en/boy oranı etkisini anlamak için yerel akım yoğunlukları, hız dağılımları, membrandaki sıvı su konsantrasyonu, hidrojen ve oksijen konsantrasyonları ve sıcaklık verileri analiz edilmiştir. Kanal en/boy oranının etkisini daha sağlıklı analiz edebilmek için kanal kesit alanı ( $1.06 \text{ mm}^2$ ) ve PEM yakıt pilinin aktif alanı her durum için sabit tutulmuştur. Sonuçlar düşük çalışma voltajında yakıt pili performansının kanal kesit en/boy oranından bağımsız olduğunu göstermiştir (Manso et al., 2011).

Iranzo ve arkadaşları paralel ve serpantin akış alanı tasarımına sahip  $50 \text{ cm}^2$  aktif alanlı PEM yakıt pili için geliştirilmiş hesaplamalı sayısal modeli ve bu modelin deneysel

olarak doğrulanmasını araştırmışlardır. Sayısal CFD modelini Ansys Fluent yazılımı kullanarak geliştirmişler ve elde edilen sonuçları deneysel verilerle doğrulamışlardır. Elde edilen sayısal sonuçlar ile deneysel verilerin uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiş ve modelin tek fazlı çözümlenmesinden dolayı polarizasyon bölgesindeki sonuçlarda yanlışlıklar gözlemlendiği vurgulanmıştır (Iranzo et al., 2010).

Lobato ve arkadaşları 50 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip bir PEM yakıt pilini üç farklı akış alanı geometrisi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(CFD) yazılımı kullanarak çözmüşlerdir. Her bir geometri, akım yoğunluğu dağılımının, tepkime maddelerinin elektrot yüzeyine yayılma yolu ile doğrudan bağlantılı olduğu gözlemlenmiştir (Lobato et al., 2010).

Das ve Bansode son 30 yıl içerisinde PEM yakıt pillerinde ısı ve kütle transferi içeren makaleleri ele alarak bir derleme oluşturmuşlardır. Derleme içeriğinde yeni ve düşük maliyetli materyallerin geliştirilmesi, ilgili fiziksel süreçlerin modellenmesi ve elektrokimyasal deneyler konuları ele alınmıştır. Derlemede PEM yakıt pillerinin çözümlenmesinde; akış yapısı ve geometrisi, akışkanlar mekaniği, çok fazlı akış, ısı transferi, kütle transferi ve elektrokimyasal reaksiyonlar arasındaki etkileşimin çok önemli olduğunu, bu sebeplerle hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD) yakıt pili analizinde kaçınılmaz bir araç haline geldiğini ortaya çıkarmıştır. CFD yazılımlarının gelişmiş öngörü kabiliyeti sayesinde yakıt pili tasarımcılarının laboratuvarında test gereksinimi olmaksızın tasarım ve işletim parametrelerini optimize etme imkânı bulabilecekleri sonucuna ulaşmışlardır (Das and Bansode, 2009).

Jeon ve arkadaşları akış alanı tasarımının yakıt pili performansına etkisini araştırmak için tek kanallı, çift kanallı, döngüsel-tek kanallı ve simetrik tek kanallı olmak üzere 4 adet serpantin akış alanı için hesaplamalı akışkanlar dinamiği(CFD) yazılımı kullanarak simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Kanal tasarımlarının basınç düşüşü, nem miktarının etkisi gibi parametreleri inceleyerek kanal tasarımlarını birbirleri ile mukayese etmişlerdir (Jeon et al., 2008).

Ferng ve Su farklı akış alanı tasarımlarının yakıt pili performansına etkisini araştırmak için üç boyutlu bir model üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı kullanarak sayısal çözümlenme yapmışlardır. Tasarladıkları paralel ve tekli

serpantin tipi akış alanlarına sahip PEM yakıt pilini sayısal olarak çözümledikten sonra aynı modellerin deney setini kurup sayısal sonuçları doğrulamışlardır. Sonuçlar farklı akış alanı tasarımlarının model tahminleri ile uyum içerisinde olduğunu göstermiştir ve kanal tasarımının yakıt pili performansını etkilediğini, bu sebeple daha farklı tasarımların daha farklı gaz dağılımı ve akım yoğunluğu oluşturabileceğini vurgulamışlardır (Feng and Su, 2007).

### 2.1.Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması kapsamında PEM yakıt pilleri üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. PEM yakıt pillerinin en önemli parçalarından birisi olan bipolar plakalar üzerindeki akış kanallarının performansını iyileştirmek ve özgün akış alanları tasarlamak üzere literatürde sıkça kullanılan tekli serpantin tipi akış alanı tasarımı deneysel olarak test edilmiş ve aynı tasarım sayısal olarak doğrulanmıştır. Doğrulan sayısal model parametreleri kullanılarak 4 adet özgün akış alanı tasarımına sahip yakıt pili sayısal olarak çözümlenmiştir. Sayısal çözümlemesi yapılan özgün akış alanı tasarımına sahip yakıt pilleri deneysel olarak da test edilmiş ve hem sayısal hem de deneysel performansı en iyi çıkan model 3 için yanıt yüzey yöntemi kullanılarak geometrik optimizasyon yapılmıştır. Literatürde hidrodinamik parametrelerin birbiri ile ilişkisini ortaya koyan çalışmaların sayısının sınırlı olduğu ve geometrik optimizasyon üzerine sistematik bir çalışmanın az olduğu görülmektedir. Ayrıca; literatürde yapılan geometrik çalışmaların ağırlıklı olarak sayısal çözümlemelerle yürütüldüğü ve deneysel çalışmalarla doğrulanan sayısal çözümlemelerin eksikliği akış alanı tasarımına yönelik incelemeleri sınırlamaktadır.

Bu çalışmanın literatüre olan katkısı; daha önce literatürce tam olarak tanımlanmamış olan akış alanı/temas yüzeyi oranı şeklinde tanımlanan bir parametrenin incelenmesi; elektriksel verim ve basınç düşümüne etki eden geometrik parametrelerin yanıt yüzey yöntemi kullanılarak irdelenmesidir. Bu sayede istatistiksel olarak kanal genişliği, kanal derinliği ve akış alanı/temas yüzeyi oranı parametrelerinin hedef fonksiyonları nasıl değiştirdiği hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

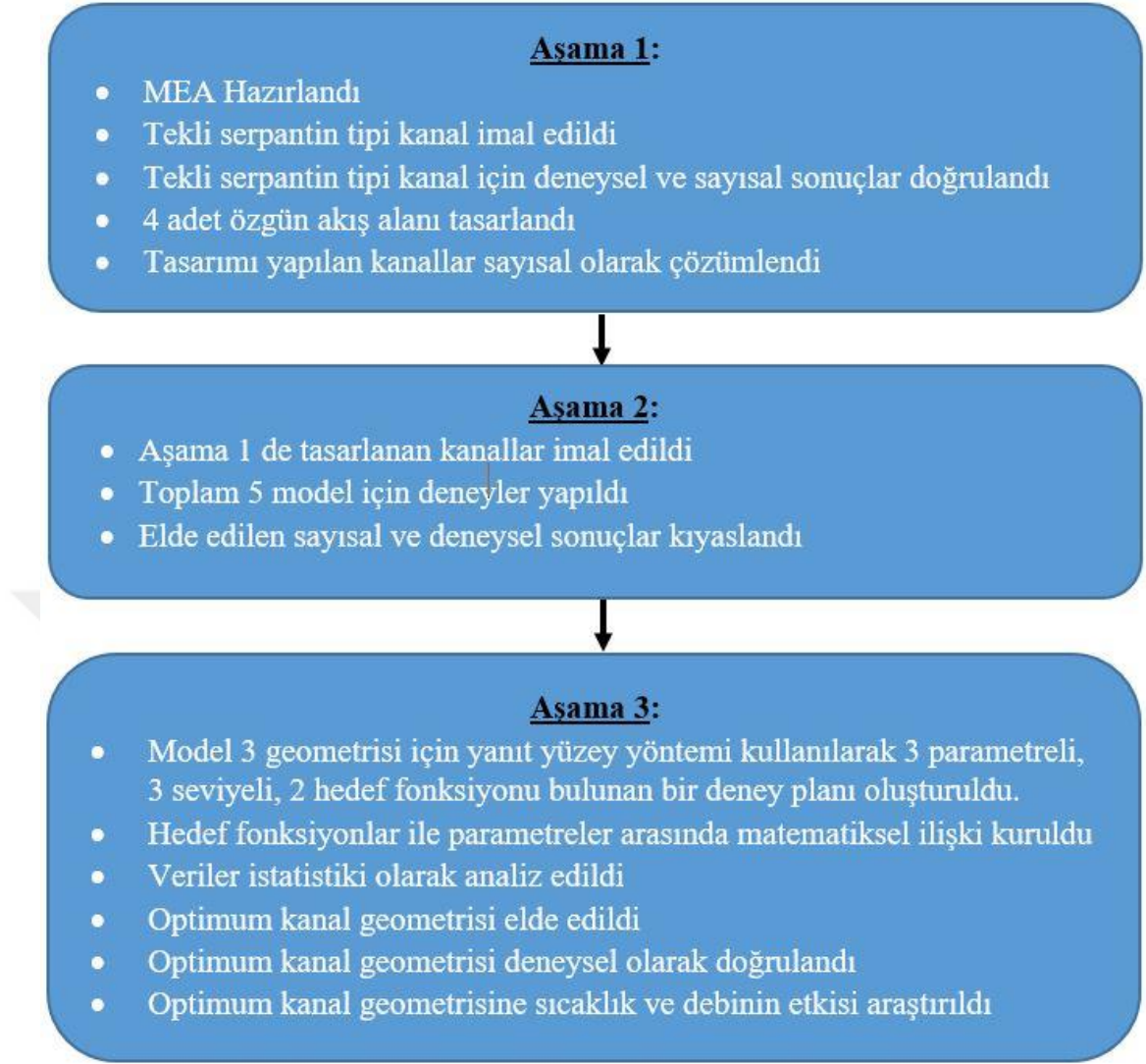
Son olarak da; imalatı yapılan optimum kanal geometrisi üzerinde işletme koşullarını iyileştirmek üzere pil sıcaklığı ve debi gibi işletme parametreleri değiştirilerek bu parametrelerin akım yoğunluğu üzerine olan etkileri incelenmiştir. Böylece;

1. Mevcutlara göre performansı yüksek akış alanları önerilerek yeni tip akış alanına sahip yakıt pilleri önerilmiştir.
2. Literatüre yeni akış alanı tasarımları sunulmuştur.
3. Mevcut literatürde kanal genişliği ve kanal derinliğinin yakıt pili performansına etkileri incelenmiş, fakat akış alanı/temas yüzeyi oranını inceleyen bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu çalışma kapsamında bu üç geometrik parametre arasında bir ilişki kurularak yakıt pili performansına etki eden bir parametre tanımlanmıştır.
4. Kanal yüksekliği, kanal genişliği, akış alanı/temas yüzeyi oranı, basınç düşümü ve elektriksel performans ilişkisini içeren kapsamlı analizler yapılmıştır.
5. Yakıt pili performansını etkileyen işletme parametreleri deneysel olarak incelenmiştir.
6. Farklı tasarımlar için deneysel çalışmalarla doğrulanmış sayısal modeller sunulmuştur.
7. Sayısal çözüm prosedürüne ilişkin detaylı açıklamalar yapılarak diğer araştırmacılara bu konuda kılavuzluk edilmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada öncelikli olarak bipolar plakalar üzerine literatürde yaygın olarak kullanılan tekli serpantin tipi akış alanı modeli imal edilmiş, imal edilen bu kanal tasarımı yakıt pili haline getirilmiş ve yakıt pili elektriksel performans deneyleri yapılmıştır. İşletme koşulları;  $T_{pil} = 70$  °C, nemlendirme sıcaklığı 70 °C, çalışma basıncı 1 atm, hidrojen debisi 0.25 lt/dk ve oksijen debisi 0.25 lt/dk olarak belirlenmiştir. Aynı akış alanı geometrisi; deneysel verilerde kullanılan işletme parametreleri kullanılarak sayısal çözümlenmiştir, bu sayede deneysel verilerle doğrulanmış bir sayısal model oluşturulmuştur.

Literatürde kullanılan tekli serpantin modeli hem deneysel hem de sayısal olarak doğrulandıktan sonra özgün kanal tasarımlarının sayısal çözümlenmeleri yapılmıştır. Sayısal çözümlenmeleri yapılan kanal tasarımlarının imatları gerçekleştirilerek deneysel performans testleri gerçekleştirilmiştir. Tezin tamamlanmasına ilişkin aşamalar Şekil 3.1 de sunulmuştur.

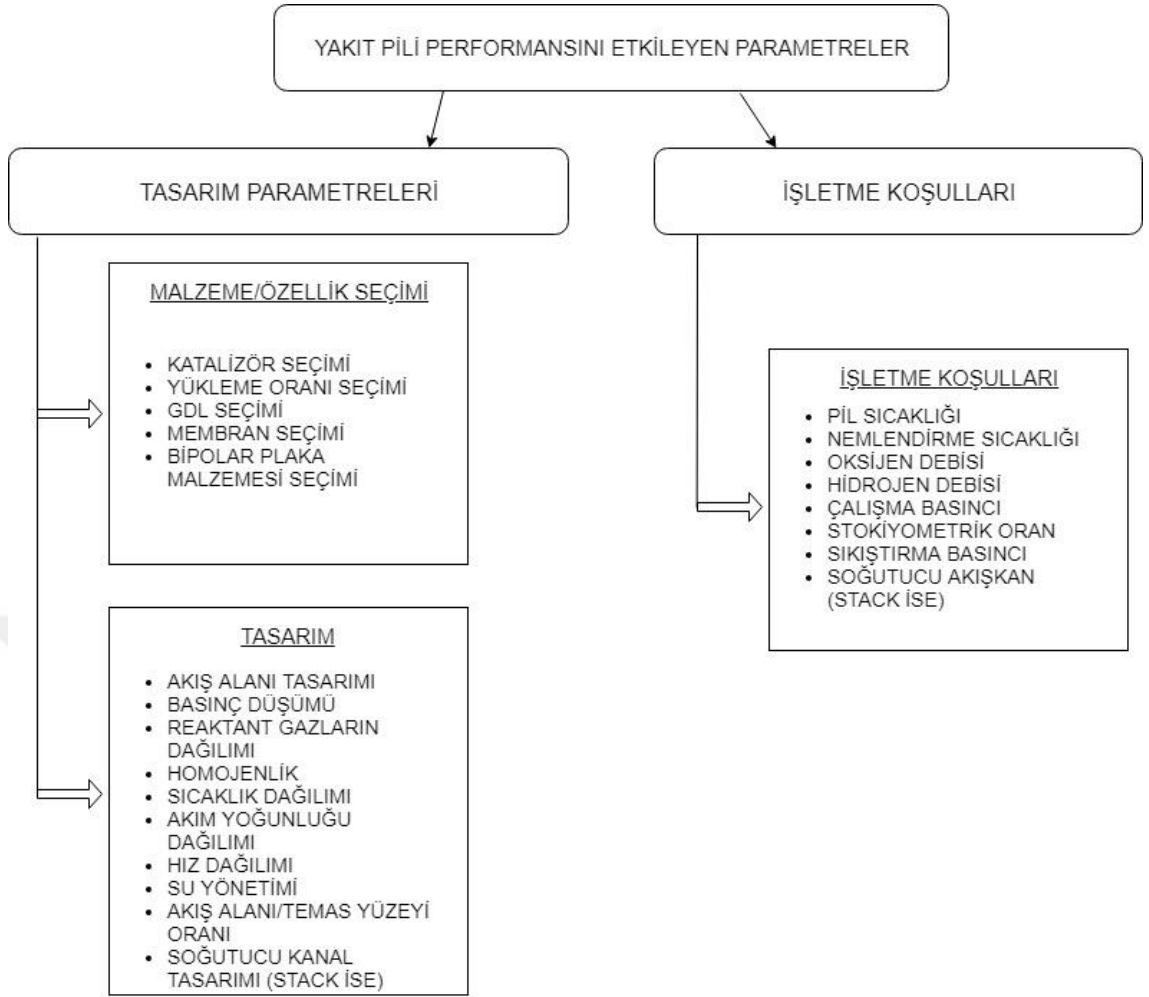


Şekil 3. 1.Çalışmanın aşamaları

Yapılan detaylı literatür taraması da göz önünde bulundurulduğunda; akış alanı tasarlamak isteyen bir tasarımcı iki ana hususa dikkat etmelidir. Performansı yüksek bir yakıt pili elde etmek isteyen tasarımcı; öncelikli olarak uygun çalışma şartlarını seçmeli ve tasarıma uygun malzeme seçimi yapmalıdır. Bu kapsamda çalışmaya başlanmadan bahsi geçen konular detaylı olarak incelenmeli ve performansa etki eden parametreler detaylandırılmalıdır. Daha sonraki araştırmacılara yol gösterici olması açısından; yakıt pili performansını etkileyen parametreler Şekil 3.2 de verilmiştir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM



**Şekil 3. 2.**Yakıt pili performansını etkileyen parametreler

#### Aşama 1:

Bu çalışma yakıt pili performansını etkileyen akış alanı tasarımı konusuna odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında öncelikli olarak malzeme seçim işlemi tamamlanmıştır. Çalışma esnasında kullanılacak olan malzemeler ve özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

**Çizelge 3. 1.**Tekli yakıt pili imalatı için kullanılan malzeme özellikleri

MALZEME	ÖZELLİK
Akım Toplama Plakası	3 mm kalınlıklı bakır levha, yüzeyi altın kaplama
Bipolar Plaka	10 mm kalınlığa sahip grafit plaka
Sızdırmazlık elemanı	0.125 mm kalınlığında silikon conta

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Katalizör	0.5 mg/cm <sup>2</sup> , %60 PtC
Gaz Difüzyon Tabakası	Sigracet gdl 34 bc
Membran	Nafion 212, 0.05 mm kalınlıklı

16 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip tekli serpantin tipi kanal geometrisi imal edilmiş, eş zamanlı olarak tekli hücreli yakıt pili tasarımına uygun olarak 0.5 mg Pt/cm<sup>2</sup>, %60 PtC katalizör yüklemesine sahip MEA hazırlanmıştır. MEA hazırlama ve kanal işleme ile ilgili konulara daha detaylı olarak 3.1. Materyal başlığında değinilmiştir.

Tekli serpantin yakıt pili haline getirilen tasarım ile deneyler yapılarak polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler literatür verileri ile kıyaslanmıştır, kıyaslama sonucunda verilerin literatürle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel işletme parametreleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

**Çizelge 3. 2.**Deneysel İşletme Parametreleri

İşletme Parametresi	Değer
Pil Sıcaklığı	70°C
Nemlendirme Sıcaklığı	70°C
Çalışma Basıncı	1 atm
Anot Debisi	0.25 lt/dk
Katot Debisi	0.25 lt/dk

Deneysel olarak test edilen tekli serpantin tipi kanal geometrisi 3 boyutlu olarak modellenmiş ve Fluent Pemfc modülü kullanılarak çözümlenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle uyum içerisindedir. Yakıt pillerinin sayısal olarak modellenmesi konusuna 3.2.2. Sayısal Analiz başlığında detaylı olarak yer verilmiştir.

Özgün akış alanı tasarımları Solidworks ve Autocad paket programları kullanılarak yapılmıştır. Akış alanı/temas yüzeyi oranı, kanal genişliği ve kanal derinliği aynı olan 4 adet özgün akış alanı tasarımı yapılmıştır. 3 boyutlu tasarımları tamamlanan 4 adet özgün akış alanı geometrisi Ansys Fluent paket programı kullanılarak sayısal çözümlenmiştir. Analiz sonuçları mevcut tekli serpantin tipi model çözümlenmesi ile kıyaslanmıştır.

#### **Aşama 2:**

Sayısal çözümlenmeleri yapılan akış alanı tasarımları Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Makine Atölyesinde bulunan CNC Freze yardımıyla grafit plakalar üzerine işlenmiştir. Tek hücreli yakıt pili haline getirilen 5 farklı tasarım deneysel olarak yakıt pili performans testlerine tabi tutulmuştur. Tasarım, Sayısal Çözümleme ve Deneysel Performans aşamaları tamamlandıktan sonra sonuçlar derlenmiş, uygun şekilde grafik edilmiş ve gerekli ilişkiler kurularak raporlanmıştır.

#### **Aşama 3:**

Aşama 1 ve aşama 2 de en yüksek akım yoğunluğunu ve en düşük basınç düşümünü sağlayan Model 3; için geometrik parametreler irdelenmiş ve bu parametrelerin performansı nasıl değiştirdiği ile ilgili bulgular araştırılmıştır. Elektriksel performansı ve basınç düşümünü etkilediği düşünülen kanal derinliği, kanal genişliği ve akış alanı/temas yüzeyi oranının tasarımlar üzerine olan etkileri araştırılmış, bu parametrelerin çıktı fonksiyonunu nasıl etkilediği üzerine polinomial bir model oluşturulmuştur. Bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasında ilişki kurmak için yanıt yüzey yöntemi(YYY) kullanılmıştır. Yanıt yüzey yöntemi değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren istatistiki bir metottur. Deney planı kapsamında elde edilen optimum kanal geometrisi imal edilerek deneysel olarak doğrulanmıştır. Aynı kanal geometrisi üzerine sıcaklık ve debinin etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

### **3.1. Materyal**

#### **3.1.1.MEA Hazırlama**

Çalışmanın kapsamı gereği ilk olarak malzeme seçimi ve MEA hazırlama kısmı gerçekleştirilmiştir. MEA hazırlanırken kullanılan malzemeler, özellikleri ve tedarik edildiği yerlere ilişkin bilgiler Çizelge 3.3 te verilmiştir.

**Çizelge 3. 3.MEA hazırlamada kullanılan malzeme özellikleri**

<b>Malzeme</b>	<b>Özellik</b>	<b>Marka</b>
GDL	Gdl 34 bc	Sigracet
Katalizör	Vulcan XC72R, Pt/C ,%60	Chemtrec
Nafion	%15	Sigma Aldrich
2-Proponal	Safılık %99.5	Sigma Aldrich

Yakıt pillerinin verimini etkileyen en önemli elemanlardan birisi de MEA'dır. MEA hazırlamada kullanılan katalizör mürekkebinin, karbon kağıdı ya da karbon kumaşı üzerine yüklenmesinde genel olarak iki önemli metot öne çıkmaktadır (Erkan, 2009).

- Püskürtme Metodu
- Sıyırma Metodu

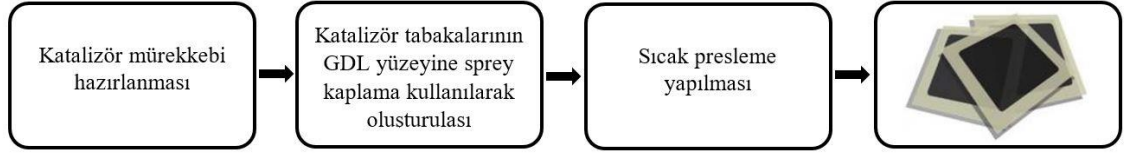
MEA yapısı hazırlanırken katalizör tabakasının yüklendiği yer açısından iki farklı metot uygulanmaktadır.

- Gaz difüzyon tabakası esaslı metot
- Membran esaslı metot

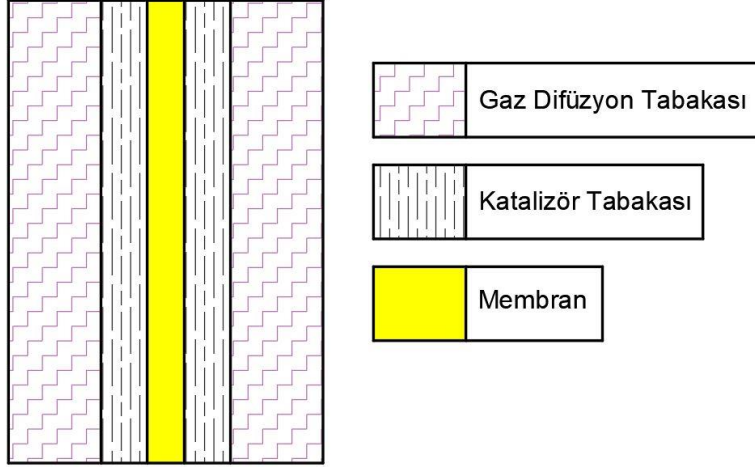
Çalışma kapsamında MEA hazırlanırken gaz difüzyon tabakası esaslı metot; katalizör mürekkebinin gaz difüzyon tabakası üzerine spreyleme yöntemiyle püskürtülmesi şeklinde uygulanmıştır. Şekil 3.3 te MEA hazırlama ana işlem basamakları verilmiştir. MEA hazırlanırken uygulanan proses; işlem sırasına göre aşağıda listelenmiştir. Yapılan bu işlem sonucunda elde edilen MEA'nın kesiti Şekil 3.4 te verilmiştir.

- Anot ve katot gaz difüzyon tabakaları aktif alan boyutlarına uygun olarak kesilir
- Kesim işlemi tamamlanan gaz difüzyon tabakaları tartılır
- Vakum tabla sıcaklığı istenilen değere ulaştığında gaz difüzyon tabakaları vakum tablaya yerleştirilir
- Yükleme kapasitesine bağlı olarak gerekli katalizör miktarı hesaplanır ve hassas terazi ile tartılır
- Katalizör mürekkebi hazırlanır
- Hazırlanan katalizör mürekkebi spreyleme yöntemiyle tablasına konulur
- Vakum tabla üzerinde bulunan gaz difüzyon tabakaları istenilen tartıma gelene kadar spreyleme yöntemiyle kaplanır
- Membran istenilen ölçüde kesilir
- Sıcak presleme işlemi, 130 °C'de ve 400 psi basınçta 5 dakika bekletilerek yapılır

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

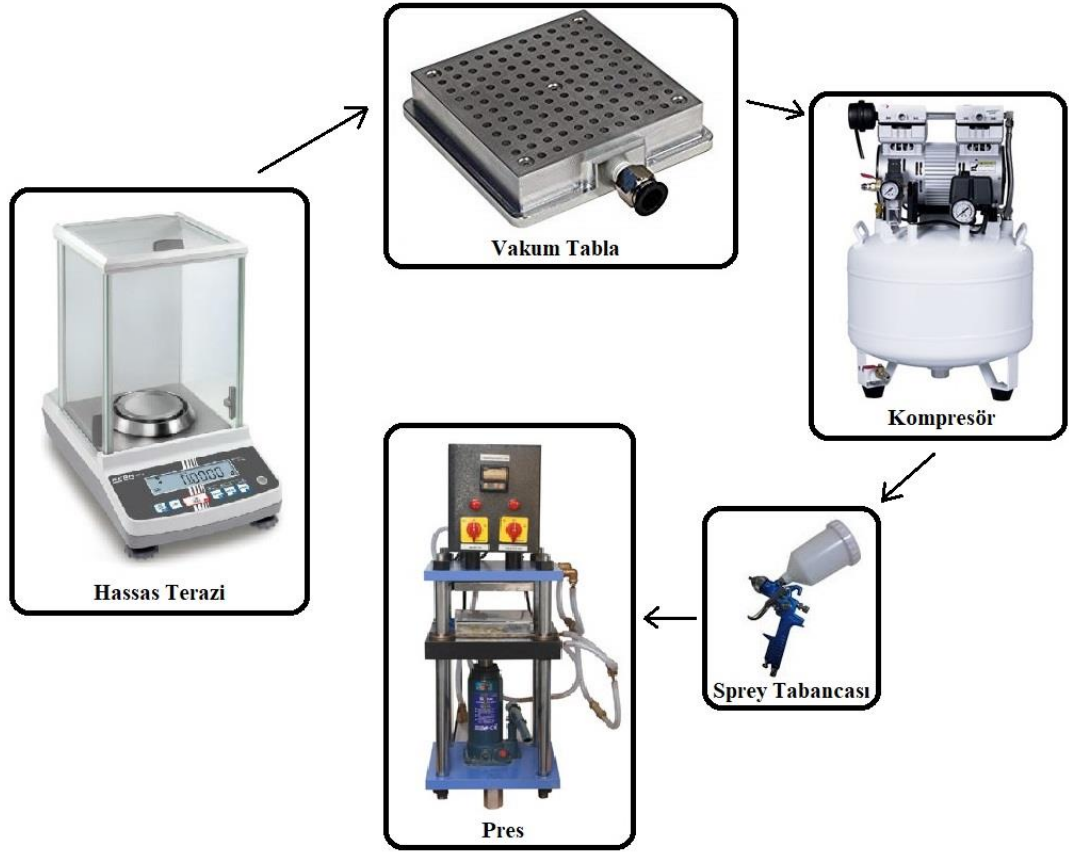


Şekil 3. 3.MEA hazırlamada ana işlem basamakları



Şekil 3. 4.Membran esaslı metot ile hazırlanan MEA kesiti

Yukarıda listelenen işlemlerin yapılması esnasında Şekil 3.5 te verilen ekipmanlar kullanılmıştır.



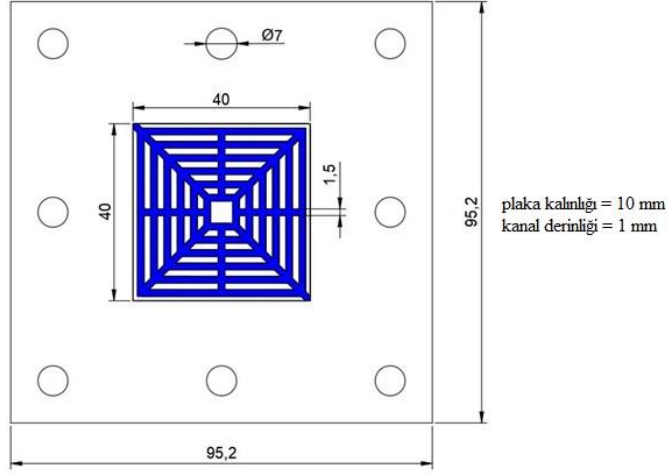
Şekil 3. 5.MEA hazırlamada kullanılan ekipmanlar

#### 3.1.2. İmalatı Yapılan Yakıt Pilleri

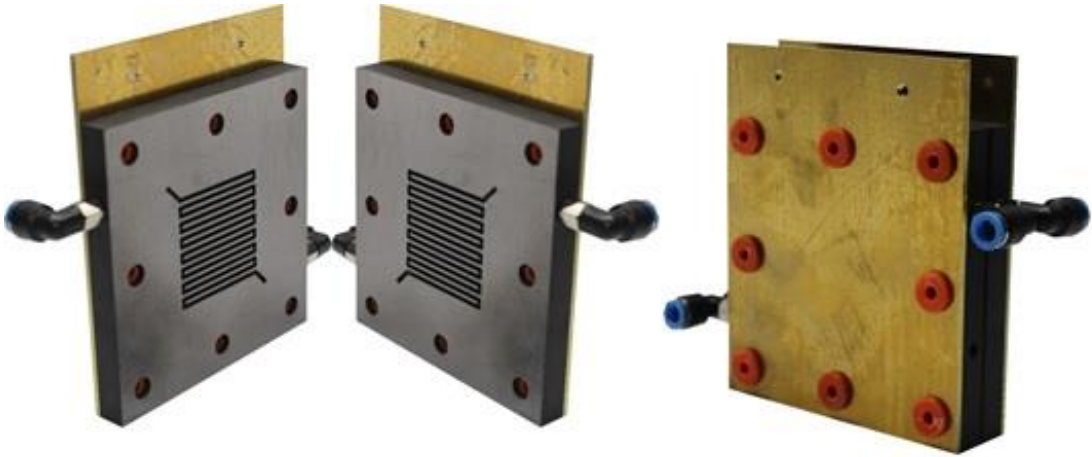
Çalışma kapsamında deneysel olarak 5 farklı akış alanı tasarlanmış ve bu tasarımlar imal edilmiştir. Akım toplama plakası olarak 3 mm kalınlığında pirinç levha imal edilmiş ve üzeri altın kaplama yaptırılmıştır. Bipolar plaka olarak 10 mm kalınlığında grafit plaka tercih edilmiştir. Pil sıcaklığı 120 V, 60 W silikon rezistans ısıtıcı ile sağlanmıştır. Yakıt pillerinin giriş çıkış portlarında M5 pnömatik rekorlar ve M5 pnömatik dirsekler kullanılmıştır. Deneysel olarak test edilen 5 farklı tasarım için kanal genişliği ve kanal derinliği değerleri sırasıyla; 1.5 mm ve 1 mm dir. Tasarlanan bütün modeller Ağrı İbrahim Çeçen üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine bölümü envanterinde yer alan 3 eksenli CNC freze ile imal edilmiştir.(Şekil 3.6). Testleri alınan yakıt pilinin teknik resmi, genel görünüşü ve imal edilen kanallar şekil 3.7 ve şekil 3.8 de verilmiştir.



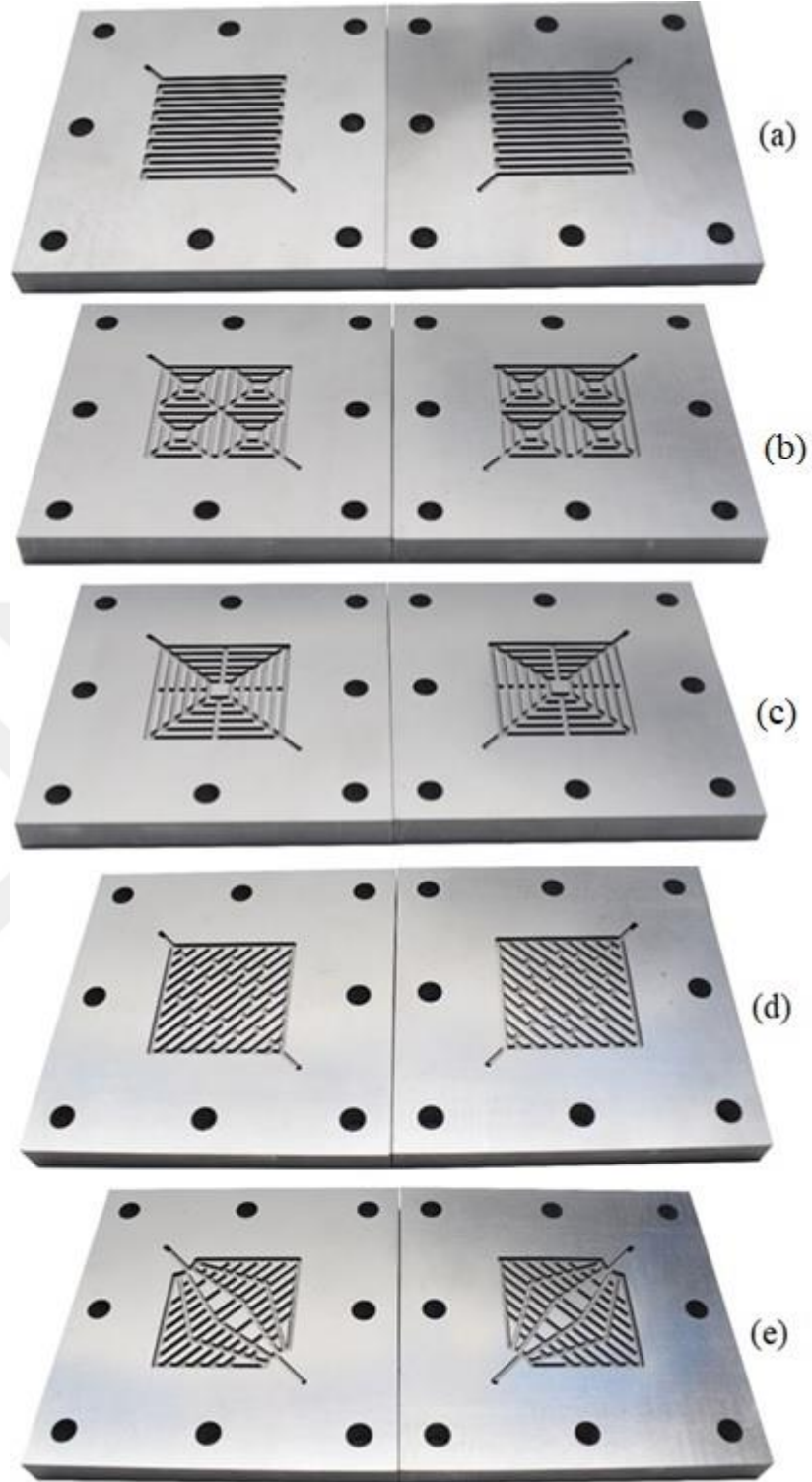
Şekil 3. 6.Kanal tasarımlarının imal edildiği CNC Freze



Şekil 3. 7.İmalatı yapılan bipolar plakaların teknik resmi



Şekil 3. 8.Tasarlanan yakıt pilinin resmi



Şekil 3. 9.İmalatı yapılan 5 modelin resmi



Şekil 3.9 da a:Model 1,b:Model 2,c: Model 3, d: Model 4 ve e: Model 5 in resmidir. Şekil 3.9 da imalat resimleri verilmiş olan tasarımlara ilişkin teknik veriler Çizelge 3.4 te verilmiştir

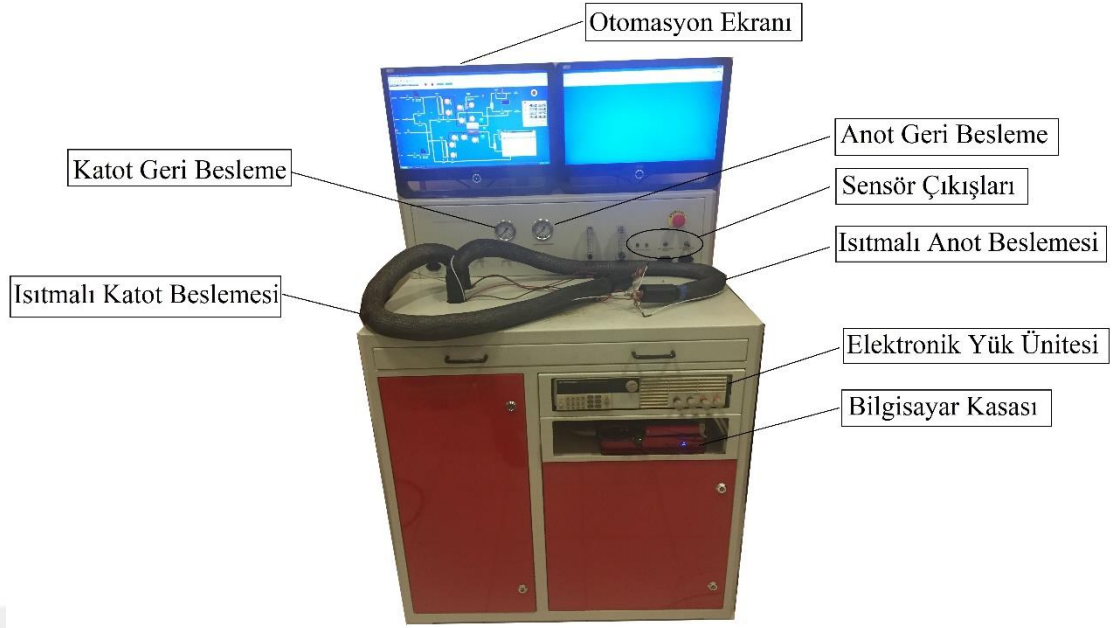
**Çizelge 3. 4.**İmalatı yapılan kanallara ilişkin teknik veriler

Parça	Kanal Genişliği	Kanal Derinliği	Katalizör Alanı	Akış Alanı	Temas Yüzeyi	Akış Alanı Yüzdesi
Model 1	1,5 mm	1 mm	1600 mm <sup>2</sup>	872	728	% 54,5
Model 2	1,5 mm	1 mm	1600 mm <sup>2</sup>	895,43	704,35	% 55,9
Model 3	1,5 mm	1 mm	1600 mm <sup>2</sup>	886,65	713,35	% 55,4
Model 4	1,5 mm	1 mm	1600 mm <sup>2</sup>	893,68	706,32	% 55,8
Model 5	1,5 mm	1 mm	1600 mm <sup>2</sup>	890,09	709,91	% 55,6

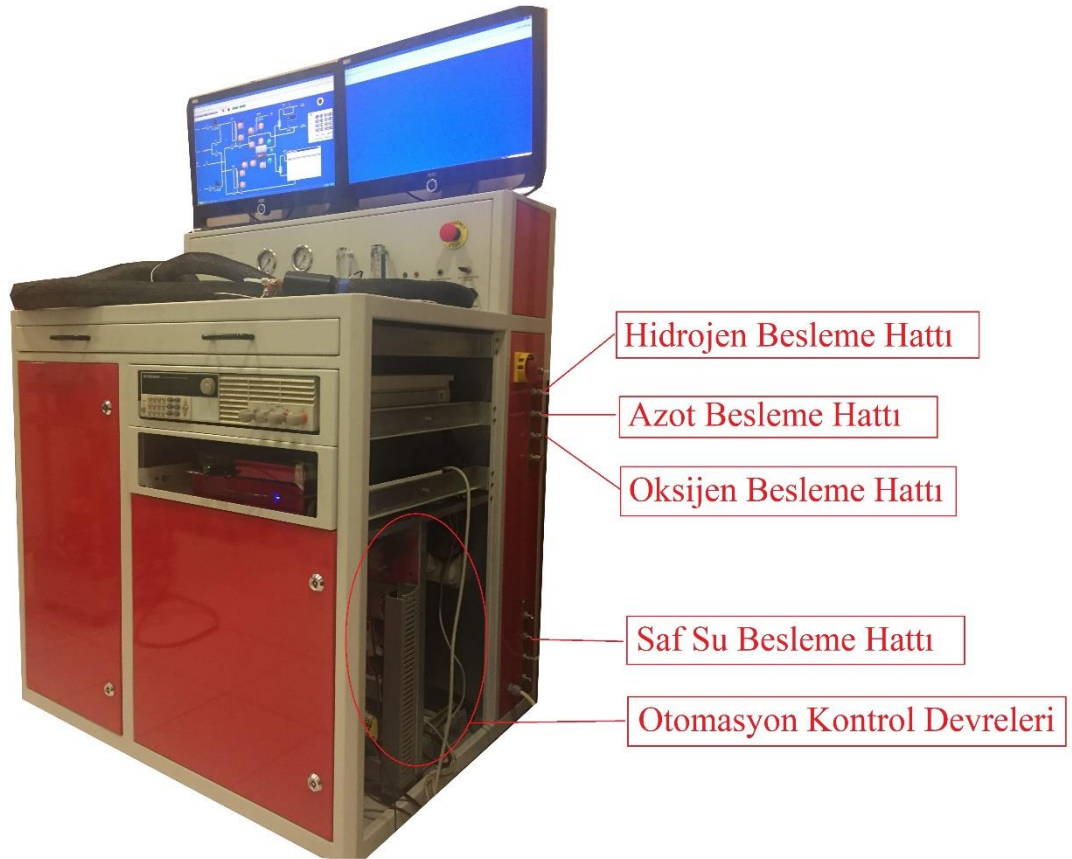
$Akış Alanı Yüzdesi = \frac{Akış Alanı}{Katalizör Alanı} \times 100$  formülü ile elde edilmiştir.

#### 3.1.3.Yakıt Pili Test İstasyonu

Yakıt pillerinin performansını karakterize etmek için, elektrokimyasal bir teknik olan polarizasyon eğrileri kullanılmaktadır. Polarizasyon eğrileri elde edildiği zaman yakıt pilinin o işletme koşulları altında uğradığı performans kayıplarına dair bilgi verir. Tasarlanan farklı akış alanına sahip yakıt pili performans testlerine tabi tutulmuştur. Pil performans testleri Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 ' de görülen, Erzurum Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Henatech<sup>TM</sup> marka (max 600 W) yakıt pili test istasyonu sistemi kullanılarak alınmıştır. Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 ' de yakıt pili test istasyonunu oluşturan kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 3. 10.Henatech™ marka (max 600 W) yakıt pili test istasyonu



Şekil 3. 11.Test istasyonunun kısımları



Şekil 3. 12. Test istasyonu nemlendirme ünitesi

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Matematiksel Model

Bu tez kapsamında oluşturulan geometrilerin matematiksel çözümü için Fluent paket programının Pemfc modülü kullanılmıştır. Matematiksel model başlığı altında Pemfc modülünün ele aldığı kabuller, korunum denklemleri, elektrokimyasal denklemler, akım ve kütle korunum denklemleri, sıvı su oluşumu, taşınımı ve etkileri ile diğer özellikler elde edilmiştir.

#### Kabuller

Bu tez çalışması kapsamında Fluent Pemfc Modülü kullanılarak yapılan çalışmalarda aşağıda maddeler halinde verilen kabuller göz önünde bulundurulmuştur (Çırak, 2011).

1. Bütün elektrokimyasal reaksiyonlarda su tek fazlı ve gaz fazında kabul edilmiştir.

2. Gaz akışı süreklidir.
3. Yakıt pili kararlı olarak kabul edilmiştir.
4. Membranlar tamamen su ile doyurulmuştur ve homojen bir yapıya sahiptirler.
5. Gazlar yalnızca difüzyon yoluyla aktarılırlar
6. Difüzyon tabakalarındaki ve akım toplayıcı tabakalardaki Ohmik kayıplar ihmal edilmiştir
7. Reaksiyona giren bütün gazlar ideal gaz davranışı göstermektedir.
8. Viskozite sabittir
9. Kanallardaki gaz akışı laminerdir

#### **Korunum Denklemleri**

Fluent Paket programı ile yapılan akış analizlerinin tamamında kütle ve momentum korunum eşitlikleri çözülmektedir. Isı transferi içeren problemlerde kütle ve korunum denklemlerine ilaveten enerji korunum denklemi de çözülmektedir. Fluent Pemfc modülü kullanılarak yapılan yakıt pili modellemeleri sırasında membran, katalizör, difüzyon tabakalarında ve akım toplama plakalarındaki elektrik potansiyel alanı da çözülür. Gözenekli katalizör bölgelerinde yüzey reaksiyonları çözülerek reaksiyon difüzyon dengesi hesaplanan değere uygulanır (Bilgili, 2011).

Yakıt pillerinin sayısal çözümlenmesi esnasında kullanılan korunum denklemleri ve kaynak terimleri Çizelge 3.5 te verilmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

**Çizelge 3. 5.** PEM yakıt pili analizinde kullanılan korunum denklemleri ve kaynak terimleri (Özdemir, 2012).

Korunum Denklemleri	Matematiksel İfadeler	Hacimsel Kaynak Terimleri
Kütle Korunum Denklemi	$\frac{\partial(\rho\epsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\epsilon v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\epsilon w)}{\partial z} = S_m$	$S_m = \begin{cases} S_{H_2} + S_{H_2O} & \text{anot katalizör} \\ S_{O_2} + S_{H_2O} & \text{katot katalizör} \end{cases}$
Momentum Korunum Denklemi	$u \frac{\partial(\epsilon\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho w)}{\partial z} = -\epsilon \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_{px}$	Gaz difüzyon, katalizör ve membran tabakaları için; $S_{px} = -\frac{\mu u}{\beta_x}$
	$u \frac{\partial(\epsilon\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho v)}{\partial z} = -\epsilon \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + S_{py}$	$S_{py} = -\frac{\mu v}{\beta_y}$
	$u \frac{\partial(\epsilon\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho w)}{\partial z} = -\epsilon \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + S_{pz}$	$S_{pz} = -\frac{\mu w}{\beta_z}$
Enerji Korunum Denklemi	$\frac{\partial(\epsilon\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\epsilon\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\epsilon\rho w h)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_h$	Katalizör ve membran tabakaları için; $S_h = h_{react} + R_{an,kat} \eta_{an,kat} + I^2 R_{ohm}$
Hidrojen Konsantrasyon Denklemi (Anot)	$u \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{H_2})}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{H_2})}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{H_2})}{\partial z} = \frac{\partial(j_{x,H_2})}{\partial x} + \frac{\partial(j_{y,H_2})}{\partial y} + \frac{\partial(j_{z,H_2})}{\partial z} + S_{H_2}$	Anot katalizör için; $S_{H_2} = -\frac{M_{H_2}}{2F} i_a$
Su Konsantrasyon Denklemi (Anot)	$u \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{aw})}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{aw})}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{aw})}{\partial z} = \frac{\partial(j_{x,aw})}{\partial x} + \frac{\partial(j_{y,aw})}{\partial y} + \frac{\partial(j_{z,aw})}{\partial z} + S_{aw}$	Anot katalizör için; $S_{aw} = \frac{M_{H_2O}}{F} i_a$
Oksijen Konsantrasyon Denklemi (Katot)	$u \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{O_2})}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{O_2})}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{O_2})}{\partial z} = \frac{\partial(j_{x,O_2})}{\partial x} + \frac{\partial(j_{y,O_2})}{\partial y} + \frac{\partial(j_{z,O_2})}{\partial z} + S_{O_2}$	Katot katalizör için; $S_{O_2} = -\frac{M_{O_2}}{4F} i_c$
Su Konsantrasyon Denklemi (Katot)	$u \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{cw})}{\partial x} + v \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{cw})}{\partial y} + w \frac{\partial(\epsilon\rho Y_{cw})}{\partial z} = \frac{\partial(j_{x,cw})}{\partial x} + \frac{\partial(j_{y,cw})}{\partial y} + \frac{\partial(j_{z,cw})}{\partial z} + S_{cw}$	Katot katalizör için; $S_{cw} = \frac{M_{H_2O}}{2F} i_c$

#### Elektrokimyasal Denklemler

PEM yakıt pilleri için elektrokimyasal modellemenin temelini hidrojen gazının oksidasyonu ve oksijen gazının redüksiyonu oluşturur. Fluent Pemfc modülünde elektrokimyasal denklemin gerçekleştiği bölgeler; membranın sağ ve solunda yer alan yüzeylerde gerçekleşen heterojen reaksiyonlar olarak değerlendirilir.

Katalizör yüzeylerindeki tepkimelerin gerçekleşmesindeki en önemli olay yüzey aşırı potansiyelidir. Yüzey aşırı potansiyeli katıların faz potansiyeli ve membranın faz potansiyeli arasındaki farktan oluşur. Buna göre; PEM modellemede iki potansiyel eşitlik kullanılması gerekir. Birinci eşitlik, elektronun katı yüzeylerdeki taşınımı, ikinci eşitlik ise; hidrojen iyonlarının iyonik taşınımıdır. Bu iki eşitlik şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \phi_{sol}) + R_{sol} = 0 \quad (3.1)$$

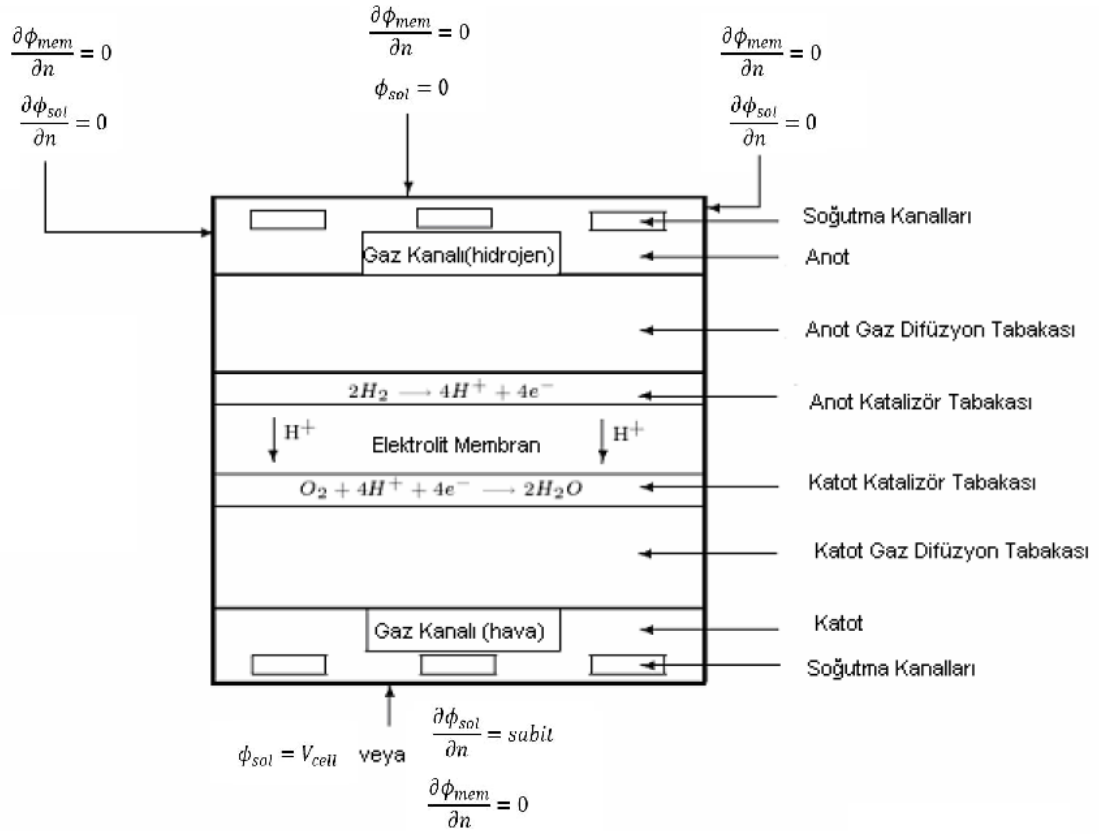
$$\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \phi_{mem}) + R_{mem} = 0 \quad (3.2)$$

Burada  $\sigma$  elektrik iletkenliği (1/ohm.m),  $\phi$  elektrik potansiyeli (Volt) ve R hacimsel transfer akımını ( $A/m^3$ ) ifade etmektedir.

$\phi_{sol}$  ve  $\phi_{mem}$  değerlerini hesaplamak için gerekli olan sınır şartları Şekil 3.13 te gösterilmiştir. Dış sınırlar ikiye ayrılır: Akımın içinden geçtiği sınırlar ve akımın içinden geçmediği sınırlar.

Protonik akımın yakıt pilini bir dış sınırdan terk etmediği göz önüne alınırsa, membranın faz potansiyeli  $\phi_{mem}$  için bir durum; dış sınırların hepsinde 'sıfır akı' sınır şartı olmasıdır.

Katı faz potansiyeli,  $\phi_{sol}$ , için anot ve katot tarafında, dış devre ile bağlantıdaki dış sınırlar göz önüne alınır ve yakıt pilinde üretilen elektrik akımı sadece bu sınırlardan geçer. Diğer tüm dış sınırlarda  $\phi_{sol}$  için 'sıfır akı' sınır şartı vardır.



**Şekil 3. 13.**  $\phi_{mem}$  ve  $\phi_{sol}$  için sınır şartlarının şematik gösterimi (Ansys, 2006).

Dış sınır şartları akımın içinden geçtiği sınırlar ve akımın içinden geçmediği sınırlar olmak üzere ikiye ayrılır. Dış temas sınırlarında,  $\phi_{sol}$  (potansiyel sınır şartları) için sabit değerler kullanılması çözümü kolaylaştırmaktadır. Anot tarafında voltaj sıfırlanırsa, okunan (pozitif) değer katot tarafındaki hücre voltajıdır. Eğer; sabit akı değeri girilirse, galvanostatik sınır şartları tanımlanıyor anlamına gelmektedir (Ansys, 2006).

Eşitlik 3.1 ve eş 3.2 deki taşınım akımları veya kaynak terimleri, sadece katalizör tabakasında ‘sıfır’ değillerdir ve şu şekilde hesaplanır;

Katı faz için,

Anot tarafında  $R_{sol} = -R_{anot} (< 0)$ ,

katot tarafında  $R_{sol} = +R_{katot} (> 0)$ ’dır.

Membran fazı için,

Anot tarafında  $R_{mem} = +R_{anot} (> 0)$  ,

katot tarafında  $R_{sol} = -R_{katot} (< 0)$  ‘dır.

Bununla birlikte kaynak terimleri değişim akım yoğunluğu(A/m<sup>3</sup>) olarak ta tanımlanabilir. Butler-Volmer fonksiyonunun genelleştirilmiş halidir. Bu fonksiyonun basitleştirilmiş hali Tafel formülasyonudur ve şu şekildedir:

$$R_{an} = j_{an}^{ref} \left( \frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} (e^{\alpha_{an} \cdot F \cdot \eta_{an} / R \cdot T} - e^{-\alpha_{kat} \cdot F \cdot \eta_{kat} / R \cdot T}) \quad (3.3)$$

$$R_{kat} = j_{kat}^{ref} \left( \frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{kat}} (-e^{\alpha_{an} \cdot F \cdot \eta_{an} / R \cdot T} + e^{-\alpha_{kat} \cdot F \cdot \eta_{kat} / R \cdot T}) \quad (3.4)$$

Bu eşitliklerdeki terimlerin açıklaması ise:

$j^{ref}$  = hacimsel referans akım yoğunluğu (A/m<sup>3</sup>)

[ ], [ ]<sub>ref</sub> = tür konsanstrasyonu, referans değer (kg.mol/m<sup>3</sup>)

$\gamma$  = konsantrasyon üssü (boyutsuz)

$\alpha$  = taşınım katsayısı, (boyutsuz)

F= Faraday Sabiti (9.65 x 10<sup>7</sup> C/kg.mol)'dir.

3.3 ve 3.4 eşitlikleri Butler-Volmer fonksiyonunun genelleştirilmiş halidir. Butler-Volmer fonksiyonunun basitleştirilmiş hali Tafel formülasyonudur ve şu şekildedir:

$$R_{an} = j_{an}^{ref} \left( \frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} (e^{\alpha_{an} \cdot F \cdot \eta_{an} / R \cdot T}) \quad (3.5)$$

$$R_{kat} = j_{kat}^{ref} \left( \frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{kat}} (e^{-\alpha_{an} \cdot F \cdot \eta_{an} / R \cdot T}) \quad (3.6)$$

Fluent'teki çözümlerde, katalizör tabakaları içindeki taşınım akımlarını bulmak için varsayılan olarak kullanılan eşitlik Butler-Volmer eşitliğidir.



Kinetik olaylar için itici güç, aktivasyon kaybı olarak da bilinen  $\eta$ , yüzey aşırı-potansiyeldir. Aktivasyon kaybının büyüklüğü genellikle katı ve membran potansiyelleri,  $\phi_{sol}$  ve  $\phi_{mem}$  arasındaki farktır.

Anot tarafından katot tarafına geçerken oluşan elektriksel potansiyel kazanımı, açık- devre voltajını,  $V_{oc}$  katot tarafından çıkartarak hesaba katılabilir.(Bilgili, 2011)

$$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem} \quad (3.7)$$

$$\eta_{kat} = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{oc} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.1 den eşitlik 3.8 e kadar olan eşitlikler kullanılarak, bilinmeyen iki potansiyel alan elde edilebilir.

#### **Akım ve Kütle Korunumu**

PEM Yakıt pillerinde elektrokimyasal reaksiyonlar,  
Yakıt pilinin anot kısmında oluşan reaksiyon (hidrojen):



Yakıt pilinin katot kısmında oluşan reaksiyon (oksijen);



Tüm hücrede gerçekleşen toplam reaksiyon:



şeklindedir.

Tür eşitlikleri için hacimsel kaynak terimleri ( $kg/m^3s$ ) ve enerji eşitliği ( $W/m^3$ ) ise şu şekilde verilir:

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

$$S_{H_2} = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} R_{an} \quad (3.12)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} R_{kat} \quad (3.13)$$

$$S_{H_2O} = -\frac{M_{w,H_2O}}{2F} R_{kat} \quad (3.14)$$

Fluent Pemfc Modülü enerji eşitliğindeki ek hacimsel kaynaklar, ohmik ısınma, suyun oluşma ısısı, elektriksel iş ve suyun gizli ısınmasıdır.

$$S_H = I^2 R_{ohm} + h_{reaksiyon} + \eta R_{an,kat} + h_{phase} \quad (3.15)$$

Elektrokimyasal reaksiyonlar, gözenekli ortamdaki katalizör yüzeylerde gerçekleşen heterojen tepkimeler olarak değerlendirilir. Tepkimeler her iki katalizör tabakasında da yüzey tepkimeleri olarak değerlendirilir ve tepkimeye giren herhangi bir türün difüzyon akışı; o türün oluşum hızı ile dengelenir.

$$\frac{\rho D_i}{\delta} (y_{i,surf} - y_{i,cent}) r = \frac{M_{w,i}}{nF} R_{an,kat} \quad (3.16)$$

Bu eşitlikteki terimlerin açıklamaları ise şu şekildedir:

$D_i$  = i türünün kütle difüzyon katsayısı ( $m^2/s$ )

$r$  = katalizör yüzeyin özgül tepkime yüzey alanı veya alanın hacme oranı ( $1/m$ )

$y_{i,surf}$  = tepkime yüzeyindeki i türünün kütle kesri

$y_{i,center}$  = i türünün hücre merkezindeki kütle kesri

$\delta$  = tepkime yüzeyleri ve hücre merkezi arasındaki ortalama uzaklık(m)

Eşitlik 3.16'nin sol tarafı tepkime yüzeyindeki difüzyon akısını, sağ tarafı ise kütle jenerasyonunu gösterir. Tepkime yüzeyleri ve hücre merkezi arasındaki ortalama mesafe ise;

$$\delta = \frac{1}{r} \quad (3.17)$$

formülünden elde edilir.

#### 3.2.2.Sayısal Analiz

Bu doktora tezi kapsamında tasarlanan geometriler Ansys Fluent Pemfc modülü kullanılarak çözümlenmiştir. Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımında bir geometrinin sayısal çözümlemesinin yapılabilmesi için öncelikli olarak geometri oluşturulması, oluşturulan geometriye çözüm ağı oluşturulmalı (mesh), ağ yapısı oluşturma işlemi tamamlanan geometriye sınır şartlar tanımlanarak çözücü ayarları yapılmalı ve ardından istenilen kesit veya kesitlerdeki özellikler gözlemlenmelidir. Bu çalışma kapsamında analiz edilen yakıt pillerinin fiziksel modelleri Autocad programı kullanılarak 2 boyutlu tasarlanmış, Autocad programında tasarlanan modeller, Solidworks programı kullanılarak 3 boyutlu hale getirilmiş ve montaj edilmiştir. Fiziksel modelin oluşturulmasından sonraki işlemler Ansys programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu anlatılan süreci detaylandırmak adına bahsi geçen konular; Ansys ekranı, geometri oluşturma, ağ yapısı oluşturma ve ayarlar başlıklarında detaylı olarak anlatılmıştır.

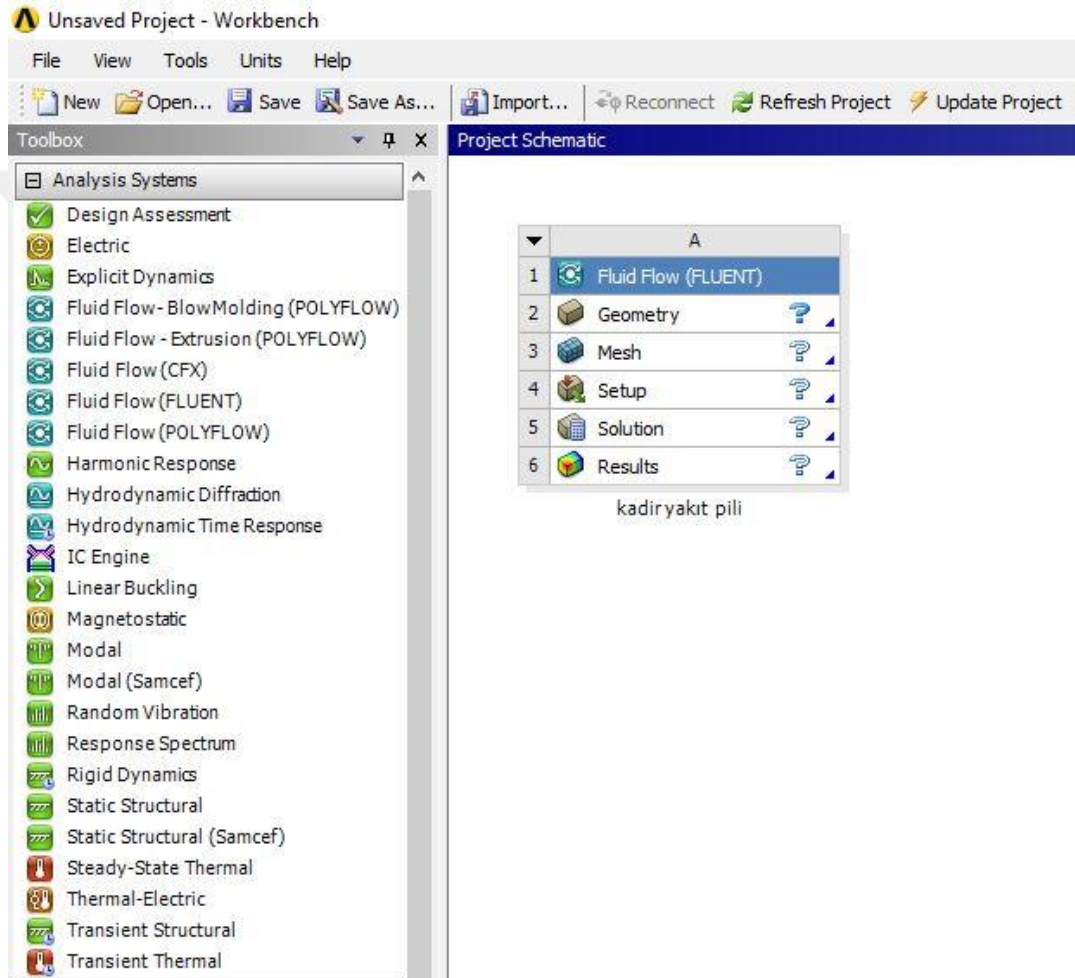
Çalışmada kapsamında yapılan sayısal çözümler için Çizelge 3.6 da teknik özellikleri verilen iş istasyonu kullanılmıştır.

**Çizelge 3. 6.**Çözümlelerde kullanılan iş istasyonunun teknik özellikleri

<b>İşlemci</b>	Intel Xeon E3-1245 V6
<b>İşlemci Hızı</b>	3.7 GHz
<b>RAM</b>	16 GB ; ECC
<b>Ekran Kartı</b>	N Vidia Quadro P600 – 2 GB
<b>Disk Tipi</b>	SSD

#### Ansyes Ekranı

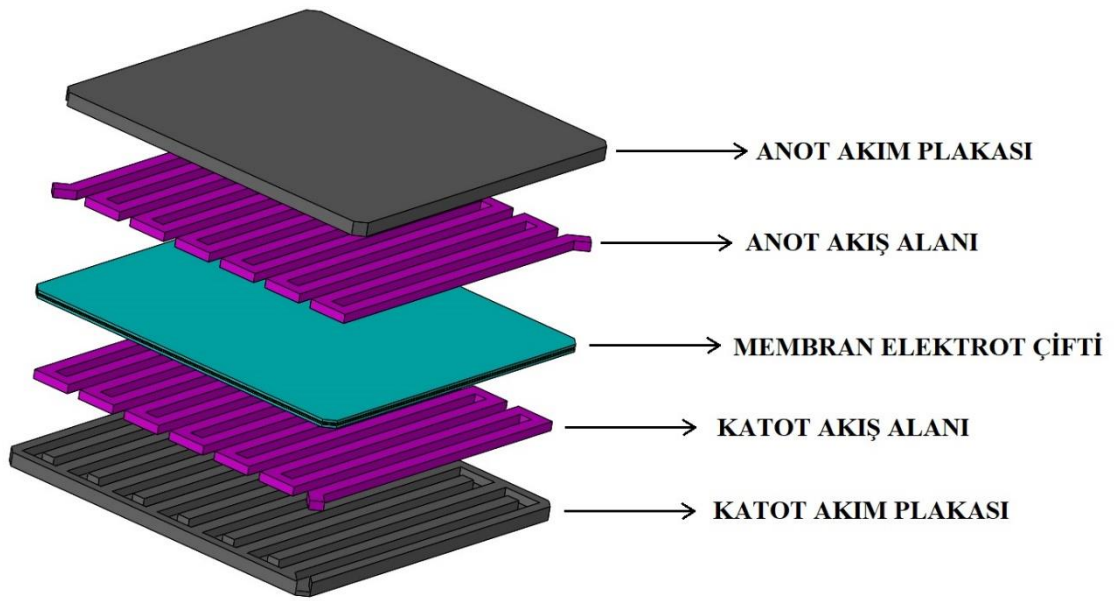
Öncelikli olarak Ansyes ekranı açılır ve “Analysis System” kısımdan fluent boş ekrana sürüklenir. Analysis system farklı çözdürücüler için pratik uygulama yapmayı sağlayan bir sistemdir. Kullanıcı tercihiine bağılı olarak aynı işlemler “Component System” kullanılarak da hazırlanabileceğı unutulmamalıdır. Şekil 3.14 te Ansyes ana ekran görüntüsü verilmiştir.



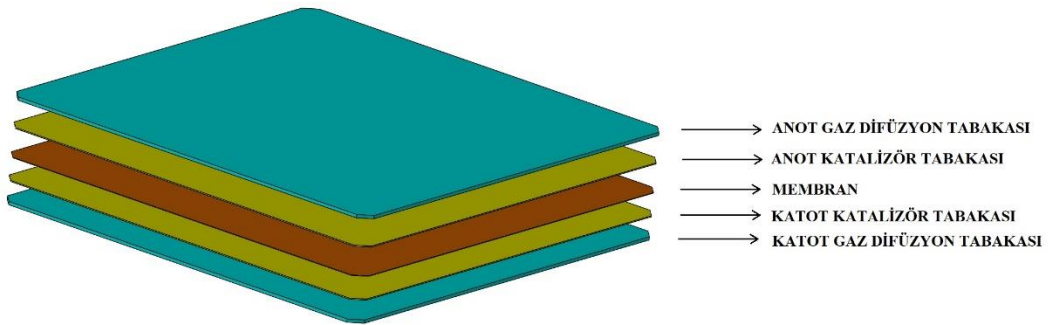
Şekil 3. 14. Ansyes ekranına fluent çözücüsünün yerleştirilmesi

#### Geometri Oluşturma

Bu çalışma kapsamında ilk etapta 5 farklı geometri tasarlanmıştır. Geometri oluşturma konusunun daha iyi anlaşılabilmesi için Model 1 in montajı detaylandırılmıştır. Herhangi bir yakıt pilinin sayısal olarak çözümlenebilmesi için 9 farklı bölgenin montaj edilmesi gereklidir. Bu bölgeler Anot akım plakası, anot akış alanı, anot gaz difüzyon tabakası, anot katalizör tabakası, membran, katot katalizör tabakası, katot gaz difüzyon tabakası, katot akış alanı ve katot akım toplama plakalarıdır. Model 1 için bu bölgeler Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 da tanımlanmıştır.



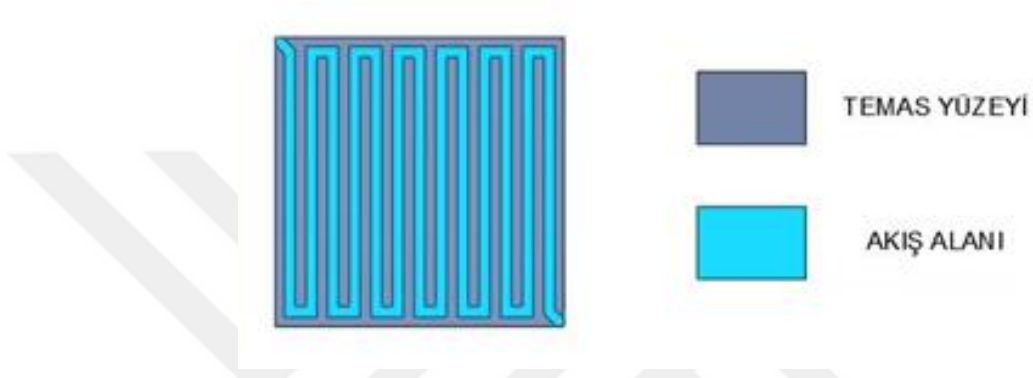
Şekil 3. 15. PEM yakıt pilinin fiziksel modeli



Şekil 3. 16. Membran elektrot grubu fiziksel bileşenleri

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

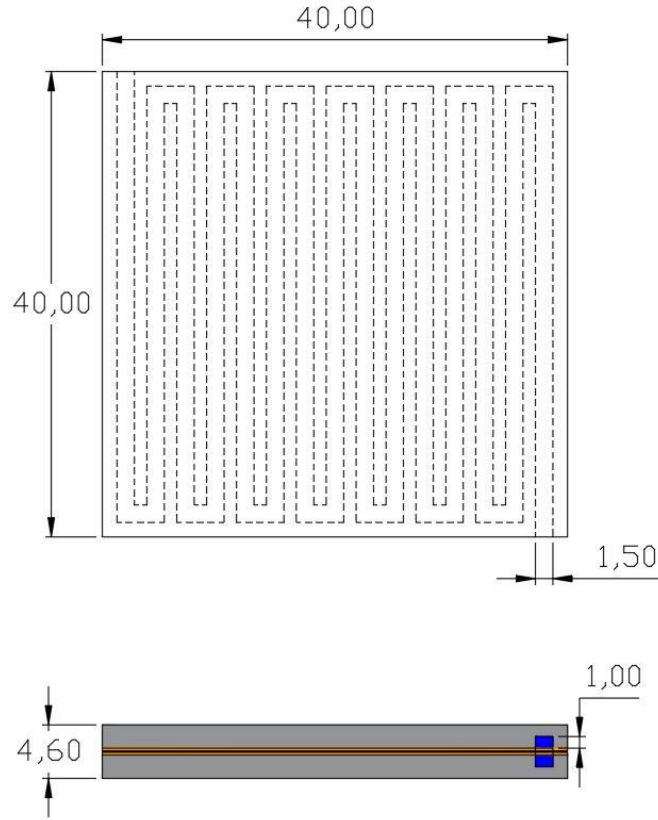
Bu çalışma kapsamında ilk olarak 5 farklı akış alanı tasarımı sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu beş kanal tasarımından bir tanesi literatürde sıkça kullanılan tekli serpantin tipi tasarımıdır. Tasarlanan bu beş kanal fiziksel olarak aynı ölçülere sahip, sadece kanal tasarımları birbirinden farklıdır. Akış alanları tasarlarken de bütün tasarımlarda akış alanı/temas yüzeyi oranına dikkat edilmiştir. Akış alanı/temas yüzeyi oranını daha iyi açıklayabilmek için Şekil 3.17 incelenmelidir.



Şekil 3. 17.Akış alanı / temas yüzeyi oranı

Çizelge 3. 7.Tasarımı yapılan kanallara ilişkin geometrik boyutlar

Parça Adı	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
Gaz Akış Kanalları	---	1.5	1
Akım Plakaları	40	40	2
Gaz Difüzyon Tabakaları	40	40	0.25
Katalizör Tabakaları	40	40	0.025
Membran	40	40	0.05
Yakıt pili	40	40	4.60



**Şekil 3. 18.** PEM yakıt pili için ortak geometrik ölçüler

Tasarlanan beş kanal için geometrik boyutlar aynıdır. Modeller için ortak olan geometrik boyutlandırmalar Çizelge 3.7 ve Şekil 3.18 de sunulmuştur. Verilen ölçüler ve teknik resimden de anlaşılacağı üzere 5 model içinde akım toplama plakalarının ölçüleri, gaz akış kanalının derinlik ve yüksekliği, gaz difüzyon tabakalarının ölçüleri, katalizör tabakalarının ölçüleri ve membran ölçüleri aynı tutulmuştur.

Ansys Fluent Pemfc modülü ile PEM tipi yakıt pilleri çözümlenirken olması gereken fiziksel model 9 hacim bölgesinden meydana gelmektedir. Yapılan tasarıma göre bu dokuz bileşenden herhangi bir tanesi çok parçalı olarak çizilmesi gerekiyorsa; Workbench sayfasında bu farklı bölgeler aynı hacim olarak seçilmelidir. Sayısal çözümlemenin tamamlanabilmesi için oluşturulması gereken 9 farklı hacim bölgesi için isimlendirmeler ve özellikler Çizelge 3.8 de sunulmuştur.

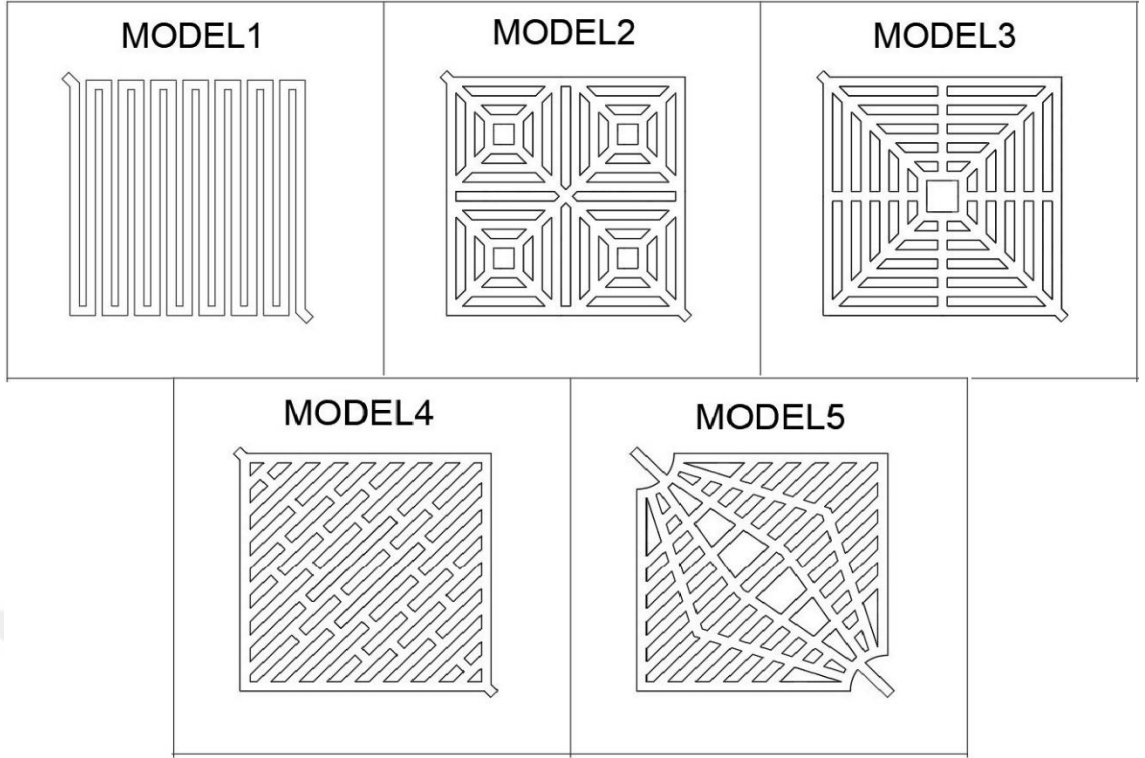
**Çizelge 3. 8.**Yakıt pili fiziksel modelini oluşturan parçalar ve özellikleri

Yakıt Pili Parçası	İsim	Özellik
Anot akım toplama plakası	anode current collector	solid
Anot gaz akış kanalı	anode gas channel	fluid
Anot gaz difüzyon tabakası	anode gas diffusion layer	fluid
Anot katalizör tabakası	anode catalyst layer	fluid
Membran	membrane	fluid
Anot katalizör tabakası	anode catalyst layer	fluid
Anot gaz difüzyon tabakası	anode gas diffusion layer	fluid
Anot gaz akış kanalı	anode gas channel	fluid
Anot akım toplama plakası	anode current collector	solid

Tasarımı yapılan geometrinin Design Modeler da açılması ve sol taraftaki unsur ağacından “form new part” işlemini yapılması ara yüzeylerin birbirini tanınması ve bir sonraki adım olan ağ yapısı oluşturma işleminde düğümlerin aynı noktalara gelmesi açısından önemli bir husustur.

İlk aşama olarak tasarlanan 5 farklı model için oluşturulan farklı akış alanı tasarımları Şekil 3.19 da verilmiştir.





**Şekil 3. 19.**Modellere ait akış alanı görüntüleri

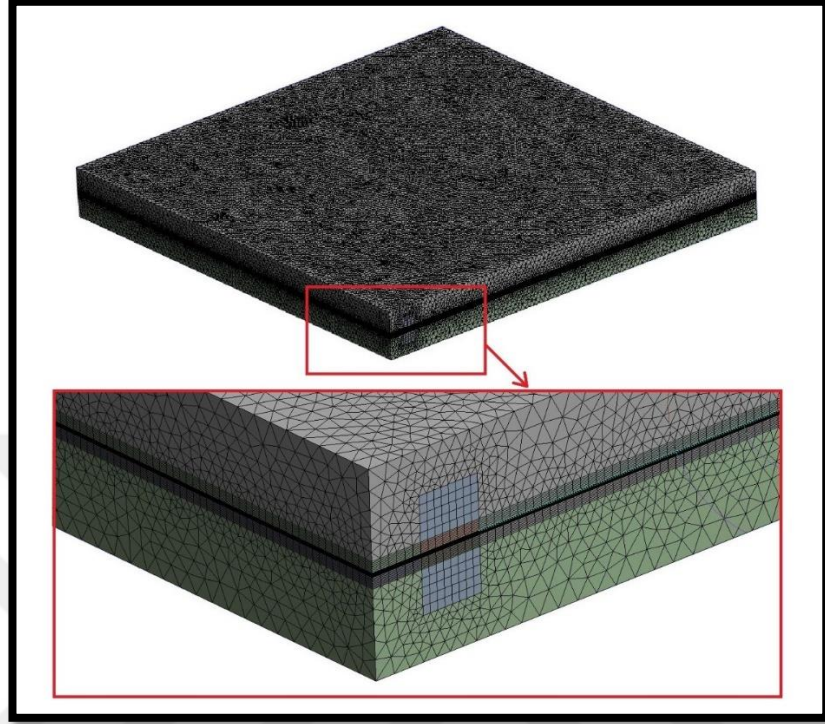
#### **Ağ Yapısı Oluşturma**

Bu bölümde, oluşturulan modeller sonlu sayıda elemana ayrılarak çözücü için anlamlı hale getirilmiş ve sınırlar tanımlanmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları; oluşturulan sonlu hacim ağlarını tanımakta ve çözümü ağlar üzerinden yapmaktadır. Oluşturulan ağın yapısı kullanılan mesh oluşturma yöntemine bağlıdır. Farklı geometriler için değişken ağ yapısı oluşturma yöntemleri uygulanabilir. Oluşturulan ağ yapısının kalitesi çözümün doğruluğu ile yakından ilgilidir. Çok fazla ağ yapısı oluşturmak çözüm süresini uzatırken, doğru uygulanmayan ağ yapısı ise yanlış sonuçlar alınmasına sebep olmaktadır. Her bir problem için farklı ağ yapısı oluşturma yöntemi uygulanabilir. Yakıt pili çözümlerinde elektrokimyasal denklemlerin gerçekleştiği ve gaz geçişinin olduğu bölgeler hassas bölgelerdir, bu açıdan ağ yapısı oluştururken bu bölgelere özel önem gösterilmelidir.

Bu çalışmada ağ yapısı oluşturma işlemi ANSYS Meshing programı ile yapılmıştır. Bu bölümde meshing programı vasıtasıyla bölgelerin fazlarının tanımlanması, yüzey tanımlamaları, mesh türü ve boyutlandırması gibi işlemler

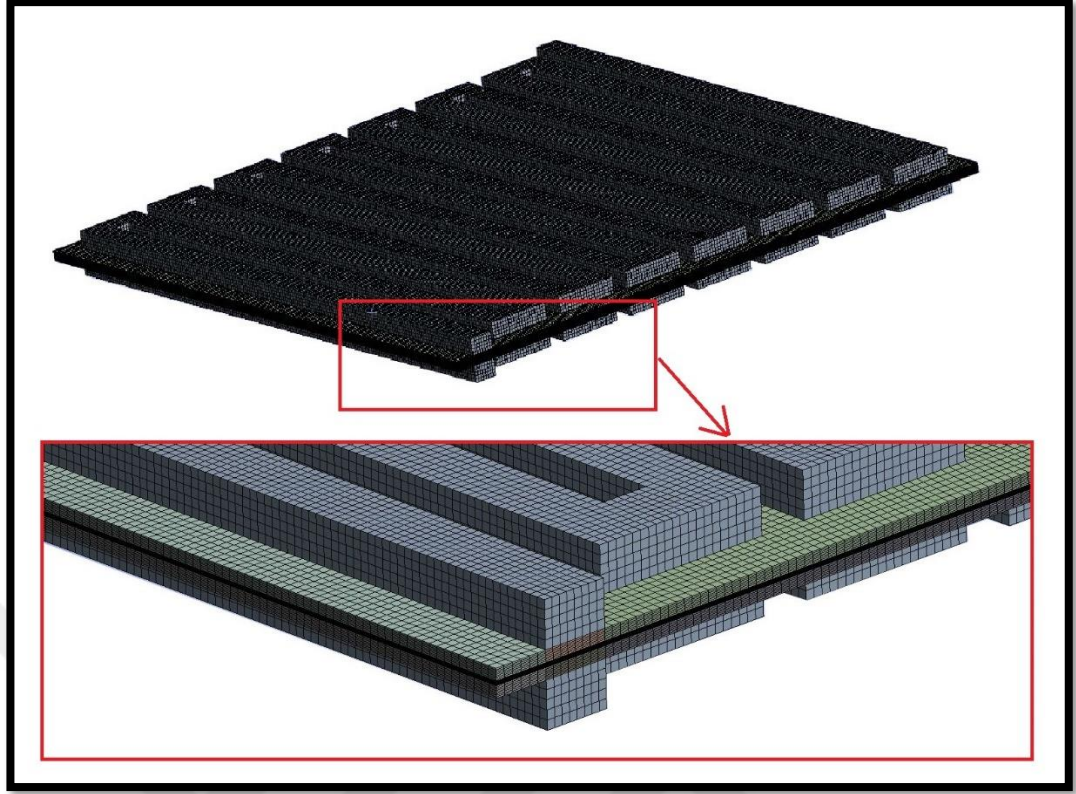
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

yapılmaktadır. Bu işlemlerin daha iyi anlaşılabilmesi için örnek bir model üzerinde ağ yapısı oluşturma işlemleri anlatılacaktır.



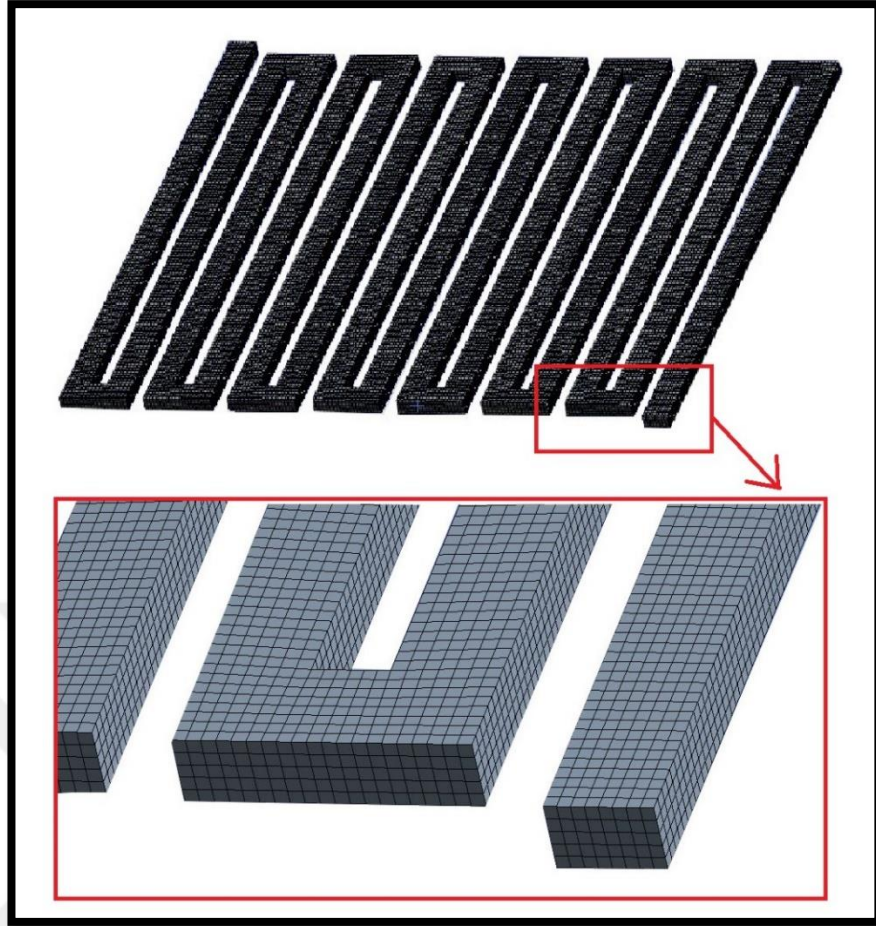
Şekil 3. 20.Model 1 için genel çözüm ağı görünümü

Şekil 3.20 de yer alan yakıt pili montajının tamamı 5425688 eleman içermektedir. Bütün tasarımlarda anot/katot akım plakaları haricindeki parçalar kübik ağ yapısında, anot/katot akım toplama plakaları ise tetragonal ağ yapısı ile oluşturulmuştur. MEA grubunu oluşturan anot/katot gaz difüzyon tabakaları, anot/katot katalizör tabakaları ve membran z ekseninde 8 eşit parçaya bölünmüştür.



**Şekil 3. 21.**Kübik mesh yapısı içeren bileşenler

MEA grubu ve anot/katot gaz akış kanalları kübik ağ yapısı seçilerek elemanlara ayrılmıştır. Çözüm ağı oluşturulurken dikkat edilmesi gereken hacimler gaz akış kanalları ve elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği MEA grubudur. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 de gaz akış kanallarının ağ yapısı görüntüleri bulunmaktadır.



**Şekil 3. 22.**Gaz akış kanalının çözüm ağı yapısı

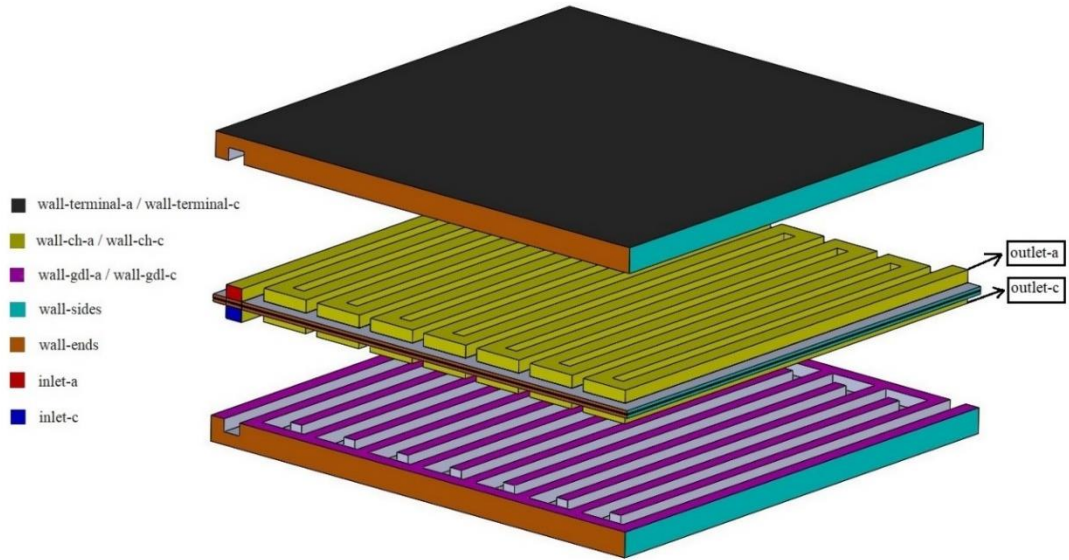
Denklemlerin sayısal olarak çözümlenebilmesi için gerekli sınır koşullarının tanımlanacağı yüzeyler meshing sayfasında tanımlanmaktadır. Model 1 için oluşturulan yüzey isimleriyle birlikte Çizelge 3.9 da, meshing sayfasında tanımlanan yüzey isimleri ise Şekil 3.23 de verilmiştir.

**Çizelge 3. 9.**Çözüm ağı(meshing) sayfasında tanımlanan yüzeyler ve yüzey isimleri

Sınır Koşulu Tanımlanan Yüzey	Yüzey Adı	Sınır Koşulu
Anot gaz kanalı girişi	inlet-a	mass flow inlet
Anot gaz kanalı çıkışı	outlet-a	pressure outlet
Katot gaz kanalı girişi	inlet-c	mass flow inlet
Katot gaz kanalı çıkışı	outlet-c	pressure outlet
Anot terminal duvarı	wall-terminal-a	wall
Katot terminal duvarı	wall-terminal-c	wall

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Anot gaz kanalı-akım toplayıcı plaka temas yüzeyi	wall-ch-a	wall
Katot gaz kanalı-akım toplayıcı plaka temas yüzeyi	wall-ch-c	wall
Anot gaz difüzyon tabakası-katalizör tabakası temas yüzeyi	wall-gdl-a	wall
Katot gaz difüzyon tabakası-katalizör tabakası temas yüzeyi	wall-gdl-c	wall
Yakıt pili kenar yüzeyleri	wall-sides	wall
Yakıt pili uç yüzeyleri	wall-ends	wall



**Şekil 3. 23.**Çözüm ağı (meshing) sayfasında tanımlanan yüzey isimleri

#### Ayarlar

FLUENT kullanıcısı tarafından oluşturulan hesaplama alanında süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemleri çözülmektedir. FLUENT PEM Yakıt pili modülünün aktif edilmesiyle (define/models/addon-module/3) birlikte yakıt pili içinde meydana gelen akış, ısı transferi, elektrokimyasal reaksiyonlar ve diğer etkileri de dikkate alarak hesaplama yapmaktadır. Ağ yapısı oluşturulup yüzey isimleri tanımlandıktan sonra çözücü açılır. Çözücü içerisinde gerekli sınır şartları, referans değerleri ve çözücü ayarları yapılır.

FLUENT programı sonlu hacimler metodu kullanarak çözüm yapmaktadır (Versteeg and Malalasekera, 2007).

Sonlu hacimler metodu çözüm algoritması ana hatlarıyla şu şekildedir;

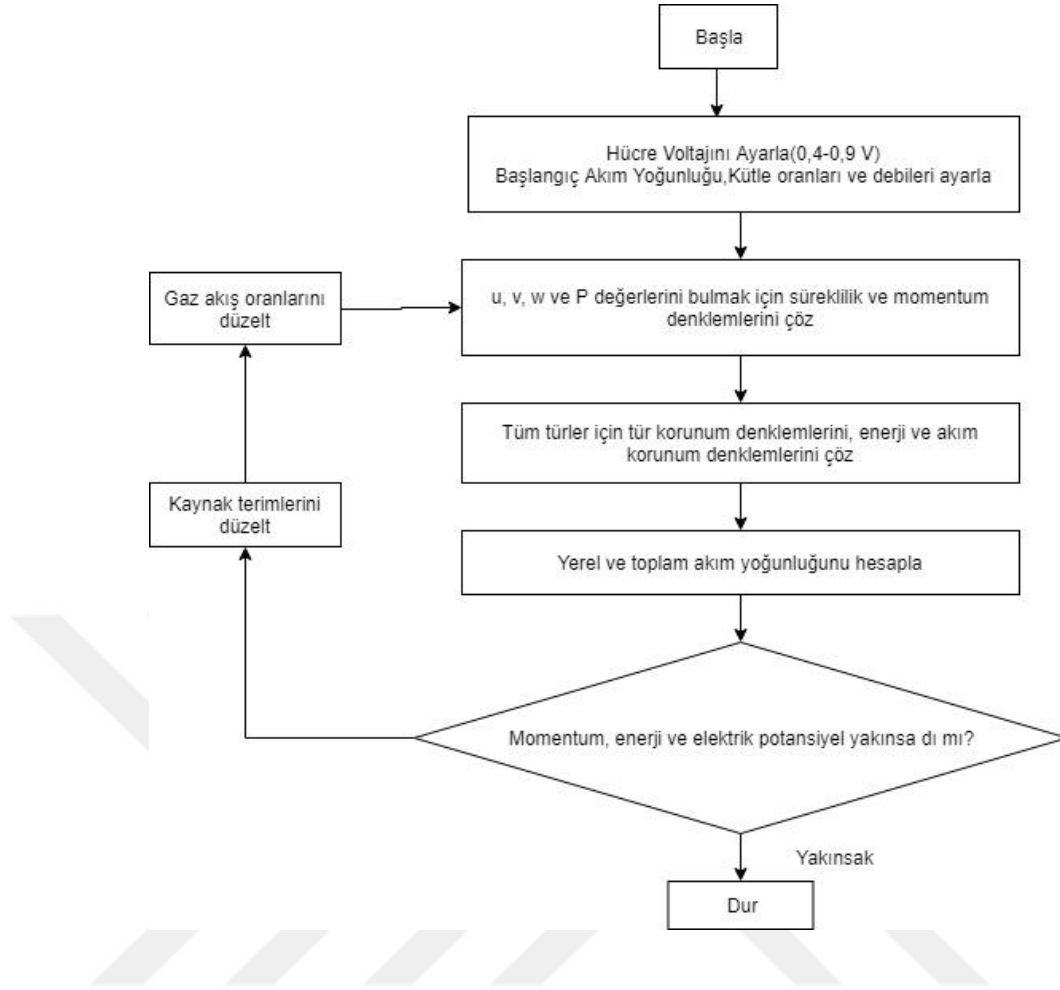
- Korunum denklemlerinin kontrol hacmi üzerinde integre edilmesi
- İntegre edilen korunum denklemlerinin cebirsel hale dönüştürülmesi
- Cebirsel denklemlerin iteratif yöntemlerle sayısal olarak çözümlenmesi

Temelde yatan fiziksel olaylar karmaşıktır ve doğrusal (non-linear) değildir, bu nedenle sayısal çözüm yaklaşımı gereklidir. Cebirsel denklemlerin en çok tercih edilen çözüm prosedürü TDMA (tri-diagonal matrix algorithm) ve basınç-hız arasındaki eşleştirmeyi sağlayan SIMPLE algoritmasıdır (Versteeg and Malalasekera, 2007).

SIMPLE algoritmasında temel işlemler;

- Basınç tahmin edilir.
- Tahmini basınç kullanılarak momentum denklemlerinden hız bileşenleri çözülür.
- Çözülen hız bileşenlerinin süreklilik denklemlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.
- Süreklilik denklemi sağlanıyorsa; elde edilen hızlar doğru kabul edilip çözüm tamamlanır. Süreklilik denklemi sağlanmazsa; basınç düzeltilir ve momentum denklemlerinden hız bileşenleri tekrar çözülür. Bu işlemler yakınsam kriterleri sağlanıncaya kadar tekrar edilerek çözüme ulaştırılır.





**Şekil 3. 24.**Çözüm algoritması akış şeması (Hashemi et al., 2012).

Çözümün doğruluğunu etkileyen en önemli iki parametre yakınsama ve ağ yapısının kalitesidir. FLUENT PEMFC Modülünde çözümün yakınsamasını sağlamak amacıyla türlerin, potansiyel ve doygunluk denklemleri için multigrid çevrim ayarlarının F-Cycle ile BCGSTAB (bi-conjugate stabilized method) olarak değiştirilmesini tavsiye etmektedir (ANSYS Inc., 2011).

Yakınsama faktör (under relaxation factor) değeri, çözümü kontrol etmek için kullanılır. Sayısal çözümler genellikle tahmin ve kontrol algoritmaları olarak düşünülebilir. Yakınsama faktörü çok düşük ayarlanmışsa bu çözüm yakınsamadan önce çözüm durabilir. Yakınsama faktörü çok yüksek ayarlanmışsa bu çözümleri belirli bir değer etrafında dalgalanmasına sebep olabilir ve çözüm yakınsamayabilir (Özdemir, 2012).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında kullanılan yakınsama faktörü değerleri Çizelge 3.10 da verilmiştir.

**Çizelge 3. 10.**Çalışmada kullanılan Yakınsama faktörü değerleri

Değer	Yakınsama faktörü
Basınç	0,45
Yoğunluk	1
Gövde Kuvvetleri	1
Momentum	0,3
H <sub>2</sub>	0,9
O <sub>2</sub>	0,9
H <sub>2</sub> O	0,9
Enerji	0,2
Elektrik Potansiyel	1
Protonik Potansiyel	0,95
Su Doygunluğu	0,5
Su içeriği	0,95

Kalıntıların kontrol edilmesi yakınsamanın belirlenmesinde önemli bir husustur. Kalıntılar istenilen değerlerden daha fazla ise mesh yapısında veya ayarlarda istenmeyen fiziksel yanlışlıklar olma olasılığı vardır. Yakınsamanın olup olmadığına karar vermek için herkesin kabul ettiği bir kural olmamakla birlikte kalıntıların seviyeleri ve istenilen değerlerin değişimini gözlemek yakınsamanın olup olmadığına karar vermekte geçerli bir yoldur.

Bu çalışma kapsamında belirlenen yakınsama kriterleri Çizelge 3.11 de verilmiştir.

**Çizelge 3. 11.**Yakınsama Kriterleri

Yakınsama Kriteri	Yakınsama Mertebesi
Süreklilik Denklemi	10 <sup>-5</sup>
Momentum Denklemi	10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> ,O <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> O konsantrasyon denklemleri	10 <sup>-5</sup>
UDS-1 (Elektrik Potansiyeli)	10 <sup>-5</sup>



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

UDS-2 (İyonik Potansiyel)	$10^{-5}$
UDS-3 (Su içeriği)	$10^{-5}$
Enerji Denklemi	$10^{-6}$

Sayısal çalışmalarda kullanılan elektrokimyasal parametreler Çizelge 3.12 de verilmiştir.

**Çizelge 3. 12.** PEM yakıt pili elektrokimyasal parametreleri

Parametre	Değer	Birim	Referans
<b>Anot</b>			
Referans Akım Yoğunluğu	2465,598	A/m <sup>2</sup>	1
Referans Mol Konsantrasyonu	0,5465	kmol/m <sup>3</sup>	2
Konsantrasyon Üssü	0,5		3
Dönüşüm Katsayısı	2		
<b>Katot</b>			
Referans Akım Yoğunluğu	$1,8081 \times 10^{-3}$	A/m <sup>2</sup>	1
Referans Mol Konsantrasyonu	0,00339	kmol/m <sup>3</sup>	2
Konsantrasyon Üssü	1		3
Dönüşüm Katsayısı	2		
<b>Diğer Parametreler</b>			
Hidrojen Referans Diffüzitesi	$11 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	4
Oksijen Referans Diffüzitesi	$3,2 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	4
Su Referans Diffüzitesi	$7,35 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	4
Diğer Türlerin Referans Diffüzitesi	$1,1 \times 10^{-5}$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	4
Açık Devre Voltajı	0,93	V	Deneysel ölçüldü
Membran Gözenekliliği	0,5		3
GDL gözenekliliği	0,5		3
Katalizör Gözenekliliği	0,5		3
GDL Geçirgenliği	$1,76 \times 10^{-11}$		3
Membran Geçirgenliği	$1,76 \times 10^{-11}$		3
Eşdeğer Membran Ağırlığı	$1,1 \times 10^3$	kg/kmol	4
Membran Protonik iletim katsayısı	1		4
Membran Protonik iletim üssü	1		4
Gaz difüzyon tabakası viskoz direnci	$1 \times 10^{12}$	m <sup>-2</sup>	4
Katalizör tabaka viskoz direnci	$1 \times 10^{12}$	m <sup>-2</sup>	4

Çizelge 3.12 de 1, 2, 3, 4 referansları sırasıyla; Al-Baghdadi and Al-Janabi (2007); Wang et al. (2003); Le and Zhou (2008); Yuan et al. (2010).



Sistem kararlı hale geldikten sonra sisteme beslenen azot gazı yazılım vasıtasıyla kesilerek reaktant gazlar gönderilmeye başlanır. Reaktant gazların sisteme beslenmeye başlamasıyla birlikte yakıt pilinde elektrik üretimi başlar. Sistem yeniden kararlı hale gelmesiyle birlikte açık devre voltajından başlanarak 0.05 V aralıklarla voltaj değeri düşürülür ve bilgisayar ekranında gözlemlenen akım yoğunluğu değeri kaydedilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus sistemin kararlı hale geldiğinden emin olmaktır. İlk ölçümün tamamlanmasıyla birlikte pil voltajı en küçük değerde iken pil en az 30 dk çalıştırılmalı, sonra açık devre voltajından 0.05 V düşürülerek değer kaydedilme işlemi yinelenmelidir. Yakıt pilleri belirli bir süre çalıştırıldıktan sonra kararlı hale geldiğinden dolayı; elde edilen akım yoğunluğu değerleri birbirine eşit olana kadar ölçüm alma işlemi tekrar edilmelidir.

#### 3.2.4. Geometrik Optimizasyon (YYY)

Yanıt yüzey yöntemi (YYY); Box ve Wilson tarafından ‘Denemelerin optimum koşullara ulaştırılması’ ismi ile geliştirilmiştir. Yanıt yüzey yöntemi çok parametrelili sistemlerin hızlı bir şekilde iyileştirilebilmesi için en küçük kareler yöntemini kullanarak yanıtın tahmin edilmesini sağlar. Yöntemin amacı az deney ile en doğru sonuca ulaşabilmektir (Elbaş, 2018).

Yanıt yüzey metodunda;

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (3.18)$$

bağıntısı kullanılır. Bu denklemde Y bağımlı değişkeni,  $X_n$  bağımsız değişkeni,  $\varepsilon$  ise hata terimi olarak adlandırılır. Yanıt yüzey yöntemi deney tasarımı, matematiksel modelleme ve model doğrulama olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır.

#### **Deney Tasarımı:**

Deney tasarımı yapmanın amacı en doğru bilgiye en az sayıda deney yaparak ulaşmaktır. Bağımlı ve bağımsız parametreler arasında bir ilişki kurabilmek, hangi parametrenin en

önemli olduğuna ulaşmak deney tasarımı ile mümkündür. Deney tasarımı yapmak aşağıda verilen avantajları sağlayabilir (Subaşı, 2010).

- Zaman ve maliyetten tasarruf
- Araştırma geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması
- Kaynakların verimli kullanılması
- Deney sayısının azaltılması
- Çok parametrenin eş zamanlı olarak değiştirilmesi
- Parametrelerin ilişkili olarak değerlendirilmesi

#### **Matematiksel Modelleme:**

Matematiksel modelleme bağımlı parametre ile bağımsız parametreler arasında ilişki kurmamızı sağlar. Hangi sonucun cevap fonksiyonu üzerinde daha etkin olduğu hakkında fikir sahibi oluruz. Bu sayede parametrelerin sayısı azaltılarak daha kısa sürede daha sağlıklı bilgilere ulaşılabilir. Yanıt yüzey yönteminde elde edilen polinomiyal modeller yanıt fonksiyonunun tahmin edilmesinde kolaylık sağladığı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Eşitlik 3.19 da ikinci dereceden polinomiyal denklem modeli verilmiştir.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i X_i + \sum_{i=1}^N b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^N b_{ij} X_i X_j \quad (3.19)$$

#### **Model Doğrulama:**

Tahmin edilen modelin ne derece hassas olduğu ve gerçek değerleri ne denli temsil ettiğini araştırmak için model doğrulama yapmak gerekir. Model doğrulamayı gerçekleştirmek için regresyon analizine hipotez testlerinin uygulanması, varyans katsayısının (C.V) hesaplanması, regresyon katsayısının ( $R^2$ ) hesaplanması, düzeltilmiş regresyon katsayısının hesaplanması ( $R_{adj}^2$ ), hipotez testlerinin regresyon katsayılarına bireysel olarak uygulanması, kalıntı analizi gibi farklı testlerin uygulanması gerekmektedir (Elbaş, 2018).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

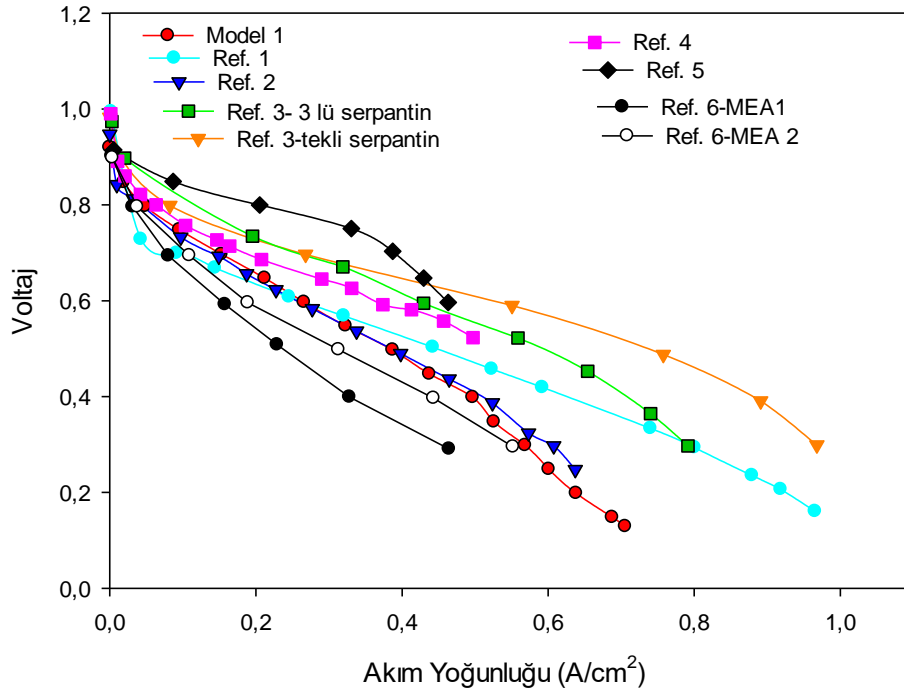
Bu çalışma içinde deneyler üzerinde etkin olan parametreler değiştirilerek matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile sayısal çözümleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan değerler birbirine ne kadar yakınsa modelin prosesi o kadar iyi temsil ettiği kabul edilir.



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez kapsamında yapılan çalışma sayısal ve deneysel olarak ikiye ayrılabilir. Deneysel doğrulama başlığı altında literatürde sıkça karşımıza çıkan tekli serpantin tipi kanal tasarımının deneysel sonuçları benzer işletme koşulları ve geometrik yapıya sahip diğer deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Sayısal doğrulama başlığı altında bu çalışmanın işletme koşulları ve geometrik yapısına benzer bir çalışmaya ait geometri modellenmiş ve ilgili çalışma koşulları kullanılarak sayısal çözümleme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sayısal çözümleme doğrulanmıştır.

## Deneysel Doğrulama



Şekil 4. 1. Deneysel Sonuçların literatürdeki benzer deneyler ile kıyaslanması

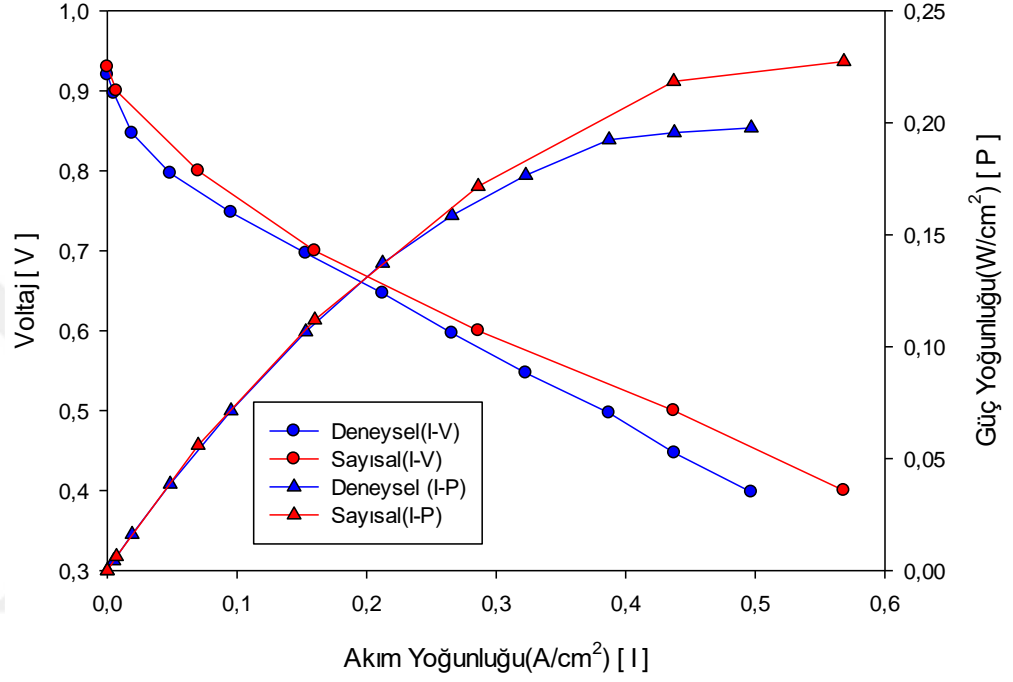
**Çizelge 4. 1.**Deneyssel olarak kıyaslama yapılan referanslar

No	Referans	Platin Yüklemesi	Kanal Genişliği	Kanal Derinliği	Pil Sıcaklığı	Basınç	Akış Alanı tasarımı
Ref.1	(Chowdhury, 2017)	Anot 0.5 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.5 mg/cm <sup>2</sup>	1.5 mm	1mm	45°C	1 bar	Tekli serpantin
Ref.2	(H. Kahraman et al., 2017)	Anot 0.4 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.2 mg/cm <sup>2</sup>	1mm	1mm	60°C	1.5 bar	yaprak deseni
Ref.3	(Velisala & Srinivasulu, 2018)	Anot 0.4 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.6 mg/cm <sup>2</sup>	-	-	50°C	1 bar	Tekli serpantin
Ref.3	(Velisala & Srinivasulu, 2018)	Anot 0.4 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.6 mg/cm <sup>2</sup>	-	-	50°C	1 bar	Üçlü serpantin
Ref.4	(Falcão et al., 2011)	Anot 0.5 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.5 mg/cm <sup>2</sup>	-	-	60°C	1 bar	Tekli serpantin
Ref.5	(Shimpalee et al., 2016)	Anot 0.1 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.4 mg/cm <sup>2</sup>	0.8 mm	0.4 mm	70°C	1 bar	Üçlü serpantin
Ref.6	(Haghyayegh et al., 2017)	Anot 0.4 mg/cm <sup>2</sup> Katot 0.4 mg/cm <sup>2</sup>	1.8mm	1.8mm	70°C	3 bar	Tekli serpantin

Deneyssel olarak elde edilen I-V polarizasyon eğrisi literatürdeki benzer parametreleri taşıyan farklı çalışmalar ile mukayese edilmiştir. Elde edilen mukayese sonucu Şekil 4.1 de sunulmuştur. Deneyssel sonuç çıktıları; Çizelge 4.1 de bazı parametreleri sunulan deneyssel literatür verileri ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde hem işletme parametreleri hem de geometrik özellikleri bu çalışma ile birebir uyumlu sonuçlar bulmak zordur. Deneyssel sonuçlara etki eden birçok parametre mevcut olmakla birlikte burada vurgulanmak istenen sonucun benzer çalışmalar ile uyum içerisinde olduğunu gözlemlemektir. Bu çalışmanın amacı elde edilebilecek maksimum akım ve güç çıktısını elde edebilmekten ziyade; referans olarak alınan bir modele göre daha iyi elektriksel performans ve daha düşük basınç düşümü elde edilebilecek kanal tasarımları gerçekleştirebilmektir.

### Sayısal Doğrulama

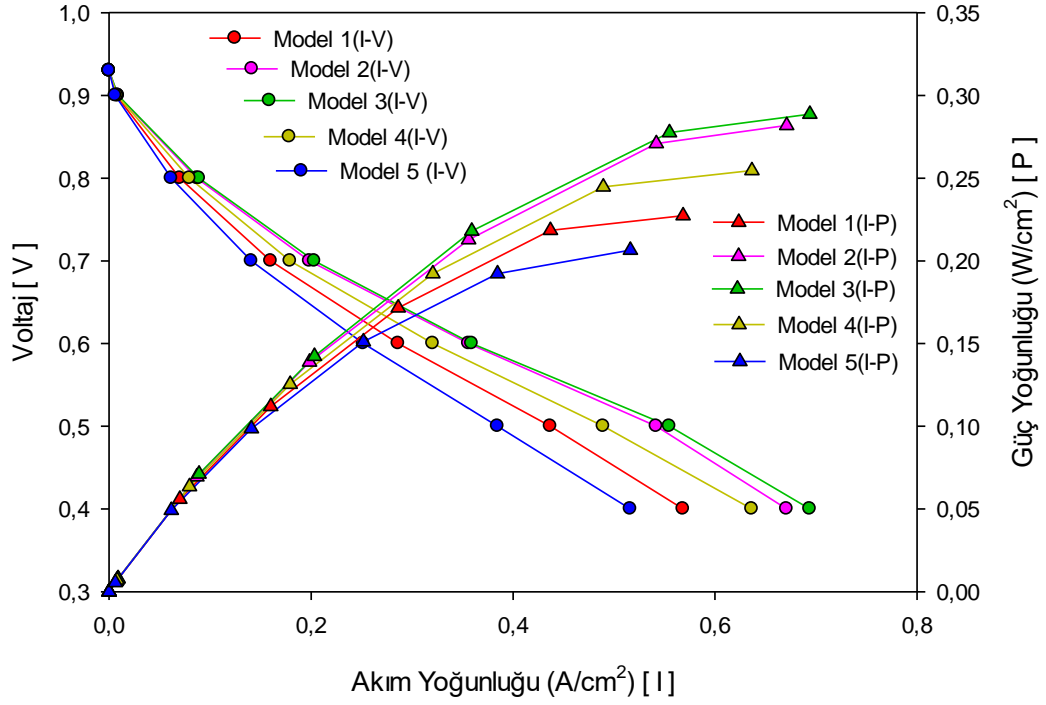
Sayısal çözümlere başlamadan önce sayısal çözüm prosedürünün ve sonuçların doğruluğunun kabul edilebilir olduğunu tespit etmek amacıyla deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar kıyaslanmış ve Model 1 tasarımı için; sayısal model %5.3 hata payı ile deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.



Şekil 4. 2.Sayısal sonucun doğrulanması



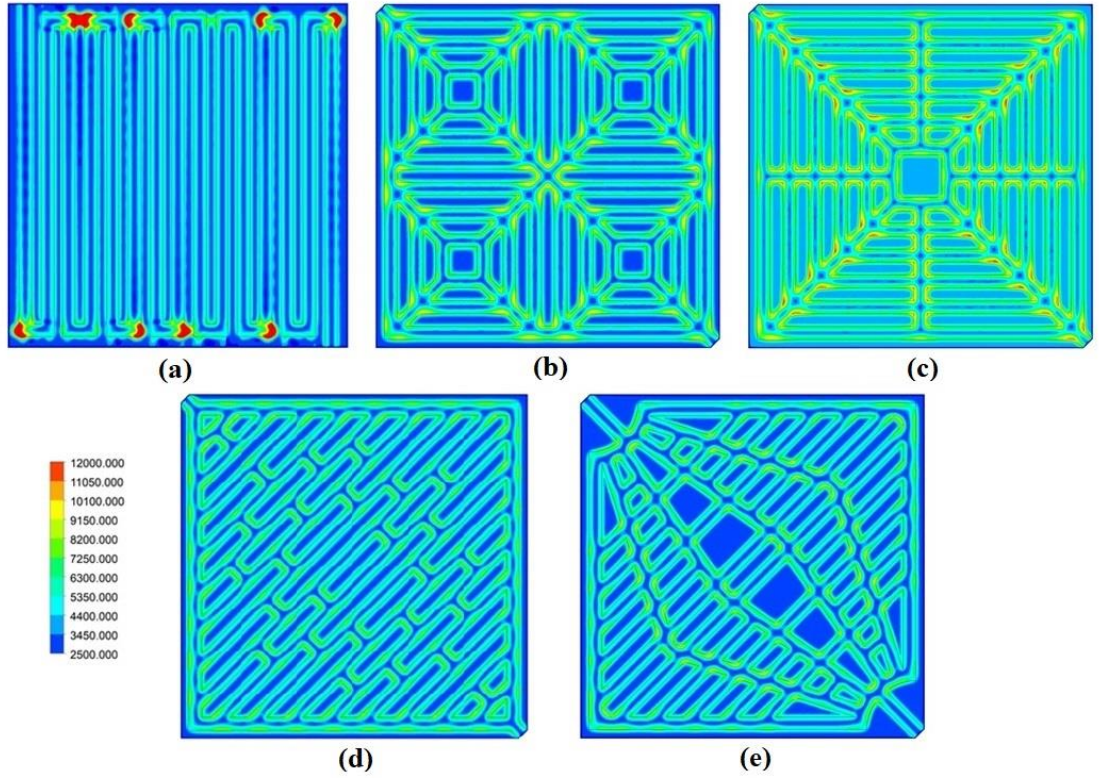
## 4.1.Sayısal Çözümleme Sonuçları



Şekil 4. 3.Sayısal çözümleme sonuçlarının kıyaslamalı polarizasyon eğrisi

Şekil 4.3 te verilen sayısal çözümleme sonuçlarına göre akım yoğunluğu iyi olandan kötü olana doğru sırasıyla Model 3, Model 2, Model 4, Model 1 ve Model 5 tir. 0.6 V değerindeki akım yoğunlukları değerine göre referans modele kıyasla Model 2 %22, Model 3 %27.4, Model 4 %13.8 artış sağlarken, Model 5 te %7.7 azalma gözlemlenmiştir. Voltajın Akım yoğunluğu-Voltaj ve Akım yoğunluğu- Güç yoğunluğu polarizasyon eğrisi incelendiğinde voltaj değeri düştükçe modeller arasındaki akım yoğunluğu farkı değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

## 4.1.1. Akım Yoğunluğu Dağılımı

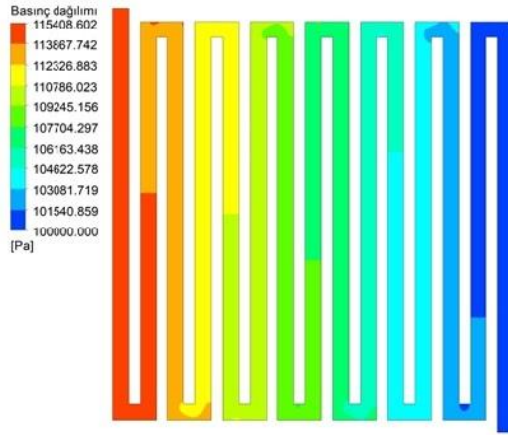


Şekil 4. 4.Modeller için Akım Yoğunluğu Dağılımı (0.6 V)

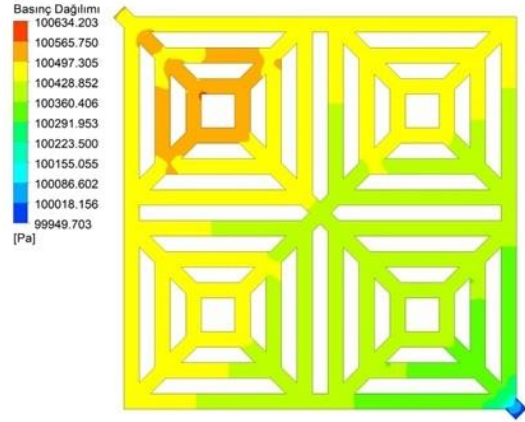
Şekil 4.4 Model 1 için akım yoğunluğu dağılımı incelendiğinde 0.6 V değeri için ortalama akım yoğunluğu değeri  $0.2861 \text{ A/cm}^2$  iken katalizör tabakası üzerinde oluşan maksimum akımın 1.2 A, minimum akımın ise 0.25 A olduğu görülmüştür. Model 2 için akım yoğunluğu dağılımı incelendiğinde 0.6 V değeri için ortalama akım yoğunluğu değeri  $0.3547 \text{ A/cm}^2$  iken katalizör tabakası üzerinde oluşan maksimum akımın 0.63 A, minimum akımın ise 0.25 A olduğu görülmüştür. Bu modelde referans modele göre %22 daha yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Model 3 için akım yoğunluğu dağılımı incelendiğinde 0.6 V değeri için ortalama akım yoğunluğu değeri  $0.3633 \text{ A/cm}^2$  iken katalizör tabakası üzerinde oluşan maksimum akımın 0.725 A, minimum akımın ise 0.345 A olduğu görülmüştür. Bu modelde referans model olan model 1 e oranla %27.4 daha yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Model 4 için akım yoğunluğu dağılımı incelendiğinde 0.6 V değeri için ortalama akım yoğunluğu değeri  $0.3204 \text{ A/cm}^2$  iken katalizör tabakası üzerinde oluşan maksimum akımın 0.535 A, minimum akımın ise 0.25 A olduğu görülmüştür. Bu modelde referans model olan model 1 e oranla %13.8 daha

yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Model 5 için akım yoğunluğu dağılımlı incelendiğinde 0.6 V değeri için ortalama akım yoğunluğu değeri 0.2517 A/cm<sup>2</sup> iken katalizör tabakası üzerinde oluşan maksimum akımın 0.535 A, minimum akımın ise 0.25 A olduğu görülmüştür. Bu modelde referans model olan model 1 e oranla % 7.7 kadar düşük akım yoğunluğu elde edilmiştir. Katalizör tabakası üzerinde oluşan yerel akım yoğunluğunun olabildiğince homojen olması beklenmektedir. Katalizör tabakası üzerinde oluşan yerel akım yoğunlukları değerlerinin birbirinden uzak olması katalizör tabakasını strese sokmakta ve ömrünü kısaltmaktadır. Akım yoğunluğu dağılımındaki renk skalasının birbirine yakınlığı homojenliğin ölçüsü gibi düşünülebilir. Model 3 için akım yoğunluğu renk skalası irdelendiğinde katalizör yüzeyi üzerinde maksimum ve minimum akımlar arasındaki farkın en az olduğu ve renk skalasının en homojen dağıldığı tasarım Model 3 tür. Model 5 tasarımı en fazla mavi renk skalasına sahip modeldir. Kesintisiz temas alanı en fazla olan bu modelde katalizör tabakası üzerinde diğer modellere oranla düşük akım yoğunluğu elde edilen bölgeler daha fazladır. Bu sonuç akış alanı tasarlarken büyük temas yüzeylerinden kaçınmamız gerektiği sonucunu çıkarılmıŐtır.

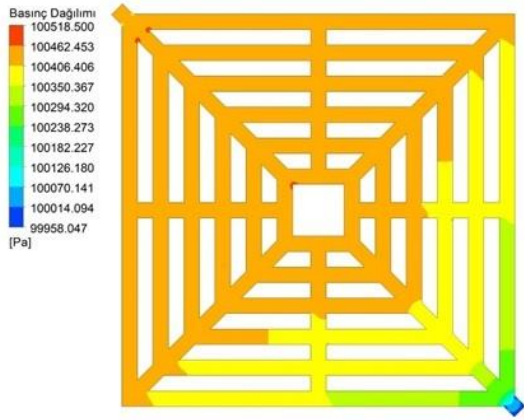
4.1.2. Basınç Dağılımı



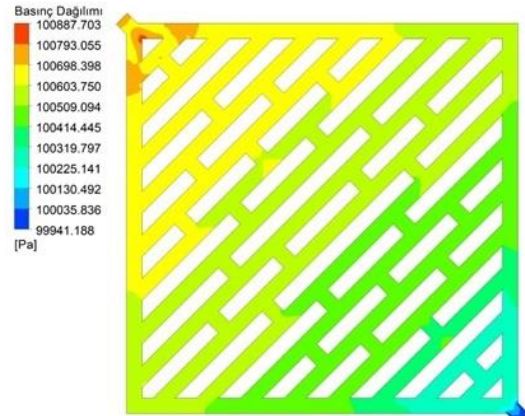
( Model 1 )



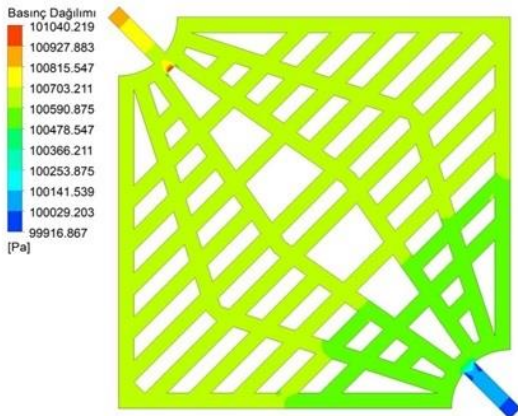
( Model 2 )



( Model 3 )



( Model 4 )

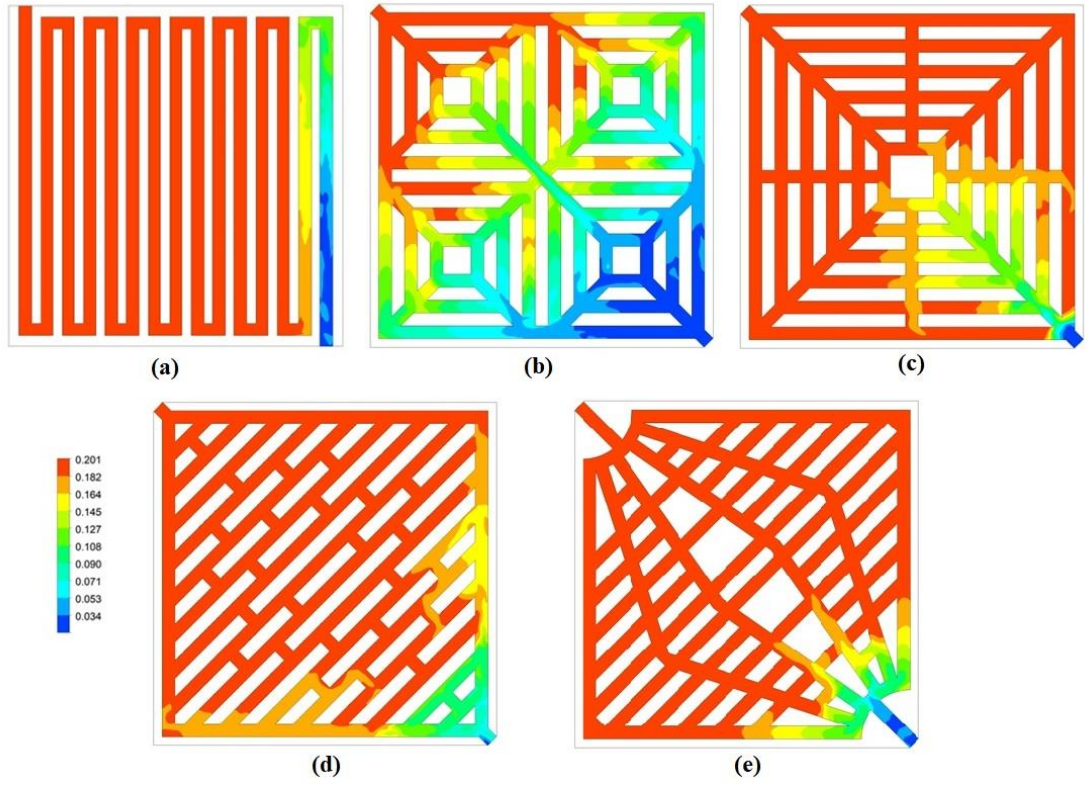


( Model 5 )

Şekil 4. 5. Modeller için basınç dağılımı (0.6 V)

Şekil 4.5 incelendiğinde; Model 1 için kanal çıkışındaki 100 kPa basıncı elde etmek için giriş basıncının 115.4 kPa olması gerektiği ve kanal giriş çıkışı arasındaki fark basıncının 15.409 kPa olduğu sonucuna varılmıştır. Model 2 için basınç dağılımı incelendiğinde kanal çıkışındaki 100 kPa basıncı elde etmek için giriş basıncının 100.634 kPa olması gerektiği ve kanal giriş çıkışı arasındaki fark basıncının 0.6843 kPa olduğu sonucuna varılmıştır. Model 3 için basınç dağılımı incelendiğinde kanal çıkışındaki 100 kPa basıncı elde etmek için giriş basıncının 100.518 kPa olması gerektiği ve kanal giriş çıkışı arasındaki fark basıncının 0.56 kPa olduğu sonucuna varılmıştır. Model 4 için basınç dağılımı incelendiğinde kanal çıkışındaki 100 kPa basıncı elde etmek için giriş basıncının 100.888 kPa olması gerektiği ve kanal giriş çıkışı arasındaki fark basıncının 0.9468 kPa olduğu sonucuna varılmıştır. Model 5 için basınç dağılımı incelendiğinde kanal çıkışındaki 100 kPa basıncı elde etmek için giriş basıncının 101.040 kPa olması gerektiği ve kanal giriş çıkışı arasındaki fark basıncının 1.1231 kPa olduğu sonucuna varılmıştır. Yığın yakıt pili tasarımları dıŐünüldüĐünde; akım yoğunluğu değerleri yüksek, pompalama gücü düşük yakıt pillerinin dizayn edilmesi çok önemli bir husustur. Bu açıdan basınç dıŐümü az olan akış alanı tasarımları çok önemli bir konudur.

## 4.1.3. Hidrojen Kütle Kesri Dağılımı

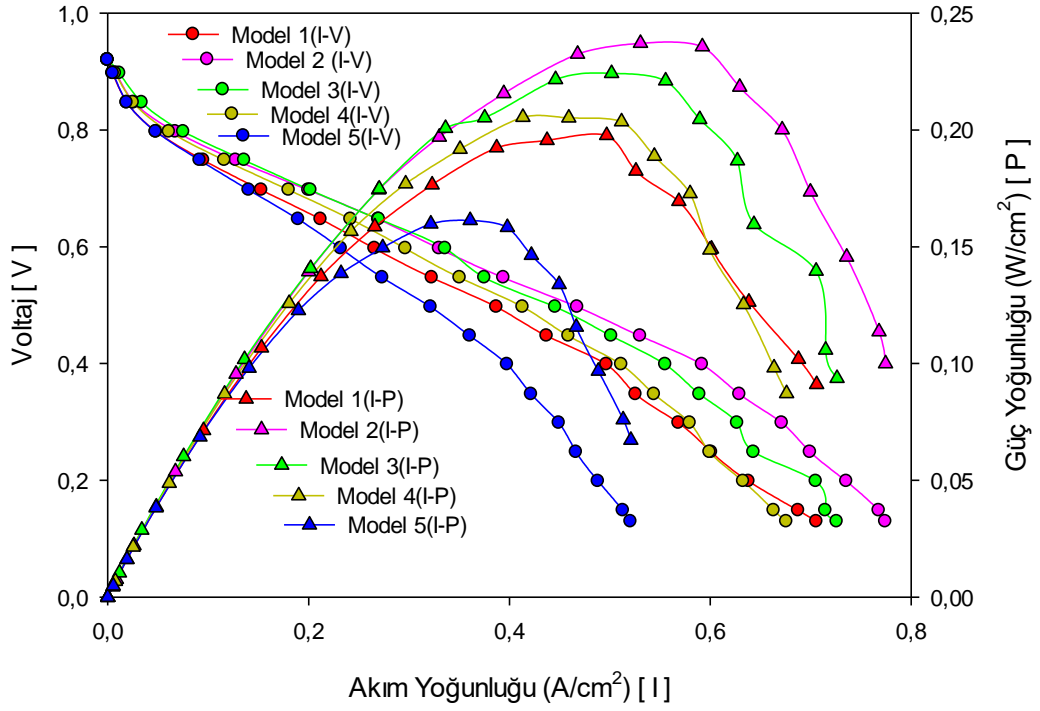


Şekil 4. 6. Modeller için Hidrojen Kütle Kesri dağılımları (0.6 V)

Şekil 4.6 Modeller için hidrojen kütle kesri dağılımı incelendiğinde Model 1(a), Model 2(b), Model 3(c), Model 4(d) ve Model 5(e) için girişteki hidrojen kütle kesrinin 0.201, çıkıştaki hidrojen kütle kesrinin ise sıfıra yaklaştığı gözlemlenmiştir. Çıkıştaki hidrojen kütle kesrinin sıfıra yakın olması giriş kanalından beslenen hidrojenin kanal içerisinde tükenmeden ve yeteri miktarda beslendiğini ifade etmektedir.



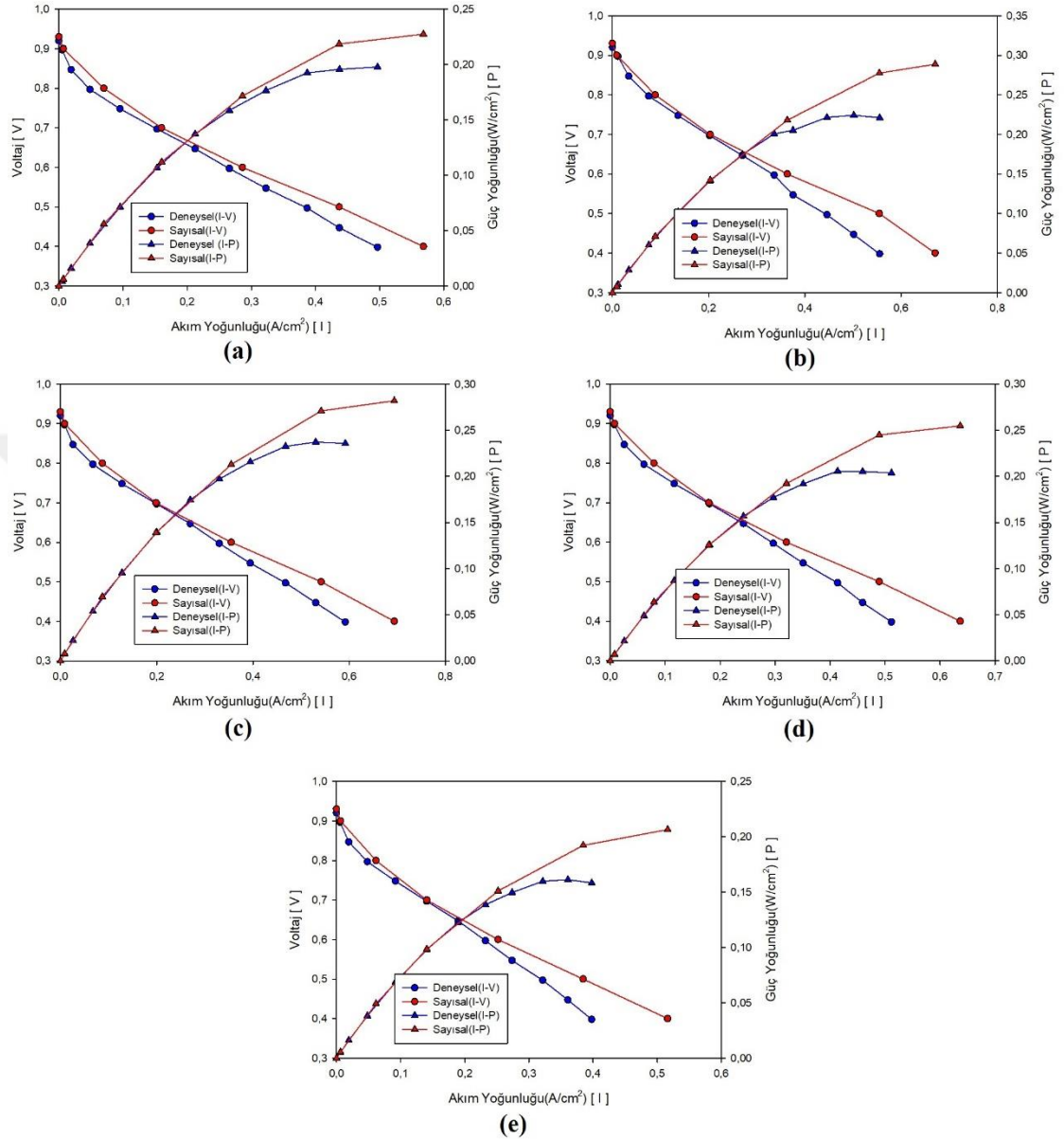
## 4.2.Yakıt Pili Deneysel Performans Sonuçları



Şekil 4. 7.Modellerin deneysel performans sonuçları

Şekil 4.7 de verilen deneysel sonuçlara göre akım yoğunluğu iyi olandan kötü olana doğru sırasıyla Model 3, Model 2, Model 4, Model 1 ve Model 5 tir. 0.6 V değerindeki akım yoğunlukları değerine göre referans modele kıyasla Model 2 %19.4, Model 3 %20.9, Model 4 %10.3 artış sağlarken, Model 5 te %14.4 azalma gözlemlenmiştir. Şekil 4.7 deki polarizasyon eğrisi incelendiğinde voltaj değeri düşükçe modeller arasındaki akım yoğunluğu farkı değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

## 4.3.Sayısal ve Deneysel Sonuçların Kıyaslanması



**Şekil 4. 8.**Model 1(a),Model 2(b), Model 3(c), Model 4(d) ve Model 5 (e) için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.8 den de anlaşılacağı üzere voltaj değeri düştükçe sayısal ve deneysel veriler arasındaki fark açılmıştır. Literatürde tek fazlı çözümlenelerde 0.4 V a kadar yapılan sayısal çözümlenelerin kullanılabileceği belirtilmiştir. Model 1 için 0.6 V değerinde sayısal akım yoğunluğu değeri %5.3, Model 2 için 0.6 V değerinde sayısal akım yoğunluğu değeri %6.8, Model 3 için 0.6 V değerinde sayısal akım yoğunluğu değeri %8, Model 4 için 0.6 V değerinde sayısal akım yoğunluğu değeri %9.6 ve Model

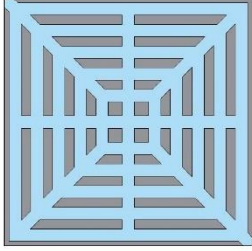
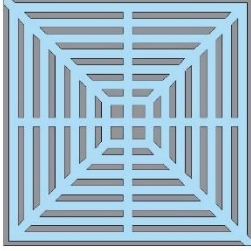
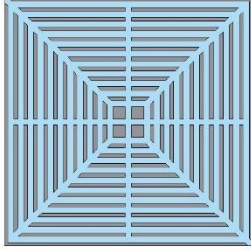
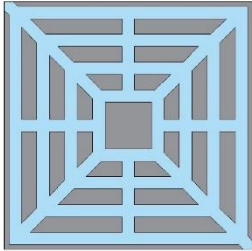
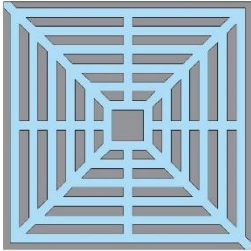
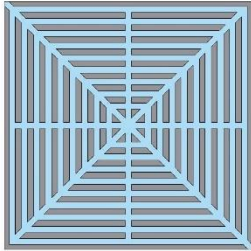
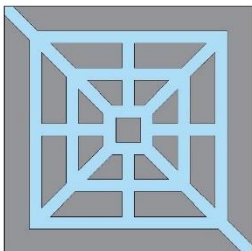
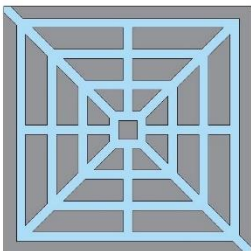
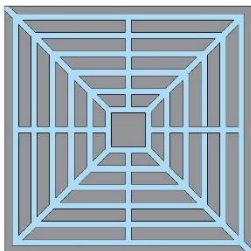


5 için 0.6 V değerinde sayısal akım yoğunluğu değeri %11.9 yüksektir. Voltaj değeri düştükçe sayısal ve deneysel veriler arasındaki farkın açılması sayısal hesaplamaların tek fazlı çözümlenmesine bağlıdır. Tek fazlı çözümlemede kanal içerisinde oluşan sıvı su buharı olarak kabul edilirken, deneysel süreçte kanal içerisinde sıvı su oluşmakta ve kısmen de olsa kanaldaki gaz akışı bu durumdan etkilenmektedir.

#### **4.4.Geometrik Parametrelerin Optimizasyonu (YYY)**

Bu başlık altında elde edilen en iyi performansı sergileyen Model 3 tasarımı için geometrik parametreler değiştirilmiş ve bu parametrelerin performansı nasıl değiştirdiği ile ilgili bulgular verilmiştir. Elektriksel performansı ve basınç düşümünü etkilediği düşünülen kanal derinliği, kanal genişliği ve akış alanı/temas yüzeyi oranının tasarımlar üzerine olan etkileri detaylandırılmış olup, bu parametrelerin çıktı fonksiyonunu nasıl etkilediği üzerine polinomial bir model oluşturulmuştur. Bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenler arasında ilişki kurmak için yanıt yüzey yöntemi(YYY) kullanılmıştır. Yanıt yüzey yöntemi değişkenler arasındaki ilişkiyi gösteren istatistiksel bir metottür. Yanıt yüzey yöntemi mühendislik alanında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Amdoun et al., 2019). Tasarım parametrelerinin performansa olan etkisini araştırmak üzere tasarlanan geometriler Şekil 4.9 da verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Akış Alanı Yüzdesi =65,1 Akış Alanı/Temas Yüzeyi =1,86 Kanal Genişliği = 2 mm	Akış Alanı Yüzdesi =64,4 Akış Alanı / Temas Yüzeyi=1,81 Kanal Genişliği = 1,5 mm	Akış Alanı Yüzdesi =64,8 Akış Alanı/Temas Yüzeyi=1,84 Kanal Genişliği = 1 mm
		
Akış Alanı Yüzdesi =55,4 Akış Alanı/Temas Yüzeyi =1,24 Kanal Genişliği = 2 mm	Akış Alanı Yüzdesi =55,4 Akış Alanı / Temas Yüzeyi=1,24 Kanal Genişliği = 1,5 mm	Akış Alanı Yüzdesi =55,3 Akış Alanı/Temas Yüzeyi=1,24 Kanal Genişliği = 1 mm
		
Akış Alanı Yüzdesi =38,2 Akış Alanı/Temas Yüzeyi=0,62 Kanal Genişliği = 2 mm	Akış Alanı Yüzdesi =39,2 Akış Alanı/Temas Yüzeyi=0,64 Kanal Genişliği = 1,5 mm	Akış Alanı Yüzdesi =38,5 Akış Alanı/Temas Yüzeyi=0,62 Kanal Genişliği = 1 mm
		

**Şekil 4. 9.** Optimum dizaynı elde etmek için tasarlanan geometriler

Tasarım parametresi olarak 3 değişken, 3 seviye tanımlanmıştır. Yani  $3^3=27$  adet tasarım mevcuttur. Şekil 4.9 da yer alan 9 adet görselin 0.5-1-1.5 mm derinliğinde olmak üzere 3 er adet farklı kanal derinlikleri mevcuttur.

Bu çalışmada akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ ) ve basınç düşümü karakteristikleri üzerinde etkili olan geometrik parametreler Kanal derinliği ( $x_1$ ), Kanal Genişliği ( $x_2$ ) ve

akış alanı/temas yüzeyi oranı ( $x_3$ ) olarak belirlenmiştir, bu parametrelerin seviye değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4. 2.** Çalışmada incelenen geometrik parametreler ve değerleri

Tasarım Değişkenleri	Seviyeler		
	-1	0	1
$x_1$ , Kanal Derinliği [mm]	0,5	1	1,5
$x_2$ , Kanal Genişliği [mm]	1	1,5	2
$x_3$ , Akış Alanı/Temas Yüzeyi Oranı [birimsiz]	0,62	1,24	1,86

Bu tez çalışması kapsamında tasarlanan özgün akış alanı tasarımları aynı işletme koşulları altında performans testlerine tabi tutulmuş, bu sonuca göre en iyi performans gösteren kanal geometrisi üzerine etkili olan 3 geometrik parametre belirlenerek, bu parametreler 3 seviyede sayısal olarak incelenmiştir. Bu parametrelerin performansa olan etkisini araştırmak üzere merkezi kompozit tasarım (MKT) kullanılarak 20 adet sayısal çözümleme yapılmıştır. Çizelge 4.2’de parametrelerin en düşük seviyesi -1, orta dereceli seviye 0, en yüksek değerli seviye ise 1 ile gösterilmiştir. Tasarım değişkenleri ve seviyelerini içeren deney planı Çizelge 4.3’te sunulmuştur. Çözümlemeler sonucunda elde edilen akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ ) ve basınç düşümü değerleri seviye değerleri de belirtilerek Çizelge 4.4’te verilmiştir. Çizelge 4.4’teki değerler kullanılarak 20 adet deney Minitab 18 paket programının deneme sürümü yardımıyla analiz edilmiştir. Çözümlemeler sonucunda elde edilen Akım yoğunluğu ve basınç düşümü değerleri tasarım değişkenlerine bağlı olarak kapalı bir fonksiyon şeklinde aşağıda verilmiştir.

$$Y = f(x_1, x_2, x_3) \quad (4.1)$$

Yukarıda bulunan kapalı fonksiyon ve yanıt yüzey yöntemi (YYY) kullanılarak sayısal çözümleme sonuçları ile tasarım değişkenleri arasında model elde edilebilir (Subaşı, 2010).

Verilerin analizinde matematiksel model üretmek için ikinci dereceden polinomiyal model seçilmiştir. Modelin doğrulaması; deney planında olmayan

parametrelerin sayısal çözümlemesi ve ilgili değerlerin elde edilen matematiksel modele konulması ile yapılmıştır. Akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ ) ve basınç düşümü için oluşturulan polinomial modeller Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Varyans analizi sonuçları (ANOVA Tablosu) Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  için elde edilen denklemler deney planında verilen minimum ve maksimum seviye aralıklarında kullanılabilir olduğu doğrulanmıştır. Bu denklemler yakıt pilinin 0.6 V değeri için elde edilmiş ve elde edilen değerler 0.6 V değerindeki  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  değerlerini vermektedir.

**Çizelge 4. 3.Deney Planı**

Deney No	Tasarım Değişkenleri		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	1	-1	1
2	-1	1	-1
3	0	0	1
4	1	-1	-1
5	0	0	0
6	1	1	1
7	0	0	-1
8	-1	-1	-1
9	1	1	-1
10	0	0	0
11	0	0	0
12	1	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	1	-1	1
16	0	-1	0
17	-1	0	0
18	-1	1	1
19	0	0	0
20	0	1	0

Çizelge 4. 4. Hesaplanan karakteristik büyüklükler (0.6 V için)

Deney No	Tasarım Parametreleri			Sayısal Çözümleme Sonuçları	
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	I <sub>ort</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	ΔP(Pa)
1	1,5	1	1,86	0,30207	420
2	0,5	2	0,62	0,27964	930
3	1	1,5	1,86	0,3057	528
4	1,5	1	0,62	0,29353	470
5	1	1,5	1,24	0,3590	560
6	1,5	2	1,86	0,27807	230
7	1	1,5	0,62	0,29604	590,8
8	0,5	1	0,62	0,29658	2440
9	1,5	2	0,62	0,27127	180
10	1	1,5	1,24	0,3590	560
11	1	1,5	1,24	0,3590	560
12	1,5	1,5	1,24	0,35185	170
13	1	1,5	1,24	0,3590	560
14	1	1,5	1,24	0,3590	560
15	1,5	1	1,86	0,30207	420
16	1	1	1,24	0,36221	1015
17	0,5	1,5	1,24	0,36416	1280
18	0,5	2	1,86	0,28956	805
19	1	1,5	1,24	0,3590	560
20	1	2	1,24	0,33697	310

Çizelge 4. 5. Regresyon Analizi sonucunda elde edilen I<sub>ort</sub> ve ΔP denklemleri

$$I_{ort}(A/cm^2) = 0,0579 + 0,0068x_1 + 0,0947x_2 + 0,39113x_3 - 0,00349x_1 \cdot x_1 - 0,03716x_2 \cdot x_2 - 0,15090x_3 \cdot x_3 - 0,00203x_1 \cdot x_2 - 0,00517x_1 \cdot x_3 - 0,00251x_2 \cdot x_3$$

$$\Delta P(Pa) = 7563 - 4818x_1 - 3829x_2 - 786x_3 + 827x_1 \cdot x_1 + 577x_2 \cdot x_2 + 106,9x_3 \cdot x_3 + 1131x_1 \cdot x_2 + 212,9x_1 \cdot x_3 + 143,9x_2 \cdot x_3$$

#### 4.4.1. $I_{ort}$ için Yanıt Yüzey Regresyonu

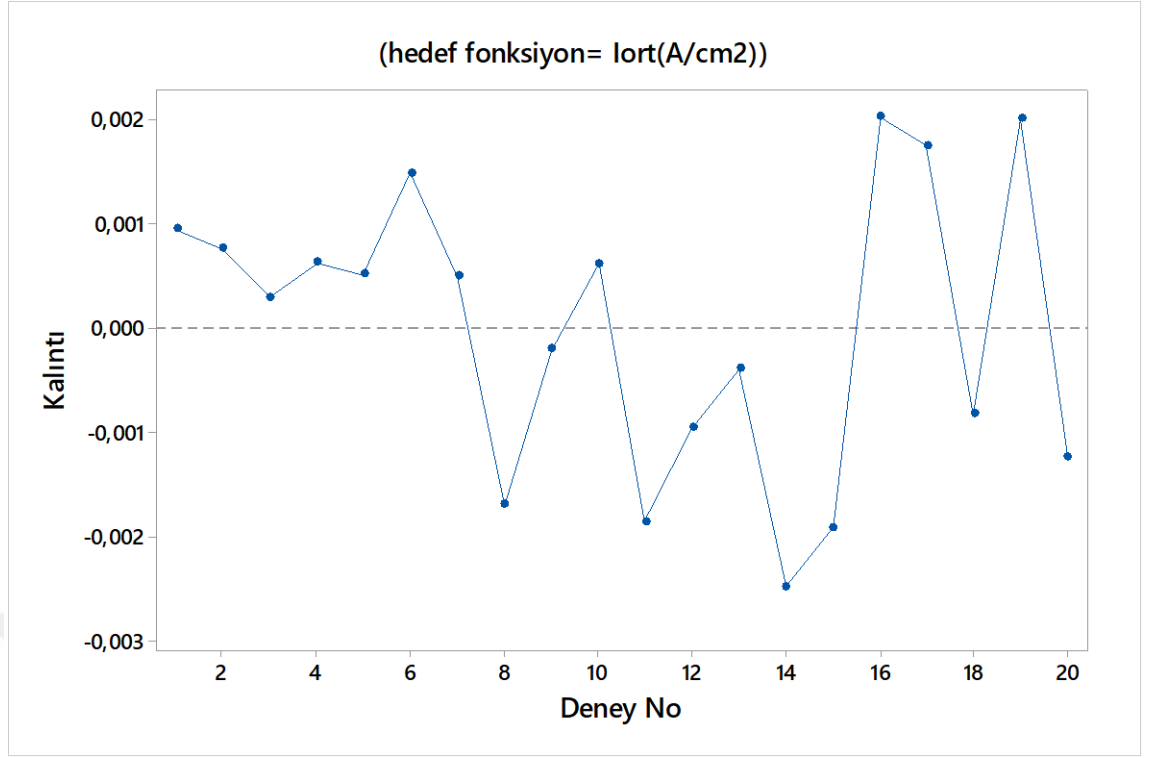
Bu başlık altında tasarım parametrelerinin  $I_{ort}$  üzerine olan etkileri analiz edilmiş ve parametreler arasında kurulan model ilişkisinin kullanılabilir olup olmadığına dair istatistiki bilgilere yer verilmiştir. Regresyon %95 güven aralığında yapılmıştır. Anova tablosunda son sütunda yer alan p-değerleri null hipotezine göre 0.05 den küçük olan değerler model üzerinde etkili ve kabul edilebilirdir. Çizelge 4.6 da  $I_{ort}$  için ANOVA tablosu verilmiştir.

**Çizelge 4. 6.**  $I_{ort}$  için ANOVA Tablosu

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	9	0,022956	0,002551	712,43	0,000
Lineer	3	0,000912	0,000304	84,95	0,000
X1	1	0,000157	0,000157	43,79	0,000
X2	1	0,000882	0,000882	246,29	0,000
X3	1	0,000178	0,000178	49,67	0,000
Kare	3	0,017421	0,005807	1621,96	0,000
X1*X1	1	0,000002	0,000002	0,57	0,467
X2*X2	1	0,000232	0,000232	64,93	0,000
X3*X3	1	0,009064	0,009064	2531,48	0,000
Etkileşim	3	0,000022	0,000007	2,00	0,178
X1*X2	1	0,000001	0,000001	0,37	0,559
X1*X3	1	0,000013	0,000013	3,62	0,086
X2*X3	1	0,000003	0,000003	0,92	0,359
Hata	10	0,000036	0,000004		
Uyumsuzluk	4	0,000018	0,000004	1,46	0,324
Toplam	19	0,022992			

**Çizelge 4. 7.**  $I_{ort}$  için Model Özeti

Hassasiyet	$R^2$	Düzeltilmiş $R^2$	Tahmin Edilen $R^2$
0,0018922	99,84%	99,70%	98,26%



**Şekil 4. 10.**  $I_{ort}$  için deney numaralarına göre kalıntı değerleri (0.6 V için)

Şekil 4.10'da deney planı kapsamında oluşturulan 20 adet deneyin kalıntı değerleri verilmiştir. Kalıntı; oluşturulan model ile sayısal çözümlene arasında oluşan farkı temsil etmektedir. Kalıntının pozitif olması modelin sayısal çözümlene değerinden küçük olduğu anlamına gelmektedir. Kalıntı değerinin düşük olması ise model ile sayısal çözümlene değerlerinin birbirine yakın olduğu anlamını taşımaktadır. Kurduğumuz modelin en iyi sonuca yaklaşması için deney planı kapsamında kalıntı değerlerinin düşük olması beklenmektedir. Bu durum kurulan modelin parametrelerle ilişkisinin güçlü olduğu anlamına gelmektedir.  $I_{ort}$  için deney numaraları ile kalıntı değerleri kıyaslandığında 11 kalıntı değeri pozitif, 9 kalıntı değeri ise negatiftir. Bu 11 sayısal çözümlene sonucunun model değerlerinden düşük olduğu, 9 adet sayısal çözümlene sonucunun ise model değerinden büyük olduğu anlamına gelmektedir. Deney 14, 16 ve 19 kalıntı değerlerinin en yüksek olduğu deneyler olmuştur.

#### 4.4.2. ΔP için Yanıt Yüzey Regresyonu

Bu başlık altında tasarım parametrelerinin ΔP üzerine olan etkileri analiz edilmiş ve parametreler arasında kurulan model ilişkisinin kullanılabilir olup olmadığına dair istatistiki bilgilere yer verilmiştir. Regresyon %95 güven aralığında yapılmıştır. Anova tablosunda son sütunda yer alan p-değerleri null hipotezine göre 0.05 den küçük olan değerler model üzerinde etkili ve kabul edilebilirdir. Çizelge 4.8’de ΔP için ANOVA tablosu verilmiştir.

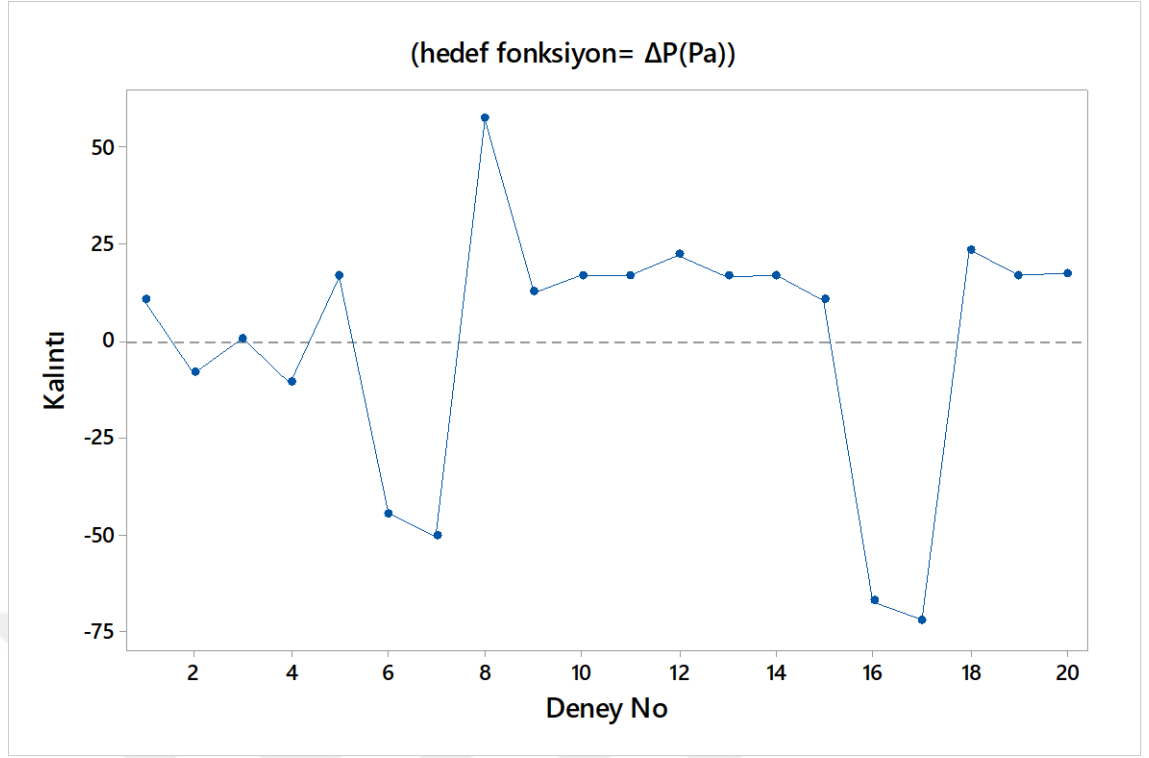
**Çizelge 4. 8.** ΔP için ANOVA Tablosu

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	9	4762706	529190	249,84	0,000
Lineer	3	3525492	1175164	554,82	0,000
X1	1	2471919	2471919	1167,05	0,000
X2	1	1138668	1138668	537,59	0,000
X3	1	23717	23717	11,20	0,007
Kare	3	478154	159385	75,25	0,000
X1*X1	1	115077	115077	54,33	0,000
X2*X2	1	56006	56006	26,44	0,000
X3*X3	1	4549	4549	2,15	0,174
Etkileşim	3	665269	221756	104,70	0,000
X1*X2	1	403824	403824	190,66	0,000
X1*X3	1	22001	22001	10,39	0,009
X2*X3	1	10903	10903	5,15	0,047
Hata	10	21181	2118		
Uyumsuzluk	4	21181	5295	953136,11	0,000
Toplam	19	4783887			

**Çizelge 4. 9.** ΔP için Model Özeti

Hassasiyet	R <sup>2</sup>	Düzeltilmiş R <sup>2</sup>	Tahmin Edilen R <sup>2</sup>
46,0226	99,56%	99,16%	89,13%





**Şekil 4. 11.**  $\Delta P$  için deney numaralarına göre kalıntı değerleri (0.6 V için)

Şekil 4.11’de deney planı kapsamında oluşturulan 20 adet deneyin kalıntı değerleri verilmiştir. Kalıntı; oluşturulan model ile sayısal çözümleme arasında oluşan farkı temsil etmektedir. Kalıntının pozitif olması modelin sayısal çözümleme değerinden küçük olduğu anlamına gelmektedir. Kalıntı değerinin düşük olması ise model ile sayısal çözümleme değerlerinin birbirine yakın olduğu anlamını taşımaktadır. Kurduğumuz modelin en iyi sonuca yaklaşması için deney planı kapsamında kalıntı değerlerinin düşük olması beklenmektedir. Bu durum kurulan modelin parametrelerle ilişkisinin güçlü olduğu anlamına gelmektedir.  $\Delta P$  için deney numaraları ile kalıntı değerleri kıyaslandığında 13 kalıntı değeri pozitif, 6 kalıntı değeri ise negatiftir. Bu 13 sayısal çözümleme sonucunun model değerlerinden düşük olduğu, 6 adet sayısal çözümleme sonucunun ise model değerinden büyük olduğu anlamına gelmektedir. Deney 8, 16 ve 17 kalıntı değerlerinin en yüksek olduğu deneyler olmuştur.

#### 4.4.3. $\Delta P$ ve $I_{ort}$ için Model Doğrulama

Tahmin edilen modelin ne derece hassas olduğu ve gerçek değerleri ne denli temsil ettiğini araştırmak için model doğrulama yapmak gerekir. Bu çalışma içinde deneyler üzerinde etkin olan parametreler değiştirilerek matematiksel modelden elde edilen sonuçlar ile sayısal çözümlene sonuçları karşılaştırılmıştır. Deney planı içerisinde yer almayan geometrik parametre değerleri için elde edilen model ve sayısal çözümlene sonuçları, bu sonuçlara ilişkin hata yüzdeleri Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’de sunulmuştur. Hata yüzde değerlerin  $I_{ort}$  için 0.31 ile 1.56 aralığında değişirken,  $\Delta P$  için 1.59 ile 4.19 aralığında değişkenlik göstermiştir. Bu hata yüzdesi modelin sayısal çözümleneler ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Elde edilen model ile çözümlene ve deney yapmaya gerek kalmaksızın beklenen akım yoğunluğu ve basınç düşümü değerlerini elde etmek mümkün olmuştur.

**Çizelge 4. 10.** Akım Yoğunluğu için doğrulama Sonuçları

Deney No	Tasarım Parametreleri			Akım Yoğunluğu, $I_{ort}$ (A/cm <sup>2</sup> )		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Sayısal	Model	% Hata
1	0,5	1	1,24	0,362469	0,363612	0,31
2	1	1	1,86	0,303071	0,307883	1,56
3	1,5	2	1,24	0,329227	0,332054	0,85

**Çizelge 4. 11.** Basınç Düşümü için doğrulama sonuçları

Deney No	Tasarım Parametreleri			Basınç Düşümü (Pa)		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Sayısal	Model	% Hata
1	0,5	1	1,24	2209	2174,4	1,59
2	1	1	1,86	1005,2	1022,5	1,69
3	1,5	2	1,24	190	182,3	4,19

**4.4.4.  $\Delta P$  ve  $I_{ort}$  için Optimizasyon (0.6 V için)**

Geometrik parametreler  $I_{ort}$  ile  $\Delta P$  hedef fonksiyonları üzerinde istenen etkiyi oluşturmamaktadır. Çalışmanın amacı; hedef fonksiyonlardan  $I_{ort}$  un maksimum olması,  $\Delta P$  nin ise minimum olması beklentisidir. Fakat hangi parametrenin daha önemli olduğu değişik tasarımlar için farklılık gösterebilir. Bu çalışma için her iki hedef fonksiyonun da önem seviyesi aynı kabul edilmiş ve elde edilen değerler Çizelge 4.12, Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'te sunulmuştur.  $x_2$  nin optimum değeri olan 1.37 mm kanal genişliğinin imalat güçlüğünden dolayı, bu değere en yakın ve imalat yöntemlerine daha elverişli değer olan 1.5 mm kanal genişliği optimum değer kabul edilerek sayısal çözümler yinelenmiştir. Sayısal değerler optimum geometrik parametrelere uygun şekilde kanal imalatı yapılarak deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

**Çizelge 4. 12.**  $\Delta P$  ve  $I_{ort}$  için Optimizasyon

Yanıt	Amaç	En düşük	Hedef	En üst	Önem seviyesi
$\Delta P(\text{Pa})$	Minimum		170,000	2440	1
$I_{ort}(\text{A/cm}^2)$	Maximum	0,271268	0,364		1

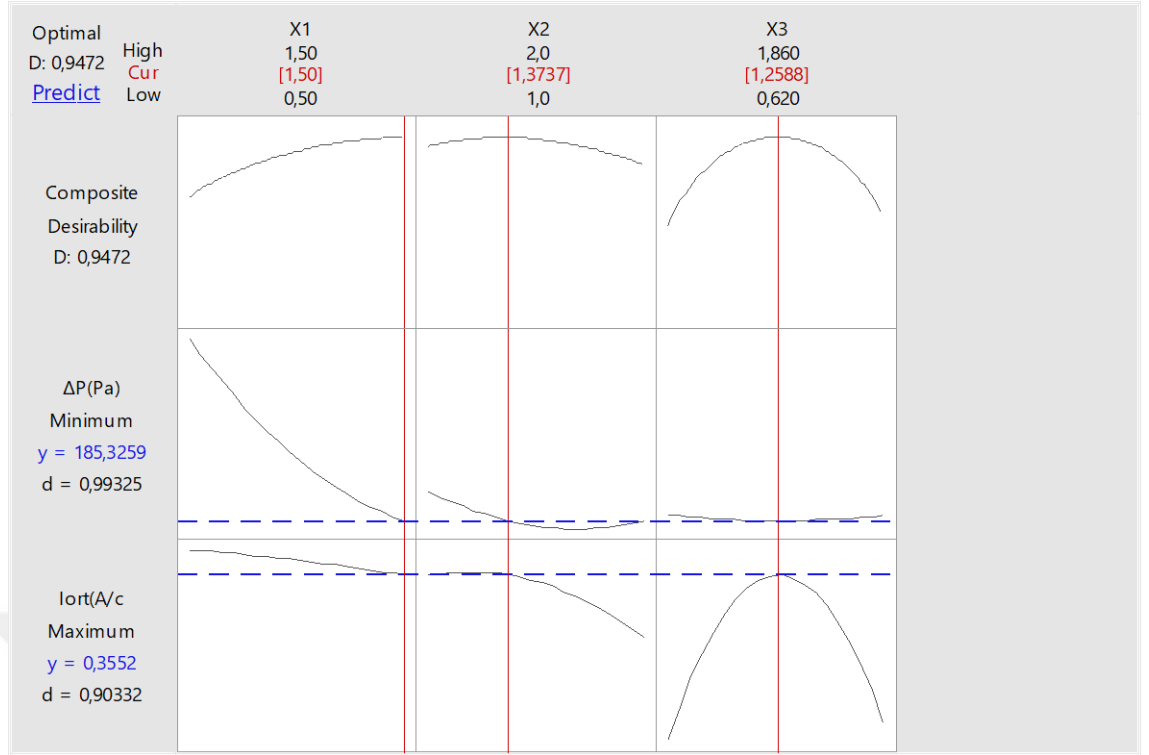
**Çizelge 4. 13.** Optimizasyon Çözümü

Çözüm	X1	X2	X3	$\Delta P(\text{Pa})$	$I_{ort}(\text{A/cm}^2)$	Karma
				Değer	Değer	Arzu edilirlilik
1	1,5	1,37374	1,25879	185,326	0,355179	0,947216

**Çizelge 4. 14.** Çoklu Yanıt Tahmini

Değişken	Değer
X1	1,5
X2	1,37374
X3	1,25879

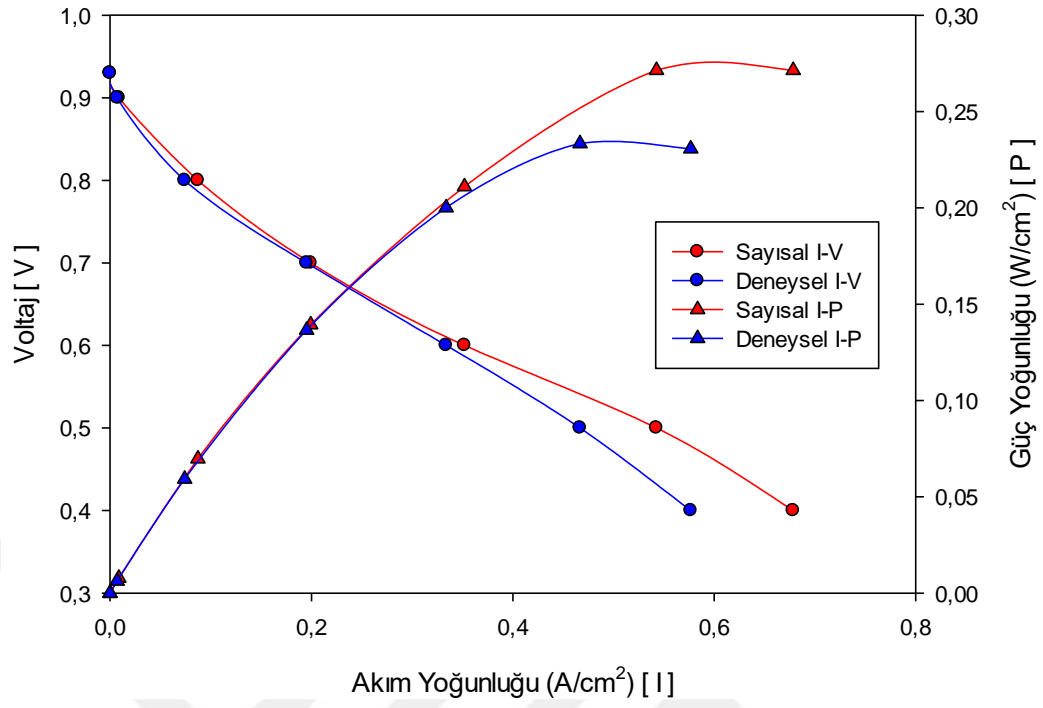
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



**Şekil 4. 12.**  $\Delta P$  yi minimum,  $I_{ort}$ 'u maksimum yapan bileşke optimizasyon eğrileri (0.6 V için)

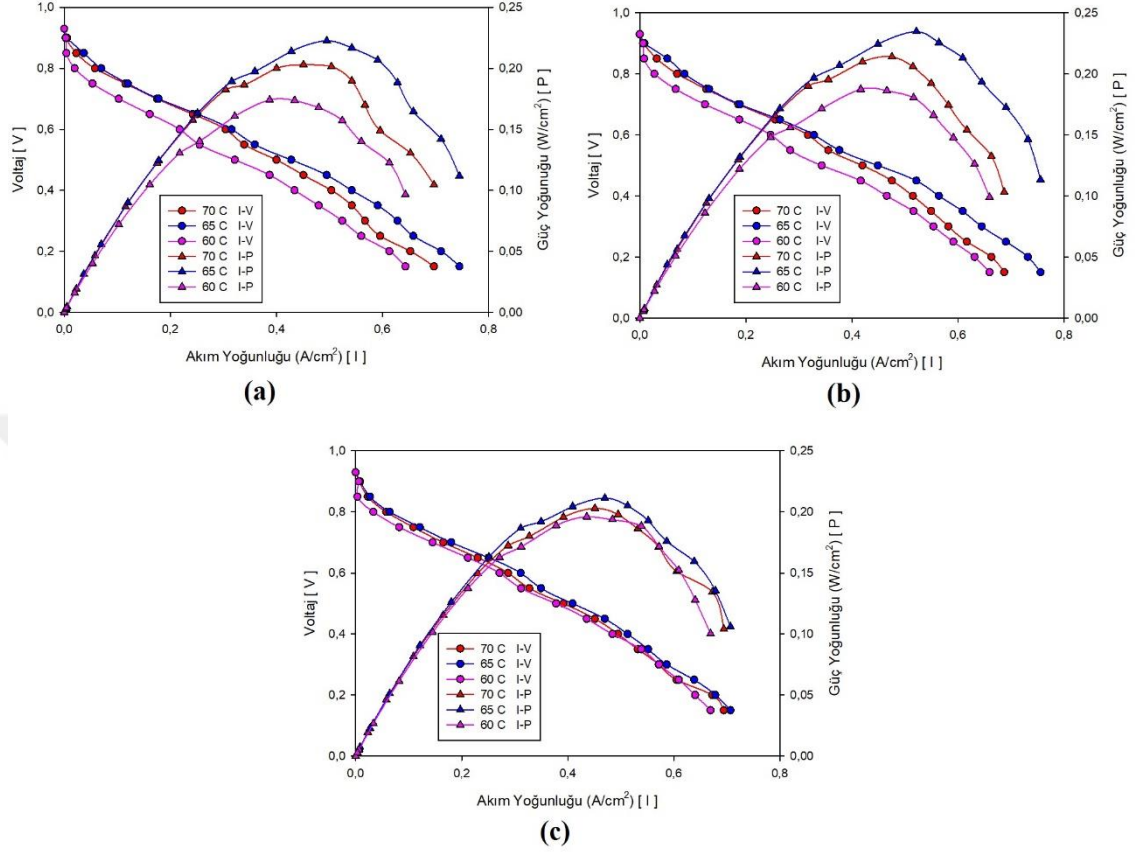
$I_{ort}$  ve  $\Delta P$  değerleri için önem seviyesinin aynı ve 1 kabul edildiği durum ve imal edilebilme durumları da göz önünde bulundurulduğunda  $x_1 = 1.5$ ,  $x_2 = 1.5$  ve  $x_3 = 1.27$  olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.12 de geometrik parametreler ile optimum olarak hesaplanan değerlerin kesişimi verilmiştir. Şekilde verilen “d” değeri maksimum yapılmak istenen hedef fonksiyonu için; hedef fonksiyonun optimum değeri / modelden elde edilebilecek maksimum değeri temsil etmektedir. “d” değeri minimum yapılmak istenen hedef fonksiyonu için; hedef fonksiyonunun optimum değeri / modelden elde edilebilecek minimum değeri temsil etmektedir. Karma arzu edilebilirlik kavramında yer alan “D” değeri ise maksimum ve minimum hedef fonksiyonlarında yer alan “d” lerin ortalamasıdır.

Optimum değerler olarak kabul edilen  $x_1 = 1.5$ ,  $x_2 = 1.5$  ve  $x_3 = 1.27$  değerleri için elde edilen sayısal çözümlerle sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.13’de sunulmuştur.



Şekil 4. 13. Optimum kanal geometrisi için deneysel doğrulama

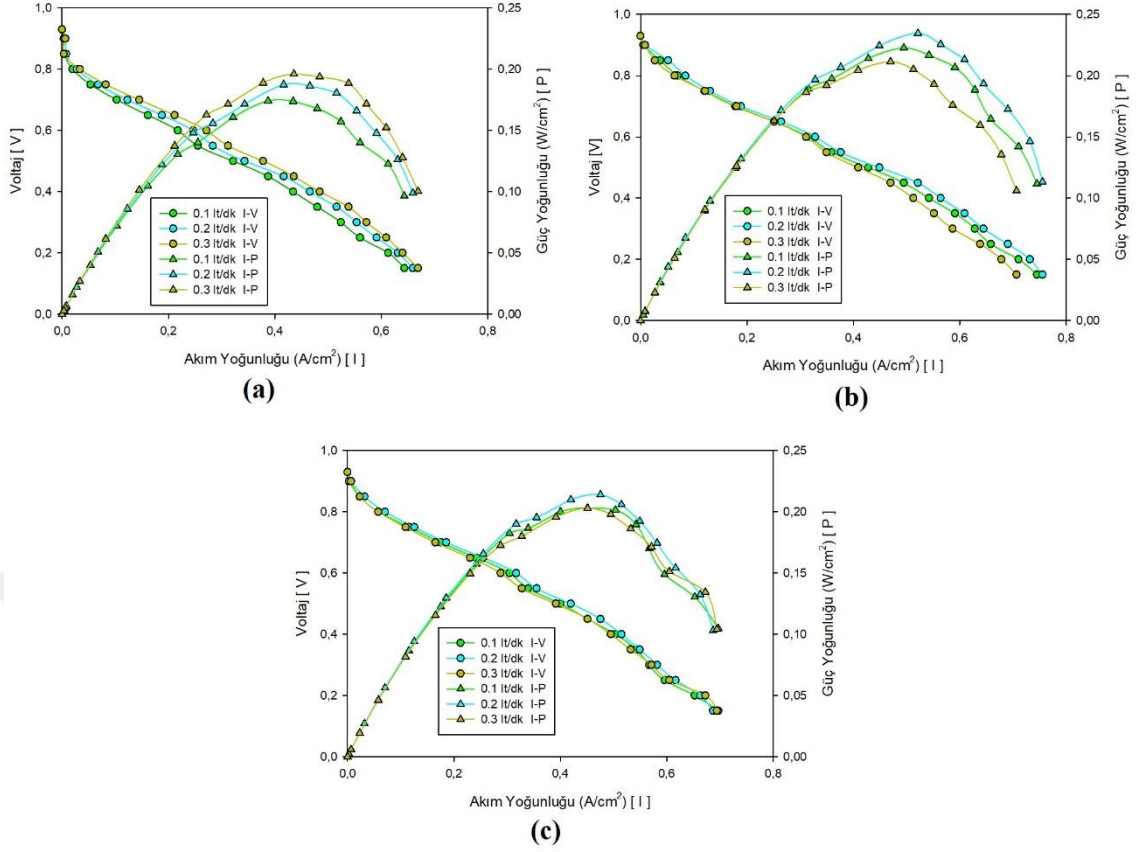
#### 4.5. Optimum Kanal Geometrisine Sıcaklık ve Debinin Etkisinin Deneysel İncelenmesi



**Şekil 4. 14.** 0.1 lt/dk(a), 0.2 lt/dk(b) ve 0.3 lt/dk(c) debi değerinde farklı sıcaklıkların deneysel polarizasyon eğrileri

Şekil 4.14 de debi değeri 0.1 lt/dk(a), 0.2 lt/dk(b) ve 0.3 lt/dk(c) debi değerlerinde sabit tutularak sıcaklık değiştirilmiş ve performans üzerine sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere en iyi performans 65 °C de elde edilmiştir. Debinin 0.3 lt/dk olduğu durumda; debi değerinin 0.2 ve 0.1 lt/dk değerine göre sıcaklığın performansa olan etkisi biraz daha az gözlemlenmiştir. Buradan; optimum değerdeki sıcaklık değerine göre sıcaklığın artması ya da azalması performansı azaltmaktadır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



**Şekil 4. 15.** 60 °C (a), 65 °C (b) ve 70 °C (c) pil sıcaklığında farklı debiler için deneysel polarizasyon eğrileri

Şekil 4.15 de görüldüğü üzere aktivasyon kayıplarının daha fazla olduğu 60 °C ve 65 °C gibi düşük sıcaklıklarda akış debilerinin etkisi daha fazla olmaktadır. Fakat 70 °C de bu fark azalmaktadır. Şekil 4.15’de 60 °C sıcaklıkta debinin artması ile akım yoğunluğunun da arttığı görülmüştür. Sıcaklığın 65 °C ve 70 °C ye artırılmasıyla 0.2 lt/dk debide maksimum akım yoğunluğu elde edilmiştir. Debilerin sabit sıcaklıkların değişken olduğu Şekil 4.15’deki grafikler incelendiğinde yakıt pili performansının en iyi olduğu sıcaklık 65 °C dir. Sıcaklığın 65 °C olduğu, debinin değişken olduğu Şekil 4.15 (b) incelendiğinde; en iyi yakıt pili sonucuna 0.2 lt/dk debisinde ulaşılmıştır.

#### 4.6.Bulguların Analizi

Çizelge 4.15'te 5 model için 0.6 V değerindeki akım ve güç değerleri verilmiştir. Çizelge 4.16'da ise her bir model için sayısal / deneysel veriler arasındaki yüzde fark ve referans modele göre kanal performanslarındaki değişim yüzdeleri verilmiştir. Çizelge 4.16'da bulunan yüzde hesaplarının nasıl yapıldığı ilgili formüller tablonun altında verilmiştir.

**Çizelge 4. 15.**Modellerin 0.6 V değerinde akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu değerleri

	SAYISAL			DENEYSEL		
	V (Volt)	I (A/cm2)	P(W/cm2)	V(Volt)	I (A/cm2)	P(W/cm2)
<b>Model 1</b>	0,6	0,2861	0,17166	0,6	0,2658	0,15948
<b>Model 2</b>	0,6	0,3547	0,21282	0,6	0,33	0,198
<b>Model 3</b>	0,6	0,3633	0,21798	0,6	0,3362	0,20172
<b>Model 4</b>	0,6	0,3204	0,19224	0,6	0,2965	0,1779
<b>Model 5</b>	0,6	0,2517	0,15102	0,6	0,2322	0,13932

**Çizelge 4. 16.**Akım yoğunluğu %Sayısal Artış, % Deneysel Artış ve % Fark Değerleri(0.6 V)

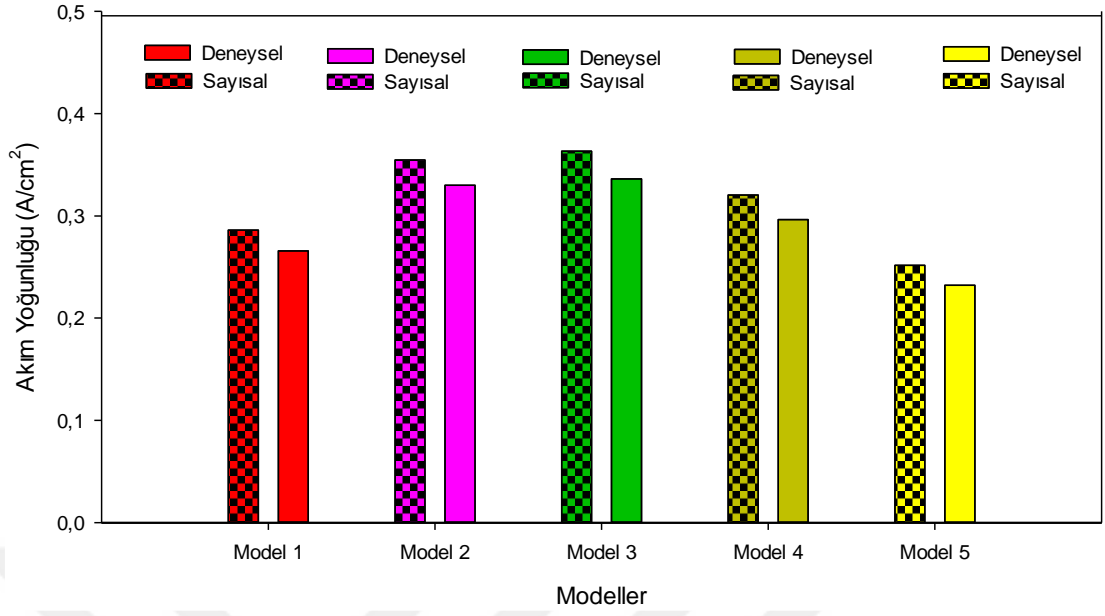
	Referans Model	Özgün Kanal Tasarımları				
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	
<b>% Sayısal Artış</b>	-	+%22	+%27,4	+%13,8	-%7,7	
<b>% Deneysel Artış</b>	-	+%19,4	+%20,9	+%10,3	-%14,4	
<b>% Fark</b>	%5,3	%6,8	%8	%9,6	%11,9	

$$\% \text{ Sayısal Artış} = \frac{\text{Model } x \text{ için } I_{0,6V \text{ Sayısal}} - \text{Model 1 için } I_{0,6V \text{ Sayısal}}}{\text{Model 1 için } I_{0,6V \text{ Sayısal}}} \times 100$$

$$\% \text{ Deneysel Artış} = \frac{\text{Model } x \text{ için } I_{0,6V \text{ Deneysel}} - \text{Model 1 için } I_{0,6V \text{ Deneysel}}}{\text{Model 1 için } I_{0,6V \text{ Deneysel}}} \times 100$$

$$\% \text{ Fark} = \frac{\text{Model } x \text{ için } I_{0,6V \text{ Sayısal}} - \text{Model } x \text{ için } I_{0,6V \text{ Deneysel}}}{\text{Model 1 için } I_{0,6V \text{ Deneysel}}} \times 100$$





**Şekil 4. 16.** Modellerin sayısal ve deneysel akım yoğunluğu dağılımı (0.6 V için)

Şekil 4.16'daki sütun grafikleri analiz edildiğinde modellerin sayısal ve deneysel akım yoğunluğu değerleri sırasıyla birbirinden %5.3-%8-%6.8-%9.6-%11.9 farklıdır. Sayısal ve deneysel akım yoğunlukları arasında değişiklikler var olmasına rağmen sayısal ve deneysel akım yoğunluğu değişim trendleri birbirine benzemektedir. Hem sayısal sonuçlarda hem de deneysel sonuçlarda en iyi akım yoğunluğu değerleri Model 3 ten elde edilmiştir. Modeller elde edilen akım yoğunluğuna göre en iyiden başlamak üzere sıralanacak olursa Model 3, Model 2, Model 4, Model 1 ve Model 5 şeklinde sıralanacaklardır. Model 2, Model 3 ve Model 4 literatür modeli olarak tercih edilen Model 1 den daha iyi akım yoğunluğu sağlarken, Model 5 elde edilen akım yoğunluğu literatür modelinden daha düşük olmuştur.

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada literatürde sıkça kullanılan tekli serpantin tipi kanal tasarımı  $16 \text{ cm}^2$  aktif alana sahip PEM yakıt pili için grafit plaka üzerine imal edilmiş ve deneysel performans testleri yapılmıştır. Aynı geometri deneysel çalışmada kullanılan işletme parametreleri ile FLUENT PEMFC modülü kullanılarak tek fazlı, üç boyutlu olarak çözümlenmiştir. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlemlenerek doğrulanan bir sayısal model geliştirilmiştir. Doğrulaması yapılan modele uygulanan 1.5 mm kanal genişliği, 1 mm kanal derinliği ve %55.4 akış alanı parametreleri korunarak 4 adet özgün akış alanı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu 4 modelin sayısal çözümlemesi yapılmış ve toplamda 5 modele ilişkin akım yoğunluğu-voltaj ilişkileri, akım yoğunluğu-güç yoğunluğu ilişkileri, modellerin katot kanal içi basınç dağılımları, anot katalizör tabakası akım yoğunluğu dağılımları, kanal içi hidrojen kütle kesri dağılımları sayısal olarak elde edilmiştir. Sayısal çözümlenmeleri yapılan 5 modele ilişkin kanal tasarımları 10 mm kalınlığında grafit plakalar üzerine işlenmiş ve deneysel performans ölçülmüştür. Her bir model için deneysel ve sayısal polarizasyon eğrileri kıyaslanmıştır.

Akım yoğunluğunun en yüksek, basınç düşümünün en düşük olduğu kanal tasarımı olan Model 3 üzerinde geometrik parametrelerin etkisini incelemek için kanal yüksekliği, kanal genişliği ve akış alanı/temas yüzeyi oranları değiştirilerek bu parametrelerin elektriksel performans ve basınç düşümü değerlerini nasıl etkilediği üzerine sayısal bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlgili geometrik parametreler ile hedef fonksiyonlar arasında bir ilişki kurmak ve geometrik optimizasyon yapmak üzere 3 parametrelilik, 3 seviyeli ve 2 hedef fonksiyonu bulunan, yanıt yüzey yöntemi uygulanan bir deney planı oluşturulmuştur. Hedef fonksiyonlardan akım yoğunluğu maksimum, basınç düşümü ise minimum hedef olarak belirlenmiştir. Deney planı çerçevesinde yapılan sayısal çözümlenmeler neticesinde, optimum parametreler; kanal derinliğinin 1.5 mm, kanal genişliğinin 1.5 mm ve akış alanı/temas yüzeyi oranınının 1.24 olduğu tasarım olarak belirlenmiştir. Sayısal çözümlenme sonucunda optimum tasarım olarak belirlenen geometri 10 mm grafit plaka üzerine imal edilerek; deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Son olarak ta; imalatı yapılan optimum kanal geometrisi üzerinde işletme koşullarını iyileştirmek üzere pil sıcaklığı ( $60-65-70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ve debinin ( $0.1-0.2-0.3 \text{ lpm}$ )

akım yoğunluğu üzerine olan etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucu 3 aşamalı olarak incelenmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında;

Tekli serpantin tipi kanal tasarımı sayısal ve deneysel doğrulanmış, ardından 4 adet özgün akış alanı tasarımı yapılarak, bu tasarımlar sayısal olarak çözümlenmiştir.

Model 1 için elde edilen deneysel sonuçlar; literatürde benzer geometriler ve işletme parametrelerinde yapılan deneyler ile kıyaslanmış ve elde edilen sonuçların literatürle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Model 1 için deneysel ve sayısal sonuçların %5.3 farklılık göstererek uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. %5.3 lük farkın sayısal modelin tek fazlı çözümlenmesinden oluştuğu düşünülmektedir. Araştırma Bulguları ve Tartışma başlığı altında verilen farklı modeller için sayısal ve deneysel değerlerin kıyaslandığı grafiklere bakıldığında voltaj düştükçe sayısal ve deneysel değerlerin birbirinden uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu farklılığın sayısal çalışmanın tek fazlı olarak çözümlenmesi sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Voltajın düşmesi ile yakıt pilinden elde edilen akım yoğunluğu artmaktadır, akım yoğunluğunun artışı; kanal içerisinde oluşan sıvı suyun artışı anlamına gelmektedir. Tek fazlı çözümlenmelerde oluşan sıvı su buhar fazında kabul edildiği için belli bir oranda deneysel verilerden uzaklaşmaktadır. Literatürde yapılmış sayısal çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında da; açık devre voltajı ile 0.4 V aralığında yapılan tek fazlı sayısal çalışmaların sonuçlarının kabul edilebilir sınırlar çerçevesinde olduğu söylenmektedir. Bu sebeple, bu çalışmadaki sayısal çözümleme sonuçları 0.93 V açık devre voltajı ile 0.4 V aralığında çözümlenmiştir.

Kanal genişliğinin 1.5 mm, kanal derinliğinin 1 mm ve akış alanı yüzdesinin %55.4 olarak sabit tutulduğu, akış alanı tasarımlarının değiştirildiği 5 model tasarımı için model 1 referans sonuç olarak seçilmiş ve sayısal çözümleme sonuçlarına göre akım yoğunluğu iyi olandan kötü olana doğru sırasıyla Model 3, Model 2, Model 4 ve Model 5 tir. 0.6 V değerindeki akım yoğunlukları değerine göre referans modele kıyasla Model 2

% 22, Model 3 %27.4, Model 4 %13.8 artış sağlarken, Model 5 te % 7.7 azalma gözlemlenmiştir (0.6 V için).

Yakıt pili performansını etkileyen tasarım parametrelerinin; akış alanının dizaynı, basınç düşümü ve kanal içi basınç dağılımı, reaktant gazların katalizör tabakasına homojen dağılımı, akım yoğunluğu dağılımı, kanal içi hız dağılımı, akış alanı/temas yüzeyi oranı, sıcaklık dağılımı, soğutucu kanal tasarımı (yığın ise) olduğu anlaşılmıştır. Bu parametrelerden basınç düşümü ve kanal içi basınç dağılımı, akım yoğunluğu dağılımı parametrelerinin doğrudan akış alanının dizaynı ile ilişkili olduğu elde edilen şekiller ile doğrulanmıştır. Katalizör tabakası üzerindeki yerel akım yoğunluğu dağılımının düzgün olmaması katalizörün strese girmesine sebep olmakta ve katalizör tabakasının ömrünün kısılması ile sonuçlanmaktadır. Akım yoğunluğu dağılımındaki renk skalasındaki değerlerin birbirine yakınlığı homojenliğin ölçüsü gibi düşünülebilir.

Yakıt pili içerisindeki dengesiz yerel akım yoğunluğu dağılımı katalizör bozulmasını hızlandırdığı için PEM yakıt pilinin ömrü ve dayanıklılığı olumsuz etkilenmektedir, optimum akış alanı tasarımları ile bu problem kısmen giderilebileceği sonucuna varılmıştır.

Kanal tasarımıdaki basınç düşümünün yüksek olması pompalama güçlerinin yüksek olmasına, dolayısıyla pompalama için harcanan enerjinin artmasına sebep olmaktadır. Bu çalışma için sayısal çözümlene tekli yakıt pili üzerinden gerçekleştirilmiştir. İlgili tasarımların yığın olması durumunda pompalama sarfiyatının bir hayli değişkenlik göstereceği ve artacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Sayısal çözümlene sonuçlarına göre basınç düşümü en düşük olandan en yüksek olana doğru sırasıyla; Model 3, Model 2, Model 4, Model 5 ve Model 1 dir. 0.6 V değerindeki basınç düşümü değerleri model 1 için 15409 Pa, Model 2 için 684.3 Pa, Model 3 için 560 Pa, Model 4 için 946.8 Pa ve Model 5 için 1123.1 Pa olarak hesaplanmıştır (0.6 V için).

Basınç gradyeninin giriş hattından çıkış hattına doğru bipolar plaka boyunca azaldığı, bununla birlikte basınç gradyeninin dağılımı ve düzgünlüğü akış alanı tasarımına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Katalizör tabakası üzerindeki akım yoğunluğu dağılımının daha iyi akış alanı tasarımlarıyla iyileştirilebileceği ve katalizör tabakasının farklı bölgelerinde oluşan değişken yerel akım yoğunluğu dağılımının daha homojen hale getirilebileceği sonucuna varılmıştır. Kanal tasarımı içerisinde reaktif gazın ulaşamayacağı ölü bölgelerin oluşması istenmeyen bir durumdur.

Yeni akış alanları tasarlanırken; kanal tasarımı içerisinde ani dönüşler ve keskin kenarlar yerine yumuşak geçiş özelliği gösteren kanal tasarımları yapılması gerektiğini göstermiştir. Ani dönüşler ve keskin kenarlar o bölgede yüksek yerel akım yoğunluğuna ve aşırı basınç düşümüne sebep olmaktadır.

Aşama 1 de gözlemlenen tüm bu sonuçlar ışığında; yeni bir akış alanı tasarımı yapmadan önce sayısal simülasyon yapmak hem daha masrafsız hem de parametreleri daha iyi irdeleyebileceğimiz sonuçlar vermektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında;

Bu çalışma kapsamına yakıt pili performansını etkileyen parametreler tasarım parametreleri ve işletme koşulları olarak iki temel başlıkta incelenmiştir. Çalışma ağırlıklı olarak tasarım parametreleri üzerinde durmaktadır. Performansı yüksek bir yakıt pili tasarılmanın en temel kriterlerinden birisinin doğru malzeme seçimi yapmak olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında bipolar plaka malzemesi olarak 10 mm kalınlığında grafit plaka, katalizör olarak %60 PtC, Nafion 212 Membran ve 0.25 mm kalınlığında GDL tercih edilmiştir.

16 cm<sup>2</sup> aktif alan boyutları için; 0.5 mg/cm<sup>2</sup>, %60 PtC katalizör içeren MEA sıcak presleme işlemi ile 130°C'de ve 400 psi basınçta 5 dakika bekletilerek hazırlanmıştır. Bütün modeller için aynı MEA kullanılmış ve işletme parametreleri 70 °C pil sıcaklığı, 70 °C nemlendirme sıcaklığı, 1 atm basınç ve anot/katot debisi 0.25 lt/dk olacak şekilde ayarlanmıştır.

Model 1 için elde edilen deneysel sonuçlar; literatürde benzer geometriler ve işletme parametrelerinde yapılan deneyler ile kıyaslanmış ve elde edilen sonuçların literatürle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde mevcut her bir kanal tasarımının avantaj ve dezavantajları vardır. Bu çalışma kapsamında önerilen hibrit özgün akış alanı tasarımları çok sayıda akış alanı tasarımının avantaj ve dezavantajlarını birleştirerek daha verimli kanallar tasarlanmıştır.

Aşama 1 de sayısal çözümlemesi yapılan akış alanları 10 mm kalınlığında grafit plaka üzerine CNC freze yardımıyla işlenerek her bir kanal deneysel performans testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlara göre akım yoğunluğu iyi olandan kötü olana doğru sırasıyla Model 3, Model 2, Model 4 ve Model 5 tir. 0.6 V değerindeki akım yoğunlukları değerine göre referans modele (Model 1) kıyasla Model 2 % 19.4, Model 3 %20.9, Model 4 %10.3 artış sağlarken, Model 5'te % 14.4 azalma gözlemlenmiştir.

Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında; Model 1 için ortalama %5.3, Model 2 için %6.8, Model 3 için %8, Model 4 için %9.6, model 5 için %11.9 fark olduğu gözlemlenmiştir. Modele göre değişen bu fark değerlerinin; sayısal çözüm prosedüründe yapılan kabuller ve referans değerlerden kaynaklandığı, ayrıca herhangi bir parametrenin deneysel prosedürde ve sayısal çözümlemede farklı etkiler oluşturması sebebiyle olduğu gözlemlenmiştir.

Önerilen modellerden 3 tanesinin geleneksel serpantin tipi kanala göre daha iyi elektriksel performans sergilediği tespit edilmiştir. İyi tasarlanmış ve optimize edilmiş bir akış alanı tasarımının elektriksel verimi etkilediği sonucuna varılmıştır.

Sayısal sonuçlar deneysel verilerle doğrulanana kadar dikkatli kullanılmalıdır.

Çalışmanın üçüncü aşamasında;

Geometrik optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Aşama 1 ve aşama 2 de en iyi elektriksel çıktıyı ve en düşük basınç düşümünü oluşturan Model 3 üzerinde Ansys Fluent Pemfc modülü kullanılarak geometrik optimizasyon çalışması yapılmış ve geometrik parametrelerin hedef fonksiyonlarını nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Yapılan geometrik optimizasyonda; kanal derinliği 0.5 ile 1.5 mm aralığında, kanal genişliği 1-2 mm aralığında, akış alanı/ temas yüzeyi oranı 0.62-1.86 aralığında değişmiştir. Optimizasyon çalışması yanıt yüzey yöntemi ile 3 parametre ve 3 seviyeli olacak şekilde yapılmıştır. Hedef fonksiyonlardan akım yoğunluğu ve basınç düşümü aynı önem seviyesine sahip olduğu kabul edilerek; maksimum akım yoğunluğu ve minimum basınç düşüşü gösteren kanalın 1.5 mm derinliğinde, 1.5 mm genişliğinde ve 1.24 akış alanı/temas yüzeyi oranında olan kanal olduğu tespit edilmiştir. Optimum kanal olarak seçilen tasarımın; akım yoğunluğunun  $0.35185 \text{ A/cm}^2$ , basınç düşümünün ise 170 Pa olduğu hesaplanmıştır. Kanal derinliği 1 mm, kanal genişliği 1.5 mm ve akış alanı/temas yüzeyi 1.24 olan model 1 için ise; akım yoğunluğunun değeri  $0.2861 \text{ A/cm}^2$ , basınç düşümü ise 15.409 kPa olduğu hesaplanmıştır. Bu iki tasarım kıyaslanırken model 1 in kanal derinliği ile optimum geometrinin kanal derinliğinin aynı olmadığı göz önünde bulundurularak kıyaslanmalıdır. Çünkü kanal derinliği basınç değişimini etkileyen en önemli parametre olarak tespit edilmiştir.

Minitab programının optimizasyon aracı çalıştırılarak elde edilen değerler  $x_1 = 1.5$  mm,  $x_2 = 1.5$  mm ve  $x_3 = 1.24$  olarak tespit edilmiştir. optimizasyon grafikleri sonucunda  $I_{ort}$  için elde edilen “d” değeri maksimum yapılmak istenen hedef fonksiyonu için; hedef fonksiyonun optimum değeri / o modelden elde edilebilecek maksimum değeri temsil etmektedir. “d” değeri minimum yapılmak istenen hedef fonksiyonu için; hedef fonksiyonunun optimum değeri / o modelden elde edilebilecek minimum değeri temsil etmektedir. Karma arzu edilebilirlik kavramında yer alan “D” değeri ise maksimum ve minimum hedef fonksiyonlarında yer alan “d” lerin ortalamasıdır.  $I_{ort}$ 'un maksimum değeri için  $d = 0.90332$ ,  $\Delta P$ 'nin minimum değeri için  $d = 0.99325$  ve karma arzu edilebilirlik  $D = 0.9472$  olarak belirlenmiştir.

Yanıt yüzey yöntemi ile oluşturulan deney planı kullanılarak elde edilen sonuçlar;  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  için yanıt yüzey regresyonu yapılmıştır. Elde edilen  $I_{ort}$  modeli için  $R^2$  değeri %99.84, tahmin edilen  $R^2$  değeri %98.26 ve  $\Delta P$  modeli için  $R^2$  değeri %99.56, tahmin edilen  $R^2$  değeri %89.13 olarak hesaplanmıştır.

0.6 V değerinde kanal derinliği, kanal genişliği ve akış alanı/temas yüzeyi oranı ile hedef fonksiyonlar( $I_{ort}$  ve  $\Delta P$ ) arasında matematiksel ilişki kurulmuştur. Elde edilen matematiksel ilişki deney planında yer almayan geometrik parametreler kullanılarak doğrulanmış ve  $I_{ort}$  için maksimum hata yüzdesinin %1.56,  $\Delta P$  için ise maksimum hata yüzdesinin 4.19 olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu doğrulama deneyleri neticesinde oluşturulan modellerin belirtilen sınırlar çerçevesinde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Akış alanı/temas yüzeyi oranını  $I_{ort}$  sonucunu 0.295 A/cm<sup>2</sup> ile 0.358 A/cm<sup>2</sup> aralığında değiştirirken, kanal genişliği  $I_{ort}$  sonucunu 0.338 A/cm<sup>2</sup> ile 0.361 A/cm<sup>2</sup> aralığında, kanal derinliği ise  $I_{ort}$  sonucunu 0.352 A/cm<sup>2</sup> ile 0.362 A/cm<sup>2</sup> aralığında değiştirmektedir.

Akış alanı/temas yüzeyi oranını  $\Delta P$  sonucunu 550 Pa ile 630 Pa aralığında değiştirirken, kanal genişliği  $\Delta P$  sonucunu 300 Pa ile 1090 Pa aralığında, kanal derinliği ise  $\Delta P$  sonucunu 170 Pa ile 1350 Pa aralığında değiştirmektedir.

Tekli serpantin, çoklu serpantin gibi geometrik olarak birbirini tekrar etmeyen akış alanı tasarımları için akış alanı/temas yüzeyi oranı diye adlandırılan bir parametre incelenmiştir. Bir akış alanı tasarlarken temas yüzeyi elektronların sevkini, akış alanı yüzeyi ise reaktant gazın katalizör üzerine dağılımı görevini üstlenmektedir. Bu iki parametrenin birbirlerine olan oranlarının çok artması ya da çok azalması akım yoğunluğu performansını olumsuz etkilemektedir. Yanıt yüzey yöntemi deney planında;  $x_1$  ve  $x_2$  nin sabit,  $x_3$  ün değişken olduğu; deney 7, deney 5 ve deney 3 ten optimum akış alanı/temas yüzeyi oranı 1.24 olarak bulunmuştur.  $x_1$  ve  $x_2$  nin sabit olduğu aynı deneylerde  $x_3$  ün artması ile basınç düşümünün arttığı gözlemlenmiştir.

Deney planında;  $x_1$  ve  $x_3$  ün sabit,  $x_2$  nin değişken olduğu deneyler; deney 16, deney 19 ve deney 20 olarak tespit edilerek  $x_2$  değişkeninin hedef fonksiyonlar üzerine



olan etkileri incelenmiştir.  $x_2$  nin artması ile  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  azalmıştır. Yani; kanal genişliği ile  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  değerleri ters orantılıdır. Kanal genişliğini artması ile  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  azalmaktadır. En düşük basınç düşümü kanal genişliğinin en yüksek olduğu, En yüksek akım yoğunluğunun ise kanal genişliğinin en düşük olduğu değerde oluşmuştur.  $\Delta P$  nin azalması istenen bir çıktı iken,  $I_{ort}$  un azalması istenmeyen bir çıktıdır.

Deney planında;  $x_2$  ve  $x_3$  ün sabit,  $x_1$  in değişken olduğu deneyler; deney 17, deney 19 ve deney 12 olarak tespit edilerek;  $x_1$  değişkeninin hedef fonksiyonlar üzerine olan etkileri incelenmiştir.  $x_1$  in artması ile  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  azalmıştır. Yani; kanal derinliği ile  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  değerleri ters orantılıdır. Kanal derinliğinin artması ile  $I_{ort}$  ve  $\Delta P$  azalmaktadır. En düşük basınç düşümü kanal derinliğinin en yüksek olduğu, En yüksek akım yoğunluğunun ise kanal derinliğinin en düşük olduğu değerde oluşmuştur.  $\Delta P$  nin azalması istenen bir çıktı iken,  $I_{ort}$  un azalması istenmeyen bir çıktıdır.

### ÖNERİLER

İstenilen yakıt pili performansına ulaşmak için reaktif gazların gaz difüzyon tabakası üzerine tekdüze bir şekilde dağılması ve bu şekilde elektrokimyasal reaksiyonların katalizör tabakasına etkili bir şekilde yayılacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda yapılan tasarımlar kanal içerisindeki su tahliyesini kolaylaştıran, su taşmasını engelleyen bir geometrik yapıya sahip olmalıdırlar. Kanal içerisindeki sıvı su oluşumunu gözlemlemek üzere çalışmalar yürütülerek su yönetimi hakkında daha detaylı bilgi alınabilir.

Oluşturulan bütün modellerde suyun buhar fazında olduğu kabul edilmiş ve sıvı su mevcudiyeti ihmal edilmiştir. Bu nedenle tasarımı yapılan modeller iki fazlı çözümlenerek daha gerçekçi bir model oluşturulabilir.

Literatürde sıkça karşılaşılan reaktif gazlar GDL üzerine homojen dağılmalıdır ilkesindeki homojenlik üzerine nicel çalışmalar yapılmalıdır.

Yeni akış alanı tasarlayacak araştırmacılar akış alanı/ temas yüzeyi oranını dikkate alarak kanal tasarlamalıdır.

Yakıt pili tasarımına başlamadan önce uygun malzeme seçimi yapıldığına emin olunmalıdır.

Yığın yakıt pilleri için soğutma kanalı tasarımı ve sıcaklık dağılımı çalışmaları yürütülebilir. Yakıt pili yığınlarının soğutulması için nanoakışkanlar kullanılabilir.

Tasarlanan kanalların imal edilebilirlik kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Abdollahzadeh, M., Pascoa, J. C., Ranjbar, A. A., and Esmaili, Q. (2014). Analysis of PEM (Polymer Electrolyte Membrane) fuel cell cathode two-dimensional modeling. *Energy*, 68, 478–494. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.075>
- Afshari, E., Ziaei-Rad, M., and Dehkordi, M. M. (2017). Numerical investigation on a novel zigzag-shaped flow channel design for cooling plates of PEM fuel cells. *Journal of the Energy Institute*, 90(5), 752–763. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.07.002>
- Akhtar, N., Qureshi, A., Scholta, J., Hartnig, C., Messerschmidt, M., and Lehnert, W. (2009). Investigation of water droplet kinetics and optimization of channel geometry for PEM fuel cell cathodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(7), 3104–3111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.022>
- Alaefour, I., Karimi, G., Jiao, K., and Li, X. (2012). Measurement of current distribution in a proton exchange membrane fuel cell with various flow arrangements - A parametric study. *Applied Energy*, 93, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.033>
- Alaefour, I., Shahgaldi, S., Ozden, A., Li, X., and Hamdullahpur, F. (2018). The role of flow-field layout on the conditioning of a proton exchange membrane fuel cell. *Fuel*, 230(February), 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.05.062>
- Alizadeh, E., Rahimi-Esbo, M., Rahgoshay, S. M., Saadat, S. H. M., and Khorshidian, M. (2017). Numerical and experimental investigation of cascade type serpentine flow field of reactant gases for improving performance of PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(21), 14708–14724. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.212>
- Amdoun, R., Benyoussef, E. H., Benamghar, A., and Khelifi, L. (2019). Prediction of hyoscyamine content in *Datura stramonium* L. hairy roots using different modeling approaches: Response Surface Methodology (RSM), Artificial Neural Network (ANN) and Kriging. *Biochemical Engineering Journal*, 144(January), 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.01.002>
- Ansys. (2006). *Fuel Cell Modules Manual*.
- ANSYS Inc. (2011). *Tutorial : Modeling a Single-Channel , Counter-Flow Polymer Electrolyte Membrane ( PEM ) Fuel Cell*.
- Antunes, R. A., De Oliveira, M. C. L., Ett, G., and Ett, V. (2011). Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance. *Journal of Power Sources*, 196(6), 2945–2961. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.041>
- Arun Saco, S., Thundil Karuppa Raj, R., and Karthikeyan, P. (2016). A study on scaled up proton exchange membrane fuel cell with various flow channels for optimizing

- power output by effective water management using numerical technique. *Energy*, 113, 558–573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.079>
- Arvay, A., French, J., Wang, J. C., Peng, X. H., and Kannan, A. M. (2013). Nature inspired flow field designs for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(9), 3717–3726. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.149>
- Ashrafi, M., Kanani, H., and Shams, M. (2018). Numerical and experimental study of two-phase flow uniformity in channels of parallel PEM fuel cells with modified Z-type flow-fields. *Energy*, 147, 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.064>
- Aslam, R. M., Ingham, D. B., Ismail, M. S., Hughes, K. J., Ma, L., and Pourkashanian, M. (2018). Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels. *Journal of the Energy Institute*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.005>
- Bachman, J., Charvet, M., Santamaria, A., Tang, H. Y., Park, J. W., and Walker, R. (2012). Experimental investigation of the effect of channel length on performance and water accumulation in a PEMFC parallel flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(22), 17172–17179. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.023>
- Bachman, J., Santamaria, A., Tang, H. Y., and Park, J. W. (2012). Investigation of polymer electrolyte membrane fuel cell parallel flow field with induced cross flow. *Journal of Power Sources*, 198, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.09.047>
- Banerjee, R., Howe, D., Mejia, V., and Kandlikar, S. G. (2014). Experimental validation of two-phase pressure drop multiplier as a diagnostic tool for characterizing PEM fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(31), 17791–17801. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.118>
- Barati, S., Khoshandam, B., and Ghazi, M. M. (2018). An investigation of channel blockage effects on hydrogen mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with various geometries and optimization by response surface methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(48), 21928–21939. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.032>
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. *Pem Fuel Cells: Theory and Practice*. <https://doi.org/10.1016/b978-012078142-3/50002-1>
- Barbir, F., Gorgun, H., and Wang, X. (2005). Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 141(1), 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.08.055>
- Baricci, A., Mereu, R., Messaggi, M., Zago, M., Inzoli, F., and Casalegno, A. (2017). Application of computational fluid dynamics to the analysis of geometrical features in PEM fuel cells flow fields with the aid of impedance spectroscopy. *Applied*

Energy, 205(August), 670–682. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.017>

Bayrak, S. M. 2011. Proton Değişimli Membran(PEM)Yakıt Hücresinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ben Amara, M. E. A., and Ben Nasrallah, S. (2015). Numerical simulation of droplet dynamics in a proton exchange membrane (PEMFC) fuel cell micro-channel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(2), 1333–1342. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.077>

Bilgili, M. 2011. Akış Kanalları İçerisindeki Yarı Silindirik Blokların PEM Yakıt Pili Performansına Etkisinin Üç Boyutlu Analizi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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*, 40(5), 2303–2311. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.139>

Çağlayan, D. G., Sezgin, B., Devrim, Y., and Eroglu, I. (2016). Three-dimensional modeling of a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell at different operation temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(23), 10060–10070. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.049>

Çağlayan, D. G., Sezgin, B., Devrim, Y., and Eroglu, I. (2018). Three-dimensional non-isothermal model development of high temperature PEM Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(23), 10834–10841. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.176>

Çalışır, O. 2014. Termoelektrik jeneratörlerde atık ısı kullanımına bir uygulama : PEM yakıt pili atık ısısının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Cao, T. F., Lin, H., Chen, L., He, Y. L., and Tao, W. Q. (2013). Numerical investigation of the coupled water and thermal management in PEM fuel cell. *Applied Energy*, 112, 1115–1125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.031>

Carton, J. G., Lawlor, V., Olabi, A. G., Hochenauer, C., and Zauner, G. (2012). Water droplet accumulation and motion in PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell mini-channels. *Energy*, 39(1), 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.023>

Carton, J. G., & Olabi, A. G. (2017). Three-dimensional proton exchange membrane fuel cell model: Comparison of double channel and open pore cellular foam flow plates. *Energy*, 136, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.010>

Çengel, Y., and Boles, M. (2008). Termodinamik. Güven Bilimsel.

Chavan, S. L., and Talange, D. B. (2017). Modeling and performance evaluation of PEM fuel cell by controlling its input parameters. *Energy*, 138, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.070>

- Chavan, S. L., and Talange, D. B. (2018). System identification black box approach for modeling performance of PEM fuel cell. *Journal of Energy Storage*, 18(May), 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.05.014>
- Chen, S., and Wu, Y. (2010). Gravity effect on water discharged in PEM fuel cell cathode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7), 2888–2893. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.111>
- Chen, S., Zhang, X., and Liu, H. (2017). Effect of pressure difference between adjacent channels in an adjustable flow field in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7), 4667–4672. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.164>
- Chevalier, S., Josset, C., and Auvity, B. (2018). Analytical solutions and dimensional analysis of pseudo 2D current density distribution model in PEM fuel cells. *Renewable Energy*, 125, 738–746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.120>
- Choi, K. S., Kim, H. M., and Moon, S. M. (2011). Numerical studies on the geometrical characterization of serpentine flow-field for efficient PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(2), 1613–1627. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.073>
- Chowdhury, M. Z. 2017. Pem yakıt pili için yeni akış alanlarının tasarımı ve optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Chowdhury, M. Z., and Akansu, Y. E. (2017). Novel convergent-divergent serpentine flow fields effect on PEM fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25686–25694. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.079>
- 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*, 43(23), 10798–10809. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.149>
- Çırak, B. B. 2011. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili Optimizasyonu. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı
- Cooper, N. J., Santamaria, A. D., Becton, M. K., and Park, J. W. (2017). Investigation of the performance improvement in decreasing aspect ratio interdigitated flow field PEMFCs. *Energy Conversion and Management*, 136, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.005>
- Cooper, N. J., Smith, T., Santamaria, A. D., and Park, J. W. (2016). Experimental optimization of parallel and interdigitated PEMFC flow-field channel geometry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2), 1213–1223. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.153>
- Damian-Ascencio, C. E., Saldaña-Robles, A., Hernandez-Guerrero, A., and Cano-Andrade, S. (2017). Numerical modeling of a proton exchange membrane fuel cell

- with tree-like flow field channels based on an entropy generation analysis. *Energy*, 133, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.139>
- Das, S. K., and Bansode, A. S. (2009). Heat and mass transport in proton exchange membrane fuel cells - A review. *Heat Transfer Engineering*, 30(9), 691–719. <https://doi.org/10.1080/01457630802677997>
- Dokkar, B., Settou, N. E., Imine, O., Saifi, N., Negrou, B., and Nemouchi, Z. (2011). Simulation of species transport and water management in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(6), 4220–4227. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.09.060>
- Ekiz, A., Camcı, T., Türkmen, İ., Sankır, M., Uslu, S., Baker, D., and Ağar, E. (2011). PEM tipi yakıt pilleri için çift kutuplu akış plakalarının modellenmesi, 26(3), 591–605.
- Elbaş, ř. 2018. Nanoakışkanlı Mini Kanallarda Optimum Tasarım Parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi ile Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Erdener, H., Gür, N., Erkan, S., şengül, E., Eroğlu, E., and Baç, N. (2013). Sürdürülebilir enerji ve hidrojen. Odtü Yayıncılık.
- Erkan, H. E. 2009. Hidrojen Yakıt Pili Membran Elektrot Bileşkesinin Tasarımı ve Yığımlarının İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
- Falcão, D. S., Gomes, P. J., Oliveira, V. B., Pinho, C., and Pinto, A. M. F. R. (2011). 1D and 3D numerical simulations in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(19), 12486–12498. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.133>
- Ferng, Y. M., and Su, A. (2007). A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), 4466–4476. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.012>
- Ghanbarian, A., and Kermani, M. J. (2016). Enhancement of PEM fuel cell performance by flow channel indentation. *Energy Conversion and Management*, 110, 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.036>
- Ghanbarian, A., Kermani, M. J., Scholta, J., and Abdollahzadeh, M. (2018). Polymer electrolyte membrane fuel cell flow field design criteria – Application to parallel serpentine flow patterns. *Energy Conversion and Management*, 166(March), 281–296. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.018>
- Ghasemi, M., Ramiar, A., Ranjbar, A. A., and Rahgoshay, S. M. (2017). A numerical study on thermal analysis and cooling flow fields effect on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 24319–24337. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.036>

- Göbbling, S., Klages, M., Haußmann, J., Beckhaus, P., Messerschmidt, M., Arlt, T., ... Heinzl, A. (2016). Analysis of liquid water formation in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell flow fields with a dry cathode supply. *Journal of Power Sources*, 306, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.060>
- Haghighayegh, M., Eikani, M. H., and Rowshanzamir, S. (2017). Modeling and simulation of a proton exchange membrane fuel cell using computational fluid dynamics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(34), 21944–21954. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.098>
- Han, I. S., Park, S. K., and Chung, C. B. (2016). Modeling and operation optimization of a proton exchange membrane fuel cell system for maximum efficiency. *Energy Conversion and Management*, 113, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.045>
- 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*, 55(3–4), 1540–1557. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.047>
- Heidary, H., Kermani, M. J., and Dabir, B. (2016). Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances. *Energy Conversion and Management*, 124, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.043>
- Heidary, H., Kermani, M. J., Prasad, A. K., Advani, S. G., and Dabir, B. (2017). Numerical modelling of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2265–2277. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.076>
- Higier, A., and Liu, H. (2010). Optimization of PEM fuel cell flow field via local current density measurement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(5), 2144–2150. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.116>
- Hou, Y., Zhang, G., Qin, Y., Du, Q., and Jiao, K. (2017). Numerical simulation of gas liquid two-phase flow in anode channel of low-temperature fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(5), 3250–3258. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.219>
- Hsieh, S. S., Her, B. S., and Huang, Y. J. (2011). Effect of pressure drop in different flow fields on water accumulation and current distribution for a micro PEM fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 975–982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.025>
- Hu, M., and Cao, G. (2016). Research on the performance differences between a standard PEMFC single cell and transparent PEMFC single cells using optimized transparent flow field unit-Part I: Design optimization of a transparent flow field unit. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2955–2966. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.144>
- Iranzo, A., Muñoz, M., Rosa, F., and Pino, J. (2010). Numerical model for the



- performance prediction of a PEM fuel cell. Model results and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11533–11550. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.129>
- Jeon, D. H., Greenway, S., Shimpalee, S., and Van Zee, J. W. (2008). The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(3), 1052–1066. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.015>
- Jia, S., and Liu, H. (2017). Numerical Modeling with Electrochemical Active Area (ECA) Distribution in the Lateral Direction in a PEM Fuel Cell. *Energy Procedia*, 105, 1513–1519. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.456>
- Kahraman, H., Haşimoğlu, C., Çevik, İ., and Murcak, A. (2017). A Different Flow Field Design Approach for Performance Improvement of a PEMFC. *Acta Physica Polonica A*, 131(3), 484–487. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.484>
- Kahraman, H., and Orhan, M. F. (2017). Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling. *Energy Conversion and Management*, 133, 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.053>
- Kahveci, E. E., and Taymaz, I. (2014). Experimental investigation on water and heat management in a PEM fuel cell using response surface methodology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10655–10663. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.195>
- Kahveci, E. E., and Taymaz, I. (2017). A Three-Dimensional Model of Single PEM Fuel Cell Having Triple-Serpentine Flow Channel Developed with CFD, 2(1), 155–163.
- Kahveci, E. E., and Taymaz, I. (2018). Assessment of single-serpentine PEM fuel cell model developed by computational fluid dynamics. *Fuel*, 217(January), 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.073>
- Kanani, H., Shams, M., Hasheminasab, M., and Bozorgnezhad, A. (2015). Model development and optimization of operating conditions to maximize PEMFC performance by response surface methodology. *Energy Conversion and Management*, 93, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.093>
- Karaoğlan, M. U., and Kurulay, N. S. (2014). Pem yakit hücresi modeli. *Mühendis ve Makina*, 55(657), 51–58.
- Kaya, D., Öztürk, H. H., and Kayfeci, M. (2017). *Hidrojen ve Yakıt Pili Teknolojisi*. Umuttepe Yayınları.
- Khazae, I., Ghazikhani, M., and Mohammadiun, M. (2012). Experimental and thermodynamic investigation of a triangular channel geometry PEM fuel cell at different operating conditions. *Scientia Iranica*, 19(3), 585–593. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.11.039>
- khazae, I., and Sabadbafan, H. (2016). Effect of humidity content and direction of the

flow of reactant gases on water management in the 4-serpentine and 1-serpentine flow channel in a PEM (proton exchange membrane) fuel cell. *Energy*, 101, 252–265. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.026>

Kim, J., Luo, G., and Wang, C. Y. (2017). Modeling two-phase flow in three-dimensional complex flow-fields of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 365, 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.003>

Kılıçoğlu, A. E. 2008. Pem Yakıt Pilinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Modellenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği

Köseler, S. 2009. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi Membran Elektrolit Bileşkesinin Optimizasyonu.Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Krastev, V. K., Falcucci, G., Jannelli, E., Minutillo, M., and Cozzolino, R. (2014). 3D CFD modeling and experimental characterization of HT PEM fuel cells at different anode gas compositions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36), 21663–21672. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.015>

Le, A. D., and Zhou, B. (2008). A general model of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 182(1), 197–222. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.047>

Li, M., Luo, S., Zeng, C., Shen, J., Lin, H., and Cao, C. (2004). Corrosion behavior of TiN coated type 316 stainless steel in simulated PEMFC environments. *Corrosion Science*, 46(6), 1369–1380. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00187-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00187-2)

Li, W., Zhang, Q., Wang, C., Yan, X., Shen, S., Xia, G., ... Zhang, J. (2017). Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEMFCs. *Applied Energy*, 195, 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.008>

Li, X., and Sabir, I. (2005). Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(4), 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.019>

Li, Y., Pei, P., Wu, Z., Ren, P., Jia, X., Chen, D., and Huang, S. (2018). Approaches to avoid flooding in association with pressure drop in proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 224(February), 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.071>

Lilavivat, V., Shimpalee, S., Van Zee, J. W., Xu, H., and Mittelsteadt, C. K. (2015). Current Distribution Mapping for PEMFCs. *Electrochimica Acta*, 174, 1253–1260. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.06.081>

Lim, B. H., Majlan, E. H., Daud, W. R. W., Husaini, T., and Rosli, M. I. (2016). Effects of flow field design on water management and reactant distribution in PEMFC: a review. *Ionics*, 22(3), 301–316. <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1644-y>

- Lim, B. H., Majlan, E. H., Daud, W. R. W., Rosli, M. I., and Husaini, T. (2017). Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9210–9218. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.189>
- Lobato, J., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., Pinar, F. J., Mena, E., and Úbeda, D. (2010). Three-dimensional model of a 50 cm<sup>2</sup> high temperature PEM fuel cell. Study of the flow channel geometry influence. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11), 5510–5520. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.089>
- Luo, S., and Liu, H. (2014). Direct measurement of current density under land and two channels in PEM fuel cells with interdigitated flow fields. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(17), 9440–9446. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.037>
- Mancusi, E., Fontana, É., Ulson De Souza, A. A., and Guelli Ulson De Souza, S. M. A. (2014). Numerical study of two-phase flow patterns in the gas channel of PEM fuel cells with tapered flow field design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(5), 2261–2273. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.106>
- Manso, A. P., Marzo, F. F., Barranco, J., Garikano, X., and Garmendia Mujika, M. (2012). Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15256–15287. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.076>
- Manso, A. P., Marzo, F. F., Mujika, M. G., Barranco, J., and Lorenzo, A. (2011). Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), 6795–6808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.099>
- Movahedi, M., Ramiar, A., and Ranjber, A. A. (2018). 3D numerical investigation of clamping pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell with interdigitated flow field. *Energy*, 142, 617–632. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.020>
- Muthukumar, M., Karthikeyan, P., Vairavel, M., Loganathan, C., Praveenkumar, S., and Senthil Kumar, A. P. (2014). Numerical studies on PEM fuel cell with different landing to channel width of flow channel. *Procedia Engineering*, 97, 1534–1542. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.437>
- Nie, J., and Chen, Y. (2010). Numerical modeling of three-dimensional two-phase gas-liquid flow in the flow field plate of a PEM electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), 3183–3197. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.050>
- Nie, J., Chen, Y., Cohen, S., Carter, B. D., and Boehm, R. F. (2009). Numerical and experimental study of three-dimensional fluid flow in the bipolar plate of a PEM electrolysis cell. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(10), 1914–1922. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.02.017>

- Obayopo, S. O., Bello-Ochende, T., and Meyer, J. P. (2012). Modelling and optimization of reactant gas transport in a PEM fuel cell with a transverse pin fin insert in channel flow. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(13), 10286–10298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.150>
- Oral, E. 2005. Hidrojen Yakıtlı Proton Dönüşüm Zarlı Yakıt Pili ve Modellenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Osanloo, B., Mohammadi-Ahmar, A., and Solati, A. (2016). A numerical analysis on the effect of different architectures of membrane, CL and GDL layers on the power and reactant transportation in the square tubular PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(25), 10844–10853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.228>
- Özdemir, B. 2012. Serpantin Kanallı PEM Yakıt Hücresinin Sayısal Analizi.Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Öztürk, A. 2016. PEM Yakıt Pillerinde Su Yönetiminin İyileştirilmesi İçin Hidrofobik Malzeme Geliştirilmesi.Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
- Pei, P., Li, Y., Xu, H., and Wu, Z. (2016). A review on water fault diagnosis of PEMFC associated with the pressure drop. *Applied Energy*, 173, 366–385. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.064>
- Rahgoshay, S. M., Ranjbar, A. A., Ramiar, A., and Alizadeh, E. (2017). Thermal investigation of a PEM fuel cell with cooling flow field. *Energy*, 134, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.151>
- Rahimi-Esbo, M., Ramiar, A., Ranjbar, A. A., and Alizadeh, E. (2017). Design, manufacturing, assembling and testing of a transparent PEM fuel cell for investigation of water management and contact resistance at dead-end mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 11673–11688. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.030>
- Rahimi-Esbo, M., Ranjbar, A. A., Ramiar, A., Alizadeh, E., and Aghaee, M. (2016). Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 3023–3037. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.001>
- Ramos-Alvarado, B., Hernandez-Guerrero, A., Juarez-Robles, D., and Li, P. (2012). Numerical investigation of the performance of symmetric flow distributors as flow channels for PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 436–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.080>
- Roshandel, R., Arbabi, F., and Moghaddam, G. K. (2012). Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells. *Renewable Energy*, 41, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.008>

- Rostami, L., Mohamad Gholy Nejad, P., and Vatani, A. (2016). A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energy*, 97, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.132>
- Roudbari, M. N., Ojani, R., and Raoof, J. B. (2019). Performance improvement of polymer fuel cell by simultaneously inspection of catalyst loading, catalyst content and ionomer using home-made cathodic half-cell and response surface method. *Energy*, 173, 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.082>
- Sadiq Al-Baghdadi, M. A. R., and Shahad Al-Janabi, H. A. K. (2007). Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model. *Renewable Energy*, 32(7), 1077–1101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.018>
- Sajid Hossain, M., Shabani, B., and Cheung, C. P. (2017). Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(8), 5272–5283. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.042>
- Salva, J. A., Iranzo, A., Rosa, F., and Tapia, E. (2016). Experimental validation of the polarization curve and the temperature distribution in a PEMFC stack using a one dimensional analytical model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20615–20632. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.152>
- Santamaria, A. D., Cooper, N. J., Becton, M. K., and Park, J. W. (2013). Effect of channel length on interdigitated flow-field PEMFC performance: A computational and experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(36), 16253–16263. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.081>
- Seyhan, M., Akansu, Y. E., Murat, M., Korkmaz, Y., and Akansu, S. O. (2017). Performance prediction of PEM fuel cell with wavy serpentine flow channel by using artificial neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25619–25629. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.001>
- Shimpalee, S., Lilavivat, V., McCrabb, H., Khunatorn, Y., Lee, H. K., Lee, W. K., and Weidner, J. W. (2016). Investigation of bipolar plate materials for proton exchange membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(31), 13688–13696. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.163>
- Shimpalee, S., Lilavivat, V., Van Zee, J. W., McCrabb, H., and Lozano-Morales, A. (2011). Understanding the effect of channel tolerances on performance of PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(19), 12512–12523. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.146>
- Silva, R. F., Franchi, D., Leone, A., Pilloni, L., Masci, A., and Pozio, A. (2006). Surface conductivity and stability of metallic bipolar plate materials for polymer electrolyte fuel cells. *Electrochimica Acta*, 51(17), 3592–3598. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.10.015>

- Singdeo, D., Dey, T., Gaikwad, S., Andreasen, S. J., and Ghosh, P. C. (2017). A new modified-serpentine flow field for application in high temperature polymer electrolyte fuel cell. *Applied Energy*, 195, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.022>
- Spernjak, D., Prasad, A. K., and Advani, S. G. (2010). In situ comparison of water content and dynamics in parallel, single-serpentine, and interdigitated flow fields of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 195(11), 3553–3568. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.031>
- Subaşı, A. 2010. Yanıt Yüzey Yöntemiyle Isı Değiştirici Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- Taccani, R., and Zuliani, N. (2011). Effect of flow field design on performances of high temperature PEM fuel cells: Experimental analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(16), 10282–10287. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.026>
- Taherian, R. (2014). A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. *Journal of Power Sources*, 265, 370–390. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.081>
- Tamerabet, M., Hocine, B. M., Youcef, S., and Abdallah, M. (2017). Unsteady three-dimensional numerical study of mass transfer in PEM fuel cell with spiral flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(2), 1237–1251. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.084>
- Tijani, A. S., Barr, D., and Rahim, A. H. A. (2015). Computational Modelling of the Flow Field of An Electrolyzer System using CFD. *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.462>
- 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*, 80, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.063>
- Vazifeshenas, Y., Sedighi, K., and Shakeri, M. (2015). Numerical investigation of a novel compound flow-field for PEMFC performance improvement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(43), 15032–15039. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.077>
- 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*, 43(3), 1225–1234. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2813-7>
- Versteeg, H., and Malalasekera, W. (2007). Conservation laws of fluid motion and boundary conditions. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Vol. M).

- Wang, J. (2015). Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: A critical review. *Applied Energy*, 157, 640–663. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.032>
- Wang, L., Husar, A., Zhou, T., and Liu, H. (2003). A parametric study of PEM fuel cell performances. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(11), 1263–1272. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00284-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00284-7)
- Wang, X. D., Huang, Y. X., Cheng, C. H., Jang, J. Y., Lee, D. J., Yan, W. M., and Su, A. (2010). An inverse geometry design problem for optimization of single serpentine flow field of PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(9), 4247–4257. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.059>
- Wang, Y., Wang, S., Wang, G., and Yue, L. (2017). Numerical study of a new cathode flow-field design with a sub-channel for a parallel flow-field polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4), 2359–2368. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.172>
- Wang, Y., Yue, L., and Wang, S. (2017). New design of a cathode flow-field with a sub-channel to improve the polymer electrolyte membrane fuel cell performance. *Journal of Power Sources*, 344, 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.075>
- Wang, Z., Zeng, Y., Sun, S., Shao, Z., and Yi, B. (2017). Improvement of PEMFC water management by employing water transport plate as bipolar plate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(34), 21922–21929. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.052>
- Wawdee, P., Limtrakul, S., Vatanatham, T., and Fowler, M. W. (2015). Water transport in a PEM fuel cell with slanted channel flow field plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(9), 3739–3748. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.037>
- Wen, D. hui, Yin, L. zhi, Piao, Z. yu, Lu, C. da, Li, G., and Leng, Q. hui. (2018). Performance investigation of proton exchange membrane fuel cell with intersectant flow field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 775–787. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.053>
- Yan, W. M., Yang, C. H., Soong, C. Y., Chen, F., and Mei, S. C. (2006). Experimental studies on optimal operating conditions for different flow field designs of PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 160(1), 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.031>
- Yaslan, S. 2014. Fotovoltaik Pille Beslemesi Yapılan Hidrojen PEM Yakıt Pili Sisteminin Verimliliği Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Anabilim Dalı
- Yılmaz, B. (2006). Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri için Anot Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yuan, W., Tang, Y., Pan, M., Li, Z., and Tang, B. (2010). Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance. *Renewable Energy*, 35(3), 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.017>

Zehtabiyani-Rezaie, N., Arefian, A., Kermani, M. J., Noughabi, A. K., and Abdollahzadeh, M. (2017). Effect of flow field with converging and diverging channels on proton exchange membrane fuel cell performance. *Energy Conversion and Management*, 152(August), 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.009>





## EKLER

### EK-1 Mol Kesirlerinin Hesaplanması

Yakıt pilinin anot kısmından hidrojen ve su buharı karışımı, katot kısmından ise oksijen ve su buharı karışımı beslenmektedir. Her iki taraftan da %100 nemlendirme yapılmakta ( $T=70^{\circ}\text{C}$  su buharı) ve saf oksijen ve saf hidrojen beslenmektedir. Aşağıdaki hesaplar yapılırken beslenen gazların ideal gaz gibi davrandıkları kabul edilmiş ve hesaplamalarda  $R_{H_2O} = 0,4615 \text{ kJ/kg.K}$ ,  $R_{H_2} = 4,124 \text{ kJ/kg.K}$ ,  $R_{O_2} = 0,2598 \text{ kJ/kg.K}$  olarak alınmıştır.

#### Anot tarafı mol kesri hesaplanması ( $\dot{m}_{an} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{H_2O}$ )

Anot gaz kanalı girişinden hidrojen ve su buharı girişi olmaktadır.  $T=70^{\circ}\text{C}$  için doymuş buhar tablosundan su buhar basıncı  $P_{H_2O@70^{\circ}\text{C}} = 31,19 \text{ kPa}$  olarak bulunur. Gaz karışımının tamamen nemlendirilmiş olduğu kabul edilerek bağıl nem  $\phi = 1$  alınır.

Su buharı kısmı basıncı;

$$P_{H_2O} = \phi \cdot P_{H_2O@70^{\circ}\text{C}} = 31,19 \text{ kPa}$$

$$\text{Hidrojenin kısmı basıncı} = P_{H_2} = P - P_{H_2O} = 101,325 - 31,19 = 70,135 \text{ kPa}$$

Anot tarafı nem oranı ideal gaz denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$W = \frac{P_{H_2O} \cdot V / R_{H_2O} \cdot T}{P_{H_2} \cdot V / R_{H_2} \cdot T} = \frac{R_{H_2} \cdot P_{H_2O}}{R_{H_2O} \cdot P_{H_2}} = 8,936 \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} = 8,936 \frac{31,19}{70,135} = 3,973 \frac{\text{kg} \cdot H_2O}{\text{kg} \cdot H_2}$$

Özgül hacimler cinsinden kütle korunum denklemi yazılırsa;

$$\frac{1}{V_{H_2}} + \frac{1}{V_{H_2O}} = \frac{1}{V_{an}}$$

Hidrojen ve su buharının ideal gaz olduğu kabulü yapılarak;

$$V_{H_2} = \frac{R_{H_2} \cdot T}{P_{H_2}} = \frac{4,124 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 343\text{K}}{70,135\text{kPa}} = 20,168 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{H_2O} = \frac{R_{H_2O} \cdot T}{P_{H_2O}} = \frac{0,4615 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 343K}{31,19kPa} = 5,077 \frac{m^3}{kg}$$

$$\frac{1}{V_{an}} = \frac{1}{V_{H_2}} + \frac{1}{V_{H_2O}} = \frac{1}{5,077} + \frac{1}{20,168}$$

$$V_{an} = 4,055 \text{ m}^3/kg$$

Anot girişindeki gazların toplam kütleli debisi; anot girişi hacimsel debisinin( $\dot{U}_{an}$ ) anot gazı özgül hacmine( $V_{an}$ ) oranıdır:

$$\dot{m}_{an} = \frac{0,25 \frac{lt}{dk} * \frac{1dk}{60sn} * \frac{1m^3}{1000lt}}{4,055 \frac{m^3}{kg}} = 3,7 * 10^{-3} \frac{kg}{sn}$$

Anot gaz girişi kütleli akış miktarı, hidrojen ve su buharı kütleli akış oranlarının toplamıdır,

$$\dot{m}_{an} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{H_2O}$$

Anot girişindeki gaz karışımının nemliliği, su buharı miktarının hidrojen miktarına oranıdır;

$$W = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{H_2}}$$

$$\dot{m}_{an} = \dot{m}_{H_2} + W \cdot \dot{m}_{H_2}$$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{an}}{W + 1} = \frac{3,7 * 10^{-3} \frac{kg}{sn}}{3,973 + 1} = 7,44 * 10^{-4} \frac{kg}{sn}$$

Hidrojen mol kesri;

$$\dot{y}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{an}} = \frac{7,44 * 10^{-4} \frac{kg}{sn}}{3,7 * 10^{-3} \frac{kg}{sn}} = 0,201$$

Su buharı kütle kesri;

$$\dot{y}_{H_2O} = 1 - 0,201 = 0,799$$

**Katot tarafı mol kesri hesaplanması ( $\dot{m}_{kat} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O}$ )**

Katot gaz kanalı girişinde oksijen ve su buharı karışımı yakıt piline dâhil olmaktadır.  $T=70^\circ\text{C}$  için doymuş buhar tablosundan su buhar basıncı  $P_{H_2O@70^\circ\text{C}} = 31,19 \text{ kPa}$  olarak bulunur. Gaz karışımının tamamen nemlendirilmiş olduğu kabul edilerek bağıl nem  $\phi = 1$  alınır.

Su buharı kısmı basıncı;

$$P_{H_2O} = \phi \cdot P_{H_2O@70^\circ\text{C}} = 31,19 \text{ kPa}$$

$$\text{Oksijenin kısmı basıncı} = P_{O_2} = P - P_{H_2O} = 101,325 - 31,19 = 70,135 \text{ kPa}$$

Katot tarafı nem oranı ideal gaz denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$W = \frac{P_{H_2O} \cdot V / R_{H_2O} \cdot T}{P_{O_2} \cdot V / R_{O_2} \cdot T} = \frac{R_{O_2} \cdot P_{H_2O}}{R_{H_2O} \cdot P_{O_2}} = 0,5629 \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} = 0,5629 \frac{31,19}{70,135} = 0,250 \frac{kg \cdot H_2O}{kg \cdot O_2}$$

Özgül hacimler cinsinden kütle korunum denklemi yazılırsa;

$$\frac{1}{V_{O_2}} + \frac{1}{V_{H_2O}} = \frac{1}{V_{kat}}$$

Oksijen ve su buharının ideal gaz olduğu kabulü yapılarak;

$$V_{O_2} = \frac{R_{O_2} \cdot T}{P_{O_2}} = \frac{0,2598 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 343K}{70,135kPa} = 1,222 \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{H_2O} = \frac{R_{H_2O} \cdot T}{P_{H_2O}} = \frac{0,4615 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 343K}{31,19kPa} = 5,077 \frac{m^3}{kg}$$

$$\frac{1}{V_{kat}} = \frac{1}{V_{O_2}} + \frac{1}{V_{H_2O}} = \frac{1}{1,222} + \frac{1}{5,077}$$

$$V_{kat} = 0,984 \frac{m^3}{kg}$$

Katot girişindeki gazların toplam kütleli debisi; katot girişi hacimsel debisinin ( $\dot{U}_{kat}$ ) katot gazı özgül hacmine ( $V_{kat}$ ) oranıdır:

$$\dot{m}_{kat} = \frac{0,25 \frac{lt}{dk} * \frac{1dk}{60sn} * \frac{1m^3}{1000lt}}{0,984 \frac{m^3}{kg}} = 4,23 * 10^{-6} \frac{kg}{sn}$$

Katot gaz girişi kütleli akış miktarı, oksijen ve su buharı kütleli akış oranlarının toplamıdır,

$$\dot{m}_{kat} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O}$$

Katot girişindeki gaz karışımının nemliliği, su buharı miktarının oksijen miktarına oranıdır;

$$W = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{O_2}}$$

$$\dot{m}_{kat} = \dot{m}_{O_2} + W \cdot \dot{m}_{O_2}$$

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{\dot{m}_{kat}}{W + 1} = \frac{4,23 * 10^{-6} \frac{kg}{sn}}{0,250 + 1} = 3,384 * 10^{-6} \frac{kg}{sn}$$

Oksijen mol kesri;

$$y_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{kat}} = \frac{3,384 * 10^{-6} \frac{kg}{sn}}{4,23 * 10^{-6} \frac{kg}{sn}} = 0,8$$

Su buharı kütle kesri;

$$\dot{y}_{H_2O} = 1 - 0,8 = 0,2$$

**Çizelge Ek 1. 1.** Anot, katot debi ve kütle kesirleri

Anot giriş debisi(lt/dk)	Katot giriş debisi(lt/dk)	Anot kütle kesri		Katot kütle kesri	
		$y_{H_2}$	$y_{H_2O}$	$y_{O_2}$	$y_{H_2O}$
$\dot{U}_{an}$	$\dot{U}_{kat}$				
0,25 lt/dk	0,25 lt/dk	0,201	0,799	0,8	0,2

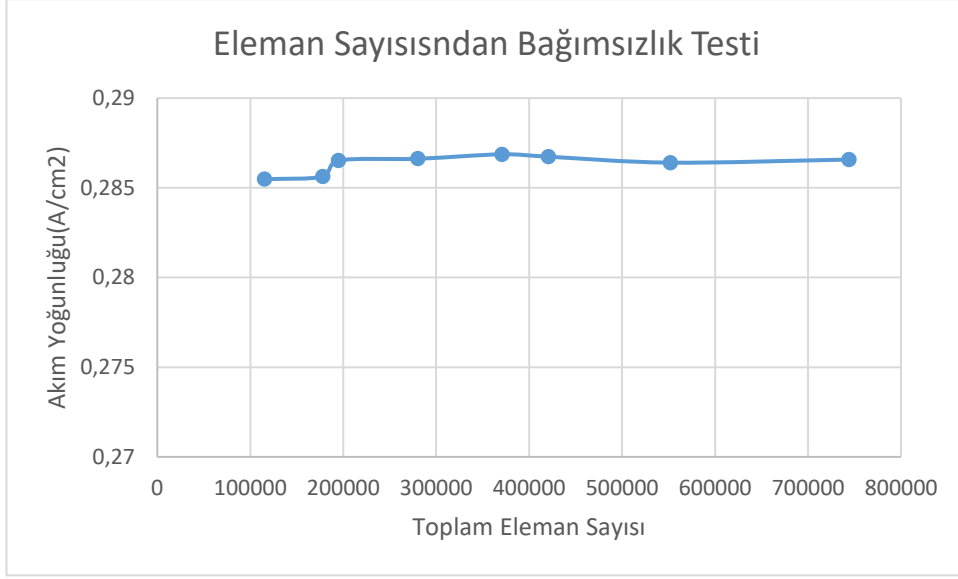
## EK-2 Sonuçların Eleman Sayısından Bağımsızlık Testi

Bu tez çalışması kapsamında 5 farklı model tasarlanmıştır, tasarlanan bu modellere ilişkin çözüm süresinin kısa olması ve elde edilen sonuçların doğru olması için örnek bir model üzerinde eleman sayısından bağımsızlık testi yapılarak; örnek model üzerinde elde edilen sonuçlar diğer modellere uygulanmıştır. Eleman sayısından bağımsızlık testi için kullanılan model; literatürde temel parametrelerin yakıt pili üzerine etkisini araştırmak üzere kullanılan tek kanallı bir modeldir. Elde edilen veriler ışığında; katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları, membran, gaz akış kanalları ve akım toplama plakalarında elde edilen optimum mesh boyutları ve mesh yöntemleri çalışma da kullanılan modeller için uygulanmıştır. Çözüm süresi sütununda verilen süreler 300 iterasyon değeri ve 0.6 V pil voltajı elde edilirken kaydedilen sonuçlardır. Pil voltajının değişmesi ile birlikte çözüm süresinin de değişebileceği unutulmamalıdır.

**Çizelge Ek 2. 1.** Akım yoğunluğunun eleman sayısına bağlı olarak değişimi

Toplam Eleman Sayısı	Eleman Boyutu (mm)	Akım Yoğunluğu(A/cm <sup>2</sup> )	Akım Yoğunluğu değişimi (%)	Çözüm Süresi (dk)
115200	0,25	0,285476	%0,36	9dk 58 sn
177840	0,22	0,285625	%0,31	14 dk 57 sn
195000	0,20	0,286521	Referans Değer	15 dk 2 sn
280224	0,18	0,286618	%0,03	24 dk 55 sn
370880	0,165	0,286867	%0,12	29 dk 54 sn
420840	0,15	0,286733	%0,07	32 dk 19 sn
552048	0,135	0,286401	%0,04	44 dk 51 sn
743928	0,12	0,286572	%0,01	1 s 4 dk 47 sn

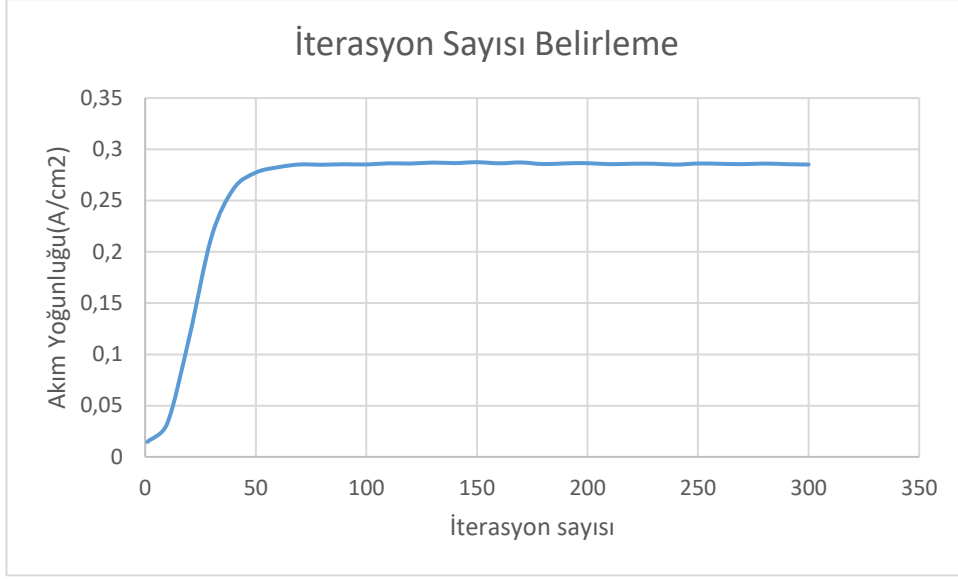
$$\% \text{ Akım Yoğunluğu Değişimi} = \left| \frac{\text{Akım Yoğunluğu} - \text{Referans Değer}}{\text{Referans Değer}} \right| \times 100$$
 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil Ek 2. 1.** Sonuçların eleman sayısından bağımsızlık testi

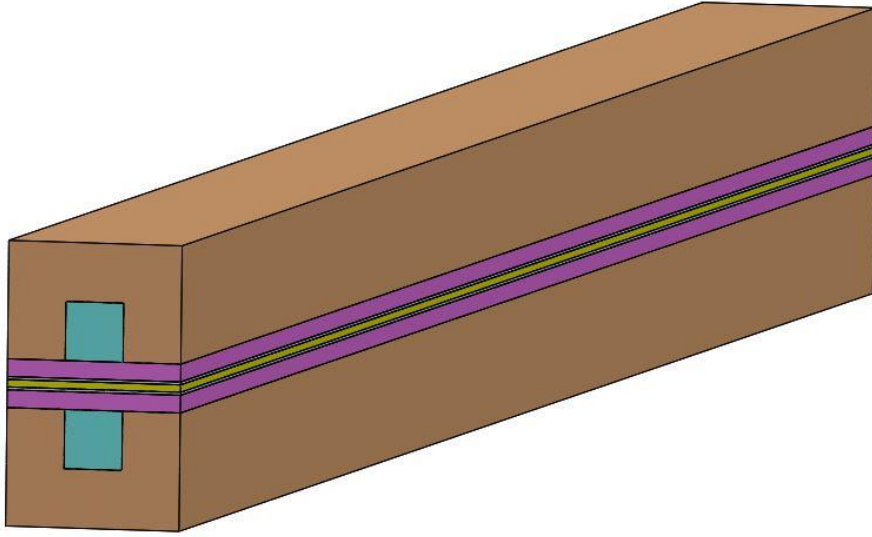
Bu tez kapsamında farklı akış alanı tasarımları çalışılması sebebiyle eleman sayısı belirleme işlemi literatürde kullanılan bir geometri üzerinden belirlenmiştir. Eleman sayısını belirlemekteki amaç eleman sayısından eleman boyutuna ulaşmak ve belirlenmiş olan eleman boyutunu diğer geometrilere de uygulamaktır.

Eleman boyutu belirlenmesi işleminden sonra iterasyon sayısı belirleme işlemi yapılmıştır. Literatürden de anlaşılacağı üzere yakıt pillerinin sayısal çözümlenmesi işleminde evrensel bir yakınsam kriteri bulunmamaktadır. Kabul edilen en mantıklı metot akım yoğunluğunun değişimini gözlemlemektir. Bu tez kapsamında çözülen bütün geometriler aynı iterasyon sayısında çözümlenmiştir. Tez çalışmasında model 1 olarak adlandırılan geometrinin çözümlenmesi esnasında her 10 iterasyonda bir akım yoğunluğu değeri kaydedilmiş ve akım yoğunluğunun belli bir iterasyondan sonra değişmediği gözlemlenmiştir. Model 1 için Akım yoğunluğunun iterasyonla değişimini gösteren grafik Şekil Ek 2.2 de verilmiştir.



**Şekil Ek 2. 2.** Akım yoğunluğunun iterasyon sayısı ile değişimi

Optimum eleman sayısını, eleman boyutunu ve mesh yöntemini elde etmek için kullanılan geometri şekil Ek 2. 3 te sunulmuştur.

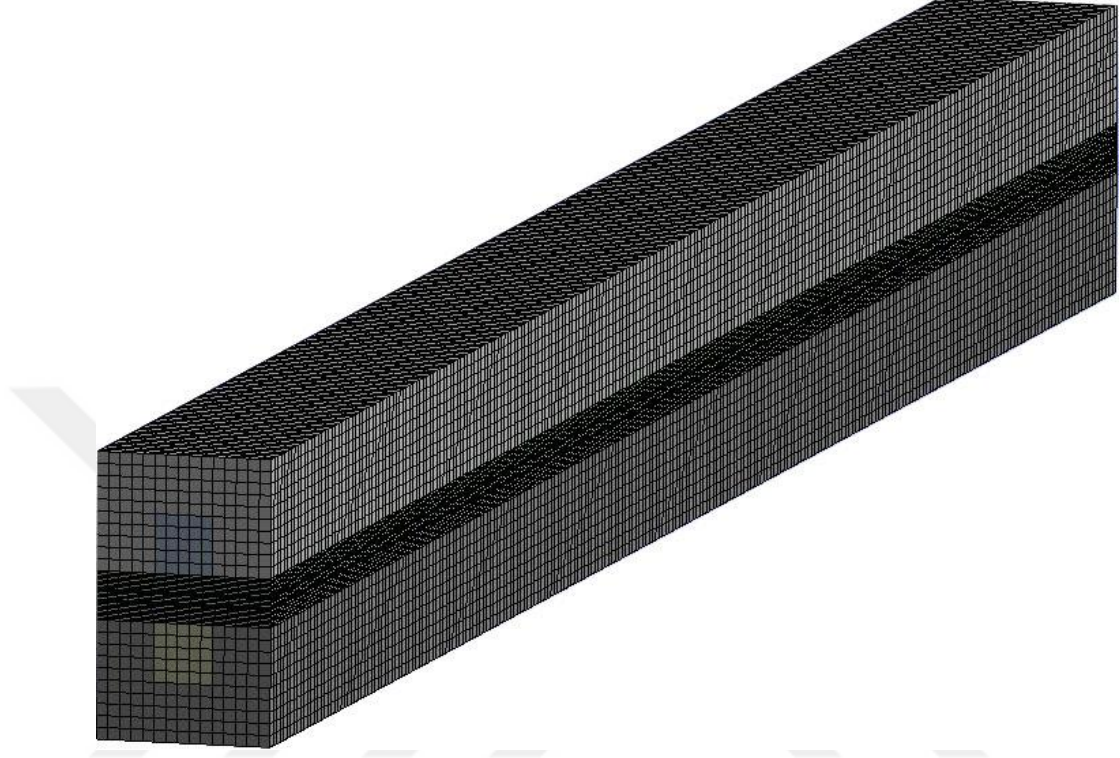


**Şekil Ek 2. 3.** Eleman boyutunun belirlenmesi için kullanılan geometri

Şekil Ek 2.3 teki geometrinin akış kanalı 1 mm derinliğinde, 1 mm genişliğindedir. Akım toplama plakasının uzunluğu 50 mm, genişliği 3 mm, kalınlığı ise 2 mm dir. MEA grubunun kalınlık ve özellikleri ise çalışmanın deneysel kısmında kullanılan MEA özellikleri ile aynıdır. Literatürde yakıt pili işletme parametrelerinin optimizasyonu, çeşitli geometrik parametrelerin belirlenmesinde ve Fluent Pemfc



tutorial'lerinde tek kanallı basit geometriler kullanılması sebebiyle bu tarz bir geometri tercih edilmiştir. Yapılan mesh sayısı optimizasyonunu sonucunda elde edilen optimum mesh boyutlandırması ve yöntemine ilişkin görsel Şekil Ek 2.4 te verilmiştir.



**Şekil Ek 2. 4.**Çözüm Ağı Yapısı

Eleman sayısının ve mesh yönteminin belirlenmesi esnasında gözlemlenen en önemli konunun elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleştiği bölge ve gaz akışının gerçekleştiği bölge olduğu anlaşılmıştır. Yani MEA bölgesinin ve gaz akış kanallarının düzgün mesh yapısına sahip olması gereklidir. Çalışma kapsamında tasarlanan yakıt pili modelleri içinde; MEA'nın ve gaz akış kanallarının mesh yapısının kübik yapılardan oluşmasına ve mesh kalitesinin yüksek olmasına özen gösterilmiştir. Bahsi geçen MEA ve gaz akış kanallarına “body sizing”, MEA yı oluşturan elemanların katmanlara ayrılmasında ise “sweep mesh” ya da “edge sizing” komutları kullanılmıştır. Anot ve katot akım toplama plakaları ise “multizone” ya da “Automatic Method” komutları kullanılarak mesh atılmıştır. Bu metotlar aynı geometriye uygulanırken uygulanan metodun işlem sırasının da önemli olduğu gözlemlenmiştir.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Kadir GELİŞ  
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti  
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.05.1988 / ÇANKIRI  
Medeni Hali : Evli  
Telefon : +904722161095 / 6036  
e-mail : kadirgelis@hotmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Atatürk Üniversitesi	2013
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2011
Lise	Kurşunlu Anadolu Lisesi	2006

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Yıl	Yer	Görev
2012-2014	Alturfa İnşaat	Makine Mühendisi
2014-(...)	Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

### Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)

Akyürek Eda Feyza, Geliş Kadir, Sahin Bayram, Manay Eyüphan (2018). Experimental Analysis for Heat Transfer of Nanofluid With Wire Coil Turbulators in A Concentric Tube Heat Exchanger. Results in Physics, 9, 376-389.

### Hakemli Dergiler

Senemtaş Ünal Ebru, Geliş Kadir, Baykan Pınar (2018). Investigation Of Awareness Levels About The Radiation Safety of Personnel Working in The İmaging Units Of The Hospital in Agri. Journal of Radiation Research And Applied Sciences, 11(11), 111-115.

Akyürek Eda Feyza, Sahin Bayram, Geliş Kadir, Manay Eyüphan, Ceylan Murat (2016). Thermal Performance Analysis Of Nanofluids in A Concetric Heat Exchanger

Equipped With Turbulators. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic And Manufacturing Engineering, 10(8), 1481-1489.

Sahin Bayram, Manay Eyüphan, Geliş Kadir, Karlı Süleyman (2014). Numerical Investigation of Convective Heat Transfer From Perforated Pin Fins. International Journal Of Advancement in Mechanical And Aeronautical Engineering, 1, 108-114.

Manay Eyüphan, Özceyhan Veysel, Sahin Bayram, Geliş Kadir (2014). At Constant Surface Temperature Heat Transfer Performance Of Single Blockages. International Journal Of Advancement in Mechanical And Aeronautical Engineering, 1, 102-107.

Manay Eyüphan, Sahin Bayram, Yılmaz Mehmet, Geliş Kadir (2012). Thermal Performance Analysis Of Nanofluids In Microchannel Heat Sinks. World Academy Of Science, Engineering And Technology, 67(15)

### **Ulusal Kongre Sunum**

Sahin Bayram, Geliş Kadir, Manay Eyüphan, Mandev Emre (2015). Şerit Elemanlar Kullanılan Es Merkezli Dairesel Bir Isı Değiştiricide Nanoakışkanların Entropi Üretimi. 20. Isı Bilimi Ve Tekniği Kongresi

### **Uluslararası Kongre Sunum**

Geliş Kadir, Sahin Bayram, Çelik Mehmet Ali (2018). Radiator Performance Test System. 3rd International Conference On Advances in Natural And Applied Science

Geliş Kadir, Çelik Mehmet Ali, Genç Naci, Sahin Bayram (2018). Irrigation Using The Off-Grid Photovoltaic Panels. 3rd International Conference On Advances in Natural And Applied Science

Senemtaş Ünal Ebru, Baykan Pınar, Geliş Kadir (2017). Determination Of The Knowledge Levels Of The Nursing Department Last Year Students Regarding The Radiation Safety. International Conference On Multidisciplinary, Science, Engineering Andtechnology

Baykan Pınar, Geliş Kadir, Senemtaş Ünal Ebru (2017). Occupational Health And Safety in Call Center Services. International Conference On Multidisciplinary, Science, Engineering Andtechnology

Geliş Kadir, Baykan Pınar, Senemtaş Ünal Ebru (2017). Sectoral Based Engineering Precautions. International Conference On Multidisciplinary, Science, Engineering Andtechnology

Geliş Kadir, Baykan Pınar, Senemtaş Ünal Ebru, Topal Mehmet (2017). The Assesment Of Risk Factors in A Research Labarotary. International Conference On Multidisciplinary, Science, Engineering Andtechnology, 308-321.

Baykan Pınar, Senemtaşı Ünal Ebru, Geliş Kadir (2017). The Importance Of The Periodic Controls In The Working Places. International Conference On Multidisciplinary, Science, Engineering Andtechnology

Senemtaşı Ünal Ebru, Geliş Kadir, Baykan Pınar (2017). Assesment Of Radiation Protection Awareness Of Personnel Working İn The Imaging Centers At Hospitals İn The City Center Of Agri. 2nd International Conference On Advances İn Natural And Applied Sciences, 338-338.

Geliş Kadir, Baykan Pınar, Senemtaşı Ünal Ebru, Özer Rahim Aytuğ (2017). Selection Of Risk Assesment Method That Will Be Applied To Units Of Agri Ibrahim Çeçen University. 2nd International Conference On Advances İn Natural And Applied Sciences

Baykan Pınar, Geliş Kadir, Senemtaşı Ünal Ebru (2017). The Evaluation Of Ergonomic Risk Factors İn Offices. 2nd International Conference On Advances İn Natural And Applied Sciences

Geliş Kadir, Baykan Pınar, Sincar Selçuk (2016). Genel Olarak Makinelerde İş Sağlığı Ve Güvenliği Tedbirleri. Uluslararası Is Güvenliği Ve Çalışan Sağlığı Kongresi

Baykan Pınar, Geliş Kadir, Sincar Selçuk (2016). Meslek Yüksekokullarının Eğitim Atölyelerinde 5s Modelinin Uygulanabilirliği. Uluslararası Is Sağlığı Ve Çalışan Sağlığı Kongresi

Geliş Kadir, Mandev Emre, Baykan Pınar, Sincar Selçuk (2016). Nanoteknoloji Ürünlerinde Is Sağlığı Ve Güvenliği Önerileri. Uluslararası Is Güvenliği Ve Çalışan Sağlığı Kongresi

Geliş Kadir, Sahin Bayram, Manay Eyüphan (2016). Heat Transfer Applications For Nanofluids. International Conference On Advences İn Natural And Applied Sciences

Manay Eyüphan, Sahin Bayram, Mandev Emre, Geliş Kadir (2015). Mikrokanallı Isı Alıcıda Nanoakışkanların Optimizasyonu. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi

Manay Eyüphan, Sahin Bayram, Geliş Kadir, Mandev Emre (2015). Thermal And Hydrodynamic Analysis Of Nanofluids At Low Concentrations in A Microchannel Heat Sink. American Society Of Thermal And Fluids Engineers

Geliş Kadir, Sahin Bayram, Manay Eyüphan, Mandev Emre (2015). Convective Heat Transfer Of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Water Nanofluids İn Aconcentric Circular Tube. American Society Of Thermal And Fluids Engineers, Doi: 10.13140/Rg.2.1.2067.1209