BİPOLAR PLAKA TASARIMININ PEM YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Adem KARAKETİR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİPOLAR PLAKA TASARIMININ PEM YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Adem KARAKETİR
0009-0006-7007-4787

Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİPOLAR PLAKA TASARIMININ PEM YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Adem KARAKETİR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU

Geniş bir zaman aralığı değerlendirildiğinde, enerji kaynakları arasında hem fosil yakıtların hem de alternatif enerji kaynaklarının kullanıldığı görülmektedir. Son yıllarda artan enerji talebiyle birlikte birçok sektör, alternatif enerji sistemlerine yönelmiştir. Uzun süredir temel enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtlar, gelişen teknolojiyle birlikte yerini daha düşük karbon emisyonuna sahip sistemlere bırakmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi çeşitli alternatif kaynaklar arasında en önemlilerinden biri hidrojen enerjisidir. Yüksek özgül enerji değerine sahip olması nedeniyle hidrojen, enerji ihtiyacının karşılanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Hidrojen enerjisinin kullanımında bu enerjiyi elektriğe dönüştüren hidrojen yakıt pilleri tercih edilmektedir. Mevcut yakıt pili türleri arasında en yaygın ve verimli sistem Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt pilidir. PEM yakıt pillerinin en önemli avantajı sıfır emisyonla çalışması olsa da her enerji sisteminde olduğu gibi verimliliğin artırılması önemli bir gelişim alanı olmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada, PEM yakıt pili sisteminde yer alan bipolar plaka tasarımı üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmış ve bu iyileştirmelerin hücre performansına etkisi sayısal analizler aracılığıyla incelenmiştir. İyileştirmeler akış plakası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üç farklı akış deseni üzerinde analiz çalışmaları yapılmış ve serpantin modelin diğer modellere göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu tasarım temel alınarak beş farklı akış kanal geometrisi analiz edilmiş, en iyi performansın yamuk kanal kesitinde elde edildiği görülmüştür. Belirlenen nihai geometri üzerinde sıcaklık, basınç, nem, stokiyometri oranı ve malzeme özellikleri gibi parametreler üç farklı seviyede analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, her bir parametrenin katkı oranını belirlemek amacıyla Taguchi analiziyle değerlendirilmiştir. Ardından, parametreler Optislang yazılımı kullanılarak optimize edilmiş ve en uygun parametre seviyeleri belirlenmiştir.

Sonuç olarak, PEM yakıt pili hücresinin önemli bir bileşeni olan akış plakasının optimum tasarımı ve parametre konfigürasyonu başarıyla belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bipolar plaka, kanal geometrisi, PEM, verimlilik, yakıt pili
2025, xvii + 104 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BIPOLAR PLATE DESİGN ON PEM FUEL CELL PERFORMANCE

Adem KARAKETİR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU

When a broad time frame is considered, it is evident that both fossil fuels and alternative energy sources have been utilized as primary energy resources. In recent years, the increasing global energy demand has led many industries to shift toward alternative energy systems. Fossil fuels, which have long served as the main energy source, are gradually being replaced by systems with lower carbon emissions as technology advances. Among the various alternative sources such as solar and wind energy, one of the most significant is hydrogen energy. Due to its high specific energy, hydrogen plays a crucial role in meeting global energy needs. Hydrogen fuel cells, which convert hydrogen energy into electrical energy, are widely used for this purpose. Among the different types of fuel cells, the Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell stands out as the most efficient and practical system. Although the main advantage of PEM fuel cells is their zero-emission operation, improving system efficiency remains an important area for further development, as in all energy systems.

In this study, various improvements were made to the bipolar plate design of a PEM fuel cell system, and the effects of these improvements on cell performance were investigated through numerical analyses. The modifications were applied to the flow plate. Analysis studies were carried out on three different flow field patterns, and the serpentine model was found to demonstrate superior performance compared to the others. Based on this design, five different flow channel geometries were analyzed, and the trapezoidal channel cross-section exhibited the best performance. For the finalized geometry, parameters such as temperature, pressure, humidity, stoichiometric ratio, and material properties were analyzed and compared at three different levels. The obtained results were evaluated using Taguchi analysis to determine the contribution ratio of each parameter. Subsequently, the parameters were optimized using the Optislang software to identify the optimal parameter levels.

As a result, the optimal design and parameter configuration of the flow plate, a key component of the PEM fuel cell, were successfully determined.

Keywords: Fuel cell, bipolar plate, channel geometry, efficiency, PEM
2025, xvii + 104 pages.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında detaylı ve kapsamlı bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu süreç boyunca elde edilen bilgi ve tecrübe, mesleki yetkinliğimin pekişmesinde ve akademik bakış açımın derinleşmesinde önemli katkılar sağlamıştır.

Hazırlık sürecinde değerli danışmanım Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU hocamın desteği, yönlendirmesi ve yapıcı eleştirileri çalışmalarımın şekillenmesinde önemli rol oynamıştır. Kendisine destekleri ve samimiyeti için teşekkürlerimi sunarım.

Süreç içerisinde lisans konusunda yardım ve destek sağlayan Numesys ekibine teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmalarımın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma, meslektaşlarıma ve aileme de minnettarım.

Son olarak, bu zorlayıcı ve değerli süreçte sabrını, ilgisini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevdiklerime teşekkür etmek isterim.

Bu tezin akademik ve sektörel çalışmalar için fayda sağlamasını temenni ederim.

Adem KARAKETİR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
1.1 Yakıt Pili 2
1.2 Yakıt Pili Çeşitleri 3
1.2.1 Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP) 3
1.2.2 Alkali Yakıt Pili (AYP) 4
1.2.3 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP) 6
1.2.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP) 7
1.2.5 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) 8
1.2.6 Proton Değişim Yakıt Pili (PDMYP/PEMYP) 9
1.3 Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP / PEMYP) Bileşenleri 10
1.3.1 Akım Toplayıcı Plaka 11
1.3.2 Bipolar Plaka 11
1.3.3 Conta ve Sızdırmazlık Elemanları 12
1.3.4 Gaz Difüzyon Tabakası (GDL) 12
1.3.5 Katalizör Tabakası 13
1.3.6 Membran Tabakası 13
1.4 PEM Yakıt Pilinde Bipolar Plaka Tasarımının Önemi 13
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI 14
3.MATERYAL ve YÖNTEM 17
3.1 Teorik Temeller 17
3.1.1 PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi 17
3.1.2 Matematiksel Model 18
3.1.3 Aktivasyon Aşırı Potansiyeli ve Transfer Akımları 19
3.1.4 Nernst Potansiyeli Denklemi ve Açıklaması 21
3.1.5 Gaz Difüzyon ve Su Taşınımı Denklemi 22
3.1.6 Isı Kaynakları Tablosu 23
3.2 Model Doğrulama 24
3.2.1 Geometri Hazırlama 25
3.2.2 Mesh Oluşturma 26
3.2.3 Fiziksel Model Ayarları 27
3.3 Akış Plaka Tasarımı 30
3.3.1 Akış Deseni Tasarımı ve Modellenmesi 30
3.3.2 Akış Kanal Geometri Tasarımı ve Modellenmesi 34
3.3.3 Parametre Analizi Modellenmesi 40
3.3.5 Taguchi Analiz Modeli 42
3.3.4 Optimizasyon (Optislang) Model Kurulumu 46
4.BULGULAR ve TARTIŞMA 50
4.1 Doğrulama Modeli 50
4.2 Akış Desen Analizi 52
4.3 Akış Kanal Geometrisi Analizi 63
4.4 Ağdan Bağımsızlık 70

4.5 Parametre Analizi 71
4.5.1 Nem Oranı Parametresinin Analizi 71
4.5.2 Sıcaklık Parametresinin Analizi 74
4.5.3 Basınç Parametresinin Analizi 79
4.5.4 Stokiyometri Oranı Parametresinin Analizi 81
4.5.5 Farklı Malzeme Parametre Analizi 83
4.6 Taguchi Analizi 85
4.7 Parametre Optimizasyonu (Optislang) 89
5. SONUÇ 97
5.1 Gelecek Çalışmalar için Öneriler 100
KAYNAKLAR 101
EKLER 103
1. ÖZGEÇMİŞ 104

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E_{cell}^{0}	Standart koşullarda hücre potansiyeli
E_{eq}	Reaksiyonun olması gereken teorik potansiyeli
R	Evrensel gaz sabiti
T	Mutlak sıcaklık
F	Faraday sabiti
P	Kısmi Gaz Basıncı
φ_{sol}	Katı malzeme elektrik potansiyel
σ_{sol}	Katı malzeme elektriksel iletkenlik
R_{sol}	Hacimsel transfer akısı
σ_{mem}	Elektrolit fazın elektriksel iletkenlik
$\emptyset_{mem}$	Elektrolit fazın elektrik potansiyel
R_{mem}	Hacimsel transfer akısı
R_{an}	Anot Hacimsel akı (A/m^3)
R_{cat}	Katot Hacimsel akı (A/m^3)
j(T)	Referans değişim akım yoğunluğu (A/m^2)
ζ	Aktif yüzey alanı (1/m)
Υ	Korelasyon bağımlılığı
$\propto_{an}^{an}$	Anot elektrotunun anot transfer katsayısı
$\propto_{cat}^{an}$	Anot elektrotunun katot transfer katsayısı
η_{an}	Anot yüzey potansiyeli
η_{cat}	Katot yüzey potansiyeli
η_{akt}	Aktivasyon kaybı
η_{ohm}	Ohmik kayıp
η_{kon}	Konsantrasyon kaybı
E_{Nernst}	Açık devre gerilimi
V_{cell}	Toplam hücre voltajı
U_{an}^{0}	Anot reaksiyonunun standart potansiyeli
U_{cat}^{0}	Katot reaksiyonunun standart potansiyeli
P_{sat}	Suyun doyma basıncı
P_{H_2}	Hidrojen kısmı basıncı
P_{O_2}	Oksijen kısmi su basıncı
P_{H_2O}	Su buharı kısmi basıncı
T^0	Standart hal sıcaklık
P^0	Standart hal basınç
E_{an}^{0}	Anot tersinir potansiyel
E_{cat}^{0}	Katot tersinir potansiyel
ΔS_{an}	Anot reaksiyon entropisi
ΔS_{cat}	Katot reaksiyon entropisi
$\overrightarrow{v_l}$	Sıvı hızı
D_{liq}	Sıvının gaz halindeki difüzyon katsayısı
$\mathcal{X}$	Sıvı-gaz hız oranı
$\overrightarrow{v_g}$	Gaz hızı
P_c	Kapiler basınç

σ	Yüzey gerilimi
S_l	Sıvı doygunluğu
J	Leverett fonksiyonu
i_s	Katı faz akım yoğunluğu
i_m	Membran fazı akım yoğunluğu
L	Yoğuşmadan kaynaklı gizli ısı
W	Watt

Kısaltmalar	**Açıklama**
AADM	Alkali Anyon Değişim Membran
AYP	Alkali Yakıt Pili
DMYP	Doğrudan Metanol Yakıt Pili
EIA	Enerji Bilgi İdaresi
EKYP	Eriyik Karbonat Yakıt Pili
FAYP	Fosforik Asit Yakıt Pili
GDL	Gaz Difüzyon Tabakası
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pili
M	Model
MG	Model Güç
MPL	Mikro Gözenekli Katman
ORR	Oxygen Reduction Reaction
PDMYP	Proton Değişim Membran Yakıt Pili
PEMYP	Proton Exchange Membrane Yakıt Pili
RH	Relative Humudity
TDMC	Tapered Dual Maze Channel
TDSC	Tapered Dual Serpentine Channel
TPCD	Tapered Paralel Channel Design

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Senaryolara Göre Küresel Toplam Enerji Arzı (2000-2050)	1
Şekil 1.2	Elektroliz – Yakıt Pili Tepkime Kıyaslaması	2
Şekil 1.3	Metanol Yakıt Hücresi Tepkime Şeması	4
Şekil 1.4	Alkali Yakıt Hücresi Tepkime Şeması	5
Şekil 1.5	Fosforik Asit Yakıt Hücresi Tepkime Şeması	6
Şekil 1.6	Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi Tepkime Şeması	7
Şekil 1.7	Katı Oksit Yakıt Hücresi Tepkime Şeması	8
Şekil 1.8	Proton Değişim Membran Yakıt hücresi Tepkime Şeması	9
Şekil 1.9	PEM/PDM Yakıt Hücresi Bileşenleri (dtu.dk, n.d.)	10
Şekil 1.10	Bipolar Plaka Akış Deseni (Çelik, 2018)	11
Şekil 1.11	Akış Kanal Geometrisi	12
Şekil 3.1	Yakıt Pili Kayıp Eğrisi	20
Şekil 3.2	Model Görünüm (Ansys Inc., 2023)	24
Şekil 3.3	Bileşen Tanımlaması (Ansys Inc., 2023)	24
Şekil 3.4	Yüzey Birleştirme işlemi	25
Şekil 3.5	Yüzey İsimlendirme	25
Şekil 3.6	Mesh Genel Görünüm	26
Şekil 3.7	Arayüz Ayarları	27
Şekil 3.8	Sınır Şartı Hesabı	29
Şekil 3.9	Kesit Görünüm	30
Şekil 3.10	Plaka Ölçüleri	31
Şekil 3.11	Dalgalı Model Mesh Genel Görünüm	31
Şekil 3.12	Izgara Model Mesh Genel Görünüm	32
Şekil 3.13	Serpantin Model Mesh Genel Görünüm	33
Şekil 3.14	Akış Kanal Geometri Tasarımı	35
Şekil 3.15	M1 Model Mesh Görünüm	35
Şekil 3.16	M2 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm	36
Şekil 3.17	M3 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm	37
Şekil 3.18	M4 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm	38
Şekil 3.19	M5 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm	39
Şekil 3.20	Meta Model Optimizasyon Kurulumu	46
Şekil 3.21	Parametre Değişim Aralıkları	48
Şekil 3.22	Optimizasyon Sınır Şartları	49
Şekil 4.1	Ansys 2023 Yakınsama Grafiği (Ansys Inc., 2023)	50
Şekil 4.2	Bu Çalışma Yakınsama Grafiği	50
Şekil 4.3	Gerilim-Akım Karşılaştırması	51
Şekil 4.4	Polarizasyon Eğrisi	51
Şekil 4.5	Polarizasyon eğrisi	52
Şekil 4.6	0,3 V Katot Basınç Görünüm	53
Şekil 4.7	0,3V Anot Basınç Görünüm	53
Şekil 4.8	0,3V Katot Hız Görünüm	54
Şekil 4.9	0,3V Anot Hız Görünüm	55
Şekil 4.10	0,3V Katot Sıcaklık Görünüm	56
Şekil 4.11	0,3 V Kesit Sıcaklık Görünüm	56
Şekil 4.12	0.3V Katot Bağıl Nem Görünüm	57
Şekil 4.13	0.3V Anot Bağıl Nem Görünüm	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

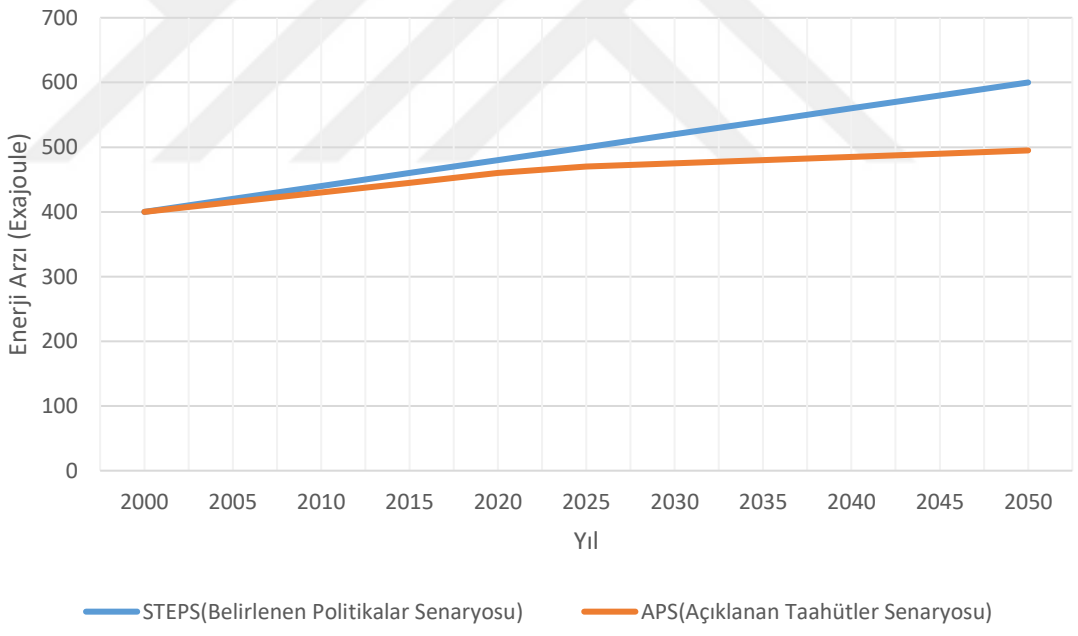
Şekil 4.15 0.3V Anot Su Aktivitesi Görünüm 58
Şekil 4.16 Serpantin Model Reaksiyon Kaynakları Grafiği..... 59
Şekil 4.17 Serpantin Model Ohmik Kaynaklar Grafiği 60
Şekil 4.18 Dalgalı Model Reaksiyon Kaynakları Grafiği 60
Şekil 4.19 Dalgalı Model Ohmik Kaynaklar Grafiği 61
Şekil 4.20 Izgara Model Reaksiyon Kaynakları Grafiği 62
Şekil 4.21 Izgara Model Ohmik Kaynaklar Grafiği..... 62
Şekil 4.22 Akış Kanal Geometrileri Polarizasyon Eğrisi..... 64
Şekil 4.23 Akış Kanal Geometrisi Basınç Görünümü 65
Şekil 4.24 Akış Kanal Geometrisi Hız Görünümü..... 66
Şekil 4.25 Akış Kanal Geometrisi Sıcaklık Görünümü 67
Şekil 4.26 Akış Kanal Geometrisi Bağıl Nem Görünümü..... 68
Şekil 4.27 Akış Kanal Geometrisi Su Aktivitesi Görünümü 69
Şekil 4.28 Farklı Nem Koşullarında Polarizasyon Eğrisi 73
Şekil 4.29 Farklı Sıcaklık Koşullarında Analiz Sonucu..... 75
Şekil 4.30 60°C Reaksiyon Kaynaklar Grafiği 76
Şekil 4.31 60°C Ohmik Reaksiyon Kaynaklar Grafiği 76
Şekil 4.32 70°C Reaksiyon Kaynaklar Grafiği 77
Şekil 4.33 70°C Ohmik Kaynaklar Grafiği..... 77
Şekil 4.34 80°C Reaksiyon Kaynaklar Grafiği 78
Şekil 4.35 80°C Ohmik Kaynaklar Grafiği..... 78
Şekil 4.36 Farklı Basınç Koşullarında Analiz Sonucu..... 80
Şekil 4.37 Farklı Stokiyometri Koşullarında Analiz Sonucu..... 82
Şekil 4.38 Farklı Malzeme Koşulu Analiz Sonucu..... 84
Şekil 4.39 1,0V Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği 86
Şekil 4.40 0,6V Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği 87
Şekil 4.41 Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği 88
Şekil 4.42 En İyi Sonuç Verileri 89
Şekil 4.43 Parametre Katılım Payı..... 90
Şekil 4.44 Korelasyon Matrisi 91
Şekil 4.45 Artık Dağılım Grafiği 91
Şekil 4.46 Akım İterasyon Geçmişi Grafiği..... 92
Şekil 4.47 Stokiyometri Hava İterasyon Geçmişi Grafiği 92
Şekil 4.48 Stokiyometri H2 İterasyon Geçmişi Grafiği..... 93
Şekil 4.49 Basınç İterasyon Geçmişi Grafiği..... 93
Şekil 4.50 Sıcaklık İterasyon Geçmişi Grafiği..... 94
Şekil 4.51 Anot Nem İterasyon Grafiği 94
Şekil 4.52 Katot Nem İterasyon Grafiği 95
Şekil 4.53 Temel Bileşen Grafiği..... 95
Şekil 4.54 Tepki Yüzeyi 3B Grafiği 96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Yakıt Pili Çeşitleri (Köseler et al., 2009) 3
Çizelge 3.1 Isı Kaynakları terimi (Ansys Inc., 2021) 23
Çizelge 3.2 Mesh Kalitesi 26
Çizelge 3.3 Ansys Fluent Model Ayarları ve Açıklamaları 28
Çizelge 3.4 Tanımlamalar 29
Çizelge 3.5 Dalgalı Model Mesh Kalitesi 32
Çizelge 3.6 Izgara Model Mesh Kalitesi 33
Çizelge 3.7 Serpantin Model Mesh Kalitesi 34
Çizelge 3.8 Sınır Şartları 34
Çizelge 3.9 M1 Model Mesh Kalitesi 36
Çizelge 3.10 M2 Model Mesh Kalitesi 37
Çizelge 3.11 M3 Model Mesh Kalitesi 38
Çizelge 3.12 M4 Model Mesh Kalitesi 39
Çizelge 3.13 M5 Model Mesh Kalitesi 40
Çizelge 3.14 Sınır Şartları 40
Çizelge 3.15 Parametre Algoritması 41
Çizelge 3.16 AISI 316L Malzeme Özellikleri 41
Çizelge 3.17 Alüminyum Malzeme Özellikleri 42
Çizelge 3.18 Analiz Faktörleri ve Seviyeleri 43
Çizelge 3.19 Başlangıç Koşulu (1.0V) Analiz Çözümleri 44
Çizelge 3.20 Orta yük (0,6V) Koşulu Analiz Çözümleri 44
Çizelge 3.21 Orta yük (0,6V) Koşulu Analiz Çözümleri (devam) 45
Çizelge 3.22 Maksimum Yük Çalışma Koşulu (0,3V) Analiz Çözümleri 45
Çizelge 3.23 0,6V Analiz Verileri 47
Çizelge 3.24 0,6V Analiz Verileri (devam) 48
Çizelge 4.1 Voltaj-Akım-Güç Verileri 52
Çizelge 4.2 Akış Kanal Geometriler Voltaj-Akım Sonuçları 63
Çizelge 4.3 Akış Kanal Geometrileri Voltaj-Güç Sonuçları 63
Çizelge 4.4 Ağdan Bağımsızlık Model Sınır Şartları 70
Çizelge 4.5 Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları 70
Çizelge 4.6 Nem Yoğunluğu Analiz Değerleri 71
Çizelge 4.7 Farklı Nem Koşullarında Analiz Sonucu 72
Çizelge 4.8 Farklı Sıcaklık Koşulu Analiz Değerleri 74
Çizelge 4.9 Farklı Sıcaklık Koşullarında Analiz Sonucu 74
Çizelge 4.10 Farklı Basınç Koşulu Analiz Değerleri 79
Çizelge 4.11 Farklı Basınç Koşullarında Analiz Sonucu 80
Çizelge 4.12 Farklı Stokiyometri Koşulu Analiz Değerleri 81
Çizelge 4.13 Farklı Stokiyometri Koşullarında Analiz Sonucu 82
Çizelge 4.14 Farklı Malzeme Koşulu Analiz Değerleri 83
Çizelge 4.15 Farklı Malzeme Koşulu Analiz Sonucu 84
Çizelge 4.16 1,0V Ortalama Değerleri Yanıt Tablosu 85
Çizelge 4.17 0,6V Ortalama Değerleri Yanıt Tablosu 86
Çizelge 4.18 0,3V Ortalama Değerleri Yanıt Tablosu 88
Çizelge 4.19 Optimizasyon Verisi ile Yapılan Analiz Sonucu 90

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde enerji kaynaklarına olan ilgi, sanayileşme, nüfus artışı ve teknolojik gelişmelerle birlikte her geçen gün artmaktadır. Bu enerji ihtiyacı yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Uzun yıllardır enerji üretiminde çoğunlukla yenilenemeyen enerji kaynakları kullanılmıştır. Bu kaynaklara kömür, petrol gibi fosil yakıtlar örnek verilebilir. Artan enerji ihtiyacı fosil yakıtların tüketimini artırırken ciddi emisyon sorunlarına yol açmaktadır. Emisyonlar ise küresel ısınma, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Bu durum, enerji ihtiyacının yanı sıra emisyonların da azaltılmasının çok önemli olduğunu göstermektedir. Son yıllarda yenilenemeyen enerji kaynakları dışında yeni enerji kaynakları arayışı hızlanmış ve emisyonların azaltılmasına odaklanılmıştır. Dolayısıyla, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelim büyük önem arz etmektedir.



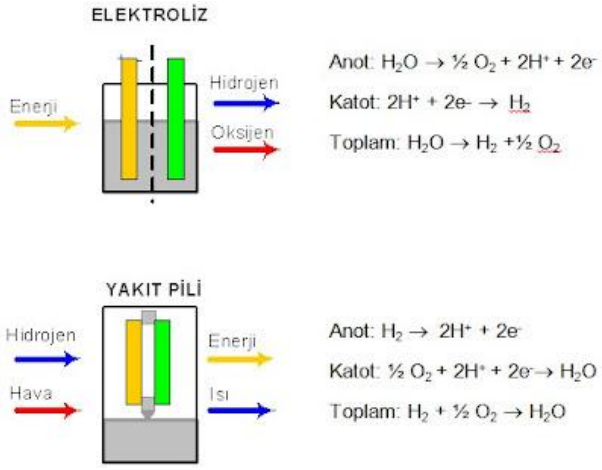
Şekil 1.1 Senaryolara Göre Küresel Toplam Enerji Arzı (2000-2050)

Şekil 1.1'de Enerji Bilgi İdaresi (EIA) tarafından hazırlanan Uluslararası Enerji Görümü bildirisi, geçmişteki ve gelecekte öngörülen artan enerji tüketimini ele almaktadır (International Energy Agency, 2023). Fosil yakıtların neden olduğu çevresel ve ekonomik sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmada büyük rol oynamıştır.

Rüzgar, güneş ve hidrojen gibi yenilenebilir enerji kaynakları karbon emisyonlarının azalmasına yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, hidrojen enerjisi ve hidrojen yakıt pilleri, yüksek verimlilikleri ve düşük emisyonları nedeniyle diğer sistemlere göre büyük ilgi çekmektedir. Yakıt hücreleri doğrudan elektrik üretir ve sadece su buharı atığı oluşturduklarından çevre dostu bir güç sistemi alternatifi sunmaktadır.

1.1 Yakıt Pili

Türkçe literatüre yakıt pili olarak geçen bu sistem aynı zamanda yakıt hücresi olarak bilinir. Yakıt pili temelinde elektroliz tepkimesinin tersine reaksiyonu olarak düşünebiliriz. Sistem içerisine uygun şartlarda oksijen ve hidrojen verildiğinde sistem içerisinde elektrokimyasal tepkime gerçekleşir. Elektron transferinden kaynaklı potansiyel fark oluşur ve elektrik elde edilir. Sistem içerisinde tepkime gerçekleştiği için ısı enerjisi oluşur. Tepkime sonunda ise su buharı elde edilir. Özetle yakıt piline uygun şartlarda hidrojen ve oksijen sağlandığında elektrik, ısı ve su buharı elde edilir. Temelinde elektroliz reaksiyonunun tersine işlemi gibi düşünülebilir.



Şekil 1.2 Elektroliz – Yakıt Pili Tepkime Kıyaslaması

Şekil 1.2'de elektroliz ve yakıt pili tepkime kıyaslaması gösterilmiştir Yakıt pilinin avantajlarından birisi emisyon sorunu olmamasıdır. Sistem atık olarak su buharı ve ısı oluşturmaktadır. Güç sistemleri incelendiğinde sistem verimi yüksektir. Yakıt pili veriminin yaklaşık olarak %45-50 olduğu bilinmektedir (Giddey et al., 2004).

1.2 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pili, özellikle az çevresel etkiyle yüksek enerji dönüşümü elde eden bir yöntem olarak hızla büyüyen enerji teknolojisinde önemli bir yeri temsil etmektedir. Farklı yakıt pili çeşitleri, kullanılan elektrolit türü, çalışma prensibi ve uygulama alanlarıyla tanınır. Bu değerlendirme çeşitli yakıt pili türlerini inceleyip tasarım ve performans özelliklerini kıyas eder. Yakıt pilleri genel olarak kullanıldığı elektrolit çeşidine göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırma çalışma sıcaklığı gibi birçok parametreye göre şekillenmiştir.

Çizelge 1.1 Yakıt Pili Çeşitleri (Köseler et al., 2009)

Yakıt Pili	Elektrolit	Taşıyıcı	Katalizör	Çalışma Sıcaklığı	Yakıt/Oksitleyici	Uygulama Alanları
DMYP	Polimer Membran	H^+	Pt-Ru	25° -130°	CH_3OH/O_2, Hava	Küçük elektrikli araçlar
AYP	Potasyum Hidroksit	OH^-	Poroz Nikel	25° -250°	H_2/O_2, Hava	Uzay araştırmaları
FAYP	Sıvı Fosforik	H^+	Pt	160° -220°	Doğalgaz, Biyogaz, H_2/O_2, Hava	Ticari uygulamalar
EKYP	Alkali Karbonatlar	CO_3^{-2}	Pt	620° -660°	Doğalgaz, Biyogaz, Kömür gazı, H_2/O_2, Hava	Elektrik santralleri
KOYP	Erimiş Alkali Metal	O^{-2}	Raney Ni	800° -1000°	Doğalgaz, Biyogaz, Kömür gazı, H_2/O_2, Hava	Ticari, sanayi uygulamalar, elektrik santrali
PEMYP	Proton Değişim Membran	H^+	Pt	25° - 80°	H_2/O_2, Hava	Ulaşım araç, askeri sistemler

Çizelge 1.1'de yakıt pillerinin çeşitleri, kullanılan elektrolit ve taşıyıcılar, katalizör türleri, çalışma sıcaklıkları, yakıtları ve uygulama alanları özetlenmiştir.

1.2.1 Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP)

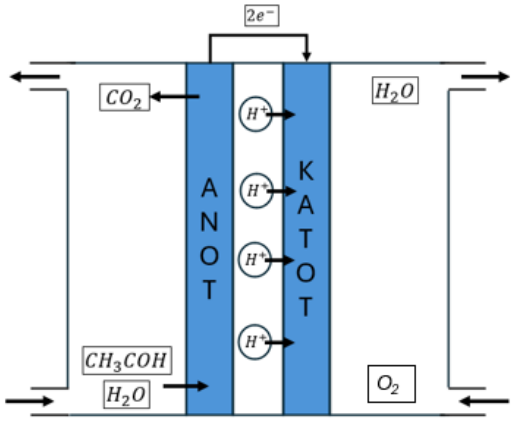
Doğrudan Metanol Yakıt Pilleri (DMYP), metanolün elektrokimyasal tepkimesi sonucu enerji dönüşümü yapan bir güç ünitesidir. Yakıt olarak doğrudan metanolü kullanarak elektrik enerjisi üreten elektrokimyasal bir hücredir. Sistem metanol doğrudan kullanabildiği için ekstra hidrojen dönüştürücüsüne ihtiyaç duymaz. Herhangi bir dönüştürücü sistemine ihtiyaç duymadığı için diğer yakıt pillerine göre sistem kompakt

ve taşınabilirdir (Kurt Urhan, 2021). Sistem içerisinde gerçekleşen reaksiyona ait denklemler (1.2)'de belirtilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu = CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^- \quad (1)$$

$$Katot\ Reaksiyonu = \frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O \quad (1.1)$$

$$Toplam\ Reaksiyon = CH_3OH + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (1.2)$$



Şekil 1.3 Metanol Yakıt Hücresi Tepkime Şeması

Şekil 1.3'te Metanol yakıt hücresi tepkime şeması gösterilmiştir. Metanolün anot tarafında elektrokimyasal olarak tepkimeye girmesi ile oluşan protonlar membran üzerinden katot tarafına geçmesiyle elektrik enerjisi oluşur. Bu proton transfer sürecinde, akım üretimine yardımcı olarak genellikle platin ve çeşitli nanopartiküller kullanılır (Karaman et al., 2021)),(Karanfil, n.d.).

1.2.2 Alkali Yakıt Pili (AYP)

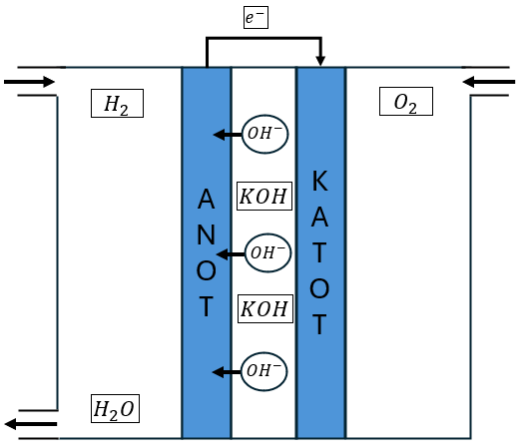
Alkali yakıt pili (AYP), hidrojen ve oksijen arasında gerçekleşen elektrokimyasal tepkimeler sonucu elektrik üreten bir sistemdir. Elektrolit olarak genellikle sodyum hidroksit (NAOH) veya potasyum hidroksit (KOH) kullanılır. Sistem proton değişim

yakıt pili (PEMYP) aksine geniş çalışma sıcaklık aralığına sahiptir (Bilhan, 2020). Sistem içerisinde gerçekleşen reaksiyona ait denklemler (1.5)'de belirtilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu = 2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^- \quad (1.3)$$

$$Anot\ Reaksiyonu = 2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^- \quad (1.4)$$

$$Toplam\ Reaksiyon = 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (1.5)$$



Şekil 1.4 Alkali Yakıt Hücresi Tepkime Şeması

Şekil 1.4'te alkali yakıt hücresi tepkime şeması gösterilmiştir. Alkali yakıt pilleri genellikle sıvı elektrolit yapısına sahiptir. Alkali ortamlarda gelişmiş katalitik performans göstermesi başlıca avantajlarından biridir. Buna ek olarak alkali ortamlarda anot ve katotta aynı anda gerçekleşen reaksiyonların hızlanması ve bu sayede yakıt hücresinin genel olarak verimliliğinin artmasına katkı sağlamaktadır.

Bu avantajları yanı sıra havada bulunan CO2'lerin varlığı ile elektrolitte karbonasyon meydana gelmekte bu da elektrotlar üzerinde çökelmeye neden olan karbonatların oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum hücrenin performansını kötü etkileyerek AYP'lerin yaygın olarak kullanılmasını önünde bir sorun teşkil etmektedir. Son zamanlarda karbonasyona daha az duyarlı olarak geliştirilen alkali anyon değişim membranları (AADM) üzerinde yapılan çalışmalar AYP'lerin de potansiyelin artırılması

konusunda önemli bir rol oynayarak özellikle CO2 kaynaklı karbonasyona gibi kısıtlayıcı faktörlerin giderilmesine katkı sağlamıştır (Bilhan, 2020).

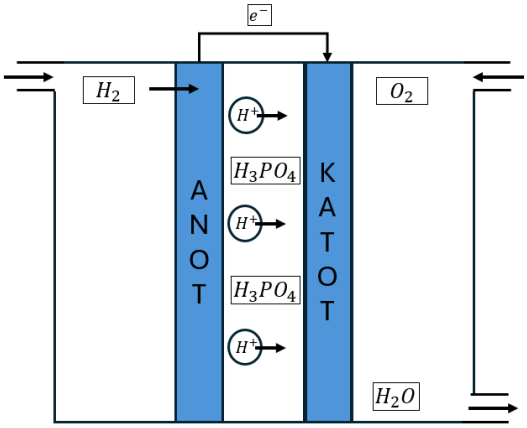
1.2.3 Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)

Fosforik asit yakıt pili (FAYP), hidrojen ve oksijen arasında gerçekleşen reaksiyonlar sırasında elektrolit olarak fosforik asit kullanan yakıt pilleridir. Sistem içerisinde gerçekleşen reaksiyona ait denklemler (1.8)'de belirtilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu = \ 2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \tag{1.6}$$

$$Katot\ Reaksiyonu = \ O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \tag{1.7}$$

$$Toplam\ Reaksiyon = 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \tag{1.8}$$



Şekil 1.5 Fosforik Asit Yakıt Hücresi Tepkime Şeması

Şekil 1.5'te fosforik asit yakıt hücresi tepkime şeması gösterilmiştir. Fosforik asit yakıt pili en genel anlamıyla 200°C'ye varan yüksek sıcaklıklarda dahi çalışması ve performanslarını stabil olarak devam ettirebilmesi gibi özellikleri ile bilinmektedir (Strickland et al., 2018).

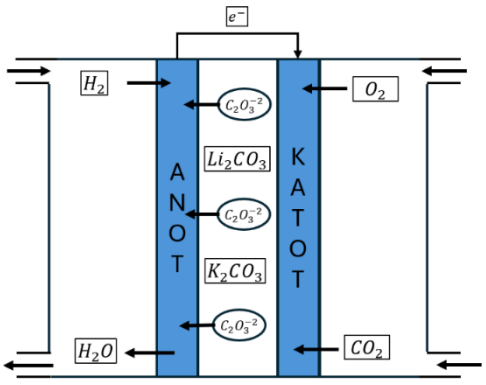
1.2.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)

Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP), temel olarak sodyum karışımı kullanan yüksek sıcaklıklarda çalışan bir yakıt pilidir. Genel olarak 600 ile 700° arasında verimli çalışan bir sistemdir. Elektrolit olarak lityum karbonat (Li2Co3), sodyum karbonat (Na2Co3) ve potasyum karbonat (K2CO3) kullanılır. Bu elektrolitler iyon iletkenliğini ve CO2 çözünürlüğünü artırır. Bu durum sistemi karbon yakalama ve depolama konusunda avantajlı hale getirir. Bu sistem büyük ölçekli enerji santrallerinde kullanılmıştır (Gürbüz et al., 2021). Sistem içerisinde gerçekleşen reaksiyona ait denklemler (1.12)'de belirtilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu = CO_3^{-2} + H_2 \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^- \quad (1.9)$$

$$Katot\ Reaksiyonu = CO_2 + \frac{1}{2O_2} + 2e^- \rightarrow CO_3^{-2} \quad (1.11)$$

$$Toplam\ Reaksiyon = 2H_2 + \frac{1}{2O_2} + CO_{2(katot)} \rightarrow 2H_2O + CO_{2(anot)} \quad (1.12)$$



Şekil 1.6 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi Tepkime Şeması

Şekil 1.6'da erimiş karbonat yakıt hücresi tepkime şeması gösterilmiştir. EKYP'lerin çalışma mantığı, anot bölmesinde hidrojen oksitlenir ve karbonat iyonları erimiş elektrolit yardımıyla yük taşır. Böylelikle oksijen katotta indirgenir.

1.2.5 Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP)

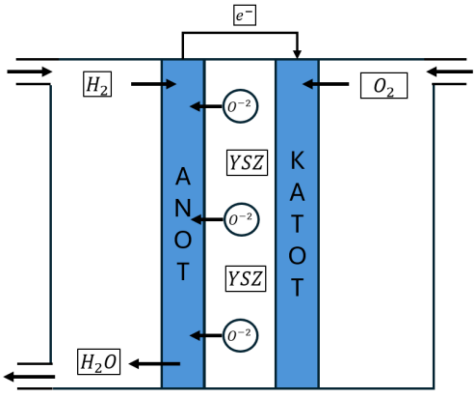
Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP), 800 ila 1000°C arasında değişen sıcaklıklarda çalışmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda iyonik iletken bir mekanizma yardımıyla yakıtlardan gelen kimyasal enerjiyi elektrik enerjine dönüştürür. Yüksek sıcaklık hidrokarbonların hücre içinde yeniden oluşmasına izin verir. Böylece hidrojen, doğalgaz ve bünyesinde hidrokarbon bulunduran yakıt türlerini kullanma imkânı sunar (Jiang et al., 2007).

KOYP'lerin çalışma mantığı, üç büyük sistem bileşeni üzerinde tepkime gerçekleştirir. Bunlar, bir anot, bir katot ve büyük çoğunlukla seramik malzemeden yapılan katı elektrolit yapılardır. Katı elektrolit sadece oksijen geçişine izin verir. Anot bölgesi yakıtın oksidasyonunu hızlandırır ve katot oksijenini indirger (Jiang et al., 2007). Sistem içerisinde gerçekleşen reaksiyona ait denklemler (1.15)'te belirtilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu = 2H_2 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + 4e^- \quad (1.13)$$

$$Katot\ Reaksiyonu = O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{-2} \quad (1.14)$$

$$Toplam\ Reaksiyon = 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (1.15)$$



Şekil 1.7 Katı Oksit Yakıt Hücresi Tepkime Şeması

Şekil 1.7'de katı oksit yakıt hücresi tepkime şeması gösterilmiştir. Doğrudan gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar %60'a varan yüksek verimlilik oranına ulaşabilir. Bu değer içten yanmalı motorun veriminden yüksektir.

1.2.6 Proton Değişim Yakıt Pili (PDMYP/PEMYP)

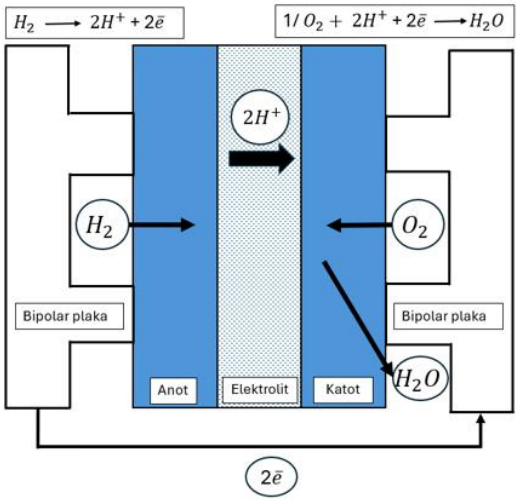
Proton Değişim Yakıt Pili (PDMYP), hidrojen ve oksijen birleşimiyle gerçekleşen reaksiyon sonucunda doğrudan elektrik üretebilen bir sistemdir. Hidrojen ve oksijen girdi olarak kullanılırken, çıktı olarak ısı ve elektrik oluşur. PDMYP elektrolit olarak membran kullanır, böylece Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP) ismini alır. Bu membran proton ileten özelliktedir. Membran olarak nafyon gibi malzemeler kullanılır.

PDMYP'lerin çalışma mantığı, hidrojen gazı yakıt pilinin anot kısmına verilir. Anot bölgesinde hidrojende bulunan elektronlar platin katalizör yardımıyla ayrılır. Elektronları ayrılan protonlar ise membran üzerinden katot tarafına geçer. Elektronlar ise harici bir devreden katot tarafına transfer olur, hidrojen ve oksijen birleşerek su oluşur (Alvaro et al., 2017). Sistem içerisinde gerçekleşen reaksiyona ait denklemler (1.18)'de belirtilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu = 2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \tag{1.16}$$

$$Katot\ Reaksiyonu = O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \tag{1.17}$$

$$Toplam\ Reaksiyon = 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \tag{1.18}$$



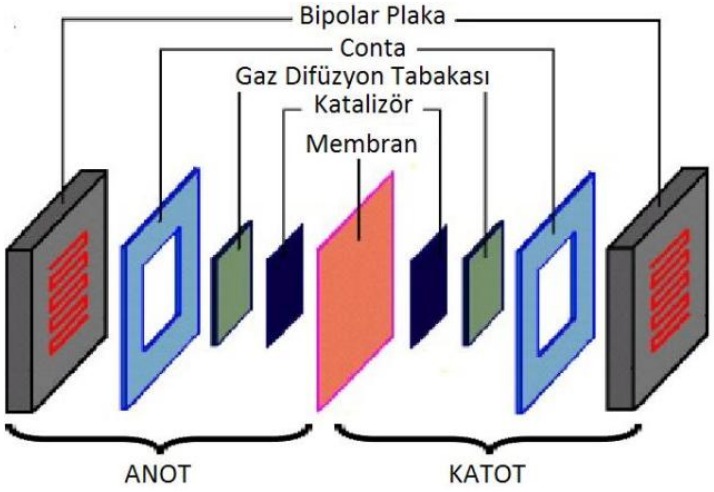
Şekil 1.8 Proton Değişim Membran Yakıt hücresi Tepkime Şeması

Şekil 1.8'de proton değişim yakıt hücresi tepkime şeması gösterilmiştir. PDMYP'ler genellikle 60-80° sıcaklık aralıklarında çalışmaktadır. Bu durum hızlı başlatma ve tüksek güç yoğunluğu sağlar. Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücreleri (PDMYP) yüksek verimlilikleri, düşük çalışma sıcaklıkları ve geniş kullanım alanları ile diğer yakıt pili türlerine göre büyük ilgi görmektedir (Peng & Lee, 2006).

1.3 Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP / PEMYP) Bileşenleri

Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP / PEMY), incelendiğinde 6 ana bileşeni olduğu gözlemlenmektedir.

- Bipolar plaka
- Gaz difüzyon tabakası (GDL)
- Katalizör
- Membran
- Conta
- Akım toplayıcı plakalar



Şekil 1.9 PEM/PDM Yakıt Hücresi Bileşenleri (dtu.dk, n.d.)

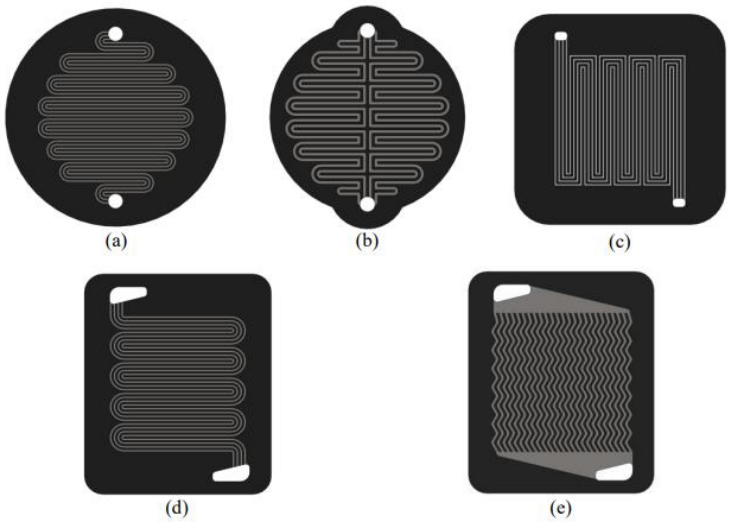
Şekil 1.9'da proton değişim yakıt hücresi bileşenleri gösterilmiştir. Gösterimdeki bileşenler bir proton değişim yakıt hücresine aittir. Hücrelerin birbiri ardına eklenmesi ile yakıt pili yığını oluşur.

1.3.1 Akım Toplayıcı Plaka

Yakıt pili yığınının başında ve sonunda bulunur. Akım toplatıcı plakalar akış plakası yüzeyine temas edecek şekilde konumlandırılır. İletken bir yapıya sahip bu plakalar hücre içerisinde oluşan akımın istenilen devreye ulaşmasını sağlar. Plakalar sistem akımını taşıyabilecek şekilde tasarlanırlar.

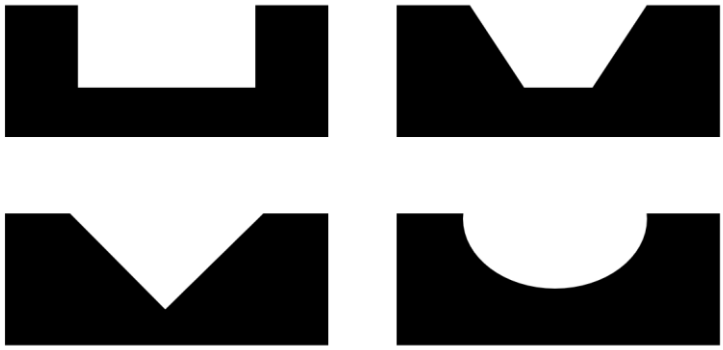
1.3.2 Bipolar Plaka

Yakıt pili hücrelerinde bulunan bu parça çok işlevli ve temel bir bileşendir. Anot ve katot arasında bulunur ve yığınlar içerisinde bulunan ayrı hücreler arasında arayüz oluşturur. İki yüzeyinde akış kanalları mevcuttur. İçerdiği bu kanallar sayesinde akış daha homojen şekilde dağılır. Düzgün ve dengeli dağılmış akışlar performansı önemli derecede artırmaktadır. Bu kanallar tepkime sürecinde akışın dengeli hız, basınç ve sıcaklığını oluşmasını sağlar. Akış dengesini sağlamak amaçlı birçok yakıt pili bipolar plaka akış deseni tasarımı mevcuttur.



Şekil 1.10 Bipolar Plaka Akış Deseni (Çelik, 2018)

Şekil 1.10'da bipolar plaka akış deseni örnekleri verilmiştir. Bipolar Plaka tasarımı yapılırken akış deseni konfigürasyonları yapılmaktadır. Akış desenleri tepkimenin verimini etkilemektedir.



Şekil 1.11 Akış Kanal Geometrisi

Şekil 1.11'de akış kanal geometri örnekleri gösterilmiştir. Akış deseni ile kanal geometrisi konfigürasyonları yapılabilir. Sistem tasarım kriterlerine göre bu kanallar değişkenlik göstermektedir.

1.3.3 Conta ve Sızdırmazlık Elemanları

Conta ve sızdırmazlık elemanları, yakıt hücresinin birçok yerinde kullanılan önemli bir bileşendir. Sistem içerisinde kaçakları önleyici yapıda olan bu bileşenler sistem ömrünü önemli biçimde etkiler. Conta tasarımları sistemin çalışma basıncı ve sıcaklığına göre tasarlanmaktadır. Sistemin çalışma durumuna göre aralıklı olarak bakım ihtiyacı gerektirebilir.

1.3.4 Gaz Difüzyon Tabakası (GDL)

Gaz Difüzyon Tabakası (GDL), genel olarak membranın iki yüzeyinde süngerimsi yapıda olan bir bileşendir. Akış kanalı ve katalizör arasında bulunur. Bu bileşen gazın elektrot yüzeyine ulaşmasını sağlar. Gazın elektrot yüzeyine homojen biçimde ulaşmasını sağlayan bu bileşen, sistem verimini ve membran ömrünü önemli ölçüde artırır. Homojen dağılım dışında su yönetimi, elektriksel iletkenlik ve ısı dağılımı konusunda sistem performansını artırır.

1.3.5 Katalizör Tabakası

Katalizör tabakası, membranın iki yüzeyinde bulunan kalınlığı en az olan bileşendir. Bu tabaka membran üzerinde gaz difüzyon tabakasının altında bulunur. Anot kısmında katalizör hidrojenin proton ve elektronunun ayrılmasını kolaylaştırır. Katot kısmında ise su oluşmasını destekler. Genellikle platin destekli bir yapıya sahiptir.

1.3.6 Membran Tabakası

Membran tabakası, anot ve katot bölmesini birbirinden ayıran temel bileşendir. 2 bölmeyi birbirinden ayıran bu yapı tepkime süresince artı yüklü iyonları iletir. Genellikle nafyon adı verilen bir malzemeden üretilir.

1.4 PEM Yakıt Pilinde Bipolar Plaka Tasarımının Önemi

Proton Değişim Yakıt Pili (PDMYP/PEMYP) hücrelerinde bulunan bipolar plakanın tasarımı, hücrenin performansını ve verimini artırma konusunda kritik öneme sahiptir. Bipolar plakanın birden çok görevi vardır. Hidrojen ve oksijenin homojen dağılımını kolaylaştırır, elektrik iletir, termal olarak ısı transferini sağlar ve hücre içi su yönetimine yardımcı olur.

Bipolar plakanın elektriksel iletkenliği direkt olarak performansı etkilemektedir. Yüksek elektrik iletkenliği performansı önemli biçimde artırır. Çeşitli çalışmalar malzeme ve kaplama seçiminin elektrik iletkenliğini etkilediğini belirtmektedir (Phuangngamphan et al., 2019). Bipolar plaka malzemesi olarak çoğunlukla paslanmaz çelik ve grafit malzemeler kullanılır. Çeliklerin elektrik iletkenliği iyidir fakat tepkime ortamında korozyon direnci düşüktür. Korozyon hücre ömrünü olumsuz etkilemektedir

Bipolar plaka tasarımı, akış alanının gelen gazın homojen biçimde dağıtılmasını ve su buharının sistemden uzaklaştırılmasını sağlar. Akışın homojen olması, performans ve membran sağlığı için önemlidir. Çeşitli kaplama yöntemleri son dönemlerde gelişme sağlanmış, iyon aşılama gibi birçok yöntem gelişmiştir (Mathew et al., 2025).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

PEM Yakıt Pili için literatür taraması yapılmış araştırma sonuçları derlenmiştir. Yakıt pili akış deseni, akış geometrisi, deney ve sayısal yöntemler incelenmiştir.

S. Çelik (2018) tarafından yapılan bu çalışmada, farklı akış kanalı tasarımları geliştirilmiştir ve PEM yakıt pili performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Beş farklı akış plakası tasarımı (dairesel serpantin, modifiye daha geniş akış kanallı dairesel serpantin, karesel serpantin, modifiye akış dönüşleri kavisli karesel serpantin, paralel akış karesel serpantin) test edilmiştir ve basınçlı ve basınçsız koşullarda performans karşılaştırması yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, dairesel ve karesel tasarımlarda, karesel tasarım çok az bir farkla daha iyi performans vermiştir. Kanal genişliğinin artırılmasının performansa olumsuz etkisi olduğu ve yaklaşık %25'lik bir kayba yol açtığı gözlemlenmiştir. Karesel tasarımlarda dönüş çapının genişletilmesi, ölü bölgeler oluşturarak performansı olumsuz etkilemiştir ve su zerreciklerinin tahliyesini ve akışın düzenliliğini artırmak amaçlanmış olsa da aktif alanın tam verimli kullanılmasını engellemiştir. Çalışma, çoklu serpantin kanalların gaz dağılımı ve su yönetimi açısından optimize olduğunu ve 1 mm kanal genişliği/derinliğinin ideal olduğunu vurgulamıştır.

F. Koçak ve ark. (2019) tarafından yapılan bu çalışmada, düşük sıcaklıkta çalışan proton değişim membranlı yakıt hücreleri için üç boyutlu, izotermal olmayan bir model geliştirilmiş ve bu model, Mississippi State Üniversitesi'nden elde edilen deneysel verilerle doğrulanmıştır. Yapılan analizler, kanal yüksekliği sabit tutulduğunda kanal genişliğinin artırılmasının yakıt hücresi performansını yükselttiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kanalın kesit alanı sabitken difüzyon tabakasıyla temas eden reaktan yüzeyinin büyümesi, performansta olumlu bir artış sağlamaktadır.

A.D Le ve B. Zhou (2008) tarafından yapılan bu çalışmada PEM yakıt pili modellenmiştir. Bu model içerisinde akışkan özellikleri ısı etkileri ve reaksiyon etkileri incelenmiştir. Su etkilerinin yakıt pili üzerinde etkisi incelenmiştir. Model içerisinde bileşenler detaylı olarak modellenmiştir. Akış deseni olarak serpantin model seçilmiştir. Serpantin akış deseni üzerinde tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda

akış kanallarında biriken suyun tasarım optimizasyonunda etkili olduğunu kanıtlamışlardır.

Busqué ve ark. (2023), PEM yakıt pili bileşenlerinden olan bipolar plaka kanal geometrisi tasarımının verimliliğe etkisini simülasyon ile incelemiştir. Beş farklı kanal kesiti (dar dikdörtgen, dikdörtgen, derin dikdörtgen, bafflel ve trapez) üzerinde çalışma yapılmıştır. Analiz çalışması Ansys PEM modüle kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde trapez kanal 0.3V seviyesinde en iyi performansı göstermiştir. Bu geometri dikdörtgen yapıya göre %4.46 daha fazla güç üretmiş ve 74,89° maksimum sıcaklığa ulaşmıştır. Dar dikdörtgen geometri yapısı ise akışı hızlandırdığı için %3,21 oranında performans artışı sağlamıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak; kanal şeklinin sadece basınç değişimini değil, tepkime hızı ve sıcaklık dağılımını da etkilediği görülmüştür. Trapez kesitli yapılar performans ve üretim kolaylığı açısından avantajlıdır.

Wilberforce ve Amiri (2023), PEM yakıt pili akış geometrisinin hücre performansına etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, serpantin ve paralel akış kanallarını referans alarak üç yen tasarım önerilmiştir. Bunlar; Tapered Dual Derpentine Channel (TDSC), Tapered Paralel Channel Design (TPCD) ve Tapered Dual Maze Channel (TDMC) tasarımlarıdır. Ansys üzerinde fluent modülü kullanarak yapılmıştır.

Kanal giriş ve çıkışlarının daraltıldığı tasarımların performansları önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. TDMC geometrisi diğer tasarımlara göre en yüksek akım yoğunluğuna sahiptir. %13,67 oranında daha yüksek akım yoğunluğu ile daha yüksek performans göstermiştir.

Xu ve ark. (2022), PEM yakıt pilli trapeziodal kesitli akış kanalları ve bunlara entegre edilen baffle (engel) yapıların hücre performansına etkilerini incelemişlerdir.
Çalışmada gaz difüzyon tabakası (GDL) ile akış kanalı arasındaki temas yüzeyini değiştirerek akım yoğunluğunda iyileşme görülmüştür. Trapezoidal kesitli kanallara yerleştirilen baffle yapıları klasik kanal yapılarına göre daha yüksek verimli olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan optimizasyonda reaktan gazlar gaz difüzyon tabakasına daha iyi nüfuz etmesini sağlamış ve reaksiyon hızı artmıştır.

Nguyen ve White (1993), PEM yakıt pili hücresi için iki boyutlu ısı ve su yönetim durumunu modellemiştir. Model; difüzyon, buharlaşma, yoğuşma ve ısı transferini içerir. Model yüksek akım yoğunluğunda çözümlenmiştir. Yüksek akım yoğunluğunda sadece katottan geri difüzyonun yeterli olmadığı, dolayısıyla anot ve katot kısmının nemlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda model üzerinde yapılan çalışmalar bipolar plakanın ısı transferindeki önemini gözlemlemiştir.

Geliş (2020), yapmış olduğu çalışmada, PEM yakıt hücresinde bir tarafı şeffaf olan bipolar plaka tasarımı ile gaz akış kanallarında oluşan sıvı su damlacıklarını gözlemlemeyi amaçlamıştır. Yakıt hücresi içerisindeki su damlacığının gözlemlenebilmesi için katot gaz akış kanalının şeffaf olarak imal edilmesi ve bipolar plaka malzemesinin elektron iletimini sağlaması gerekmektedir. Şeffaf yakıt pili elde etmek için 1mm kalınlığında kanal tasarımı yapılmış, 10 mm kalınlığındaki polikarbonat levha sac levha üzerine monte edilmiştir. Şeffaf olarak imal edilen yakıt pili, alüminyum levha üzerine imal edilen kanal tasarımı deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda katalizör yüklemesindeki meydana gelen artış ile şeffaf olmayan yakıt hücresinin etkinliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Bipolar plakalar aynı zamanda iletken plakalar olarak ifade edilmektedir. Bu plakalar yakıt pili hücreleri arasında bulunan akışkanların iletimini gerçekleştirmektedirler. Malzemem olarak bu plakların üretiminde grafit veya metal esaslı malzemeler tercih edilmektedir. Elektriksel iletkenlik, gaz dağılımı ve akışkan yöntemi, ısı yönetimi, su yöntemi, mekanik dayanıklılık ve ağırlık gibi parametreler bipolar plaka tasarımındaki belirli parametreler olup yakıt pili performansını etkilemektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Teorik Temeller

Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP/PEMYP) temel çalışma prensibi incelendiğinde, elektrokimyasal tepkimeler, kütle ve enerji transfer mekanizmaları, su yönetimi ve bipolar plaka tasarım parametreleri ile performans hesaplarını içermektedir.

3.1.1 PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP/PEMYP), dışardan sisteme dahil olan hidrojeni anot kısmında oksitleyerek proton ve elektronuna ayırır. Bünyesinde bulunan membran üzerinden proton geçerken, elektron harici bir hat üzerinden katoda doğru yönelir. Hidrojen protonu ve elektronu katot bölgesine geçtikten sonra elektrokimyasal tepkime gerçekleşir ve su oluşur. Bu reaksiyon denklem (3.3)'te verilmiştir.

$$Anot\ Reaksiyonu: H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \tag{3.1}$$

$$Katot\ Reaksiyonu: \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \tag{3.2}$$

$$Net\ Reaksiyon: H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + Enerji(ısı + elektrik) \tag{3.3}$$

Bir PEM yakıt pili hücresinde ölçülen açık devre gerilimi, Nernst denklemi ile teorik olarak hesaplanır. Bu denklem içerisinde tepkimeye giren gazların kısmi basınçları ve çalışma sıcaklıkları vardır (Ansys Inc., 2021).

$$E_{cell} = E^0_{cell} + \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{P_{H_2}.P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \tag{3.3}$$

E^0_{cell} : Standart koşullarda hücre potansiyeli (1.23V)

R: Evrensel gaz sabiti (J/(mol·K))

T: Mutlak sıcaklık (K)

F: Faraday sabiti **(**C/mol)

P: Kısmi gaz basıncı (Pa)

3.1.2 Matematiksel Model

Matematiksel model içerisinde anodik ve katodik reaksiyon oranlarının hesabı yer almaktadır. Hesap anot ve katot reaksiyon hızlarının hesaplanmasıyla ilişkilidir. Reaksiyon süresince elektron (e^-) ve proton (H^+) taşınımı gerçekleşir. Bu taşınım modeli içinde ayrı potansiyel denklemi yer alır.

1. **Elektron taşınımı için (φ_{sol}):** Katı iletken malzemelerde elektron taşınımını açıklar. (Katı faz).

$$\nabla.(\sigma_{sol}\nabla\emptyset_{sol}) + R_{sol} = 0 \tag{3.4}$$

σ_{sol}: Katı malzeme elektriksel iletkenlik (1/ohm.m)

φ_{sol}: Katı malzeme elektrik potansiyel (volt)

R_{sol}: Hacimsel transfer akısı (A/m^3)

2. **Proton taşınımı için (φ_{mem}):** Elektrolit/membran içinde iyon (H^+) taşınımını açıklar. (Membran Fazı).

$$\nabla.(\sigma_{mem}\nabla\emptyset_{mem}) + R_{mem} = 0 \tag{3.5}$$

σ_{mem}: Elektrolit fazın elektriksel iletkenlik (1/ohm.m)

$\emptyset_{mem}$: Elektrolit fazın elektrik potansiyel (volt)

R_{mem}: Hacimsel transfer akısı (A/m^3)

Bu iki faz arasında oluşan potansiyel fark, aktivasyon potansiyelini (η) oluşturur.

$$\eta = \emptyset_{sol} - \emptyset_{mem} - E_{eq} \tag{3.6}$$

E_{eq}: Reaksiyonun olması gereken teorik potansiyeli(V)

Hacimsel transfer akısının genel tanımları genel olarak şu şekildedir.

$$R_{an} = (\zeta_{an} j_{an}(T)) \left(\frac{A}{A_{ref}}\right)^{\Upsilon an} \left(\frac{e^{\propto_{an}^{an} F\eta_{an}}}{RT} - \frac{e^{-\propto_{cat}^{an} F\eta_{an}}}{RT}\right) \tag{3.7}$$

$$R_{cat} = (\zeta_{cat} j_{cat}(T)) \left(\frac{A}{A_{ref}}\right)^{\Upsilon cat} \left(\frac{e^{\propto_{an}^{cat} F\eta_{an}}}{RT} + \frac{e^{-\propto_{cat}^{cat} F\eta_{cat}}}{RT}\right) \tag{3.8}$$

R_{an}: Anot Hacimsel akı (A/m^3)

R_{cat}: Katot Hacimsel akı (A/m^3)

j(T): Referans değişim akım yoğunluğu (A/m^2)

ζ: Aktif yüzey alanı (1/m)

Υ: Korelasyon bağımlılığı (-)

$\propto_{an}^{an}, \propto_{cat}^{an}$: Anot elektrotunun anot ve katot transfer katsayıları (-)

$\propto_{an}^{cat}, \propto_{cat}^{cat}$: Katot elektrotunun anot ve katot transfer katsayısı (-)

η_{an}, η_{cat}: Anot ve katot yüzey potansiyelleri (V)

F: Faraday sabiti **(**C/mol)

R: Evrensel gaz sabiti (J/(mol·K))

T: Sıcaklık (K)

3.1.3 Aktivasyon Aşırı Potansiyeli ve Transfer Akımları

Fiziksel olarak çalışan bir yakıt pili hücresi voltajı, teorik Nernst potansiyelinden düşüktür. Bu düşüsün üç temel sebebi vardır.

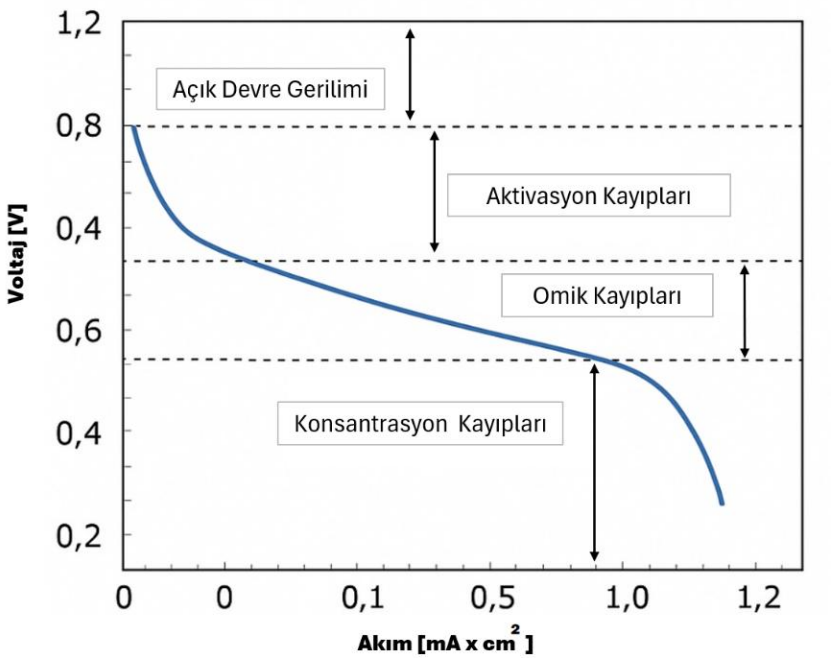
1. **Aktivasyon kaybı (η_{akt}):** Sistemin aktif olup reaksiyonun başlaması için gereken enerji eşini aşma kaybıdır.

2. **Ohmik kayıp (η_{ohm}):** Elektron ve protonların iç dirençlerinden kaynaklı oluşan kayıpları içerir.

3. **Konsantrasyon kaybı (η_{kon}):** Elektrokimyasal tepkimenin gecikmesinden sınırlamalardan kaynaklanır.

Toplam hücre voltajı, hücre başlangıç voltajı ve kayıpların toplamını içerir.

$$V_{cell} = E_{Nernst} - \eta_{akt} - \eta_{ohm} - \eta_{kon} \tag{3.9}$$



Şekil 3.1 Yakıt Pili Kayıp Eğrisi

Oluşan kayıplar Şekil 3.1'de grafik üzerinde gösterilmiştir. Yakıt pili kayıp eğrisi, açık devre gerilimi ve üç kayıp bölgesini gösterir: düşük akım yoğunluğunda aktivasyon kayıpları, orta akım yoğunluğunda ohmik kayıplar ve yüksek akım yoğunluğunda kütle taşınımı kayıpları meydana gelir; bu eğri, hücre performansını ve verim sınırlarını belirlemede temel bir araçtır

Butler – Volmer formülünün genel yazılmış halidir. η Büyük ise denklem sadeleşir. Bu haliyle Tafel formülü olarak bilinir

$$R_{an} = \zeta_{an} j_{an}(T) \left(\frac{A}{A_{ref}}\right)^{\Upsilon an} \left(\frac{e^{\propto_{an}} F \eta_{an}}{RT}\right) \tag{3.10}$$

$$R_{cat} = \zeta_{cat} j_{cat}(T) \left(\frac{A}{A_{ref}}\right)^{\Upsilon cat} \left(\frac{e^{\propto_{cat}} F \eta_{cat}}{RT}\right. \tag{3.11}$$

Referans akım yoğunluğu değişimi $j_{cat}(T), j_{an}(T)$ lokal sıcaklığına bağlıdır.

$$j_{an}(T) = j_{an}^{ref} e^{-E_{an}/RT\left(1-\frac{T}{T_{an}^{ref}}\right)} \tag{3.12}$$

$$j_{cat}(T) = j_{cat}^{ref} e^{-E_{cat}/RT\left(1-\frac{T}{T_{cat}^{ref}}\right)} \tag{3.13}$$

Kinetik süreçlerindeki itici güç, yerel yüzey aşırı potansiyeli (η), diğer tanımıyla aktivasyon kaybı olarak bilinmektedir. Bu potansiyel, genellikle katı elektrot (ϕ_{k}) ile membran (ϕ_{mem}) arasındaki voltaj kaybından oluşur.

$$\eta_{an} = \phi k - \phi_{mem} - U_{an}^{0} \tag{3.14}$$

$$\eta_{cat} = \phi k - \phi_{mem} - U_{cat}^{0} \tag{3.15}$$

3.1.4 Nernst Potansiyeli Denklemi ve Açıklaması

Anot ve katottaki yarı hücre potansiyelleri (η_{an}, η_{cat}), Nernst denklemi ile çözülür. Nernst potansiyeli, sistemde teorik olarak elde edilebilecek maksimum hücre gerilimidir. Gazların sıcaklığına ve kısmi basıncına bağlıdır(Ansys Inc., 2021).

$$U_{an}^{0} = E_{an}^{0} - \frac{\Delta S_{an}}{2F}(T - T^{0}) - \frac{RT}{2F} Ln\,(\frac{PH_2}{P^{0}}) \quad (3.15)$$

$$U_{cat}^{0} = E_{cat}^{0} - \frac{\Delta S_{cat}}{2F}(T - T^{0}) - \frac{RT}{2F} Ln\,(\frac{PH_2}{P_{sat}\sqrt{\frac{PO_2}{P^{0}}}}) \quad (3.16)$$

P_{sat}: Suyun doyma basıncı (Pa)

$P_{H_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$: Türlerin kısmi basıncı (Pa)

T^{0}, P^{0}: Standart hal sıcaklık, basınç (K), (Pa)

E_{an}^{0}, E_{cat}^{0}: Tersinir potansiyel (V)

ΔS_{an}, ΔS_{cat}: Reaksiyon entropisi (J/(mol·K))

3.1.5 Gaz Difüzyon ve Su Taşınımı Denklemi

Yakıt pili içerisinde elektrokimyasal tepkime gerçekleştiğinde atık olarak su oluşur. Su molekülleri gaz difüzyon tabakasından (GDL) ilerleyip akış kanalına geçer. Su oluşumundan kaynaklanan basınç düşüşünü inceleyen denklemler şu şekildedir (Ansys Inc., 2021).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f s) + \nabla\,.\,(\rho_f s \overrightarrow{v_l} s) = \nabla.(D_{liq}\nabla s) \quad (3.14)$$

ρ_f: Sıvı yoğunluğu (kg/m³)

s: Sıvı Yoğunluğu (kg/m³)

$\overrightarrow{v_l}$: Sıvı hızı (m/s)

D_{liq} : Sıvının gaz halindeki difüzyon katsayısı (m^2/s)

Sıvı hızı, gaz hızının bir fraksiyonu olarak değerlendirilir.

$$\overrightarrow{v_l} = \mathcal{X}\overrightarrow{v_g} \quad (3.15)$$

$\mathcal{X}$: Sıvı-gaz hız oranı (-)

$\overrightarrow{v_g}$: Gaz hızı (m/s)

Hesaplamalar içerisinde anot ve katot girişlerinde sıvı doygunluğu s=0 olarak kabul edilir. Isı iletiminin taşınım ağırlıklı olduğu varsayıldığı içi akış kanalında faz değişimleri ihmal edilir. Suyun gözenekli ortamlar (GDL, MPL) içinde taşınması kapiler basınç farkı ile oluşur. Bu basınç sıvı doygunluğu ile ilişkilidir. Bu ilişkiyi Leverett fonksiyonu tanımlar.

$$P_c = \sigma \, . J(S_l) \tag{3.16}$$

P_c: Kapiler basınç (Pa)
σ: Yüzey gerilimi (N/mm^2)
S_l: Sıvı doygunluğu (-)
J: Leverett fonksiyonu (-)

3.1.6 Isı Kaynakları Tablosu

Yakıt pili modellemesinde elektrokimyasal reaksiyon sırasında açığa çıkan enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüşmez. Dolayısıyla termodinamik denklemlere ek olarak hacimsel ısı kaynakları da dahil edilir.

Çizelge 3.1 Isı Kaynakları terimi (Ansys Inc., 2021)

Bölge	Isı Kaynağı Terimi
GDL + MPL	$\frac{i_s^2}{\sigma_{sol}} - S'_{gl}.L$
Anot Katalizör Tabakası	$R_{an}\left(\eta_{an} - \frac{T\Delta S_{an}}{2F}\right) + \frac{i_s^2}{\sigma_{sol}} + \frac{i_m^2}{\sigma_{mem}} - \left(S_{dl} + S_{gl}\right).L$
Katot Katalizör Tabakası	$R_{cat}\left(-\eta_{cat} - \frac{T\Delta S_{cat}}{2F}\right) + \frac{i_s^2}{\sigma_{sol}} + \frac{i_m^2}{\sigma_{mem}} - \left(S_{dl} + S_{gl}\right).L$
Membran (katı)	$\frac{i_m^2}{\sigma_{mem}}$
Akım Toplayıcı (katı)	$\frac{i_s^2}{\sigma_{sol}}$
Gaz Kanalları	Yok

i_s: Katı faz akım yoğunluğu (A/m^2)

i_m: Membran fazı akım yoğunluğu (A/m^2)

$\sigma_{sol}, \sigma_{mem}$: Katı faz ve membran fazı elektriksel iletkenliği (S/m)

R: Reaksiyon oranı (-)

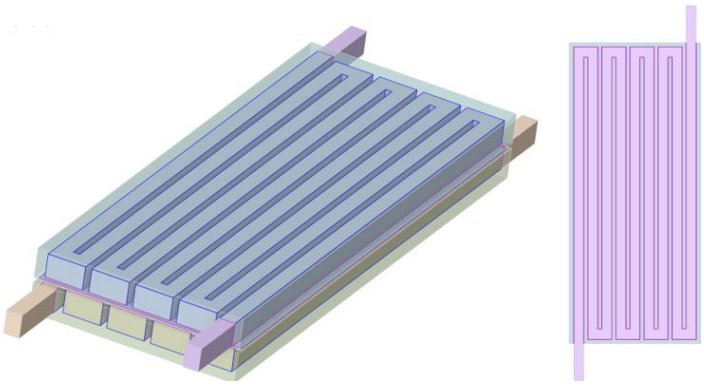
η: Aktivasyon aşırı potansiyeli (V)

L (<0): Yoğuşmadan kaynaklı gizli ısı (J)

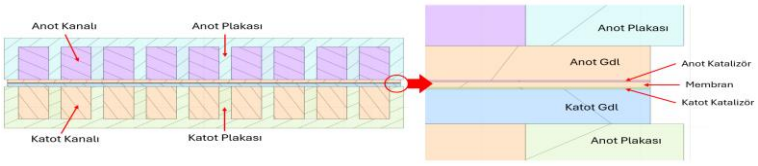
Bölgelere göre hacimsel ısı kaynakları Çizelge 3.1'de verilmiştir (Ansys Inc., 2021). Sistem enerji dengesini tutarlı hesaplamak ve ısı üretimini bölgesel olarak modellemek kaynak terimleri kullanılır.

3.2 Model Doğrulama

Proton Değişim Membran Yakıt Pili (PDMYP/PEMYP), analiz metotları irdelendiğinde Ansys programı fluent ara yüzünde bulunan PEM modülü üzerinden çözüm yapılabileceği gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle model doğrulama çalışması amacıyla Ansys üzerinden analiz çalışması yapılması amaçlanmıştır.



Şekil 3.2 Model Görünüm (Ansys Inc., 2023)

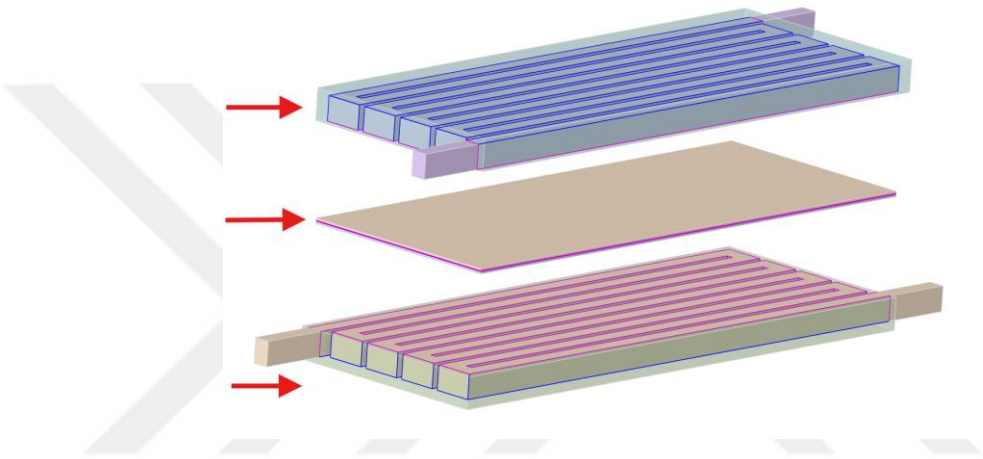


Şekil 3.3 Bileşen Tanımlaması (Ansys Inc., 2023)

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te yakıt pili hücre model geometrisi ve tanımlamalar gösterilmiştir. Kesit görünümde membran setinin isimleri ve konumları gösterilmiştir.

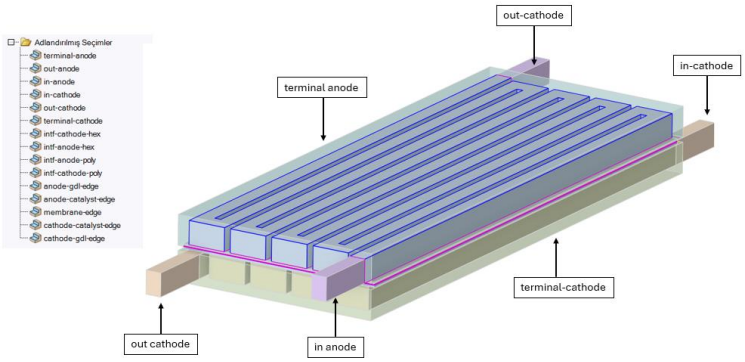
3.2.1 Geometri Hazırlama

Boyutları belirli olan modelin yüzey isimlendirmesi yapılıp, birleştirilecek yüzeyler belirlenip birbiri ile ilişkisi tanımlanmıştır. Geometri üzerinde ortak yüzeyleri paylaşan bölgeleri birleştirme işlemi yapılır.



Şekil 3.4 Yüzey Birleştirme işlemi

Şekil 3.4'te gösterilen yüzey birleştirme işleminden sonra yüzeyler isimlendirilir. İsimlendirilmiş yüzeyler sınır şartı belirlemede kullanılır.

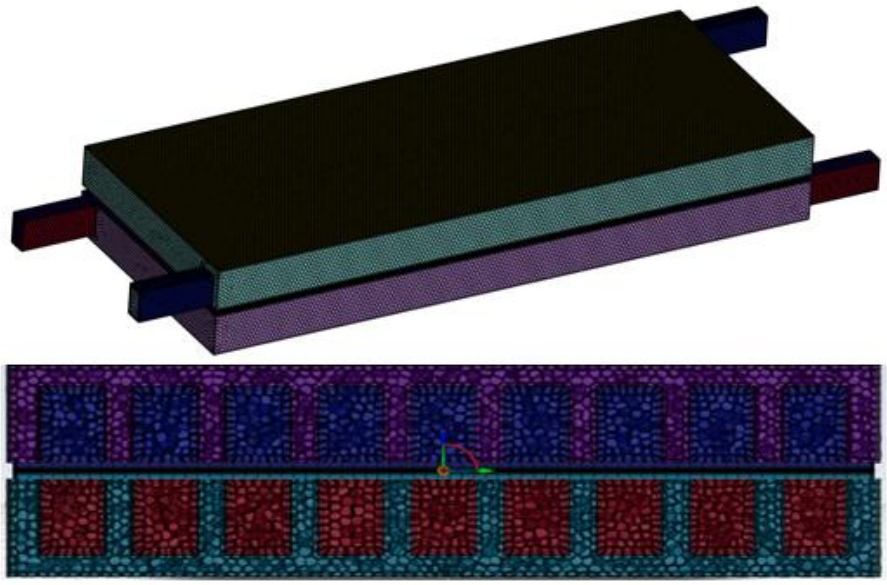


Şekil 3.5 Yüzey İsimlendirme

Şekil 3.5'te belirtilen isimlendirmeler hücre geometrisi üzerinde yapılmıştır. İsimlendirmeler model kurulumunda kullanılacaktır.

3.2.2 Mesh Oluşturma

İlk olarak yüzey ağı oluşturulmuş sonrasında yüzey ayrımı yapılmıştır. Yüzeyler geometri kısmında birleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Mesh Genel Görünüm

Şekil 3.6'da uygulanan mesh çalışması gösterilmiştir. Sonuçların düzgün yakınsaması için sınır tabaka çalışması yapılmıştır. İnce katmanlarda mesh boyutu küçültülmüştür. Mesh yapısı olarak poly ve hex mesh türü tercih edilmiştir. Mesh kontrolü yapılmıştır.

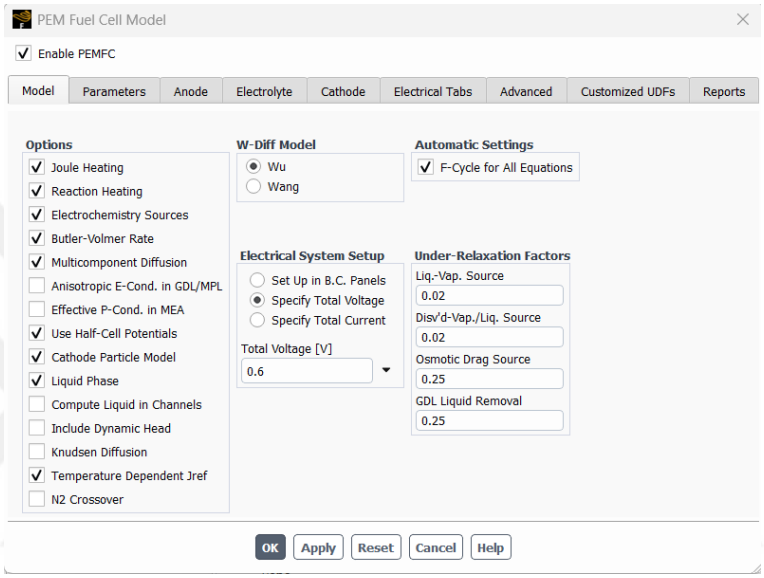
Çizelge 3.2 Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.20
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1.00
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.90

Çizelge 3.2'de mesh kalitesi incelenmiştir. Minimum ortogonal kalite 0,2 olarak gözlemlenmiştir. Analiz sonucu almak için yeterli kabul edilmiştir.

3.2.3 Fiziksel Model Ayarları

Ağ yapısı tanımlandıktan sonra Ansys Fluent arayüzünde model ayarlarına geçilmiştir. Bu çalışmada akış laminer kabul edilmiştir. PEM yakıt pillerinde düşük Reynolds sayısı (R=108) sebebiyle akış laminer kabul edilir. Model içerisinde yer alan PEMFC model aktif edildikten sonra girdiler tanımlanmıştır.



Şekil 3.7 Arayüz Ayarları

Şekil 3.7'de PEM modülü ara yüzü gösterilmiştir. PEM yakıt pili modeli, arayüz üzerinde sunulan sekmeler aracılığıyla kapsamlı bir şekilde yapılandırılmıştır. Model sekmesi altında temel fiziksel süreçler (ısıl etkiler, elektrokimyasal kaynaklar, çok bileşenli difüzyon, Knudsen difüzyonu, sıvı faz oluşumu) etkinleştirilmiş ve çözümde kullanılacak yaklaşım seçenekleri belirlenmiştir. Parameters, Anode, Electrolyte ve Cathode sekmeleri, her bir bölgeye ait malzeme özellikleri, reaksiyon parametreleri ve iletkenlik modellerinin tanımlandığı kısımlardır. Electrical Tabs bölümünde pilin çalışma modu, toplam gerilim veya akım seçimi gibi elektriksel sınır koşulları belirlenmiştir. Advanced sekmesi, gevşeme faktörleri ve çözüm kararlılığını etkileyen ek numerik ayarları içermektedir. Ayrıca Customized UDFs sekmesi, özel kullanıcı fonksiyonlarının modele entegre edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yapı sayesinde model, fizik, malzeme ve

elektriksel ayarların tutarlı bir şekilde tanımlandığı bütüncül bir çözüm ortamı sunmaktadır.

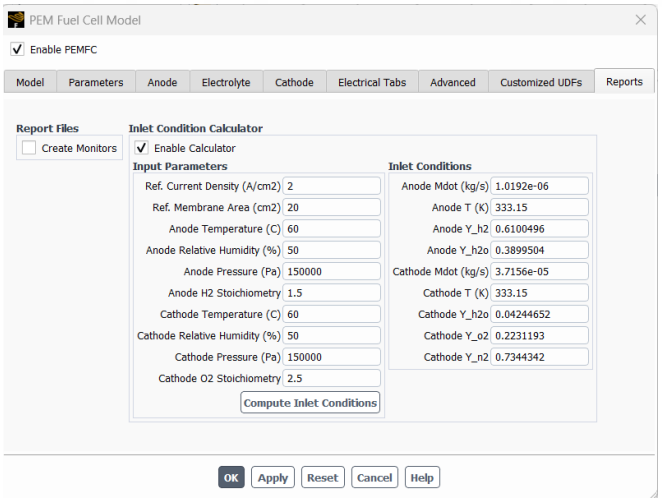
Çizelge 3.3 Ansys Fluent Model Ayarları ve Açıklamaları

Seçenek	Tanım
Joule Heating	Hücre içerisinde bulunan katı bölgelerde oluşan ısı kaybını modele dahil eder.
Reaction Heating	Hücre içerisinde elektrokimyasal tepkime sonucu çıkan ısıyı modele dahil eder
Electrochemistry Sources	Model içerisinde elektrokimyasal çözümün oluşmasını sağlar. Seçenek işaretlenmediğinde sadece akış çözer.
Butler-Volmer Rate	Reaksiyon hızını tanımlayan denklemdir. Reaksiyon kinetiğini sıcaklık ve gerilimle ilişkilendirir.
Multicomponent Diffusion	Gaz bileşenleri arasındaki çoklu difüzyonu hesaba katar.
Anisotropic E-Conductivity in GDL/MPL	Gaz difüzyon tabakası (GDL) ve mikro gözenekli yapı (MPL) kısımlarında elektriksel iletkenliğin yön bağımlı olduğunu (anizotropik) kabul eder
Effective P-Conductivity in MEA	Membran montajı içerisinde iyonik iletkenliğin etkisini dahil eder. Heterojen modellerin basitleştirilmiş halidir.
Use Half-Cell Potentials	Yarım hücre potansiyeli üzerinden elektrot potansiyelini tanımlar. Genellikle referans elektrot hesabında kullanılır.
Cathode Particle Model	Katot katalizör yüzeyinde mikro düzeyde difüzyon ve reaksiyon modellenir.
Liquid Phase	Modele su üretimini dahil eder.
Compute Liquid in Channels	Akış kanallarındaki su miktarını hesaplar.
Include Dynamic Head	Akışkan hareketinde kinetik enerjiyi hesaplar.
Knudsen Diffusion	Gözenekli yapılarda Knudsen difüzyon etkisini dahil eder.
Temperature Dependent Jref	Jref ‘in (Reaksiyon hızı) sıcaklığa bağlı değişimini inceler.
N_2 Crossover	Katot kanalındaki azotun (N_2) membran üzerinden anot tarafına geçişini inceler.

Çizelge 3.4 Tanımlamalar

Bölge	Tanım
Anode-cc	Akım Plakası (Current Collector)
Anode-ch	Akış Kanalı (Flow Channel)
Anode-Gdl	Gaz Difüzyon Tabakası (Porous Electrode / GDL)
Anode Catalyst	Katalizör (TPB Layer)
Cathode-cc	Akım Plakası (Current Collector)
Cathode-ch	Akış Kanalı (Flow Channel)
Cathode-Gdl	Gaz Difüzyon Tabakası (Porous Electrode / GDL)
Cathode Catalyst	Katalizör (TPB Layer)
Membrane	Elektrolit (Electrolyte)

Çizelge 3.3'te PEM ara yüzünde gösterilen model ayarları ve açıklamaları verilmiştir. PEMFC panelinden PEM yakıt pili modellendiği için elektrolit olarak membran tanımlanmıştır. Electrical sekmesinde ise diğer bileşenler tanımlanmıştır. Sınır şartları, Report bölmesinde hesaplanmıştır. Çizelge 3.4'te gösterilen tanımlamalar, geometri kısmında yapılan isimlendirmelerle model içerisindeki ilgili bileşenleri göstermektedir.



Şekil 3.8 Sınır Şartı Hesabı

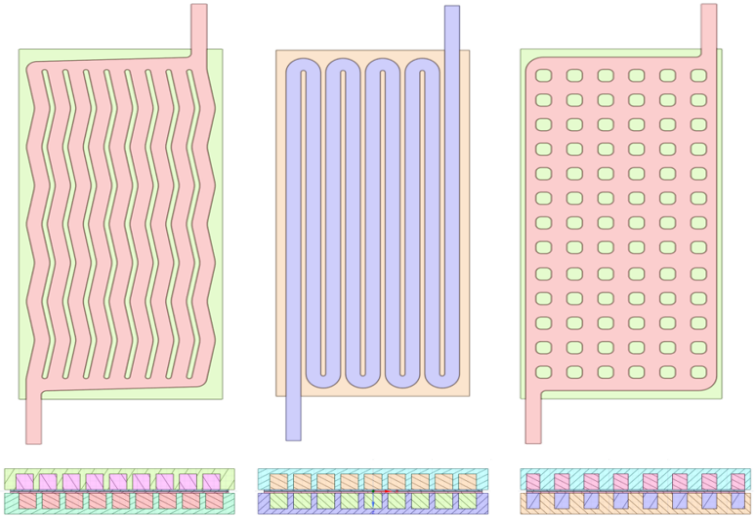
Şekil 3.8'de ara yüzde tanımlanan sınır şartlarının, kullanıcı tarafından girilen giriş parametreleri (inlet condition) doğrultusunda görüntülendiğini göstermektedir. Analiz çalışması belirli voltaj aralığında iterasyon yapılmıştır. 0,7V-0,3V arasında analiz çözümü yapılmıştır.

3.3 Akış Plaka Tasarımı

Bipolar plaka tasarımı PEM yakıt pili performansını önemli biçimde etkilemektedir. Sistem içerisine giren akış kanal içerisinde ilerleyip elektrokimyasal tepkime oluşur. Kanal deseni tasarımı bu tepkimenin verimini etkilemektedir.

3.3.1 Akış Deseni Tasarımı ve Modellenmesi

Akış plakası tasarımı yapılırken akışı iyi yönlendirmek amaçlı çeşitli desen tasarımları yapılmaktadır. Desen tasarımları akışı dengeleyerek verimi artırmalıdır. Desen tasarımlarında önemli parametreler ise hız, basınç ve sıcaklık dengesidir. Akış deseni tasarımında 3 farklı tasarım ele alınmıştır. Bu tasarımlar dalgalı, serpantin ve ızgara desen akış plaka modelleridir.

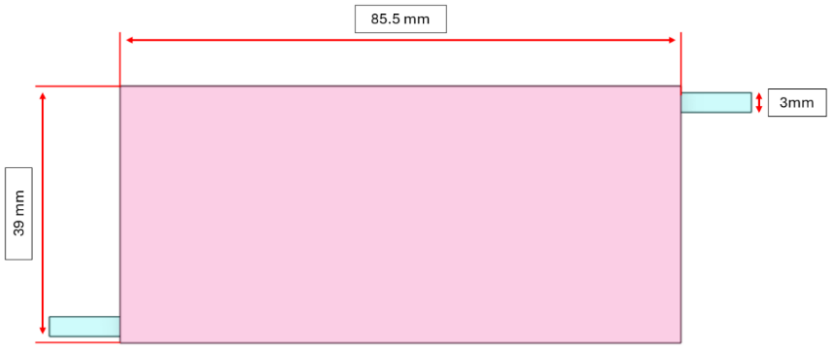


Şekil 3.9 Kesit Görünüm

Şekil 3.9'da akış desen geometrileri ve kesit görünümleri gösterilmiştir. Yapılan plaka tasarımları efektif yüzey alanları 30 cm^2 olacak şekilde tasarlamıştır. Kanal derinliği 3mm'dir. Akış desenleri sırası ile;

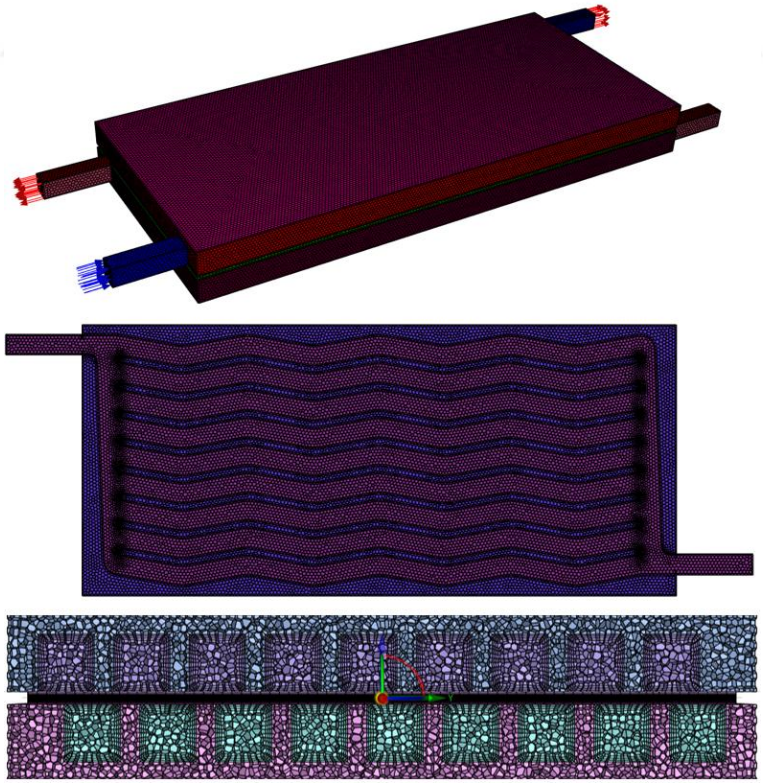
- Dalgalı Model
- Serpantin Model
- Izgara Model

Şeklinde isimlendirilmiştir. Plakaların desen dışındaki ölçüleri değiştirilmemiştir.



Şekil 3.10 Plaka Ölçüleri

Şekil 3.10'da bütün modellerde sabit tutulan ölçüler gösterilmiştir. Tasarımları yapılan modeller space claim üzerinde gerekli geometri temizlikleri yapıldıktan sonra, mesh ve sınır şartları belirleme işlemleri yapılması gereklidir. Mesh olarak poly ve hex mesh yapısı kullanılmıştır.

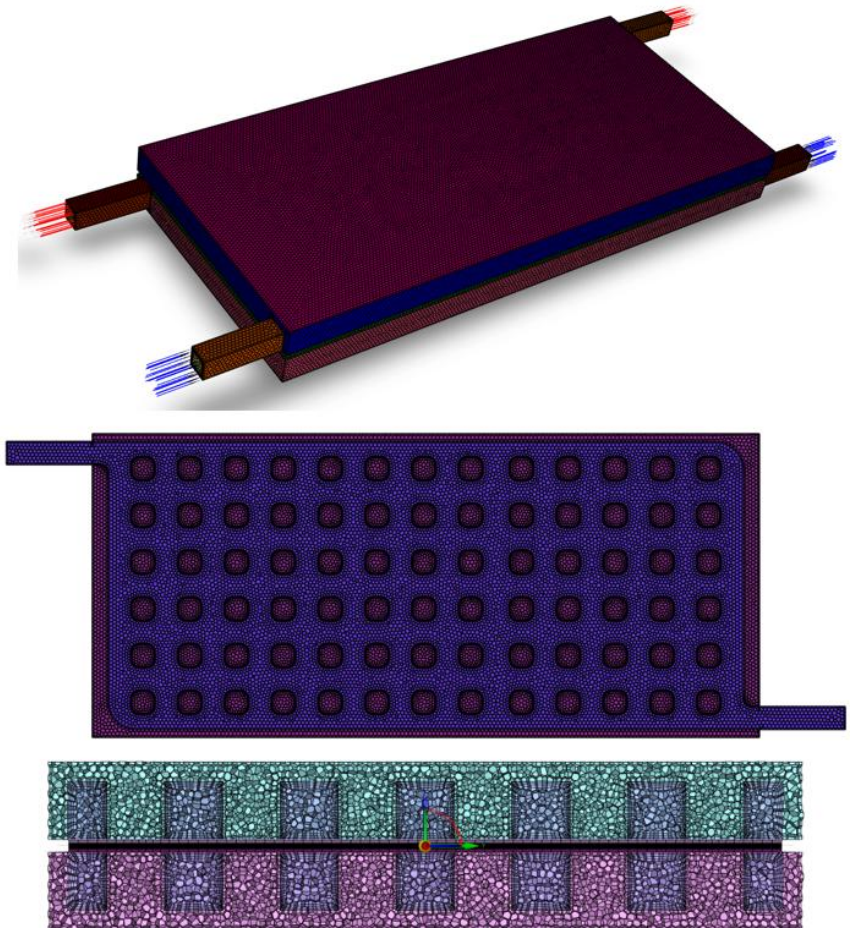


Şekil 3.11 Dalgalı Model Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.5 Dalgalı Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.21
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1.00
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.92

Şekil 3.11'de dalgalı akış alanına sahip modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Mesh, üstten, üst yüzeyden ve kesit görünümünden üç farklı açıyla görüntülenmiştir. Çizelge 3.5'te ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.92 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.

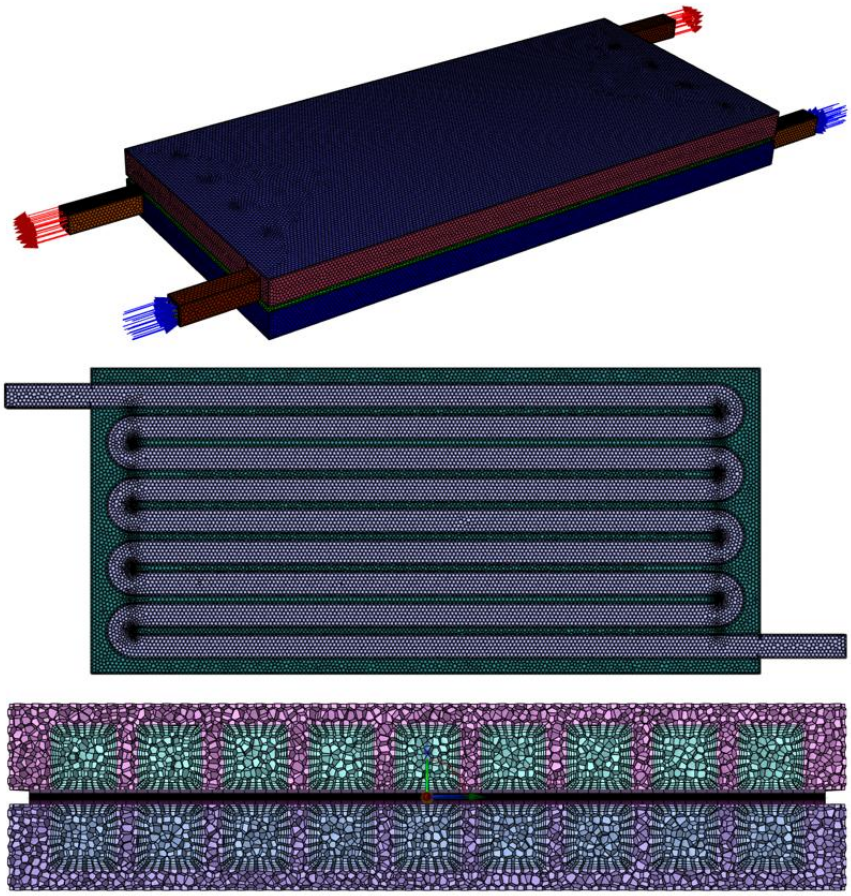


Şekil 3.12 Izgara Model Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.6 Izgara Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.22
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1.00
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.91

Şekil 3.12'de ızgara model akış alanına sahip modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Mesh, üstten, üst yüzeyden ve kesit görünümünden üç farklı açıyla görüntülenmiştir. Çizelge 3.6'da ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.91 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.13 Serpantin Model Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.7 Serpantin Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.20
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.92

Şekil 3.13'te serpantin model akış alanına sahip modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Mesh, üstten, üst yüzeyden ve kesit görünümünden üç farklı açıyla görüntülenmiştir. Çizelge 3.7'de ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.92 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Sınır şartları belirlenen akış plakaları modellerinde ortak membran geometrileri kullanılmıştır.

Çizelge 3.8 Sınır Şartları

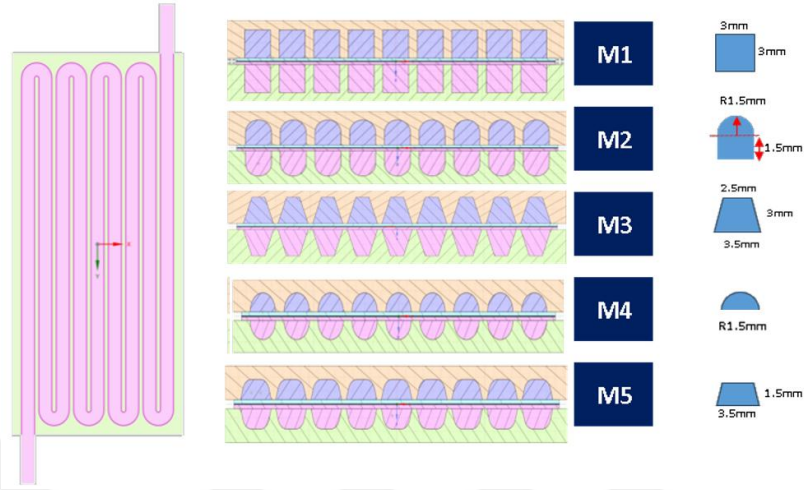
Parametre	Değer	Birim
Referans Membran alanı	30	A/cm^2
Anot Sıcaklığı	60	°C
Anot Bağıl Nem Oranı	50	%
Anot Basınç	150000	Pa
Anot H2 Stokiyometri oranı	1.5	-
Katot Sıcaklık	60	°C
Katot Bağıl Nem Oranı	50	%
Katot Basınç	150000	Pa
Katot O2 Stokiyometri	2.5	-

Mesh ayarı yapılan modeller için kullanılacak sınır şartları Çizelge 3.8'de verilmiştir. Değerler PEM yakıt pili çalışma aralıkları içerisinde belirlenmiştir.

3.3.2 Akış Kanal Geometri Tasarımı ve Modellenmesi

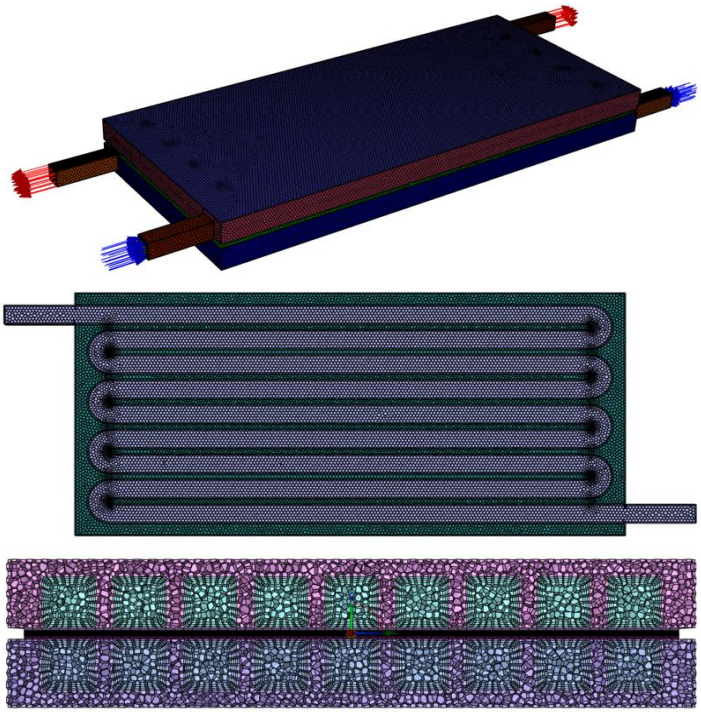
Akış deseni belirlenen plaka üzerinde akış kanal geometrisi üzerine çalışma yapılmıştır. Akış kanal geometrisinin performansı iyileştirmesi hedeflenmiştir. Akış kanal geometrisi tasarımında serpantin akış deseni diğer desenlere göre en iyi sonucu verdiği için serpantin

desen üzerinde kanal geometrileri modellenmiştir. Serpantin akış desen modeli üzerinde 5 farklı kanal geometrisi oluşturulmuştur.



Şekil 3.14 Akış Kanal Geometri Tasarımı

5 farklı akış kanal geometrisi tasarlanıp analiz modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.14'te kanal geometrileri ve kesit görünümleri gösterilmiştir. Analiz modelinde membran seti aynı kullanılmıştır. Bütün modellerde poly ve hex mesh tipi kullanılmıştır.

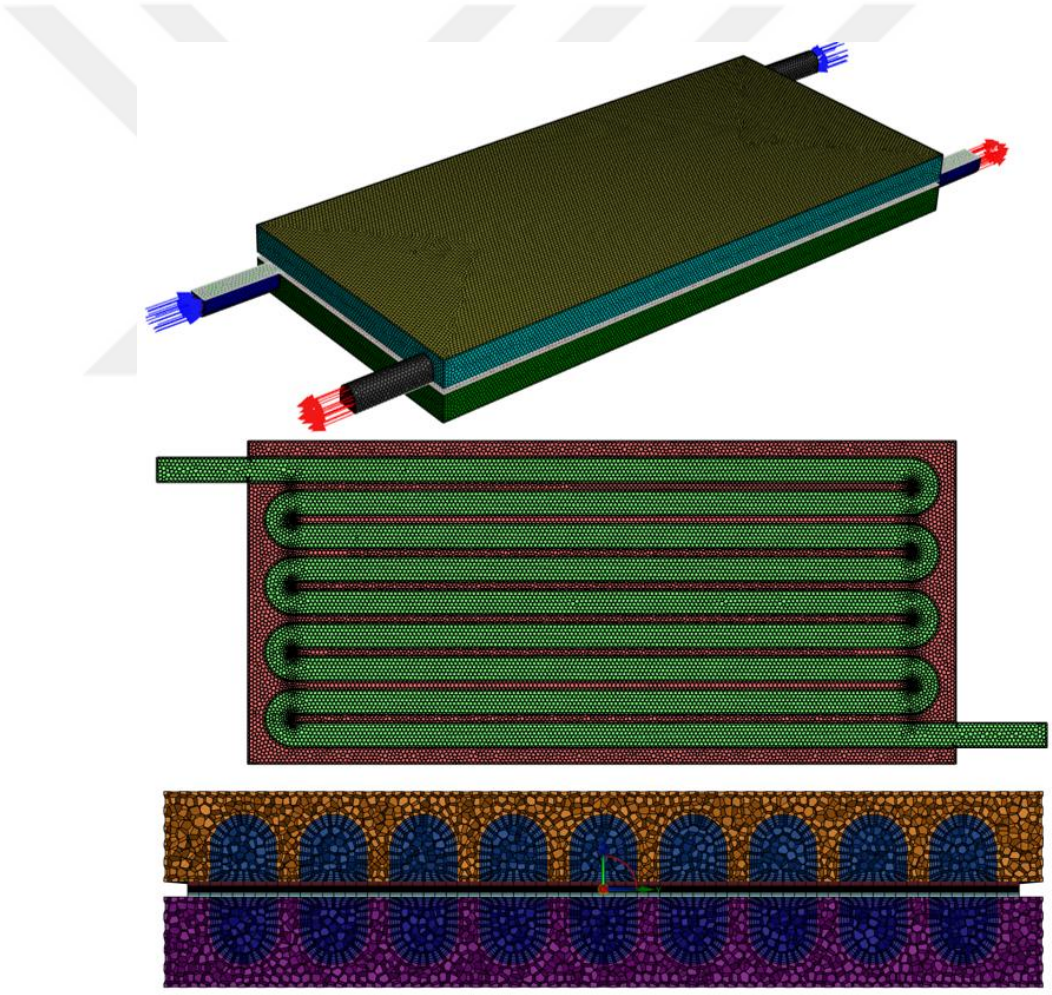


Şekil 3.15 M1 Model Mesh Görünüm

Çizelge 3.9 M1 Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.20
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.92

Şekil 3.15'te M1 model modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Çizelge 3.9'da ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.92 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.

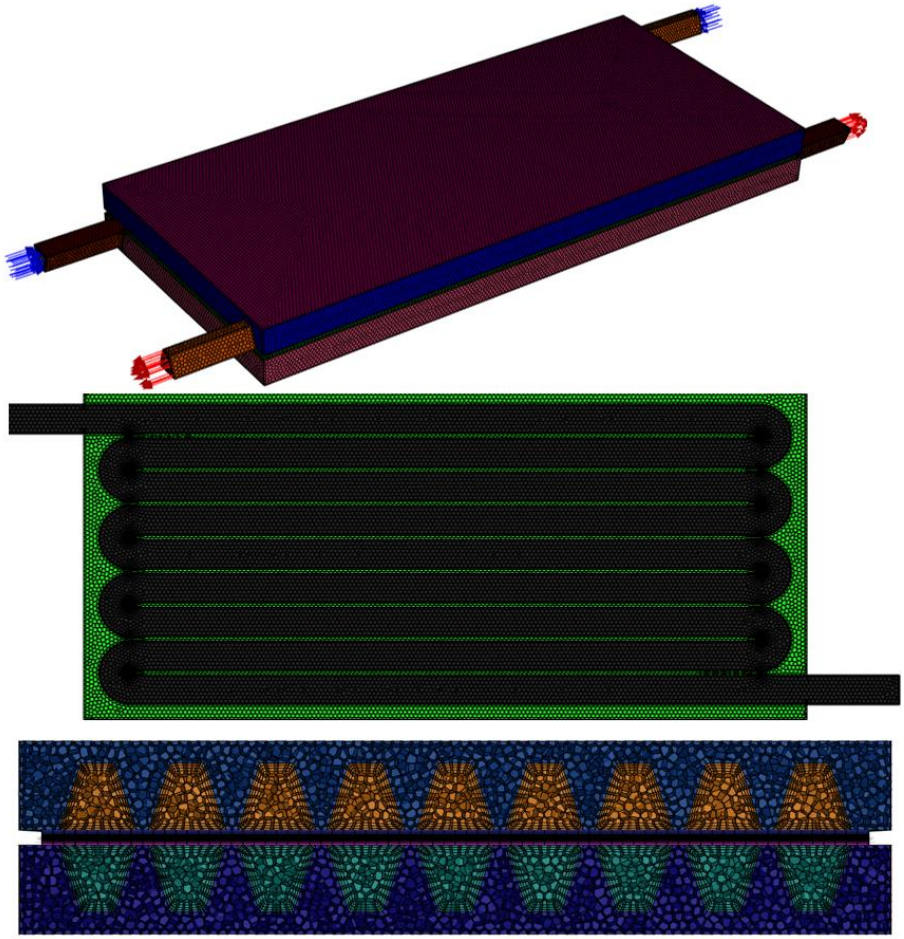


Şekil 3.16 M2 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.10 M2 Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.36
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.94

Şekil 3.16'da M2 model modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Çizelge 3.10'da ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.94 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.

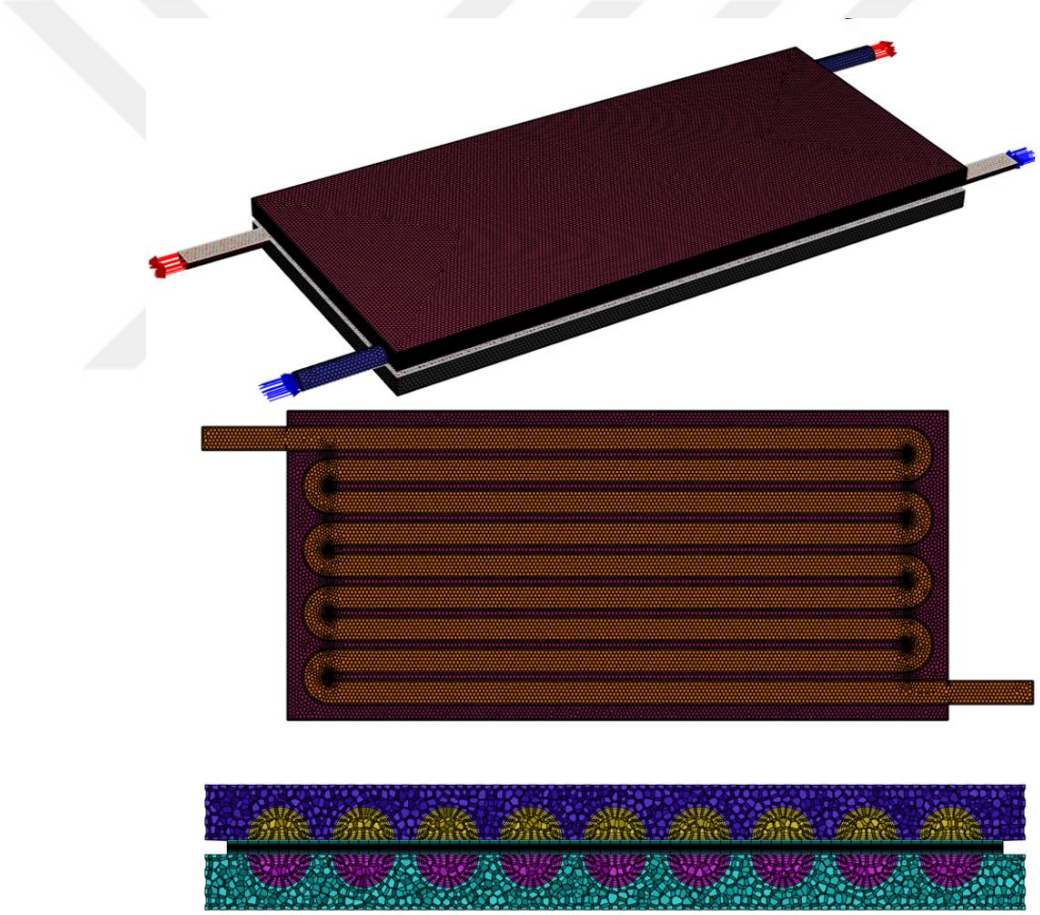


Şekil 3.17 M3 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.11 M3 Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.24
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.91

Şekil 3.17'de M3 model modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Çizelge 3.11'de ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.91 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.

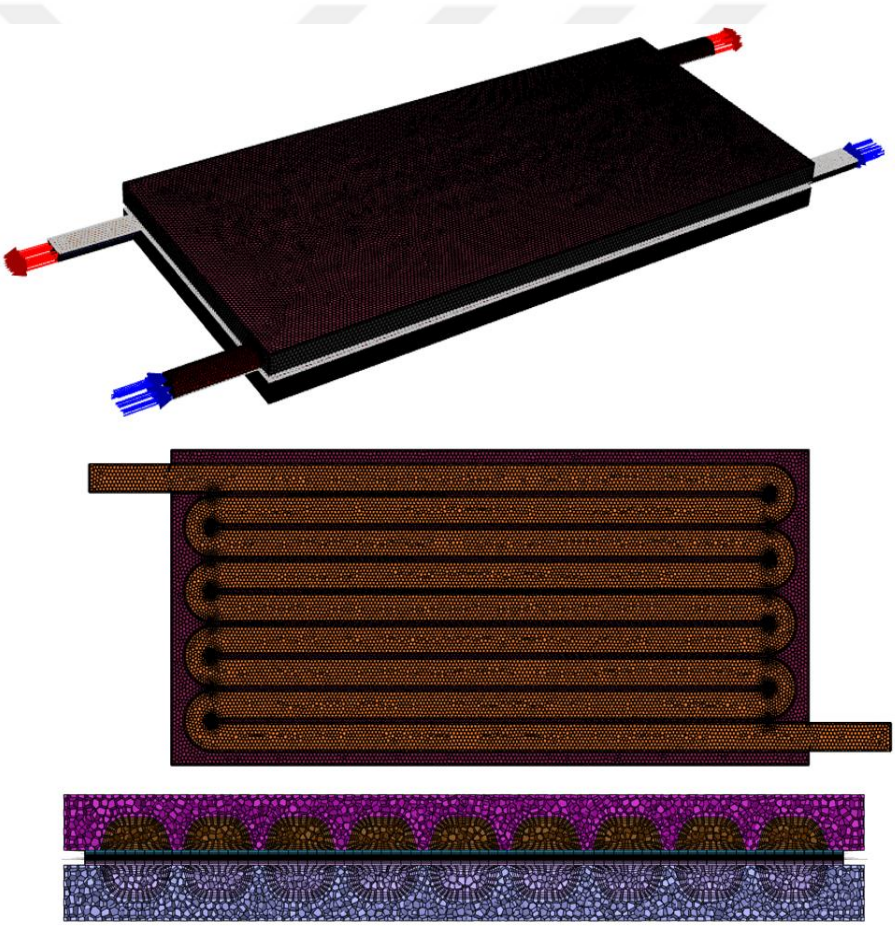


Şekil 3.18 M4 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.12 M4 Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.37
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.93

Şekil 3.18'de M4 model modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Çizelge 3.12'de ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.93 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.19 M5 Akış Kanal Geometrisi Mesh Genel Görünüm

Çizelge 3.13 M5 Model Mesh Kalitesi

Parametre	Değer
Minimum Ortogonal Mesh Kalitesi	0.20
Maksimum Ortogonal Mesh Kalitesi	1
Ortalama Ortogonal Mesh Kalitesi	0.91

Şekil 3.19'da M5 model modelin genel mesh yapısını göstermektedir. Çizelge 3.13'te ise modelde kullanılan meshin minimum, maksimum ve ortalama kalite değerleri verilmiştir. Ortalama mesh kalitesi 0.91 olup, bu değer modelin yeterli çözünürlük ve hesaplama doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.14 Sınır Şartları

Parametre	Değer	Birim
Referans Membran alanı	30	A/cm^2
Anot Sıcaklığı	60	°C
Anot Bağıl Nem Oranı	50	%
Anot Basınç	150000	Pa
Anot H2 Stokiyometri oranı	1.5	-
Katot Sıcaklık	60	°C
Katot Bağıl Nem Oranı	50	%
Katot Basınç	150000	Pa
Katot O2 Stokiyometri	2.5	-

Çizelge 3.14'te verilen sınır şartları 5 model için 0,3V-1,0V aralığında tanımlanmıştır.

3.3.3 Parametre Analizi Modellenmesi

Akış kanal geometrisi incelenen modeller arasında akım ve güç yoğunlukları incelenmiş M5 modeli seçilmiştir. Seçilen model üzerinde parametre analiz çalışması yapılmıştır. Sistem üzerinde akış modelinin etkileri belirli olgunluğa ulaştığı için analiz kurgusu parametre değişkenleri üzerinden yapılması planlanmıştır.

Çizelge 3.15 Parametre Algoritması

Analiz No	Sıcaklık (T) [°C]	Basınç (P) [bar]	Anot Nem (RH) [%]	Katot Nem (RH) [%]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]
1	60	1,5	50	50	1,5	2,5
2	60	1,5	70	80	1,5	2,5
3	60	1,5	80	90	1,5	2,5
4	60	1,5	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
5	70	1,5	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
6	80	1,5	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
7	En iyi T	1,2	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
8	En iyi T	1,5	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
9	En iyi T	1,8	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
10	En iyi T	En İyi P	En İyi %	En İyi %	1,2	2,0
11	En iyi T	En İyi P	En İyi %	En İyi %	1,5	2,5
12	En iyi T	En İyi P	En İyi %	En İyi %	2,5	4,0

Parametre analiz tablosu Çizelge 3.15‘te verilmiştir. Tüm parametreler için 3 seviye belirlenmiştir. Bu seviyeler düşük orta ve yüksek olacak şekilde oluşturulmuştur. Analizler sırası ile çözümlenip akım değerlerinin kıyaslanması planlanmıştır. Analizler 0,3V-1,0V arasında çözümlenip polarizasyon eğrisi oluşturulacaktır. Parametre analizinde en iyi parametreleri belirlendikten sonra akış plakası malzemeleri üzerinde çalışma yapılmıştır. Akış kanalı malzemesi olarak 316L ve alüminyum malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 3.16 AISI 316L Malzeme Özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Yoğunluk	7870	Kg/m^3
Özgül Isı (Cp)	530	J/kgK
Termal İletkenlik	17	W/mK
Elektrik İletkenlik	1340000	S/m

Çizelge 3.17 Alüminyum Malzeme Özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Yoğunluk	2719	Kg/m^3
Özgül Isı (Cp)	871	J/kgK
Termal İletkenlik	100	W/mK
Elektrik İletkenlik	1000000	S/m

Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17'de PEM yakıt pili analizlerinde kullanılan iki farklı malzemenin (AISI 316L paslanmaz çelik ve alüminyum) temel fiziksel ve termo-elektriksel özellikleri verilmiştir. AISI 316L daha yüksek yoğunluğa ve daha düşük ısıl iletkenliğe sahip olup mekanik dayanımın ve korozyon direncinin kritik olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Buna karşılık alüminyum daha düşük yoğunluğu ve daha yüksek özgül ısısı sayesinde ısıl yönetimi açısından avantaj sağlamakta; ayrıca elektrik iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle akım toplama performansını artırabilmektedir. Bu tablolar malzemelerin yoğunluk, özgül ısı, ısıl iletkenlik ve elektriksel iletkenlik değerleri üzerinden iki seçenek arasındaki performans farklarını karşılaştırabilmek amacıyla sunulmuştur.

3.3.5 Taguchi Analiz Modeli

Bu çalışmada Taguchi deney tasarımı, akış alanı geometrisi değiştirilmeden, yalnızca yakıt pili performansını etkilediği bilinen temel işletme parametrelerinin değerlendirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Bu doğrultuda, model üzerinde doğrudan etkiye sahip olan stokiyometrik oran, basınç, sıcaklık ve nem oranı gibi kontrol parametreleri faktör olarak belirlenmiştir. Her bir faktör, literatür aralıkları ve sistem çalışma limitleri dikkate alınarak üç farklı seviyede tanımlanmıştır. Böylece, Taguchi metodunun temel avantajı olan minimum sayıda deneyle optimum işletme koşullarına ulaşma prensibi, PEM yakıt pili modeline uygun şekilde uygulanmıştır. Faktörlerin seçimi sırasında, akış alanı geometrisi sabit tutulmuş, yalnızca elektro-kimyasal ve işletme koşullarını ifade eden parametrelere odaklanılmıştır.

Çizelge 3.18 Analiz Faktörleri ve Seviyeleri

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Anot Nem [%]	50	70	80
Katot Nem [%]	50	80	90
Sıcaklık [°C]	60	70	80
Basınç [bar]	1,2	1,5	1,8
H_2 Stokiyometri [-]	1,2	1,5	2,0
Hava Stokiyometri [-]	1,5	2,5	4,0

Çizelge 3.18'de, PEM yakıt pili performansını etkileyen altı giriş parametresi ve her bir parametrenin üç seviyesi gösterilmektedir. Bu faktörler, Taguchi deney tasarımı kapsamında optimum kombinasyonun belirlenmesi amacıyla seçilmiştir.

Çalışmada, farklı voltaj koşulları için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Başlangıç koşulu (1,0 V) ve maksimum yük çalışma koşulu (0,3 V) için, seçilen faktör ve seviyeler arasından belirlenen 12 farklı kombinasyon ile analizler yapılmıştır. Optimum çalışma voltajı (0,6 V) için ise, tüm L27 ortogonal dizisinin 27 kombinasyonu kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, voltaj seviyelerine göre simülasyon yoğunluğunu optimize ederek hem temel performans trendlerinin incelenmesine hem de optimum koşulların doğrulanmasına olanak sağlamaktadır. Her kombinasyon bir simülasyon koşulunu temsil etmiş ve PEM yakıt pili modelinde performans çıktıları incelenmiştir. Performansın artırılması hedeflendiği için, simülasyon sonuçları maksimum akım yoğunluğu veya güç yoğunluğu ile ilişkilendirilmiş ve S/N oranları "Büyük olan iyidir (Larger-the-better)" kriterine göre hesaplanmıştır. S/N oranı, aşağıdaki formül ile belirlenmiştir:

$$\frac{S}{N} = -10\, log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2})\right) \tag{3.17}$$

Elde edilen simülasyon sonuçları, her faktörün performans üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu doğrultuda, her faktörün optimum seviyesi tespit edilerek en yüksek performansı sağlayan kombinasyon belirlenmiştir.

Çizelge 3.19 Başlangıç Koşulu (1.0V) Analiz Çözümleri

Analiz No	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H_2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
1	50	50	60	1,5	1,5	2,5	0,7788
2	70	80	60	1,5	1,5	2,5	0,6722
3	80	90	60	1,5	1,5	2,5	0,6551
4	80	90	60	1,5	1,5	2,5	0,6551
5	80	90	70	1,5	1,5	2,5	0,3910
6	80	90	80	1,5	1,5	2,5	0,2180
7	80	90	60	1,2	1,5	2,5	0,4303
8	80	90	60	1,5	1,5	2,5	0,6551
9	80	90	60	1,8	1,5	2,5	0,8884
10	80	90	60	1,8	1,2	2,0	0,8449
11	80	90	60	1,8	1,5	2,5	0,8884
12	80	90	60	1,8	2,5	4,0	0,8598

Çizelge 3.20 Orta yük (0,6V) Koşulu Analiz Çözümleri

Analiz No	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
1	50	50	60	1,5	1,5	2,5	42,1172
2	70	80	60	1,5	1,5	2,5	43,7412
3	80	90	60	1,5	1,5	2,5	46,2984
4	80	90	60	1,5	1,5	2,5	46,2984
5	80	90	70	1,5	1,5	2,5	43,9560
6	80	90	80	1,5	1,5	2,5	39,5643
7	80	90	60	1,2	1,5	2,5	42,4025
8	80	90	60	1,5	1,5	2,5	46,2984
9	80	90	60	1,8	1,5	2,5	49,8005
10	80	90	60	1,8	1,2	2,0	47,8003
11	80	90	60	1,8	1,5	2,5	49,8005
12	80	90	60	1,8	2,5	4,0	50,2350
13	50	50	60	1,2	1,2	2,0	38,7375
14	50	50	60	1,2	1,5	2,5	38,1890
15	50	50	60	1,2	2,5	4,0	35,7440

Çizelge 3.21 Orta yük (0,6V) Koşulu Analiz Çözümleri (devam)

Analiz No	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
16	50	80	70	1,5	1,2	2,0	39,0100
17	50	80	70	1,5	1,5	2,5	42,1200
18	50	80	70	1,5	2,5	4,0	41,0440
19	50	90	80	1,8	1,2	2,0	42,8560
20	50	90	80	1,8	1,5	2,5	43,8560
21	50	90	80	1,8	2,5	4,0	43,7550
22	70	50	70	1,8	1,2	2,5	50,1510
23	70	50	70	1,8	1,5	4,0	45,2590
24	70	50	70	1,8	2,5	2,0	44,4530
25	70	80	80	1,2	1,2	2,5	34,2170
26	70	80	80	1,2	1,5	4,0	34,6140
27	70	80	80	1,2	2,5	2,0	33,1150

Çizelge 3.22 Maksimum Yük Çalışma Koşulu (0,3V) Analiz Çözümleri

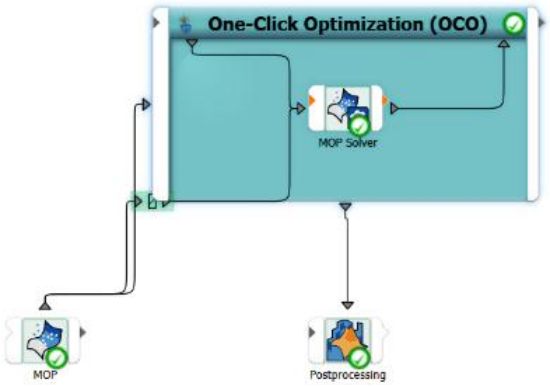
Analiz No	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
1	50	50	60	1,5	1,5	2,5	72,2281
2	70	80	60	1,5	1,5	2,5	69,6695
3	80	90	60	1,5	1,5	2,5	72,9231
4	80	90	60	1,5	1,5	2,5	72,9231
5	80	90	70	1,5	1,5	2,5	67,2924
6	80	90	80	1,5	1,5	2,5	63,7094
7	80	90	60	1,2	1,5	2,5	64,7898
8	80	90	60	1,5	1,5	2,5	72,9231
9	80	90	60	1,8	1,5	2,5	74,5410
10	80	90	60	1,8	1,2	2,0	67,5201
11	80	90	60	1,8	1,5	2,5	74,5410
12	80	90	60	1,8	2,5	4,0	81,0579

Çizelge 3.19, başlangıç koşulu (1,0 V) için gerçekleştirilen simülasyon analizlerini ve elde edilen akım değerlerini göstermektedir. Çizelge 3.20 ve Çizelge 3.21, optimum

çalışma voltajı (0,6 V) için yapılan simülasyon sonuçlarını ve her faktörün optimum seviyelerini özetlemektedir. Çizelge 3.22 ise maksimum yük çalışma koşulu (0,3 V) için elde edilen analiz sonuçlarını sunmaktadır. Bu tablolar, Taguchi analizinin uygulanabilirliğini ve farklı voltaj koşullarında performans çıktılarının sistematik olarak elde edildiğini göstermektedir.

3.3.4 Optimizasyon (Optislang) Model Kurulumu

Parametre analizi ve Taguchi analizi yapıldıktan sonra meta-model ile optimizasyon modeli kurulmuştur.



Şekil 3.20 Meta-Model Optimizasyon Kurulumu

Şekil 3.20'de verilen Meta Model Optimizasyon (MOP) kurulumu, belirlenen tasarım değişkenleri için otomatik optimizasyon sürecinin oluşturulmuş halini göstermektedir. MOP modülü tasarım noktalarını üretirken, MOP Solver bu noktaları çözerek yanıt yüzeyini oluşturur. Son aşamada Post-processing birimi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesini ve en uygun tasarımın belirlenmesini sağlar. Bu yapı, optimizasyon sürecini hızlandırarak hesaplama verimliliğini artırmaktadır.

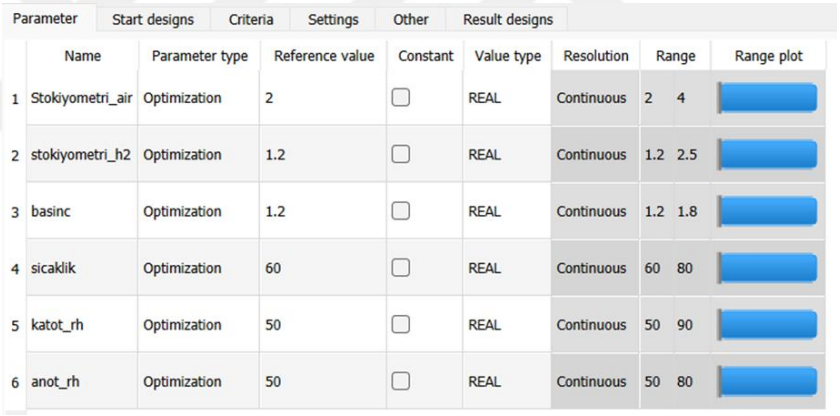
Çizelge 3.23 0,6V Analiz Verileri

Analiz No	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
1	50	50	60	1,5	1,5	2,5	42,1172
2	70	80	60	1,5	1,5	2,5	43,7412
3	80	90	60	1,5	1,5	2,5	46,2984
4	80	90	60	1,5	1,5	2,5	46,2984
5	80	90	70	1,5	1,5	2,5	43,9560
6	80	90	80	1,5	1,5	2,5	39,5643
7	80	90	60	1,2	1,5	2,5	42,4025
8	80	90	60	1,5	1,5	2,5	46,2984
9	80	90	60	1,8	1,5	2,5	49,8005
10	80	90	60	1,8	1,2	2,0	47,8003
11	80	90	60	1,8	1,5	2,5	49,8005
12	80	90	60	1,8	2,5	4,0	50,2350
13	50	50	60	1,2	1,2	2,0	38,7375
14	50	50	60	1,2	1,5	2,5	38,1890
15	50	50	60	1,2	2,5	4,0	35,7440
16	50	80	70	1,5	1,2	2,0	39,0100
17	50	80	70	1,5	1,5	2,5	42,1200
18	50	80	70	1,5	2,5	4,0	41,0440
19	50	90	80	1,8	1,2	2,0	42,8560
20	50	90	80	1,8	1,5	2,5	43,8560
21	50	90	80	1,8	2,5	4,0	43,7550
22	70	50	70	1,8	1,2	2,5	50,1510
23	70	50	70	1,8	1,5	4,0	45,2590
24	70	50	70	1,8	2,5	2,0	44,4530
25	70	80	80	1,2	1,2	2,5	34,2170
26	70	80	80	1,2	1,5	4,0	34,6140
27	70	80	80	1,2	2,5	2,0	33,1150
28	70	90	60	1,5	1,2	2,5	46,0660
29	70	90	60	1,5	1,5	4,0	47,3830
30	70	90	60	1,5	2,5	2,0	43,2380
31	80	50	80	1,5	1,2	4,0	38,162
32	80	50	80	1,5	1,5	2,0	41,7100
33	80	50	80	1,5	2,5	2,5	37,076

Çizelge 3.24 0,6V Analiz Verileri (devam)

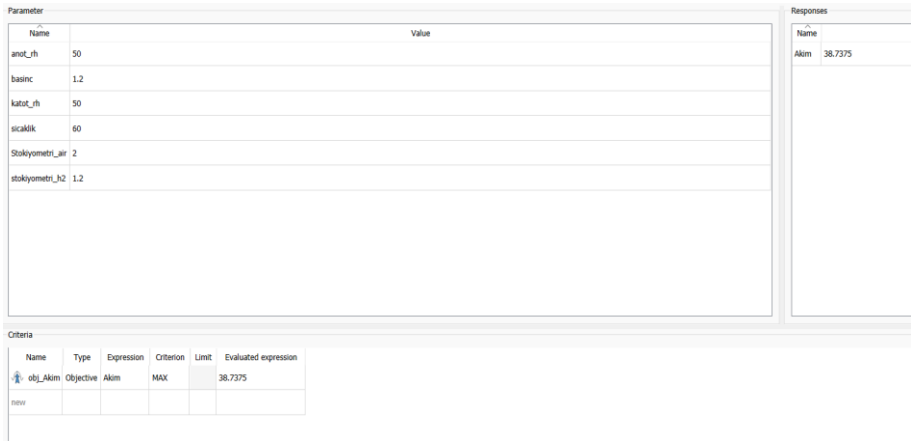
Analiz No	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
34	80	80	60	1,8	1,2	4,0	41,7100
35	80	80	60	1,8	1,5	2,0	47,0344
36	80	80	60	1,8	2,5	2,5	49,4349
37	80	90	70	1,2	1,2	4,0	41,1034
38	80	90	70	1,2	1,5	2,0	38,8515
39	80	90	70	1,2	2,5	2,5	39,3777

Çizelge 3.23 ve Çizelge 3.24 'te verilen parametreler 0.6V değerinde çözümlenmiştir. Veriler excel üzerinden export alınıp optislang ara yüzüne import edilmiştir. Meta-model içerisinde sınır şartları belirlenmiştir.



Şekil 3.21 Parametre Değişim Aralıkları

Şekil 3.21'de Optislang ortamında tanımlanan parametre aralıkları gösterilmiştir. Bu çalışmada her bir tasarım parametresi için minimum–maksimum sınırlar belirlenmiş ve analizler bu aralıklar içerisinde yürütülmüştür. Optislang, kullanıcı tarafından girilen bu değer aralıklarına göre tasarım alanını otomatik olarak örneklemekte ve istatistiksel olarak anlamlı bir tasarım seti oluşturmaktadır. Böylece model, hem parametrelerin etkisini görebilecek şekilde geniş bir çözüm uzayını taramakta hem de gereksiz hesaplama maliyetlerinin önüne geçilmektedir. Parametreler için belirlenen alt ve üst sınırlar, optimizasyon sürecinin başlangıç noktası olarak kullanılmıştır.



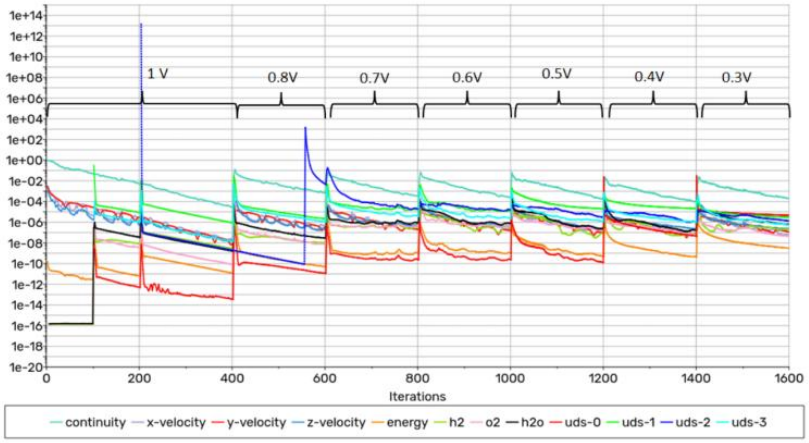
Şekil 3.22 Optimizasyon Sınır Şartları

Şekil 3.22'de, Optislang içerisinde analiz için kullanılan çıktı sınır şartının tanımlandığı girdi alanı gösterilmektedir. Bu bölümde, çözüm sürecinde takip edilecek olan çıktı büyüklüğünün alt ve üst limitleri kullanıcı tarafından doğrudan girilmektedir. Tanımlanan bu sınırlar, Optislang'in hesaplama boyunca yalnızca belirtilen aralıkta kalan sonuçları değerlendirmesini sağlar. Böylece optimizasyon süreci, istenen performans değerlerine yönlendirilmiş ve çözüm alanı kontrol altına alınmış olur. Sınır şartı olarak maksimum akım tanımlanmıştır.

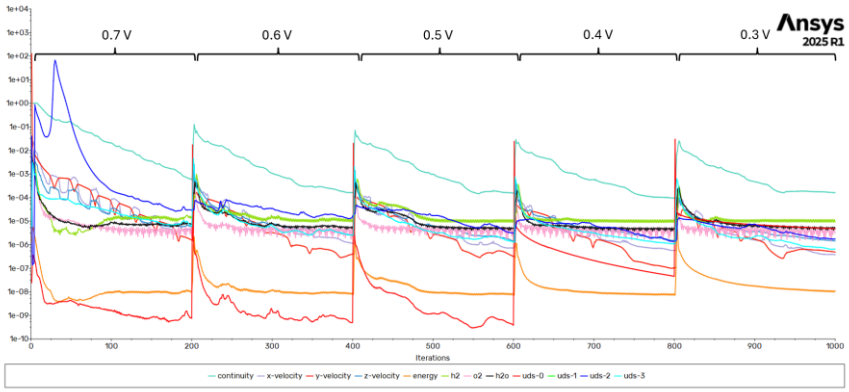
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Doğrulama Modeli

Ansys kaynaklarına bulunan çalışma model doğrulama amaçlı çözümlenmiştir. Çözüm belirli gerilim değerlerinde yapılmıştır. Analiz modeli yüksek gerilimden düşük gerilime doğru, her bir gerilim aralığında 200 iterasyon olacak şekilde yapılmıştır. Çözüm sonrası elde edilen sonuçlar incelenmiş sonuçlarıyla kıyaslanmıştır.

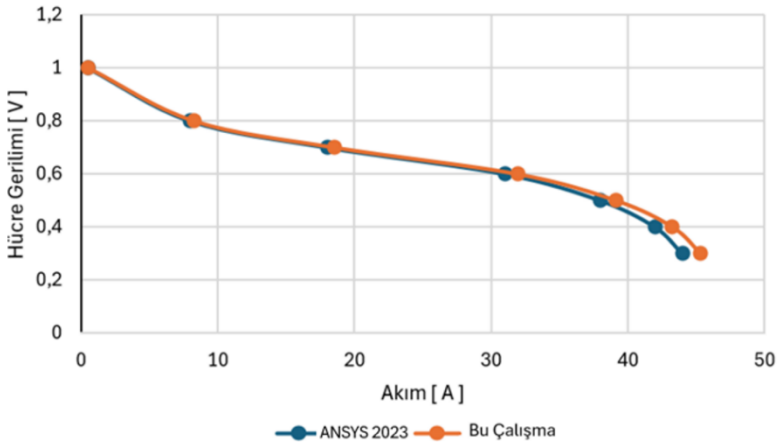


Şekil 4.1 Ansys 2023 Yakınsama Grafiği (Ansys Inc., 2023)



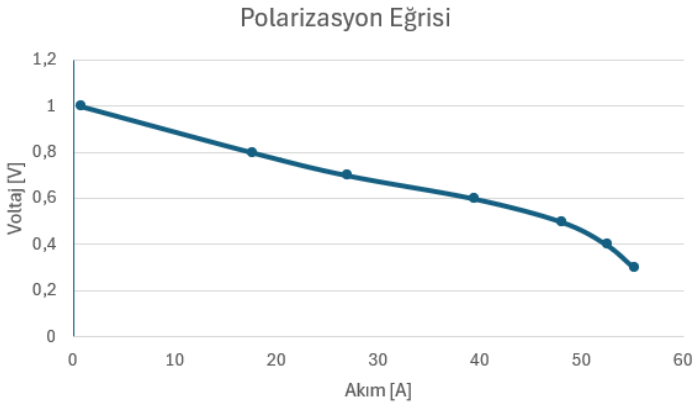
Şekil 4.2 Bu Çalışma Yakınsama Grafiği

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de analiz yakınsama grafikleri verilmiştir. Yapılan çalışmada akım değerleri karşılaştırılmış, grafik üzerinde örtüştürülmüştür.



Şekil 4.3 Gerilim-Akım Karşılaştırması

Şekil 4.3'te verilen değerler incelendiğinde, analiz modelinin Ansys dokümanı ile benzer çıktılar verdiği görülmüştür. Hata oranı yaklaşık olarak %3 hesaplanmıştır. Sonuç olarak analiz modeli ve metodolojisi yapılacak olan yeni çalışma için uygudur. Tez çalışması kapsamında analizi yapılan Dalgalı Model akış kanalı tasarımının voltaj-akım değerleri grafiği (polarizasyon eğrisi) oluşturulmuştur.



Şekil 4.4 Polarizasyon Eğrisi

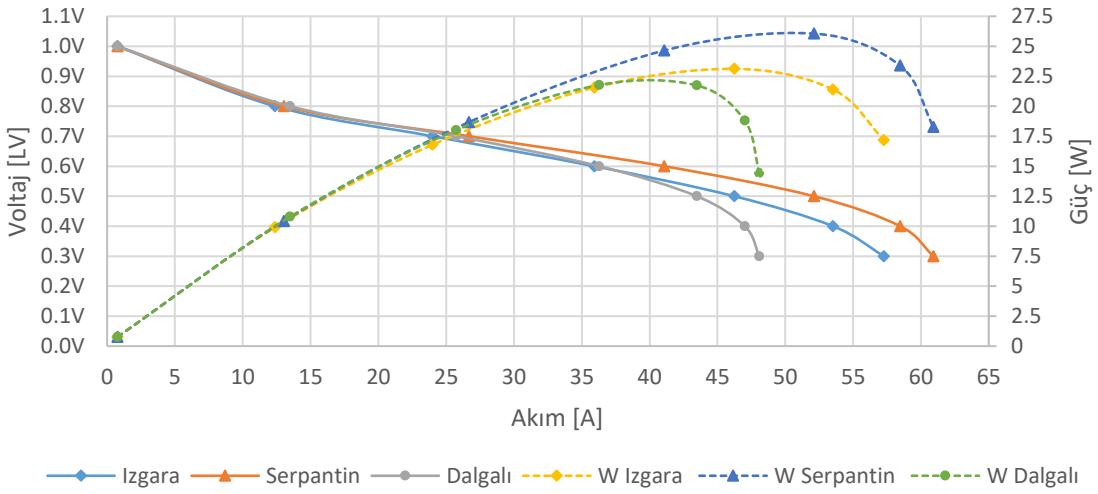
Analiz modeli 1,0V- 0,3V arasında çözümlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen veriler incelenmiş, Şekil 4.4'te polarizasyon eğrisi oluşturulmuştur.

4.2 Akış Desen Analizi

Yakıt pili performansını optimize etmek amacıyla farklı akış alanı geometrileri (serpantin, dalgalı, ızgara) ile analiz modeli oluşturulmuştur. Membran montajları ve membran yüzey alanları aynı olan 3 farklı desenleri analiz edilip karşılaştırma yapılması planlanmıştır. Bu çalışma kapsamında basınç, nem dağılımı, hız, sıcaklık ve su aktivitesi gibi kritik akışkan ve termal parametreler incelenmiş, ayrıca elektrokimyasal performansı polarizasyon eğrisi ve güç-akım karakteristikleriyle değerlendirilmiştir. Akış desenleri analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

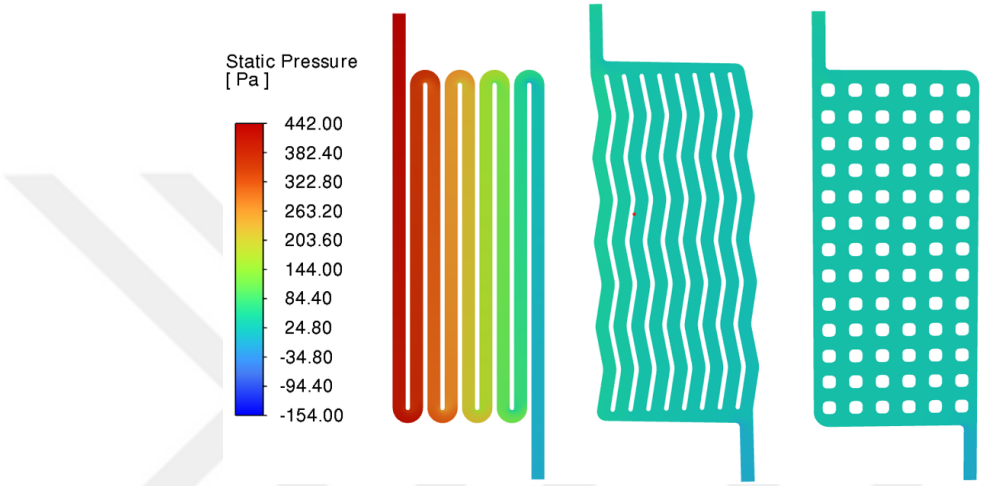
Çizelge 4.1 Voltaj-Akım-Güç Verileri

	Akım			Güç		
Voltaj	**Izgara**	**Serpantin**	**Dalgalı**	**Izgara**	**Serpantin**	**Dalgalı**
1,0V	0,7575	0,7677	0,7576	0,7575	0,7677	0,7576
0,8V	12,3854	13,0385	13,4917	9,9083	10,4308	10,7934
0,7V	23,9857	26,6794	25,7301	16,7899	18,6755	18,0110
0,6V	35,9289	41,0744	36,2805	21,5573	24,6446	21,7683
0,5V	46,2363	52,1094	43,4719	23,1181	26,0547	21,7359
0,4V	53,5131	58,4680	47,0110	21,4052	23,3872	18,8044
0,3V	57,2728	60,9213	48,0885	17,1818	18,27639	14,4265

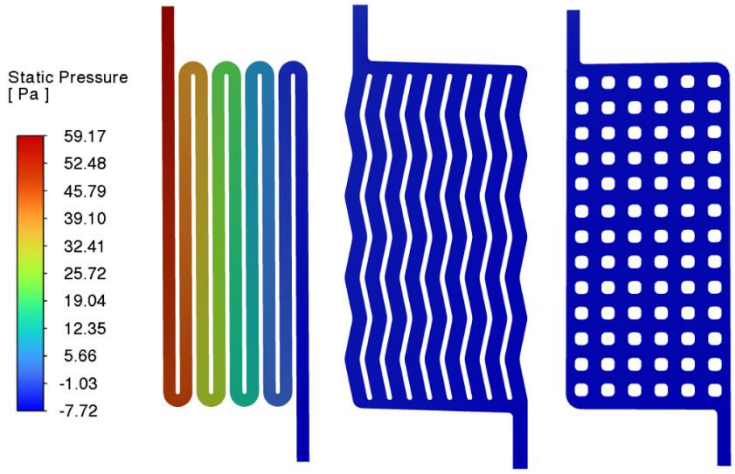


Şekil 4.5 Polarizasyon eğrisi

Çizelge 4.1'de voltaj değerlerine karşılık akım ve güç değerleri 1,0V ile 0,3V aralığında farklı voltaj durumlarında akım güç değerleri incelenmiş, Şekil 4.5'te polarizasyon eğrisi oluşturulmuştur. Polarizasyon eğrisi üzerinden kıyaslama yapılmıştır. Serpantin model diğer akış desenlerine göre akım-güç yoğunluğu daha yüksek olduğu görülmüştür. Polarizasyon eğrisi dışında alınan veriler 0.3V değerinde elde edilmiştir. 0.3V değerinde sistem daha yüksek akım çektiği için oluşan farklar daha belirgin olmuştur.



Şekil 4.6 0,3 V Katot Basınç Görünüm



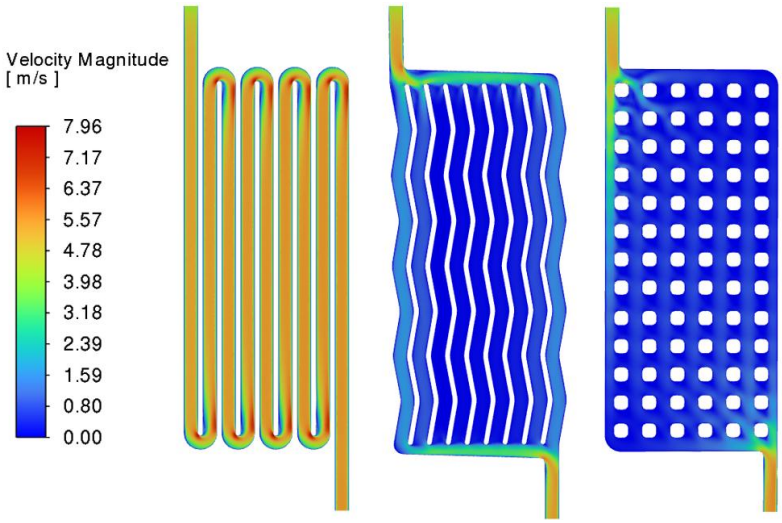
Şekil 4.7 0,3V Anot Basınç Görünüm

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 0,3 V çalışma gerilimi altında katot ve anot tarafındaki basınç dağılımları sunulmaktadır. Katotta basınç seviyeleri belirgin şekilde daha yüksek olup maksimum basınç 442 Pa'ya ulaşırken, anotta bu değer 59 Pa'da kalmıştır. Serpantin akış

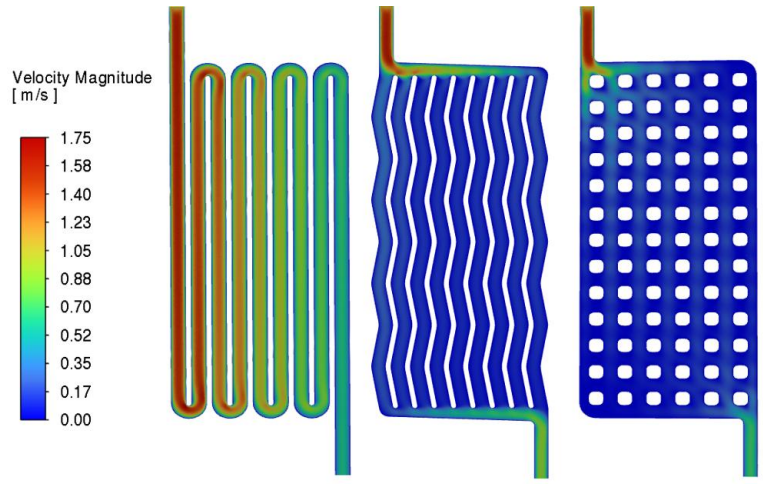
alanında uzun ve dar kanallar nedeniyle basınç kayıpları en yüksek seviyededir; dalgalı yapı daha dengeli bir dağılım sergilerken, ızgara akış alanı gözenekli yapısı sayesinde en düşük kayıpları oluşturmuştur. Anot tarafında debinin düşük olması nedeniyle desenler arasındaki farklar sınırlı kalmaktadır.

Basınç alanlarında gözlenen negatif statik basınç değerleri fiziksel bir sorun değil, çözücünün basıncı mutlak değil referans basınç olarak hesaplamasının doğal sonucudur. Çıkış basıncının sıfır referans kabul edilmesiyle, akışın hızlandığı ve daraldığı bölgelerde statik basınç referansın altına düşebilir ve bu durum PEMFC akış çözümleri için tamamen normaldir.

Basınç dağılımlarının polarizasyon eğrisiyle karşılaştırılması sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir. Serpantin akış alanı yüksek basınç kaybına rağmen reaktan taşınımının güçlü olması sayesinde yaklaşık 27 W ile en yüksek güç çıktısını vermiştir. Izgara desen düşük basınç kaybı sunmasına karşın taşınımın sınırlı olması nedeniyle yaklaşık 22 W, dalgalı desen ise düşük taşınım karakteri nedeniyle yaklaşık 19 W güç üretmiştir.



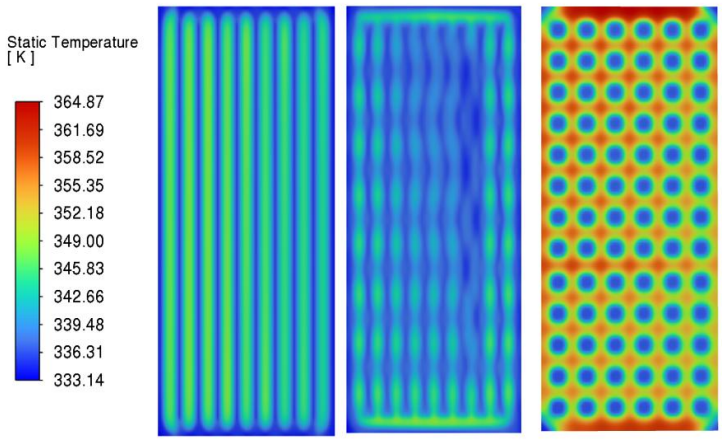
Şekil 4.8 0,3V Katot Hız Görünüm



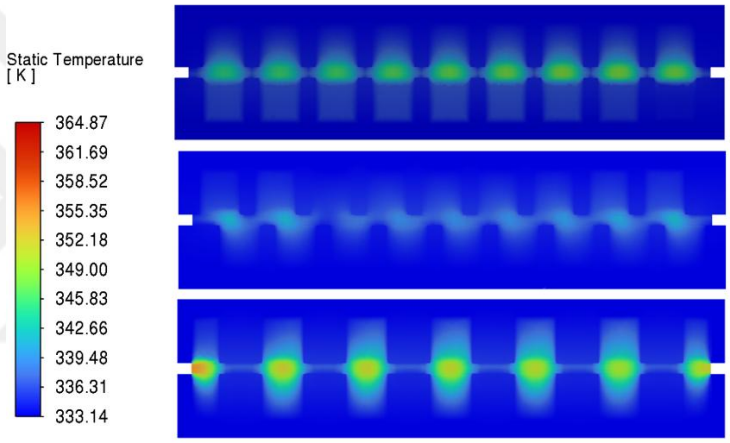
Şekil 4.9 0,3V Anot Hız Görünüm

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da 0,3 V çalışma gerilimi altında katot ve anot tarafındaki hız dağılımları farklı akış alanı desenleri için verilmiştir. Katot tarafında hız büyüklüklerinin anot tarafına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Katotta en yüksek hız yaklaşık 7,96 m/s iken, anotta bu değer 1,75 m/s civarındadır. Serpantin akış alanında akışın yönlendirilmiş şekilde kanallar boyunca yüksek hızlara ulaştığı, dalgalı akış alanında hız dağılımının homojen olmakla birlikte düşük seviyelerde seyrettiği, ızgara akış alanında ise akışın giriş-çıkış bölgelerinde yoğunlaşırken gözenekli kısımlarda düşük hız değerleri gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu bulgular polarizasyon eğrisi ile karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Polarizasyon eğrisinde en yüksek güç değeri yaklaşık 27 W ile serpantin desende elde edilmiştir. Izgara desen yaklaşık 22 W ile orta seviyede kalırken, dalgalı desen yaklaşık 19 W ile en düşük güç çıktısını vermiştir. Bu durum, hız dağılımlarında gözlenen akış karakteristiği ile doğrudan örtüşmektedir. Yüksek hızların ve güçlü taşınımın sağlandığı serpantin desende performans en yüksek düzeye çıkarken, düşük hız bölgelerinin hâkim olduğu dalgalı desende performans sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.10 0,3V Katot Sıcaklık Görünüm

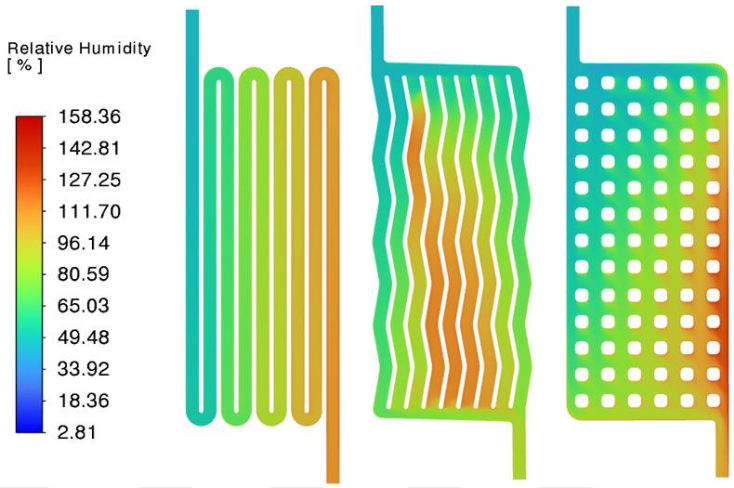


Şekil 4.11 0,3 V Kesit Sıcaklık Görünüm

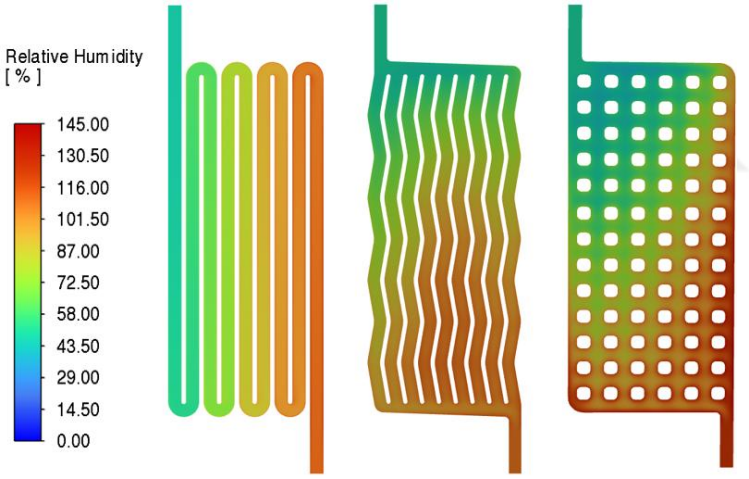
Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de 0,3 V çalışma gerilimi altında katot ve anot tarafındaki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Katot tarafında sıcaklık seviyelerinin anoda göre daha yüksek ve daha düzensiz olduğu görülmüştür. Serpantin akış yapısında sıcaklık dağılımı noktalar halinde yoğunlaşırken, ızgara yapıda daha homojen bir dağılım sağlanmıştır. Dalgalı yapıda ise sıcaklık dağılımı serpantin yapıya göre daha düzensiz ancak ızgaraya kıyasla daha yoğundur.

Polarizasyon eğrileri incelendiğinde, serpantin modelinin diğer modellere kıyasla daha yüksek voltaj değerleri gösterdiği ve maksimum yaklaşık 27 W güç çıkışı sağladığı belirlenmiştir. Izgara modeli, düşük sıcaklık dalgalanması ve basınç kayıplarına rağmen, reaktan taşınımının yetersiz kalması nedeniyle yaklaşık 22 W güç üretmiştir. Dalgalı yapı

ise hem sıcaklık dağılımı hem de akışkan taşınımı açısından daha az verimli olup, yaklaşık 19 W güç çıkışı vermiştir.



Şekil 4.12 0.3V Katot Bağıl Nem Görünüm

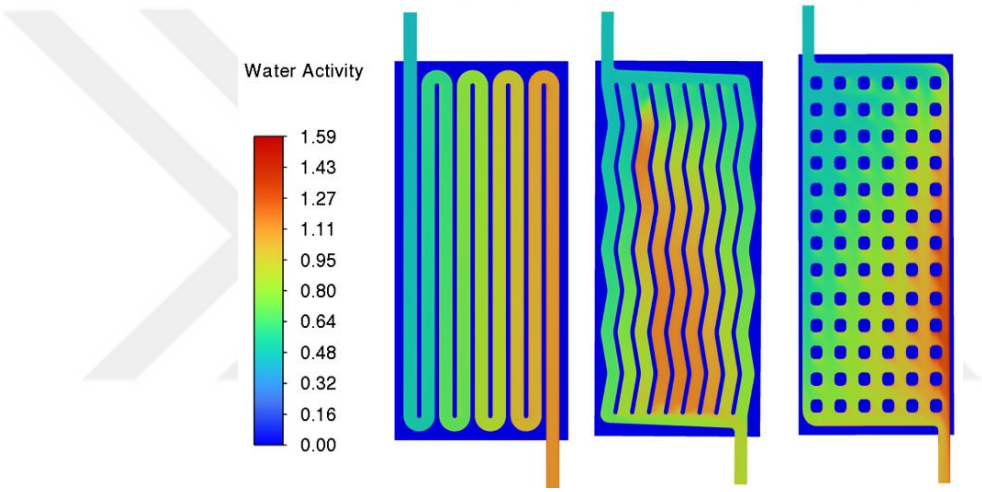


Şekil 4.13 0.3V Anot Bağıl Nem Görünüm

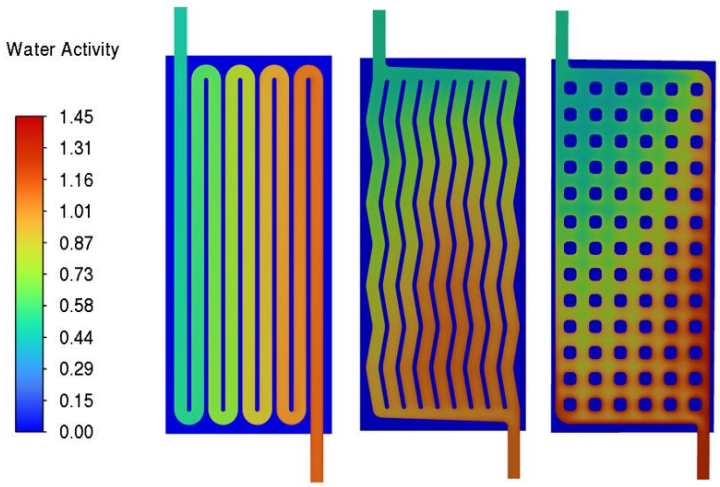
Yapılan sayısal analizler sonucunda, farklı akış alanı geometrilerinin (serpantin, dalgalı ve ızgara) PEM yakıt hücresindeki bağıl nem dağılımı üzerinde önemli etkiler oluşturduğu görülmüştür. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te verilen nem dağılım görsellerine göre, serpantin modelinde gaz akışının daha homojen ilerlediği ve bağıl nemin hücre boyunca dengeli bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Dalgalı akış alanında, akışın yön değiştirmesi nedeniyle lokal bölgelerde nem yoğunlaşmaları oluşmuş ve bu durum dağılımın düzensizleşmesine yol açmıştır. Izgara akış alanında ise gazın farklı yönlerden

dağılım göstermesi nemin daha geniş bir alana yayılmasına katkı sağlamış, ancak bazı bölgelerde yüksek nem birikimleri meydana gelmiştir.

Polarizasyon eğrisi bulguları, bu nem dağılımı sonuçlarını destekler niteliktedir. Serpantin akış alanı hem voltaj değerlerinde hem de güç çıktısında en yüksek performansı sergilemiştir. Dalgalı akış alanında ise artan akımla birlikte hızlı bir voltaj düşüşü gözlenmiş, bu durum lokal su birikimlerinden kaynaklanan kütle transferi sınırlamaları ile ilişkilendirilmiştir. Izgara modelinde dalgalıya kıyasla daha kararlı bir performans elde edilmiş olmakla birlikte, serpantin modelinin verim seviyesine ulaşılamamıştır.



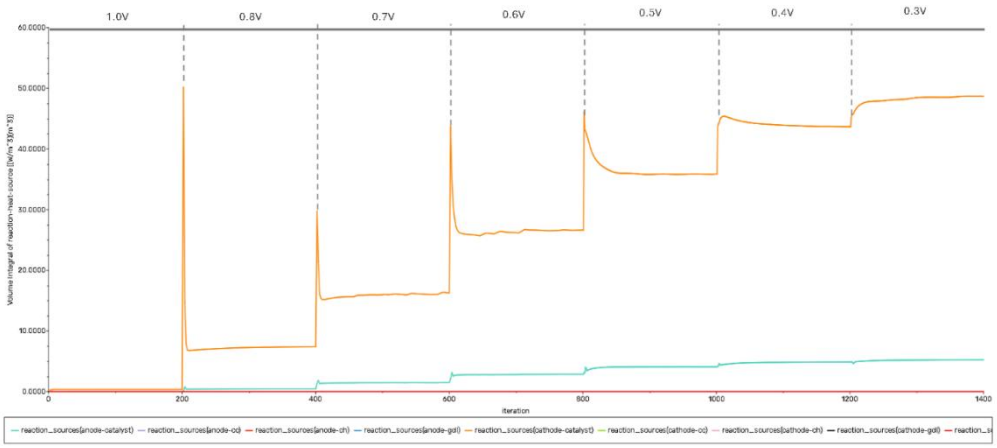
Şekil 4.14 0.3V Katot Su Aktivitesi Görünüm



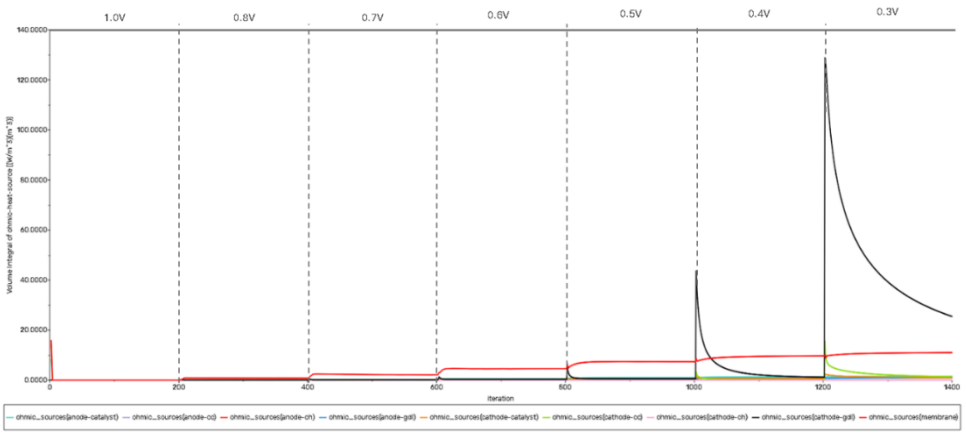
Şekil 4.15 0.3V Anot Su Aktivitesi Görünüm

Yapılan sayısal analizler sonucunda, farklı akış alanı geometrilerinin (serpantin, dalgalı ve ızgara) PEM yakıt hücresinde su yönetimi ve performans üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmüştür. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te verilen su aktivitesi dağılım görsellerine göre, serpantin modelinde akışın kanal boyunca tek hat üzerinden ilerlemesi nedeniyle suyun daha çok çıkış bölgelerinde biriktiği, ancak dağılımın görece düzenli olduğu tespit edilmiştir. Dalgalı akış alanında, kanal yönünün sürekli değişmesi akışta türbülans yaratmış ve bu durum lokal bölgelerde su birikimlerine yol açmıştır. Izgara akış alanında ise gazın çoklu giriş–çıkış yolları sayesinde suyun daha geniş bir alana yayıldığı, fakat bazı bölgelerde yoğun su birikimleri meydana geldiği gözlenmiştir.

Polarizasyon ve güç eğrisi bulguları bu gözlemleri destekler niteliktedir. Izgara geometrisi, özellikle yüksek akım yoğunluklarında en yüksek güç değerine ulaşarak en verimli performansı göstermiştir. Serpantin tasarımı orta akım yoğunluklarında kararlı bir davranış sergilemiş, ancak yüksek akımlarda uç kısımlarda oluşan su birikimleri nedeniyle voltaj düşüşü hızlanmıştır. Dalgalı tasarımda ise artan akımla birlikte erken kütle taşınım sınırlamaları ortaya çıkmış ve performans diğer tasarımların gerisinde kalmıştır.

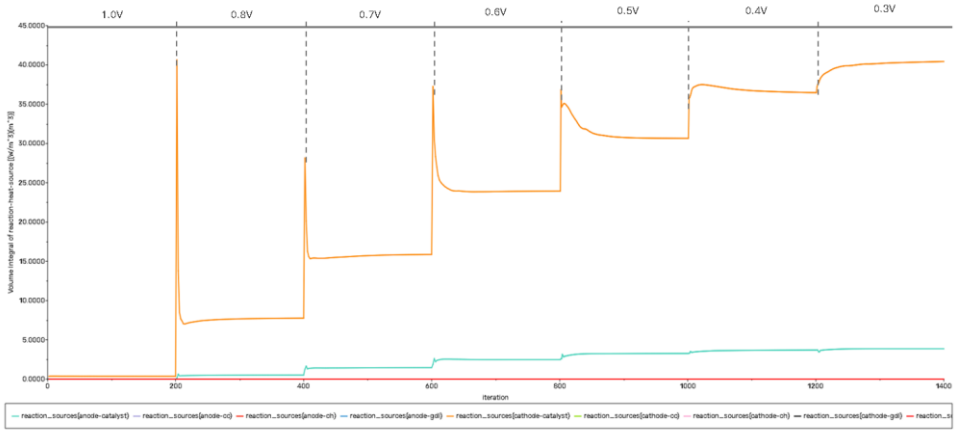


Şekil 4.16 Serpantin Model Reaksiyon Kaynakları Grafiği

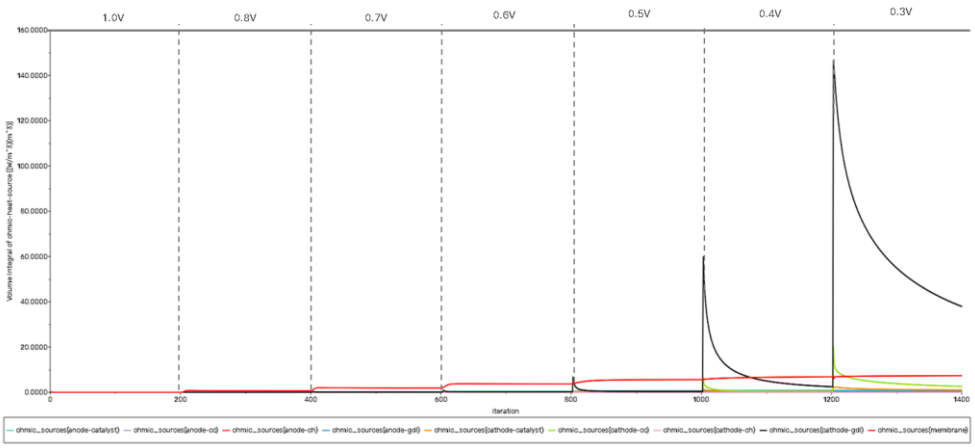


Şekil 4.17 Serpantin Model Ohmik Kaynaklar Grafiği

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilen analizlerde, serpantin akış alanı için 1.0–0.3 V çalışma gerilimi aralığında reaksiyon ve ohmik kaynakların dağılımı incelenmiştir. Yüksek voltaj (≈1.0 V) bölgesinde reaksiyon entegralleri düşük seviyelerde seyretmiş hem anot hem de katotta sınırlı tepkime gerçekleşmiştir. Voltaj düşüşüyle birlikte özellikle katot tarafında reaksiyonların hızlandığı ve ORR yükünün baskın hale geldiği görülmüştür. Bu süreçte membran kaynaklı ohmik kayıplar da artış göstermiş, voltaj azaldıkça membran üzerinde belirgin dalgalanmalar meydana gelmiştir. Düşük voltaj bölgesine yaklaşıldığında (≈0.3 V), katot reaksiyonları en yüksek değerlere ulaşırken membranda ani tepe noktaları gözlenmiş, bu durum lokal su birikimi ve taşınım dengesizlikleri ile ilişkilendirilmiştir.

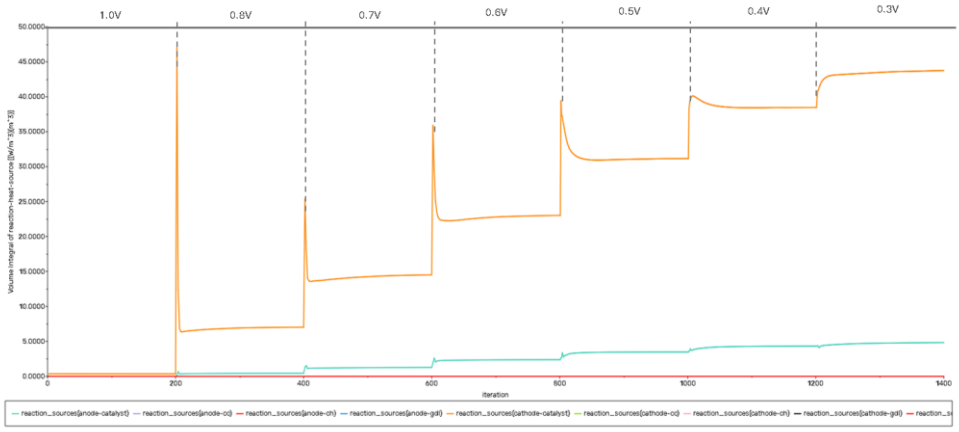


Şekil 4.18 Dalgalı Model Reaksiyon Kaynakları Grafiği

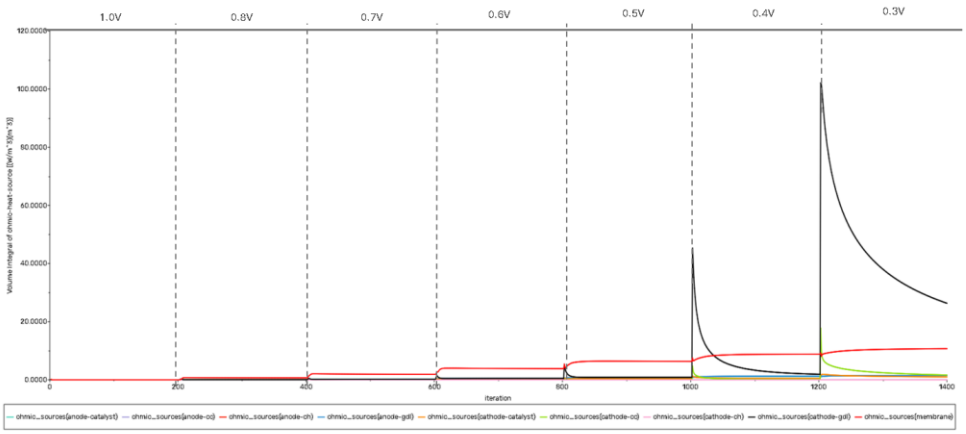


Şekil 4.19 Dalgalı Model Ohmik Kaynaklar Grafiği

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de verilen analizlerde, dalgalı akış alanı için 1.0–0.3 V çalışma gerilimi aralığında reaksiyon ve ohmik kaynakların dağılımı incelenmiştir. Yüksek voltaj (≈1.0 V) seviyesinde reaksiyon kaynakları nispeten düşük seyretmiş hem anot hem katot tarafında sınırlı reaksiyon gerçekleşmiştir. Voltaj düştükçe özellikle katot bölgesinde reaksiyon hızında belirgin bir artış gözlemlenmiş ve oksijen indirgenme reaksiyonu (ORR) baskın hale gelmiştir. Bu süreçte, membran kaynaklı ohmik kayıplarda da artış meydana gelmiş; voltaj azaldıkça membran üzerindeki ohmik dirençlerde dalgalanmalar ortaya çıkmıştır. Düşük voltaj bölgesine (≈0.3 V) yaklaşıldığında, katot reaksiyonlarının maksimum seviyeye ulaştığı ve membran üzerinde ani direnç zirvelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durumun, lokal su birikimi ve iyon taşınım dengesizliklerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Polarizasyon eğrisinde de görüldüğü üzere, bu reaksiyon ve ohmik kaynaklardaki değişimler dalgalı modelin yüksek akım ve düşük voltajlarda performansının sınırlanmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.20 Izgara Model Reaksiyon Kaynakları Grafiği



Şekil 4.21 Izgara Model Ohmik Kaynaklar Grafiği

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilen analizlerde, dalgalı akış alanı için 1.0–0.3 V çalışma gerilimi aralığında reaksiyon ve ohmik kaynakların dağılımı incelenmiştir. Yüksek voltaj seviyelerinde (≈1.0 V) reaksiyon kaynakları oldukça düşük seviyededir. Voltaj düştükçe özellikle 0.7 V'tan itibaren reaksiyon kaynaklarında artış gözlemlenmiş ve bu artış katot tarafında daha belirgin olmuştur. Bu durum, voltaj azaldıkça yakıt hücresindeki reaksiyonların hızlandığını ve özellikle oksijen indirgenme reaksiyonunun (ORR) öne çıktığını göstermektedir.

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi, ohmik kayıplar yüksek voltajda çok düşüktür. Ancak voltaj 0.5 V'un altına indiğinde, özellikle membran ve anot tarafında ohmik kaynaklarda ani artışlar meydana gelmiştir. 0.3 V'a yaklaşıldığında bu kayıplar zirveye ulaşmıştır. Bu

artışın, membran içinde oluşan su birikimi veya iyon iletimindeki bozulmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3 Akış Kanal Geometrisi Analizi

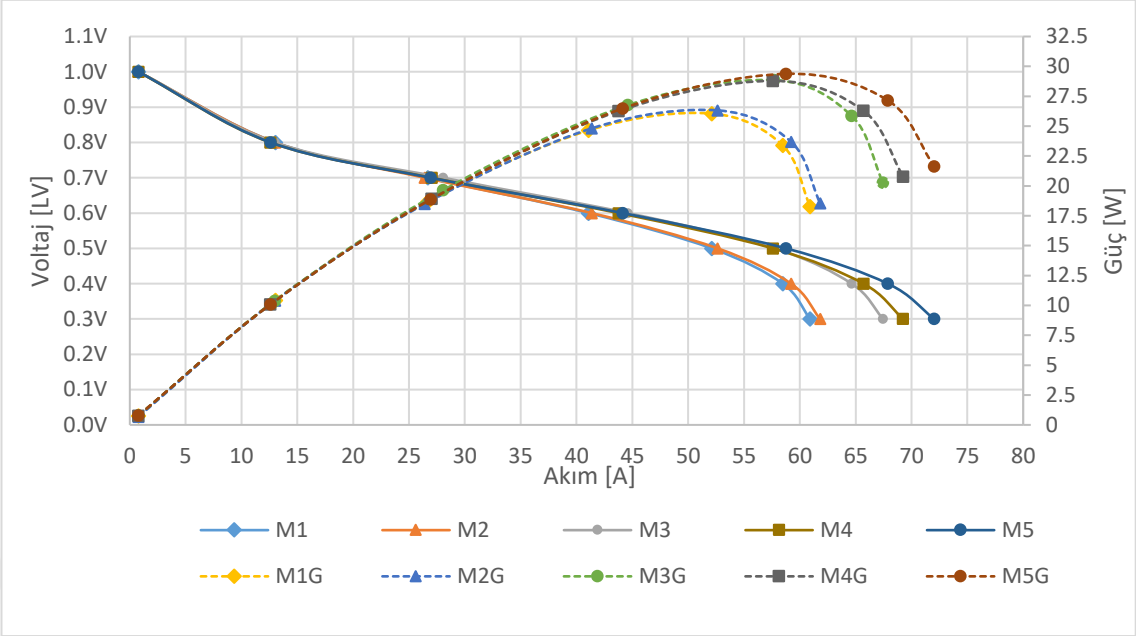
3 farklı akış desen modeli arasında analiz çalışması yapılmış, polarizasyon eğrisi ve diğer çıktılar değerlendirilip serpantin model çalışma koşullarına en uyumlu model olarak belirlenmiştir. Belirlenen akış deseni geometrisi üzerinde faklı akış kanal geometrileri oluşturulup analiz çalışması yapılmıştır.

Çizelge 4.2 Akış Kanal Geometriler Voltaj-Akım Sonuçları

	Akım				
Voltaj	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**
1,0V	0,7677	0,7660	0,7768	0,7701	0,7790
0,8V	13,0385	13,0070	12,9815	12,5839	12,6070
0,7V	26,6794	26,4157	28,0656	27,0316	26,9446
0,6V	41,0744	41,3575	44,6059	43,7609	44,1342
0,5V	52,1094	52,6383	57,7034	57,5787	58,7521
0,4V	58,4680	59,2161	64,6367	65,7010	67,8827
0,3V	60,9213	61,8181	67,4599	69,2539	72,0404

Çizelge 4.3 Akış Kanal Geometrileri Voltaj-Güç Sonuçları

	Güç				
Voltaj	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**
1,0V	0,7677	0,6725	0,7768	0,7701	0,7790
0,8V	10,4308	10,4056	10,3852	10,0671	10,0856
0,7V	18,6755	18,4909	19,6459	18,9221	18,8612
0,6V	24,6446	24,8145	26,7635	26,2565	26,4805
0,5V	26,0547	26,3191	28,8517	28,7893	29,3760
0,4V	23,3872	23,6864	25,8547	26,2804	27,1531
0,3V	18,2763	18,5454	20,2379	20,7761	21,61212

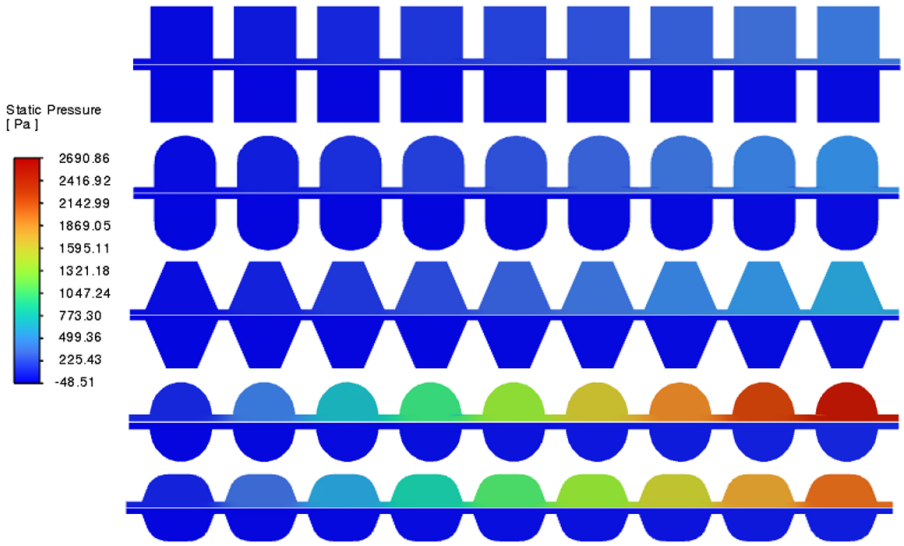


Şekil 4.22 Akış Kanal Geometrileri Polarizasyon Eğrisi

Çizelge 4.2'de farklı akış kanal geometrileri (M1–M5) için elde edilen voltaj–akım sonuçları verilmiştir. Elde edilen verilere göre, aynı voltaj seviyelerinde akım değerlerinin geometrilere bağlı olarak değiştiği ve özellikle daha etkin gaz taşınımına sahip geometrilerin daha yüksek akım çıktıları sağladığı görülmektedir. Buna paralel olarak, Çizelge 4.3'te aynı geometriler için hesaplanan voltaj–güç sonuçları sunulmuş olup, güç üretiminin de akım davranışına benzer şekilde akış yolu tasarımından önemli ölçüde etkilendiği anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlar Şekil 4.22'de verilen polarizasyon eğrisi ile desteklenmektedir. Şekil 4.22'de beş farklı akış kanal geometrisinin voltaj-akım karakteristikleri karşılaştırılmış ve en yüksek akım değerlerini M5 geometrisinin sağladığı açıkça görülmüştür. Polarizasyon eğrisi aynı zamanda geometrinin gaz dağılımı, basınç düşümü ve reaksiyon etkinliği üzerindeki etkilerini de yansıtmaktadır.

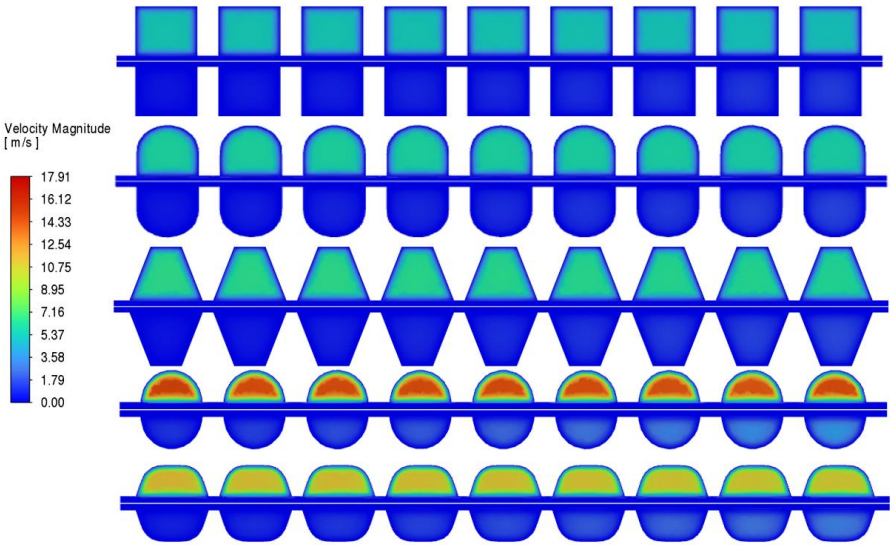
.



Şekil 4.23 Akış Kanal Geometrisi Basınç Görünümü

Akış kanal geometrisi analiz çalışmasında, 0,3 V sabit hücre gerilimi altında farklı kanal geometrilerinin (M1–M5) PEM yakıt pili içerisindeki gaz dağılımı ve performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.23'te sunulan statik basınç dağılımı konturlarına göre, kanal yapısına bağlı olarak önemli düzeyde basınç farkları oluştuğu gözlemlenmiştir. M1 tasarımı en düşük basınç seviyelerine sahipken, M5 tasarımında statik basınç değeri 2600 Pa seviyesine kadar ulaşmıştır. Özellikle M5 kanal yapısında gazın daha düzenli ve etkili dağıldığı görülmektedir. Daha karmaşık ve yönlendirilmiş yapılar içeren M4 ve M5 tasarımları, reaktanların daha dengeli bir şekilde membran yüzeyine taşınmasına olanak tanımış; bu da reaksiyon verimliliğini artırmıştır. Buna karşılık, daha basit yapıya sahip M1 ve M2 tasarımları, sınırlı taşınım nedeniyle düşük basınç ve düşük performans ile sonuçlanmıştır. M3 tasarımı ise bu iki uç arasında orta düzeyde bir basınç profili sergilemiştir.

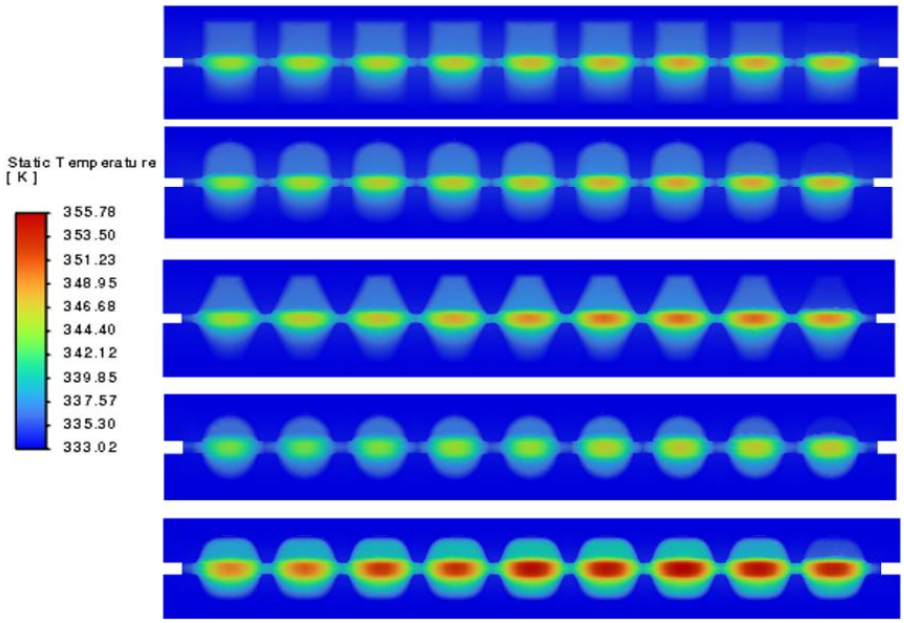
Polarizasyon eğrileri de bu bulguları destekler niteliktedir. Düşük voltaj seviyelerinde (0,3 V) çalışılmasına rağmen, M5 tasarımı yaklaşık 30 W ile en yüksek güç çıktısını sağlamıştır. M4 tasarımı 25 W seviyesinde güç üretirken, M1 ve M2 tasarımları sırasıyla yalnızca 10 W ve 12 W civarında kalmıştır. M3 tasarımı ise 17 W seviyesinde güç üreterek orta düzeyde performans sergilemiştir.



Şekil 4.24 Akış Kanal Geometrisi Hız Görünümü

Şekil 4.24'te verilen hız dağılımı analizleri, farklı kanal geometrilerinin akış alanında belirgin farklılıklar oluşturduğunu göstermiştir. M1 modelinde yerel hız değerleri 17,91 m/s'ye ulaşırken, M5 modelinde hız dağılımının daha homojen olduğu ve maksimum hız değerlerinin daha düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle kanal dirsek bölgelerinde, M1 ve M2 modellerinde oluşan yüksek hız gradyanları ve düşük hızlı bölgelerin, M4 ve M5 modellerinde daha dengeli bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir.

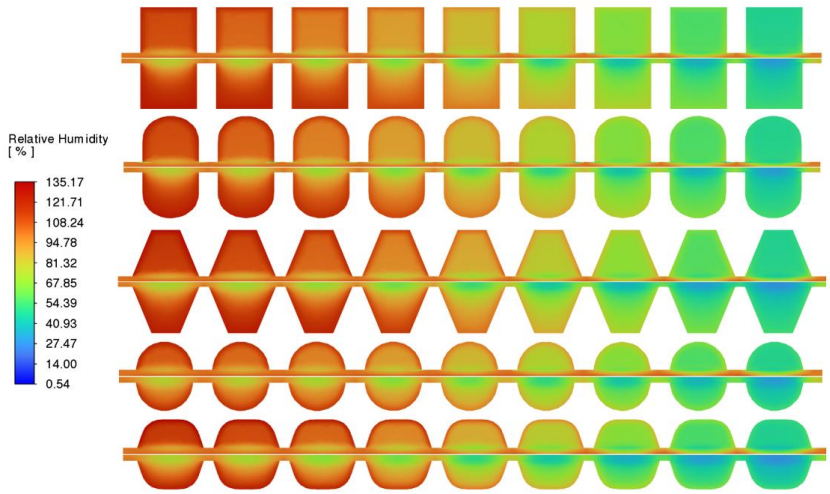
Polarizasyon eğrilerinden elde edilen sonuçlar, kanal geometrisinin elektrokimyasal performans üzerinde doğrudan etkisi olduğunu kanıtlamıştır. M1 ve M2 modelleri sırasıyla 10 W ve 12 W gibi düşük güç değerleriyle sınırlı kalırken, M3 modeli 17 W'lık orta düzey bir performans sergilemiştir. En yüksek performans ise M4 (25 W) ve M5 (30 W) modellerinden elde edilmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilmiş kanal geometrilerinin reaktan dağılımını iyileştirerek konsantrasyon kayıplarını azalttığını ve dolayısıyla daha yüksek güç çıkışı sağladığını göstermiştir.



Şekil 4.25 Akış Kanal Geometrisi Sıcaklık Görünümü

Şekil 4.25'te verilen beş farklı serpantin akış kanalı geometrisinin (M1-M5) yakıt pili performansı üzerindeki etkisi, statik sıcaklık dağılımı analizleriyle desteklenmiştir. Elde edilen sıcaklık verileri, kanal geometrisinin termal yönetim üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Sıcaklık dağılımı analizleri incelendiğinde, tüm modellerde sıcaklığın 333.02 K ile 355.78 K aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. M1 modelinde maksimum sıcaklık değeri 355.78 K olarak ölçülürken, bu değerin M5 modelinde daha düşük seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Termal dağılımın homojenliği açısından, M4 ve M5 modellerinin daha dengeli bir sıcaklık profili sergilediği, buna karşılık M1 ve M2 modellerinde yerel sıcaklık farklılıklarının daha belirgin olduğu görülmüştür. M4 modelinde basınç ve hız M5 modeline göre yüksektir. Bu verilere dayanarak M4 modelinin güç verisinin yüksek olması beklenir fakat sıcaklık verisi incelendiğinde M5 modelinin daha yüksek sıcaklıklar oluşturduğu görülmektedir. Bu durum M4 modelinde akış hızının reaksiyon hızından fazla olduğu için tepkime veriminin düştüğü yorumu yapılabilir

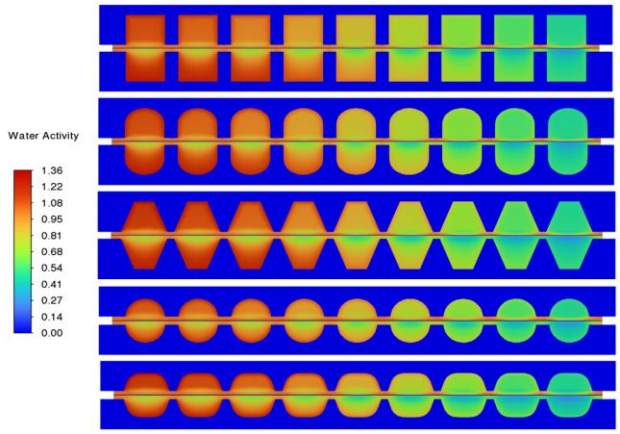


Şekil 4.26 Akış Kanal Geometrisi Bağıl Nem Görünümü

Gerçekleştirilen nümerik analizler sonucunda, beş farklı serpantin akış kanalı geometrisinin (M1–M5) proton değişim membranlı yakıt pili içerisindeki bağıl nem dağılımı üzerinde kayda değer etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Şekil 4.26'da görüldüğü üzere, bağıl nem değerleri %0,54 ile %135,17 arasında değişmekte olup, akış kanalı geometrisindeki farklılıkların nem dağılım karakteristiğini doğrudan etkilediği anlaşılmaktadır. Bu durum, uygun akış yolu tasarımının membran hidrasyonu ve dolayısıyla yakıt pili performansı açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Yapılan karşılaştırmalı incelemelerde, M1 konfigürasyonunda maksimum bağıl nem değerinin %135,17 seviyesine ulaştığı, buna mukabil M5 konfigürasyonunda bu değerin kayda değer ölçüde düşük seviyelerde seyrettiği müşahede edilmiştir. Nem dağılımının homojenlik analizi, M4 ve M5 modellerinin daha dengeli bir dağılım profil sergilediğini, buna karşılık M1 ve M2 modellerinde hem yerel nem konsantrasyonlarının hem de kuru bölgelerin daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığını göstermiştir.

Özellikle kanal geometrisinin kritik kesitlerinde, M1 modelinde %135,17 seviyesine varan aşırı nem birikimleri tespit edilirken, M5 modelinde bağıl nem değerlerinin %40,93 ile %94,78 aralığında kontrollü bir dağılım sergilediği müşahede edilmiştir. Bu bulgular, optimize edilmiş kanal geometrilerinin su yönetimi açısından daha etkin bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.27 Akış Kanal Geometrisi Su Aktivitesi Görünümü

Yakıt hücresi performansının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen su aktivitesi ve polarizasyon eğrisi analizleri, membran hidrasyonu ile elektrokimyasal performans arasında doğrudan bir ilişki bulunduğunu göstermiştir. Şekil 4.27'de görüldüğü üzere, su aktivitesi değerleri 0,00 ile 1,36 aralığında değişmekte olup, M1 modelinde maksimum su aktivitesi 1,36 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, M5 modelinde su aktivitesinin 0,41–0,95 aralığında daha dengeli bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, homojen nem yönetiminin performans üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Polarizasyon eğrilerinin analizi, su aktivitesi dağılımı ile elektrokimyasal performans arasında doğrudan bir korelasyon olduğunu göstermiştir. M1 modelinde gözlemlenen aşırı su birikimi (1,36) ve M2 modelindeki düzensiz dağılım, ohmik kayıpların artmasına ve dolayısıyla düşük akım yoğunluklarında belirgin performans düşüşlerine neden olmuştur. Buna karşılık, M4 ve M5 modellerinde gözlemlenen dengeli su aktivitesi dağılımı (0,41-0,95), membran nemlendirmesinin optimize edilmesi sayesinde hem aktivasyon hem de ohmik kayıpların azaltılmasını sağlamıştır.

Özellikle yüksek akım yoğunluklarındaki performans değerlendirmesinde, M5 modelinin 0.95 maksimum su aktivitesi değeri ile 0,6 V'ta 1,2 A/cm² akım yoğunluğuna ulaştığı tespit edilirken, M1 modelinin aynı gerilim değerinde 0,8 A/cm² ile sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, su aktivitesi dağılımının homojenliğinin, yakıt hücresinin elektrokimyasal performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

4.4 Ağdan Bağımsızlık

Akış plakası geometrisi için belirlenen en uygun desen üzerinden, sayısal çözümün ağ yapısına duyarlılığını incelemek amacıyla ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, elde edilen çözümün hücre sayısına bağlı olarak değişip değişmediğini ortaya koymak ve bundan sonraki analizlerde kullanılacak ağ yoğunluğunu belirlemektir.

Ağdan bağımsızlık analizi kapsamında beş farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapıları arasında yalnızca eleman sayısı değiştirilmiş, diğer tüm sınır koşulları ve çözüm parametreleri sabit tutulmuştur. Çözümler, Ansys Fluent yazılımında bulunan PEM modülü üzerinden çözümlenmiştir. Her bir çözüm sonrasında yakıt pilinin ortalama akım (A) değeri belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.4 Ağdan Bağımsızlık Model Sınır Şartları

Sınır Şartları	
Voltaj [V]	1,0
Sıcaklık [°C]	60
Basınç [bar]	1,5
Nem RH Anot [%]	50
Nem RH Katot [%]	50
Stokiyometri H2	1,5
Stokiyometri Hava	2,5

Çizelge 4.5 Ağdan Bağımsızlık Çalışması Sonuçları

Ağ No	**Eleman Sayısı**	**Akım**	**Fark**
1	245000	0,755	-
2	376000	0,771	2,08
3	512000	0,777	0,81
4	638000	0,779	0,23
5	782000	0,780	0,11

Ağdan bağımsızlık çalışması kapsamında kullanılan sınır şartları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Belirlenen bu koşullar altında oluşturulan beş farklı ağ yapısına ait çözüm sonuçları ise Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Çizelge 4.5 incelendiğinde elde edilen sonuçlara göre, ağ yoğunluğu arttıkça ortalama akım yoğunluğu değerlerinde meydana gelen değişim azalmaktadır. Dördüncü ve beşinci ağ yapıları arasındaki farkın %0,2'den küçük olması, çözümün ağdan bağımsız hale geldiğini göstermektedir. Bu nedenle, hesaplama doğruluğu ile işlem süresi arasındaki denge dikkate alınarak 638.000 elemanlı ağ yapısı sonraki tüm analizlerde referans olarak seçilmiştir. Bu ağ yapısı, akım yoğunluğu dağılımı bakımından kararlı sonuçlar vermekte ve ağ yoğunluğuna bağlı olarak anlamlı bir değişim göstermemektedir. Böylece çözümün ağ yapısından bağımsız hale geldiği kabul edilmiştir.

4.5 Parametre Analizi

Akış desenleri ve akış kanal geometrileri içerisinde karşılaştırma yapılıp nihai model belirlenmiştir. Serpantin akış deseni üzerinde M5 akış kanal geometrisi sonuçlara göre en verimli model olmuştur. Bu model üzerinden parametre analizleri yapılmıştır. Nihai model 6 Farklı parametrede 3 farklı seviyede incelenmiştir.

4.5.1 Nem Oranı Parametresinin Analizi

Belirlenen nihai model üzerinde 3 farklı nem değeri ile analiz çalışması yapılmıştır.

Çizelge 4.6 Nem Yoğunluğu Analiz Değerleri

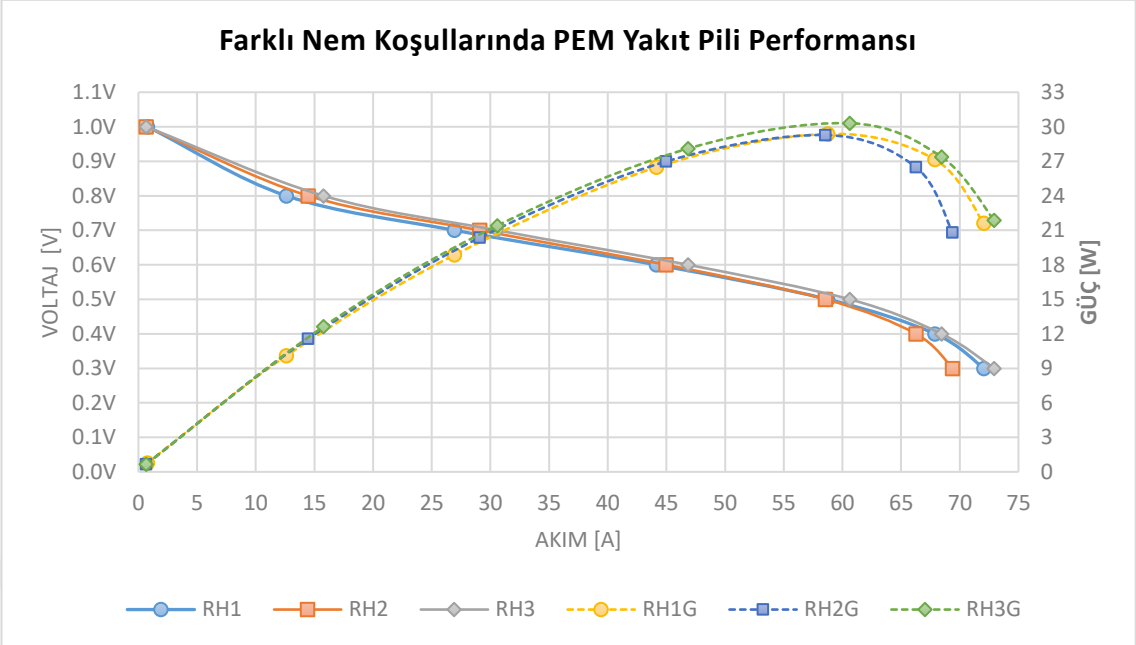
Farklı Nem Koşulu			
Seviye	**RH1**	**RH2**	**RH3**
Sıcaklık [°C]	60	60	60
Basınç [bar]	1,5	1,5	1,5
Nem RH Anot [%]	50	70	80
Nem RH Katot [%]	50	80	90
Stokiyometri H2	1,5	1,5	1,5
Stokiyometri Hava	2,5	2,5	2,5

Çizelge 4.7 Farklı Nem Koşullarında Analiz Sonucu

	Akım			Güç		
Voltaj	**RH1**	**RH2**	**RH3**	**RH1**	**RH2**	**RH3**
1,0V	0,7790	0,6724	0,6553	0,7790	0,6724	0,6553
0,8V	12,6070	14,4617	15,7725	10,0856	11,5694	12,6180
0,7V	26,9446	29,0898	30,5763	18,8612	20,3628	21,4034
0,6V	44,1342	44,9655	46,8361	26,4805	26,9793	28,1017
0,5V	58,7521	58,5579	60,6170	29,3760	29,2789	30,3085
0,4V	67,8827	66,2562	68,4426	27,1531	26,5025	27,3770
0,3V	72,0404	69,3802	72,9231	21,6121	20,8140	21,8769

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de sunulan polarizasyon verilerinin ayrıntılı incelenmesi, nem oranının (RH) PEM yakıt pili performansı üzerindeki etkisinin gerilim bölgesine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Düşük akım yoğunluğu aralığında (0,8–1,0 V), nem oranındaki artışın akım üretimini sınırladığı görülmüştür. Nitekim 1,0 V gerilim seviyesinde RH1 koşulunda 0,7790 A/cm² olarak ölçülen akım yoğunluğu, RH3 koşulunda 0,6553 A/cm²'ye kadar gerilemiştir. Bu durum, düşük akım bölgesinde aşırı nemlendirmeye bağlı olarak difüzyon sınırlarının oluştuğunu ve reaksiyon bölgelerindeki gaz transferinin kısmen zayıfladığını işaret etmektedir.

Buna karşılık, orta ve yüksek akım bölgelerinde (0,4–0,7 V) nem oranındaki artışın performansı olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Özellikle 0,6 V işletme noktasında RH1 koşulunda 44,1342 A/cm² olan akım yoğunluğunun RH3 koşulunda 46,8361 A/cm²'ye yükselmesi, membran iletkenliğinin artan nem içeriğiyle birlikte iyileştiğini göstermektedir.



Şekil 4.28 Farklı Nem Koşullarında Polarizasyon Eğrisi

Şekil 4.28'de verilen polarizasyon eğrileri üzerinden güç verileri incelenmiştir. Güç çıkışının en yüksek değerlere 0,5 V işletme geriliminde ulaştığı ve nem oranı arttıkça maksimum güç değerlerinde belirgin bir iyileşme meydana geldiği görülmektedir. Nitekim maksimum güç çıktısı RH1, RH2 ve RH3 koşullarında sırasıyla 29,3760 W, 29,2789 W ve 30,3085 W olarak elde edilmiştir. Bu bulgular, yüksek nem seviyelerinin özellikle yüksek akım bölgelerinde membran proton iletkenliğini artırarak performansı kayda değer biçimde geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

Yapılan çalışmalar, PEM yakıt pillerinde nem oranının artmasıyla hücre performansının yükseldiğini göstermektedir. Nemli koşullarda membranın su içeriği artarak proton iletkenliği yükselmekte ve buna bağlı olarak verim artışı gözlenmektedir. (Huo et al., 2023; P. H. Lee & Hwang, 2009; Wilberforce et al., 2019)

Elde edilen en iyi performans RH3 koşuluna aittir ve bu değer sonraki basınç değişimi analizlerinde referans koşulu (T1) olarak kullanılmıştır.

4.5.2 Sıcaklık Parametresinin Analizi

Belirlenen nihai model üzerinde 3 farklı sıcaklık değeri ile analiz çalışması yapılmıştır. Nem oranı analiz çalışmasındaki RH3 değerleri değişkenlerden birisi olarak kullanılmıştır.

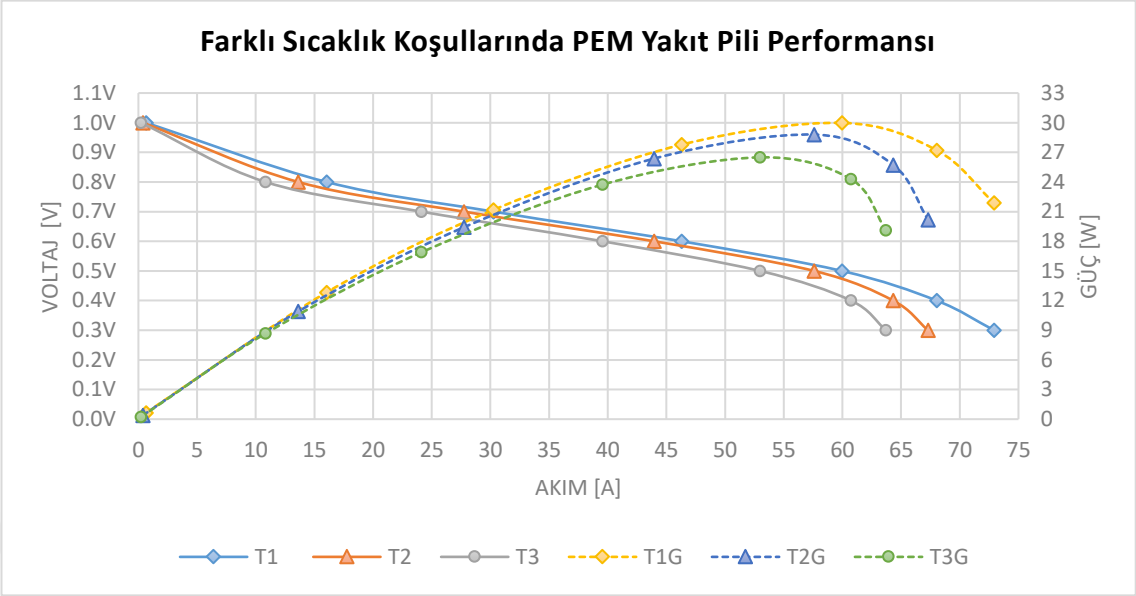
Çizelge 4.8 Farklı Sıcaklık Koşulu Analiz Değerleri

Farklı Sıcaklık Koşulu			
	T1 [RH3]	**T2**	**T3**
Sıcaklık [°C]	60	70	80
Basınç [bar]	1,5	1,5	1,5
Nem RH Anot [%]	80	80	80
Nem RH Katot [%]	90	90	90
Stokiyometri H2	1,5	1,5	1,5
Stokiyometri Hava	2,5	2,5	2,5
Sıcaklık [°C]	60	70	80

Çizelge 4.9 Farklı Sıcaklık Koşullarında Analiz Sonucu

	Akım			**Güç**		
Voltaj	**T1**	**T2**	**T3**	**T1**	**T2G**	**T3**
1,0V	0,6551	0,3910	0,2180	0,6551	0,3910	0,2180
0,8V	16,0350	13,6241	10,8438	12,8280	10,8993	8,6750
0,7V	30,2732	27,7487	24,1287	21,1912	19,4241	16,8901
0,6V	46,2984	43,9560	39,5643	27,7790	26,3736	23,7386
0,5V	59,9542	57,5959	52,9852	29,9771	28,7980	26,4926
0,4V	68,0298	64,3216	60,7253	27,2119	25,7286	24,2901
0,3V	72,9231	67,2924	63,7094	21,8769	20,1877	19,1128

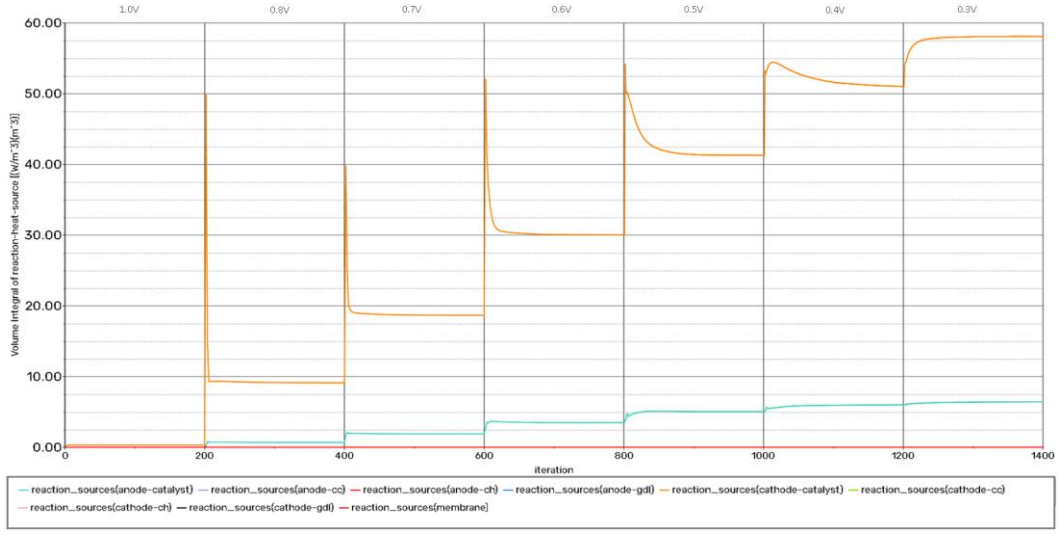
Analizler 60°C (T1), 70°C (T2) ve 80°C (T3) sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Sınır koşulları sabit tutulmuş, yalnızca sıcaklık parametresi değiştirilmiştir. Çizelge 4.8.'de analiz girdileri, Çizelge 4.9'da ise farklı sıcaklıklarda elde edilen akım ve güç değerleri verilmiştir.



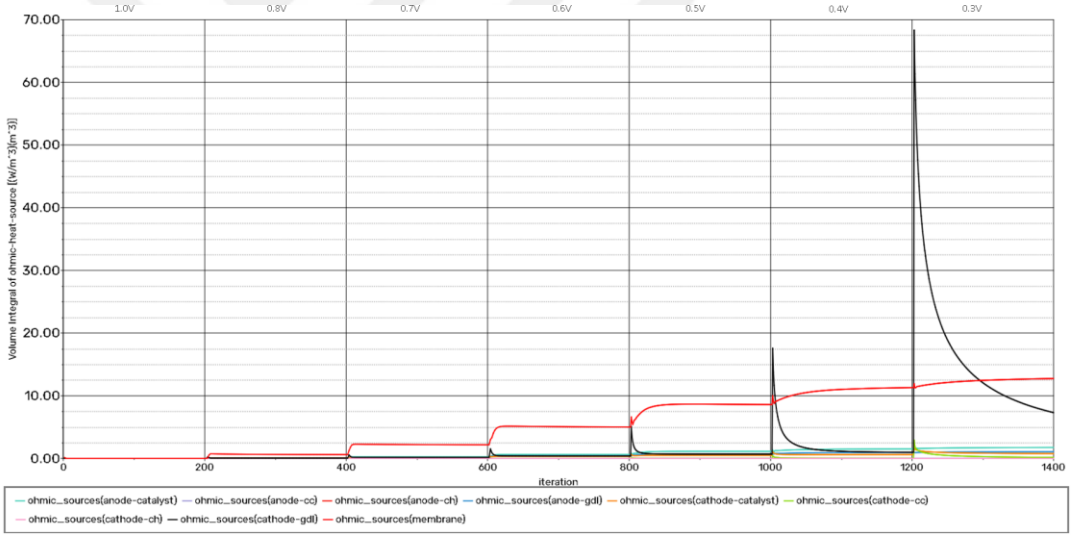
Şekil 4.29 Farklı Sıcaklık Koşullarında Analiz Sonucu

Sonuçlara göre en yüksek performans 60°C koşulunda (T1) elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta membranın nem tutma kapasitesi korunmuş, proton iletkenliği yüksek kalmış ve bu sayede tüm voltaj noktalarında akım ve güç değerleri diğer sıcaklıklara göre daha yüksek gerçekleşmiştir.

Şekil 4.29.'daki polarizasyon ve güç–akım grafikleri bu durumu açık biçimde göstermektedir. Sıcaklık artışı ilk etapta kinetik fayda sağlamasına rağmen, membran neminin azalması nedeniyle yakıt pili performansı 70°C ve 80°C koşullarında olumsuz etkilenmiştir. Bu durum, optimum sıcaklık aralığının membranın nem dengesini koruyabildiği seviyelerde olduğunu ortaya koymaktadır. Membran kurumasını teyit etmek amaçlı reaksiyon kaynaklar ve ohmik kaynaklar grafikleri incelenmiştir.

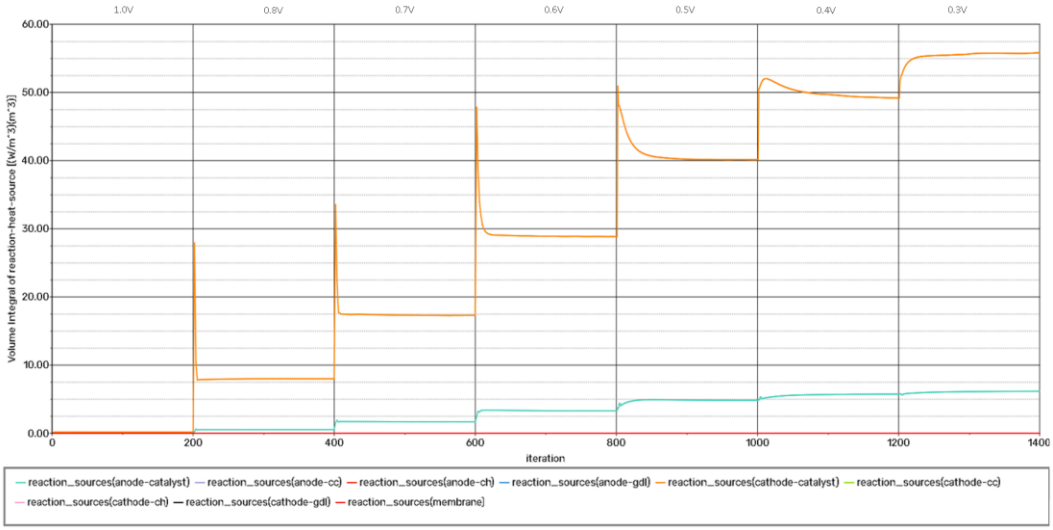


Şekil 4.30 60°C Reaksiyon Kaynaklar Grafiği

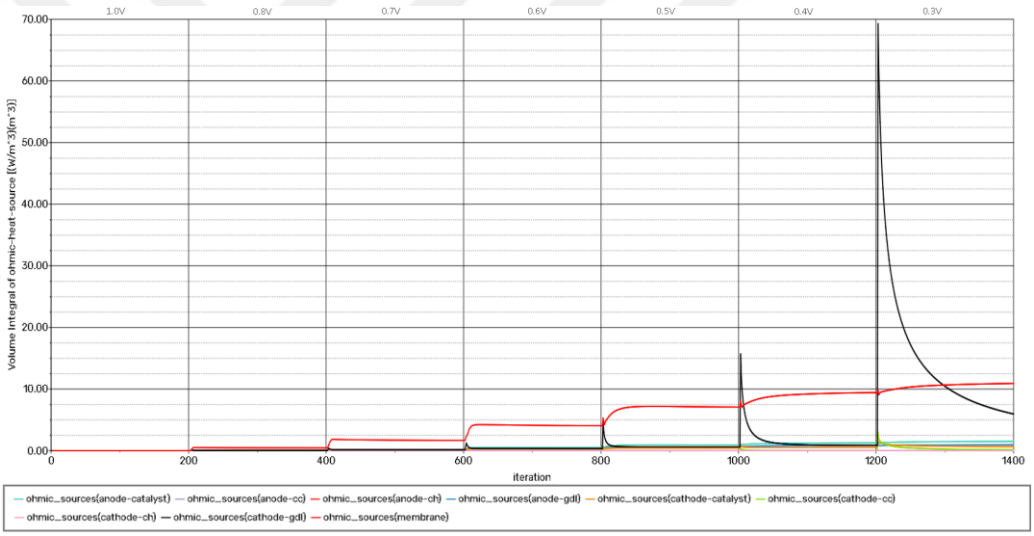


Şekil 4.31 60°C Ohmik Reaksiyon Kaynaklar Grafiği

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'de 60°C koşulunda reaksiyon ve ohmik kaynakların dağılımı gösterilmektedir. Bu sıcaklıkta membran su içeriği yeterli düzeyde korunduğundan ohmik kayıplar düşük ve kararlı seyretmiştir. Reaksiyon kaynaklarının düzenli dağılımı, proton iletimi ve elektrokimyasal etkinliğin optimum seviyede gerçekleştiğini göstermektedir.

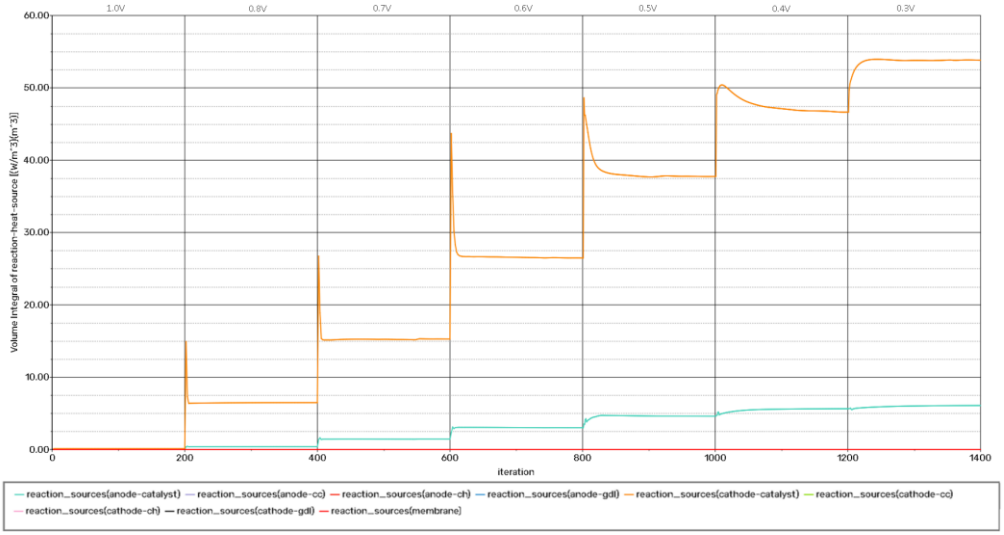


Şekil 4.32 70°C Reaksiyon Kaynaklar Grafiği

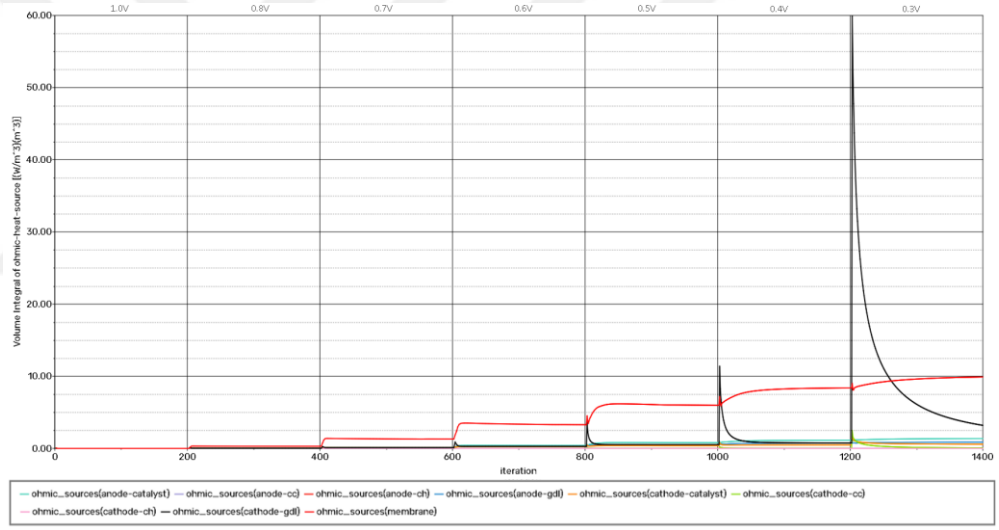


Şekil 4.33 70°C Ohmik Kaynaklar Grafiği

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te 70°C'de reaksiyon ve ohmik kaynakların değişimi sunulmaktadır. Sıcaklık artışı ile membranda su kaybı başladığından yüksek akım bölgelerinde ohmik kaynakların belirgin şekilde yükseldiği görülmektedir. Reaksiyon kaynaklarındaki azalma ise katalizör bölgesinde iyon iletiminin zayıflamaya başladığını işaret etmektedir.



Şekil 4.34 80°C Reaksiyon Kaynaklar Grafiği



Şekil 4.35 80°C Ohmik Kaynaklar Grafiği

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te 80°C koşulunda kaynak dağılımları gösterilmekte olup membran kurumasının belirginleşmesi nedeniyle ohmik kaynakların yüksek akım bölgelerinde keskin şekilde arttığı gözlenmektedir. Reaksiyon kaynaklarının düşmesi ise proton iletiminin ciddi ölçüde azaldığını ve hücre performansının bu sıcaklıkta minimum seviyeye indiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlarla literatürde yapılan çalışmalar, hücre sıcaklığının artmasının membranın su içeriğini azaltabileceğini ve sonuçta membran iletkenliğinin düşmesine yol açarak hücre performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle sıcaklık yükseldikçe, membrandaki su buharlaşma hızı artmakta, yeterli yeniden hidratasyon sağlanamazsa membran kuruması ortaya çıkmakta ve iyon taşıma direnci yükselmektedir.(H. F. Lee et al., 2018)

Elde edilen en iyi performans T1 koşuluna (60°C) aittir ve bu değer sonraki basınç değişimi analizlerinde referans koşulu (P2) olarak kullanılmıştır.

4.5.3 Basınç Parametresinin Analizi

Belirlenen nihai model üzerinde 3 farklı basınç değeri ile analiz çalışması yapılmıştır. Sıcaklık parametresi analiz çalışmasındaki P2 değerleri değişkenlerden birisi olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.10 Farklı Basınç Koşulu Analiz Değerleri

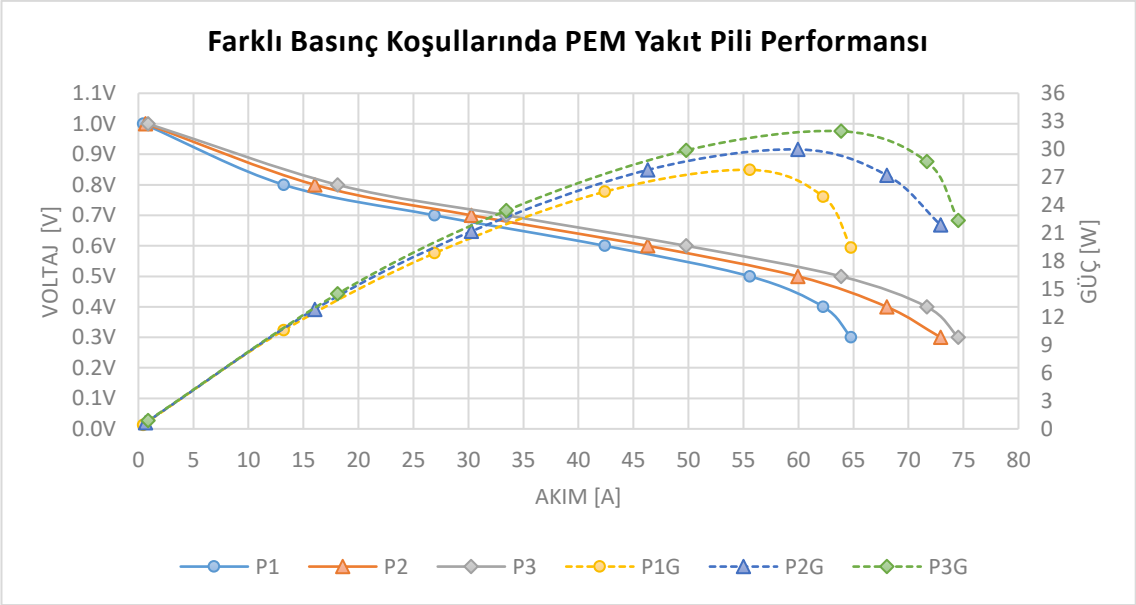
Farklı Basınç Koşulu			
	P1	**P2 [T1]**	**P3**
Sıcaklık [°C]	60	60	60
Basınç [bar]	1.2	1.5	1.8
Nem RH Anot [%]	80	80	80
Nem RH Katot [%]	90	90	90
Stokiyometri H2	1.5	1.5	1.5
Stokiyometri Hava	2.5	2.5	2.5
Sıcaklık [°C]	60	60	60

Çizelge 4.10'da verilen sınır şartları içerisinde sadece basınç değerleri değişkenlik göstermektedir. Basınç dışındaki değerler sabit kabul edilmiştir.

Çizelge 4.11 Farklı Basınç Koşullarında Analiz Sonucu

	Akım			Güç		
Voltaj	**P1**	**P2**	**P3**	**P1**	**P2**	**P3**
1,0V	0.4303	0.6551	0.8884	0.4303	0.6551	0.8884
0,8V	13.2242	16.0350	18.0983	10.5794	12.8280	14.4786
0,7V	26.9165	30.2732	33.4479	18.8416	21.1912	23.4135
0,6V	42.4025	46.2984	49.8005	25.4415	27.7790	29.8803
0,5V	55.5797	59.9542	63.8639	27.7899	29.9771	31.9320
0,4V	62.2530	68.0298	71.6667	24.9012	27.2119	28.6667
0,3V	64.7898	72.9231	74.5410	19.4369	21.8769	22.3623

Çizelge 4.11'de farklı basınç koşullarında akım ve güç değerleri sunulmaktadır. Tüm voltaj seviyelerinde basınç artışı ile akım değerleri yükselmiştir. Örneğin, 0.6 V'da akım P1'de 42.40 A iken P2'de 46.29 A'a, P3'te ise 49.80 A'a yükselmiştir. Benzer şekilde, 0.4 V seviyesinde akım P1'de 62.25 A iken P3'te 71.66 A olarak kaydedilmiştir. Güç değerlerinde de benzer eğilim gözlenmiş, 0.6 V'da P1 için 25.44 W olan güç P2'de 27.77 W'a, P3'te ise 29.88 W'a yükselmiştir. Bu sonuçlar, basınç artışının hücrenin daha yüksek akım ve güç üretmesini sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.36 Farklı Basınç Koşullarında Analiz Sonucu

Şekil 4.36'da farklı basınç koşullarında elde edilen polarizasyon eğrileri sunulmaktadır. Basınç artışının özellikle orta ve yüksek akım bölgelerinde belirgin avantaj sağladığı gözlemlenmiştir. Düşük akım bölgelerinde P1, P2 ve P3 arasındaki fark sınırlı kalmakla birlikte, akım yükseldikçe basınç artışının sağladığı fayda daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, yüksek basınç altında membran nemliliğinin daha iyi korunması ve gaz difüzyonunun kolaylaşmasıyla açıklanabilir.

Yapılan çalışmalar, PEM yakıt pillerinde çalışma basıncının artmasının hücre performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Basınç artışıyla birlikte reaktan gazların yoğunluğu yükselmekte, bu durum elektrot yüzeyinde daha etkin bir kütle transferi sağlayarak reaksiyon hızını artırmaktadır. Ayrıca, yüksek basınç altında membranın su içeriği daha dengeli bir şekilde korunmakta ve proton iletkenliği artmaktadır. Sonuç olarak, hücre gerilimi ve genel verimlilikte artış gözlenmektedir. (Smith et al., 2021)

Elde edilen en iyi performans P3 koşuluna aittir ve bu değer sonraki farklı stokiyometri koşulu analizlerinde referans koşulu (S2) olarak kullanılmıştır.

4.5.4 Stokiyometri Oranı Parametresinin Analizi

Nihai analiz modeli üzerinde 3 farklı stokiyometri oranı ile analiz çalışması yapılmıştır.

Çizelge 4.12 Farklı Stokiyometri Koşulu Analiz Değerleri

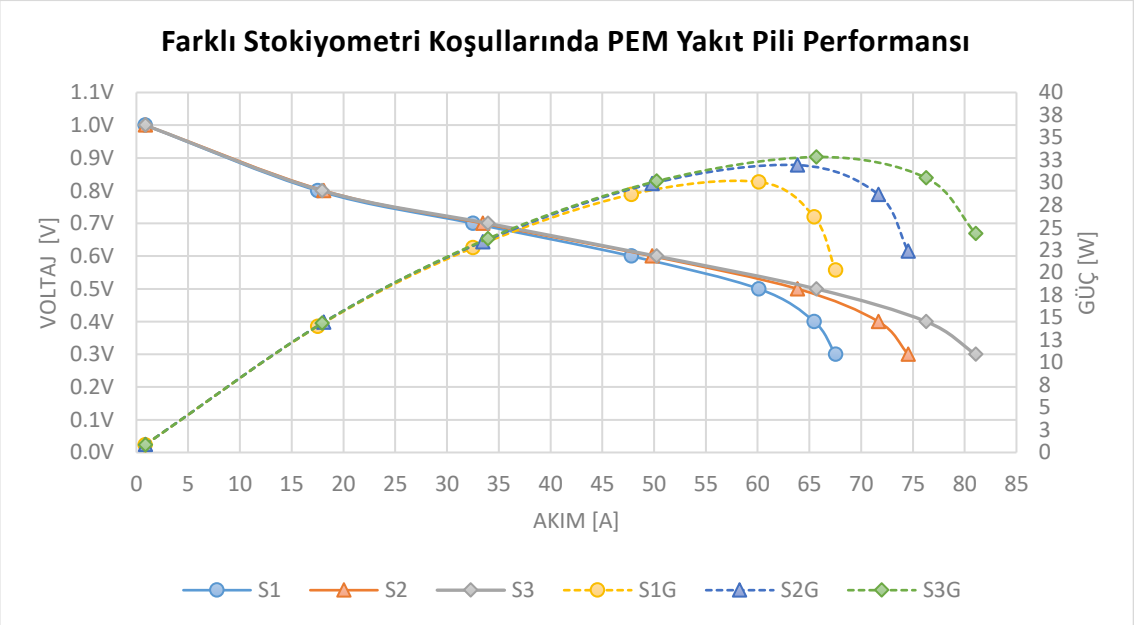
Farklı Stokiyometri Koşulu			
	S1	**S2 [P3]**	**S3**
Sıcaklık [°C]	60	60	60
Basınç [bar]	1,8	1,8	1,8
Nem RH Anot [%]	80	80	80
Nem RH Katot [%]	90	90	90
Stokiyometri H2	1,2	1,5	2,5
Stokiyometri Hava	2	2,5	4,0
Sıcaklık [°C]	60	60	60

Çizelge 4.12'de verilen sınır şartları içerisinde sadece stokiyometri oranı değişkenlik göstermektedir. Stokiyometri oranı dışındaki değerler sabit kabul edilmiştir.

Çizelge 4.13 Farklı Stokiyometri Koşullarında Analiz Sonucu

	Akım			Güç		
Voltaj	**S1**	**S2**	**S3**	**S1**	**S2**	**S3**
1,0V	0.8449	0.8884	0.8598	0.8449	0.8884	0.8598
0,8V	17.4989	18.0983	17.9352	13.9991	14.4786	14.3482
0,7V	32.5020	33.4479	33.9520	22.7514	23.4135	23.7664
0,6V	47.8003	49.8005	50.2350	28.6802	29.8803	30.1410
0,5V	60.1173	63.8639	65.6637	30.0587	31.9320	32.8319
0,4V	65.4533	71.6667	76.2752	26.1813	28.6667	30.5101
0,3V	67.5201	74.5410	81.0579	20.2560	22.3623	24.3174

Çizelge 4.13'te farklı stokiyometri koşullarında elde edilen akım ve güç değerleri sunulmaktadır. Sonuçlara göre stokiyometri arttıkça hücre performansında iyileşme gözlenmiştir. Örneğin, 0.6 V çalışma voltajında akım S1'de 47.8 A iken, S2'de 49.8 A'a ve S3'te 55.3 A'a yükselmiştir. Benzer şekilde, güç değerleri de artış göstermiş olup, S3 koşulu en yüksek güç çıkışını sağlamıştır.



Şekil 4.37 Farklı Stokiyometri Koşullarında Analiz Sonucu

Şekil 4.37'de farklı stokiyometri koşullarında elde edilen polarizasyon eğrileri gösterilmektedir. Düşük stokiyometri koşullarında hücrenin performansının daha düşük olduğu, yüksek stokiyometri ile özellikle orta ve yüksek akım bölgelerinde daha yüksek akım ve güç değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Bu durum, yakıt ve oksijenin elektrotlara daha etkin taşınması, difüzyon sınırlamalarının azalması ve reaksiyonların daha verimli gerçekleşmesiyle açıklanabilir. Stokiyometri artışının hücre performansını artırdığını ve hem akım hem de güç üretimini optimize ettiğini göstermektedir.

Elde edilen en iyi performans S3 koşuluna aittir ve bu değer sonraki farklı malzeme koşulu analizlerinde referans koşulu olarak kullanılmıştır.

4.5.5 Farklı Malzeme Parametre Analizi

Belirlenen nihai model üzerinde iki farklı malzeme ile analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Bipolar plaka malzemesi dışındaki parametreler, farklı stokiyometri analiz çalışmasındaki S3 koşulundaki değerler kullanılarak belirlenmiştir. S3 değerleri, önceki analizler sonucunda akım değerlerinin maksimum olduğu sınır şartları esas alınarak sonraki analizlere girdi olarak uygulanmıştır. Dolayısıyla, farklı malzeme analizinde kullanılan girdiler, önceki çalışmada en yüksek akım ve güç değerlerini sağlayan sınır şartlarıdır.

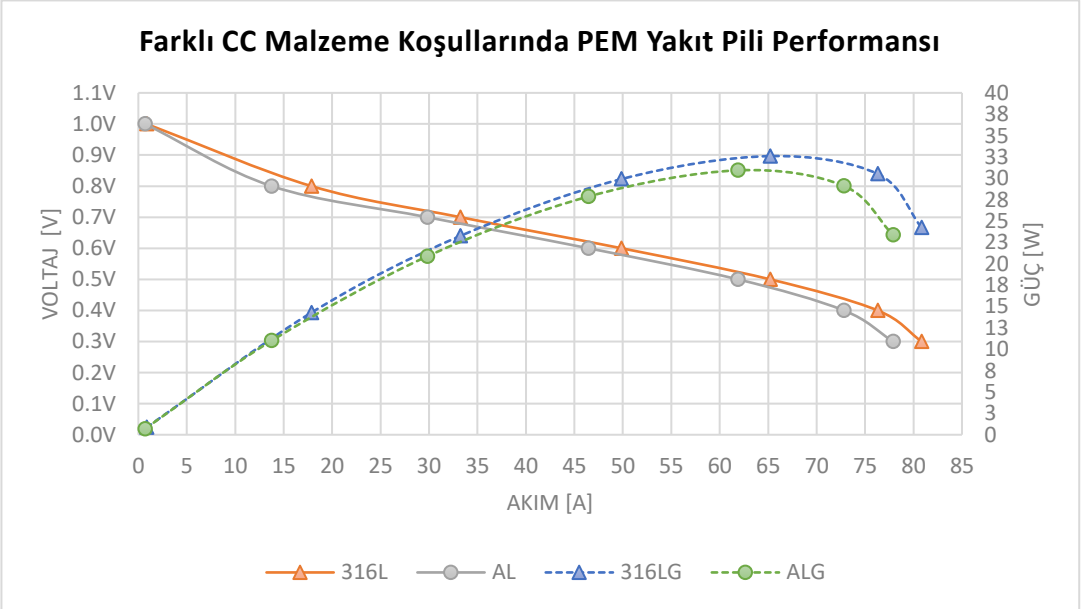
Çizelge 4.14 Farklı Malzeme Koşulu Analiz Değerleri

Farklı Malzeme Koşulu		
	Alüminyum	**316 L**
Sıcaklık [°C]	60	
Basınç [bar]	1,8	
Nem RH Anot [%]	80	
Nem RH Katot [%]	90	
Stokiyometri H2	2,5	
Stokiyometri Hava	4,0	
Sıcaklık [°C]	60	

Çizelge 4.15 Farklı Malzeme Koşulu Analiz Sonucu

	Akım		Güç	
Voltaj	**316L**	**AL**	**316L**	**AL**
1,0V	0.8527	0.6913	0.8527	0.6913
0,8V	17.8605	13.7612	14.2884	11.0090
0,7V	33.2308	29.8169	23.2616	20.8718
0,6V	49.8643	46.4518	29.9186	27.8711
0,5V	65.2026	61.8697	32.6013	30.9349
0,4V	76.2975	72.8002	30.5190	29.1201
0,3V	80.8311	77.8878	24.2493	23.3663

Çizelge 4.15'te verilen analiz sonuçları, AISI 316L paslanmaz çelik akış plakasının alüminyuma kıyasla daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir. 316L'nin daha yüksek elektrik iletkenliği ($1{,}34\times10^{6}$ S/m), tüm voltaj seviyelerinde alüminyuma göre daha yüksek akım çekilmesini sağlamıştır. Güç performansı açısından, 316L malzemesi 0,5 V'de 32,6 W'lık tepe gücüne ulaşırken, alüminyum yalnızca 30,9 W'da kalmıştır. Bu değerler, 316L'nin yaklaşık %5,4 daha yüksek maksimum güç sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.38 Farklı Malzeme Koşulu Analiz Sonucu

Şekil 4.38’de sunulan polarizasyon eğrileri de bu bulguları desteklemektedir. Eğriler, özellikle orta ve yüksek akım bölgelerinde 316L'nin voltaj kaybının daha düşük olduğunu ve genel performans avantajını doğrulamaktadır. Böylece hem akım hem de güç açısından 316L malzemesinin üstünlüğü görsel olarak da teyit edilmiştir.

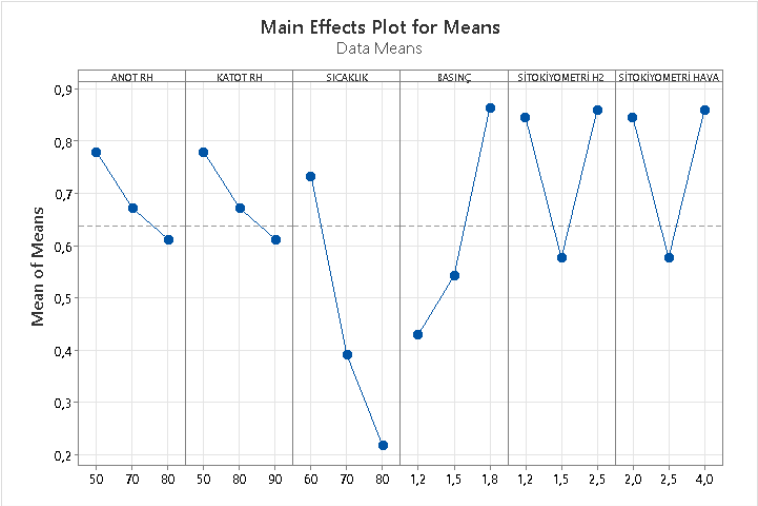
4.6 Taguchi Analizi

Nihai model üzerinden yapılan parametre analizleri sonucunda sistemin parametrelere olan duyarlılığını gözlemlemek için Taguchi metodu ile analiz çalışması yapılmıştır. Analiz çalışması 1,0V, 0,6V, 0,3V düzeyinde yapılmıştır.

Çizelge 4.16 1,0V Ortalama Değerleri Yanıt Tablosu

Seviye	Anot Rh	Katot Rh	Sıcaklık	Basınç	Stokiyometri H_2	Stokiyometri Hava
1	0,7788	0,7788	0,7328	0,4303	0,8449	0,8449
2	0,6722	0,6722	0,3910	0,5430	0,5763	0,5763
3	0,6125	0,6125	0,2180	0,8644	0,8598	0,8598
Delta	0,1663	0,1663	0,5148	0,4341	0,2835	0,2835
Rank	5,5	5,5	1	2	3,5	3,5

Çizelge 4.16’ta verilen veriler, deneysel faktörler arasında Sıcaklık faktörünün en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir; Rank sütununda 1 ile belirtilen bu faktör, diğer faktörlere kıyasla deneysel sonuçlar üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Sıcaklık seviyeleri arasındaki farklar küçük olmasına rağmen, sonuçlar üzerinde belirgin bir değişim yaratmaktadır. Anot ve Katot faktörleri, sırasıyla 0,7788, 0,6722 ve 0,6125 ile birbirine yakın ortalama değerlere sahip olmalarına rağmen, Sıcaklık kadar güçlü bir etkiye sahip değildir.



Şekil 4.39 1,0V Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği

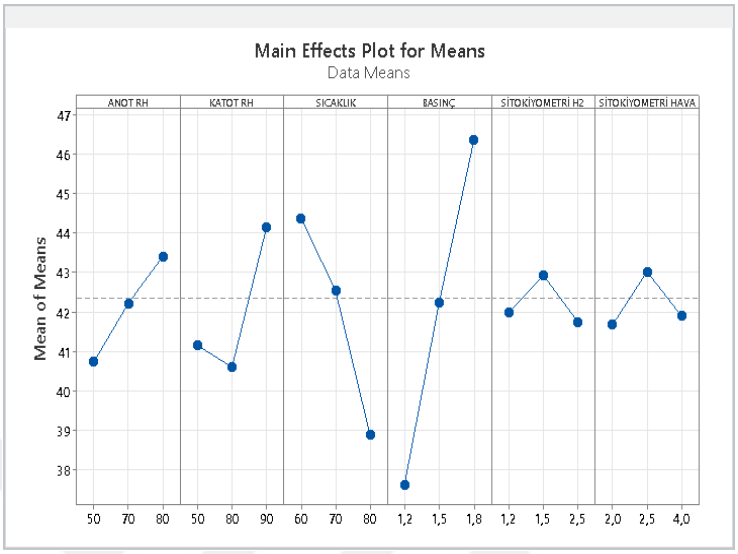
Şekil 4.39'da sunulan görsel veriler de bu bulguları desteklemektedir. Basınç faktörü, seviyeleri arasındaki farkların belirgin olmasıyla deneysel sonuçlar üzerinde anlamlı bir etki yaratırken, Stokiyometri H2 ve Stokiyometri Hava faktörlerinin etki düzeyleri minimaldir ve sonuçlar üzerinde anlamlı bir etkileri bulunmamaktadır. Bu bulgular, Sıcaklık faktörünün özellikle optimize edilmesi gerektiğini ve Anot ile Katot gibi diğer faktörlerin de göz önünde bulundurulmasının önemini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.17 0,6V Ortalama Değerleri Yanıt Tablosu

Seviye	Anot Rh	Katot Rh	Sıcaklık	Basınç	Stokiyometri H_2	Stokiyometri Hava
1	40,74	41,16	44,37	37,64	41,98	41,68
2	42,22	40,60	42,53	42,25	42,93	43,02
3	43,41	44,16	38,89	46,36	41,75	41,90
Delta	2,66	3,55	5,48	8,73	1,18	1,34
Rank	4	3	2	1	6	5

Çizelge 4.17'de sunulan veriler, deneysel faktörler arasında Basınç faktörünün en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir; Rank sütununda 1. sırada yer alan bu faktör, seviyeler arasındaki belirgin farklarla deneysel sonuçlar üzerinde güçlü bir etki yaratmaktadır. Sıcaklık faktörü ise ikinci en etkili parametre olarak öne çıkmakta olup, seviyeler arasındaki farklar görece sınırlı olsa da yanıt değerlerinde önemli değişimlere

yol açmaktadır. Anot Rh ve Katot Rh faktörlerinin ortalama değerleri birbirine yakın olmasına rağmen, bu faktörlerin etkileri Basınç ve Sıcaklık kadar güçlü değildir.



Şekil 4.40 0,6V Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği

Şekil 4.40'da sunulan görsel veriler de bu bulguları doğrulamaktadır. Buna karşılık, Stokiyometri H_2 ve Stokiyometri Hava faktörlerinin etkileri oldukça düşük olup, deneysel sonuçlar üzerinde anlamlı bir fark oluşturmamaktadır. Bu sonuçlar, sistem performansının iyileştirilmesi için özellikle Basınç ve Sıcaklık parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini, Anot ve Katot faktörlerinin ise ikincil düzeyde dikkate alınmasının uygun olacağını ortaya koymaktadır.

Stokiyometriye bağlı performans analizlerinde, akım ve güç değerlerinin önce artıp sonra azalması gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük ve orta stokiyometri seviyelerinde reaktanların yeterli şekilde hücreye ulaşmasıyla performansın artması, çok yüksek seviyelerde ise performansın düşmesiyle açıklanabilir. Bu nedenle, stokiyometri seviyelerinin optimize edilmesi veya farklı seviyelerle yeniden belirlenmesi, sistem performansının artırılması açısından önemlidir.

Çizelge 4.18 0,3V Ortalama Değerleri Yanıt Tablosu

Seviye	Anot Rh	Katot Rh	Sıcaklık	Basınç	Stokiyometri H_2	Stokiyometri Hava
1	72,23	72,23	71,82	64,79	67,52	67,52
2	69,67	69,67	67,29	69,16	69,31	69,31
3	70,26	70,26	63,71	74,37	81,06	81,06
Delta	2,56	2,56	8,11	9,58	13,54	13,54
Rank	5,5	5,5	4	3	1,5	1,5

Çizelge 4.18'te sunulan veriler, deneysel faktörler arasında Stokiyometri H_2 ve Stokiyometri Hava faktörlerinin en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir; Rank sütununda 1,5 değeri ile belirtilen bu iki parametre, seviyeler arasındaki belirgin farklarla deneysel sonuçlar üzerinde güçlü bir etki yaratmaktadır. Basınç faktörü de görece yüksek bir etkiye sahip olup, sistem performansında dikkate değer değişimlere yol açmıştır. Sıcaklık faktörü ise orta düzeyde bir etki gösterirken, Anot Rh ve Katot Rh faktörlerinin ortalama değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir.



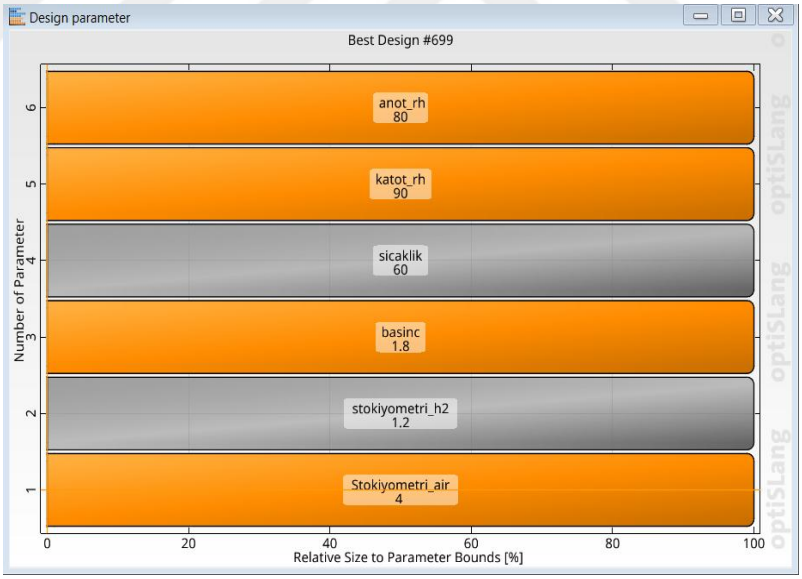
Şekil 4.41 Ortalamalar için Ana Etkiler Grafiği

Şekil 4.41'de sunulan görsel veriler de bu bulguları desteklemektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, sistemin 0,3 V altında optimum performans gösterebilmesi için

özellikle Stokiyometri H_2 ve Stokiyometri Hava parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği, Basınç faktörünün bu etkiyi desteklediği, Sıcaklık, Anot Rh ve Katot Rh faktörlerinin ise ikincil düzeyde rol oynadığı sonucuna varılmaktadır.

4.7 Parametre Optimizasyonu (Optislang)

Nihai model üzerinden çeşitli parametreler farklı sevilerde analiz çalışması yapılmış, parametrelerin sisteme olan etkileri incelenmiştir. Taguchi analiziyle birlikte parametrelerin katılım payı bulunmuştur. Yapılan bu çalışma ile parametrelerin optimizasyon yapılıp sonuçların incelenmesi planlanmıştır. Optislang programı üzerinden parametre ve sonuçlar tanımlanmış ve birçok sonuç elde edilmiştir. Korelasyon matrisi, parametrelerin katılım payı, en iyi sonuç gibi birçok veri elde edilmiştir. Yapılan girdi parametreleri ile yaklaşık 1500 iterasyon yapılıp %99 doğruluk (Cop) oranı ile optimizasyon yapılmıştır.



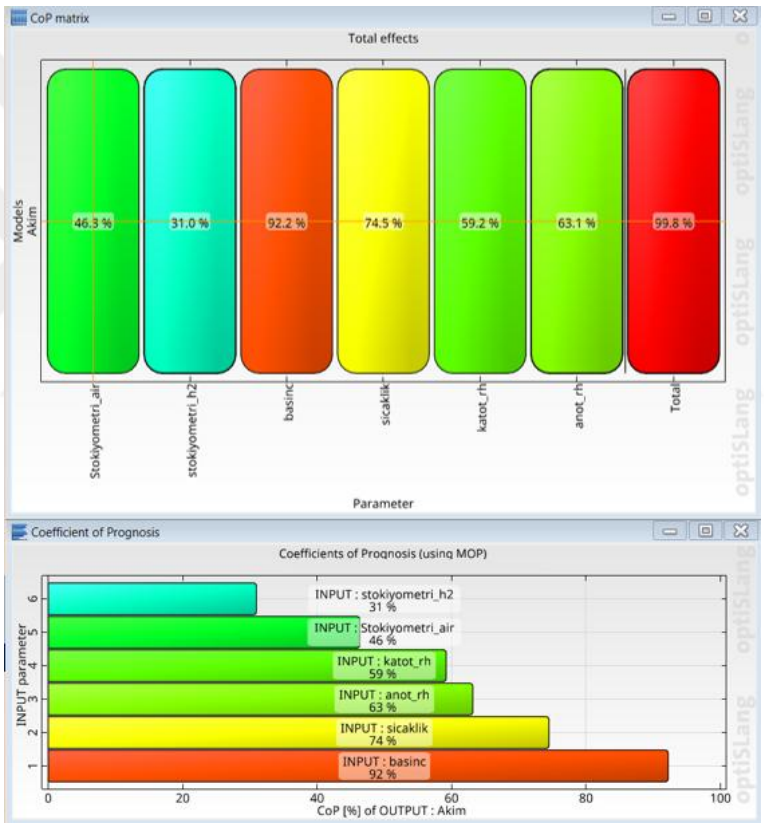
Şekil 4.42 En İyi Sonuç Verileri

Optislang analizleri sonucunda elde edilen en iyi performans değerleri, Şekil 4.42'de gösterilmiştir. Bu sonuçlar, sistem parametrelerinin optimize edilmesiyle ulaşılan maksimum akım ve güç seviyelerini açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.19 Optimizasyon Verisi ile Yapılan Analiz Sonucu

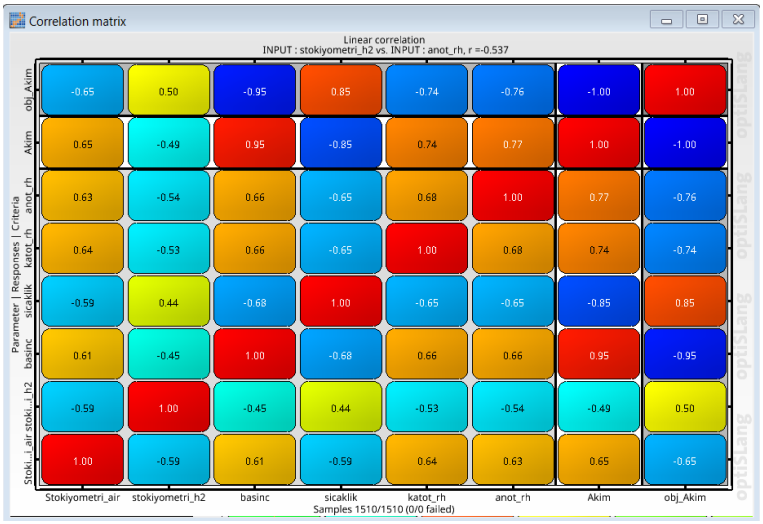
Voltaj	Anot Nem [%]	Katot Nem [%]	Sıcaklık [°C]	Basınç [bar]	H2 Stokiyometri [-]	Hava Stokiyometri [-]	Akım [A]
0,6V	80	90	60	1.8	1.2	4	51.203

Optimizasyon sonucunda belirlenen girdiler kullanılarak fiziksel model üzerinde analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.19'da sunulan sonuçlara göre, yapılan analiz çalışmasıyla 51,2031 A ile en yüksek akım değeri elde edilmiştir.



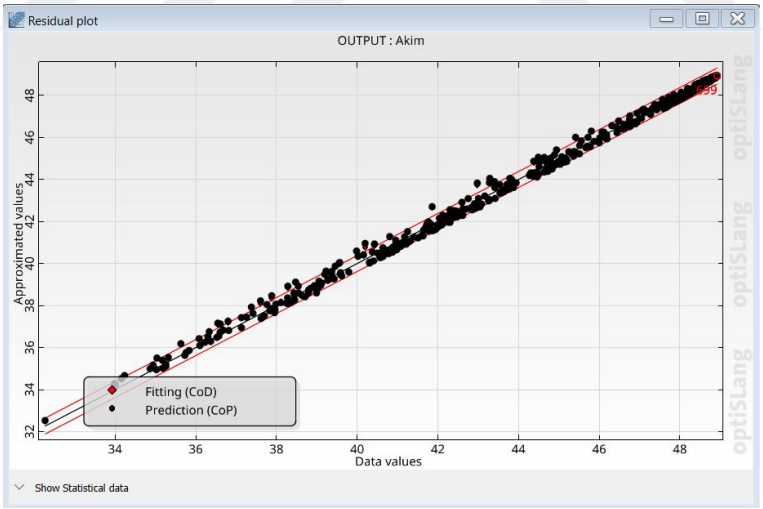
Şekil 4.43 Parametre Katılım Payı

Şekil 4.43'te gösterilen parametre katılım payları incelendiğinde, sisteme en yüksek etkiyi yapan parametrenin basınç olduğu görülmektedir. 0,6 V değerinde gerçekleştirilen Taguchi analizinde de katılım payı en yüksek parametre basınç olarak belirlenmiştir. Farklı yöntemlerle yapılan değerlendirmelerde de benzer şekilde, basınç parametresinin katılım payının diğer parametreler üzerinde üstün olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



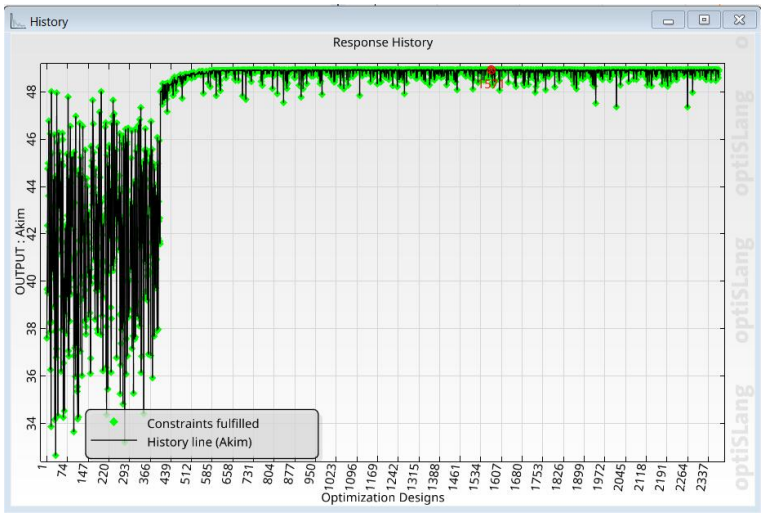
Şekil 4.44 Korelasyon Matrisi

Şekil 4.44'te sunulan korelasyon matrisi, deneysel faktörler arasındaki doğrusal ilişkileri göstermektedir. Matris incelendiğinde, bazı parametreler arasında güçlü pozitif veya negatif korelasyonlar olduğu, bunun analiz sonuçlarının yorumlanmasında önemli bilgiler sağladığı görülmektedir.



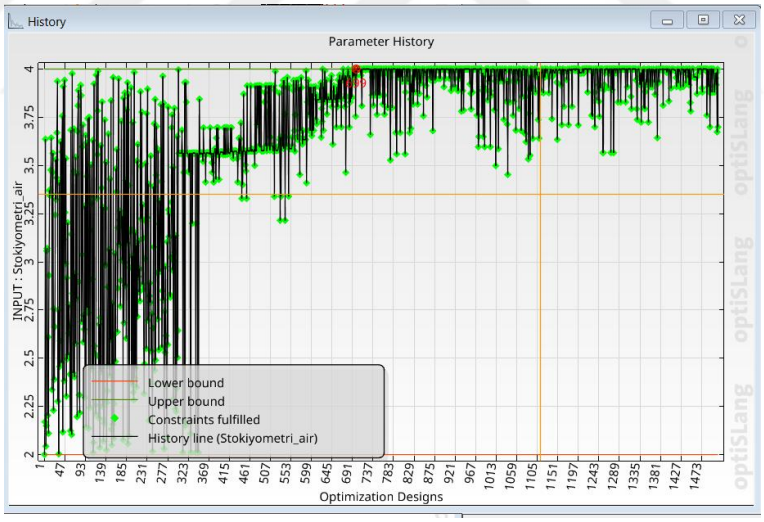
Şekil 4.45 Artık Dağılım Grafiği

Şekil 4.45'te sunulan artık dağılım grafiği, modelin öngörülen değerleri ile analiz değerleri arasındaki uyumu göstermektedir. Grafikten, modelin tahminlerinin genel olarak deneysel sonuçlarla iyi bir örtüşme sergilediği görülmektedir.



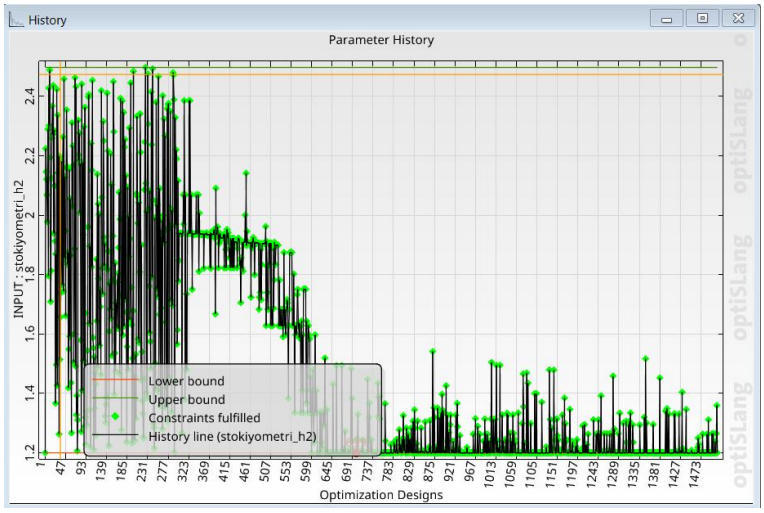
Şekil 4.46 Akım İterasyon Geçmişi Grafiği

Şekil 4.46'da gösterilen akım iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyonda akımın maksimum olmasının hedef olarak belirlendiği süreçte, simülasyon boyunca akım değerlerinin nasıl değiştiğini ve sonuçların stabilizasyon sürecini göstermektedir.



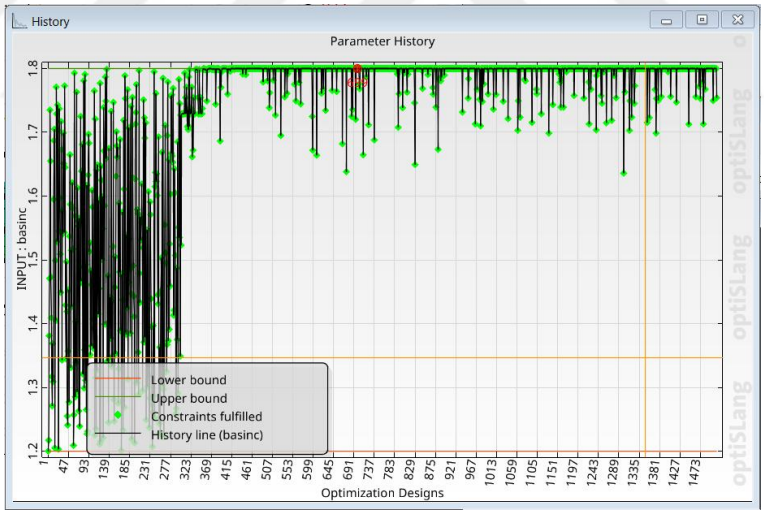
Şekil 4.47 Stokiyometri Hava İterasyon Geçmişi Grafiği

Şekil 4.47'de gösterilen Stokiyometri Hava iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyon sürecinde bu parametrenin değerlerinin nasıl değiştiğini ve sistemin kararlı bir optimum seviyeye ulaştığını göstermektedir.



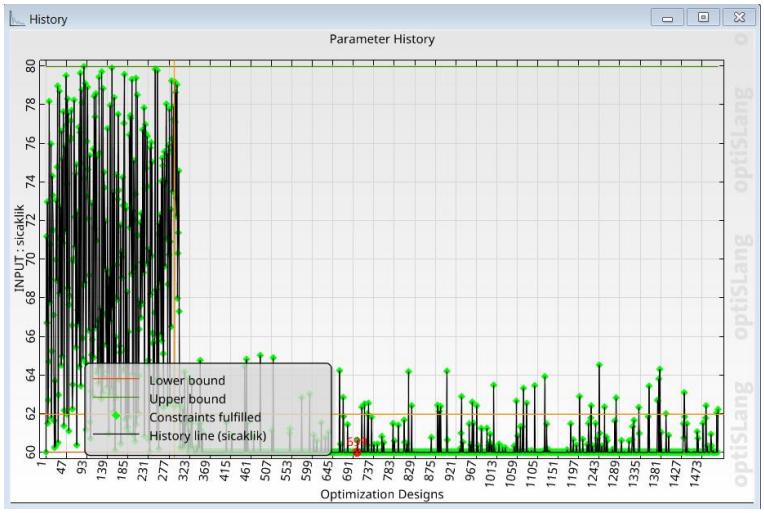
Şekil 4.48 Stokiyometri H2 İterasyon Geçmişi Grafiği

Şekil 4.48'de sunulan Stokiyometri H_2 iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyon sürecinde bu parametrenin değerlerinin değişimini ve sistemin kararlı bir optimum seviyeye ulaşma sürecini göstermektedir.



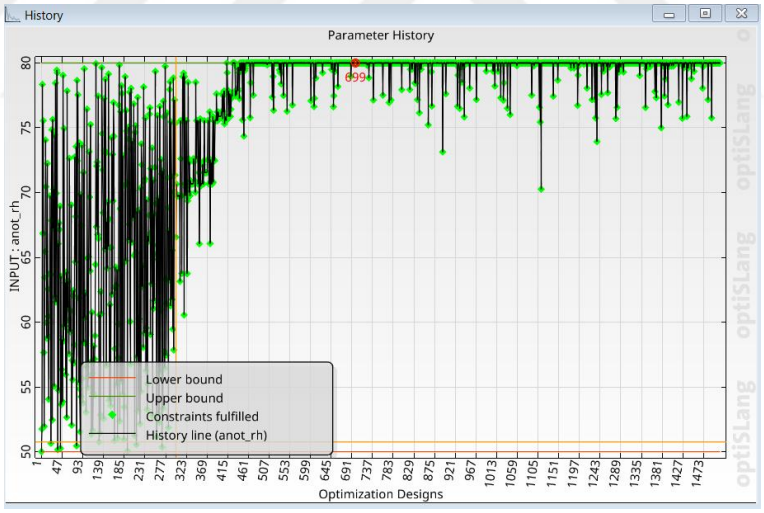
Şekil 4.49 Basınç İterasyon Geçmişi Grafiği

Şekil 4.49'da sunulan Basınç iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyon sürecinde basınç değerlerinin nasıl değiştiğini ve sistemin kararlı bir optimum seviyeye ulaşma sürecini göstermektedir.



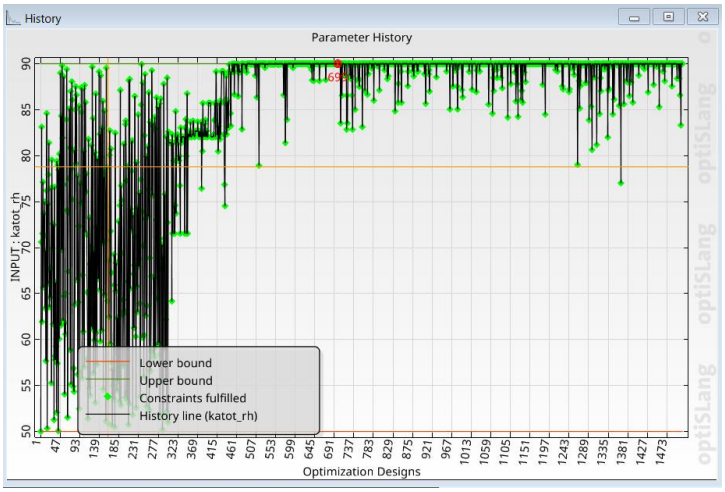
Şekil 4.50 Sıcaklık İterasyon Geçmişi Grafiği

Şekil 4.50'de gösterilen Sıcaklık iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyon sürecinde sıcaklık parametresinin değerlerindeki değişimi ve sistemin optimum sıcaklık seviyesine ulaşma eğilimini ortaya koymaktadır.



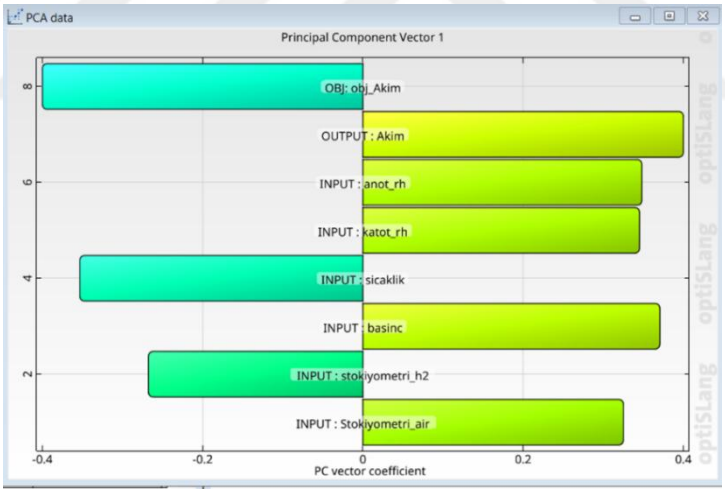
Şekil 4.51 Anot Nem İterasyon Grafiği

Şekil 4.51'de sunulan Anot Nem iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyon sürecinde anot tarafındaki nem oranının nasıl değiştiğini ve sistemin kararlı bir optimum değere ulaşma eğilimini göstermektedir.



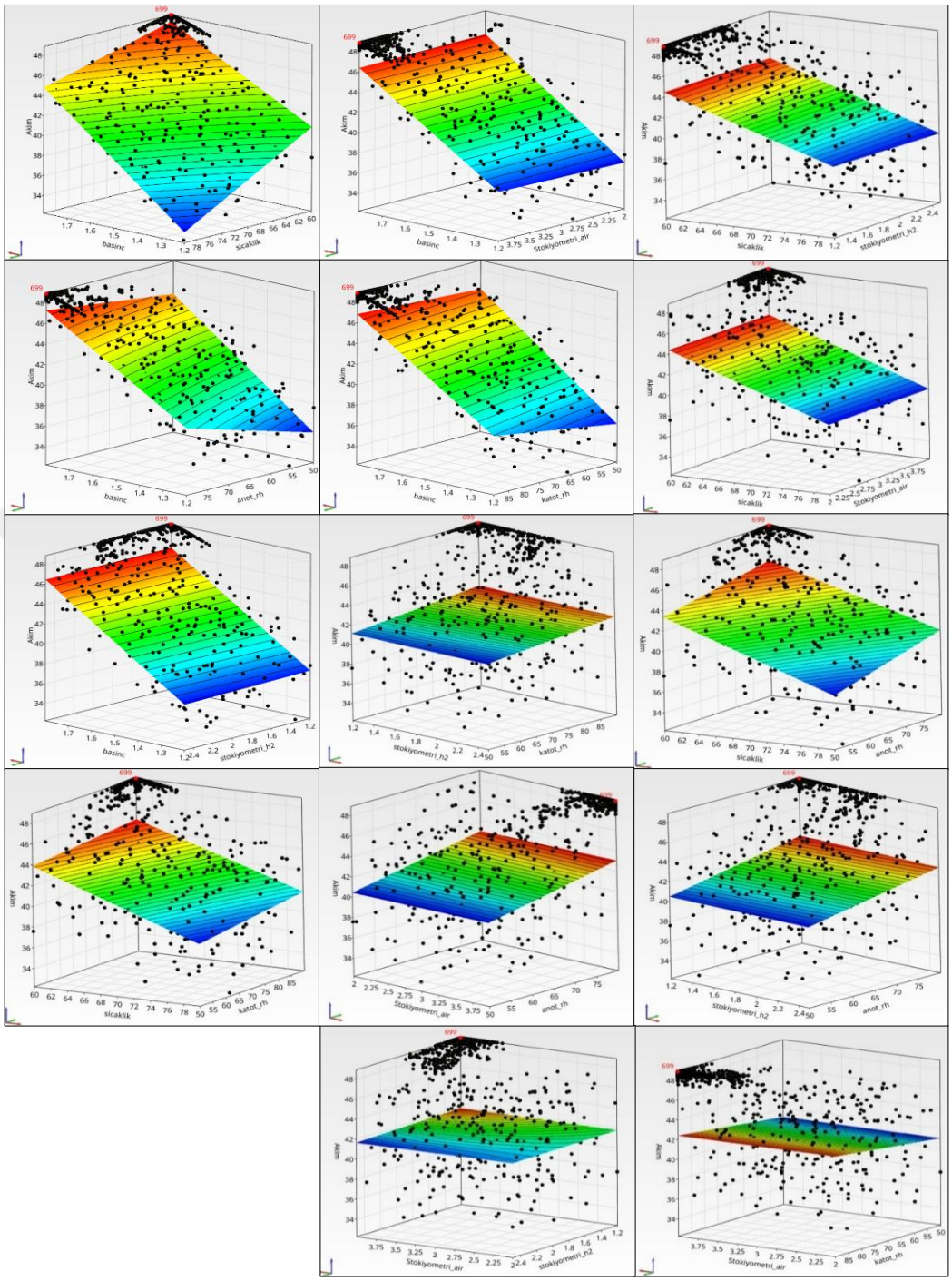
Şekil 4.52 Katot Nem İterasyon Grafiği

Şekil 4.52'de sunulan Katot Nem iterasyon geçmişi grafiği, optimizasyon sürecinde katot tarafındaki nem oranının değişimini ve sistemin optimum seviyeye ulaşma eğilimini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.53 Temel Bileşen Grafiği

Şekil 4.53'teki temel bileşen analizi, sıcaklık ve Stokiyometri H_2 düşük; Anot Rh, Katot Rh, basınç ve Stokiyometri Hava yüksek olduğunda akımın maksimum değerlere ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.54 Tepki Yüzeyi 3B Grafiği

Şekil 4.54'te sunulan üç boyutlu tepki yüzeyi grafiği, seçilen parametrelerin akım üzerindeki etkileşimlerini ve optimum performans bölgesinin konumunu görsel olarak ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu yüksek lisans tezinde, Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEMFC) sistemlerinde bipolar plaka tasarımının hücre performansına etkileri sayısal simülasyon yöntemiyle kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, akış alanı deseninin, kanal geometrisinin ve işletme koşullarının hücre performansına olan etkilerini belirleyerek optimum tasarım parametrelerini ortaya koymaktır.

Çalışmada öncelikle üç farklı akış alanı deseni (serpantin, dalgalı ve ızgara) analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, akış alanı deseninin PEM yakıt pili performansını doğrudan etkilediğini açıkça göstermiştir. Serpantin desen, reaktan taşınımını artıran yüksek hız değerleri sayesinde en yüksek güç çıktısını sağlamıştır. Dalgalı desen düşük hız bölgeleri nedeniyle en zayıf performansı sergilerken, ızgara desen orta düzeyde performans göstermiştir. Basınç analizleri sonucunda, serpantin desenin katot tarafında yüksek basınç kayıpları oluşturmasına rağmen etkin taşınım sağlaması sayesinde en yüksek güç çıktısını verdiği belirlenmiştir. Izgara desen düşük basınç kayıplarıyla enerji kaybını en aza indirirken, taşınım sınırlamaları nedeniyle güç verimi düşmüştür.

Sıcaklık dağılımı açısından değerlendirildiğinde, serpantin desenin homojen sıcaklık profili ve etkin gaz dağılımı sayesinde en yüksek verimlilikte çalıştığı görülmüştür. Izgara desen düşük basınç kayıplarıyla avantaj sağlamasına karşın, sınırlı taşınım nedeniyle orta seviyede kalmıştır. Dalgalı desen ise düzensiz sıcaklık dağılımı ve düşük taşınım performansı nedeniyle en düşük verimi göstermiştir. Benzer şekilde, bağıl nem ve su yönetimi analizlerinde de serpantin desenin homojen nem dağılımı sağlaması, optimum su yönetimi gerçekleştirmesi ve yüksek güç çıktısı üretmesiyle öne çıktığı tespit edilmiştir.

Reaksiyon ve ohmik kayıp analizleri, hücre voltajı azaldıkça hem reaksiyon hızlarının hem de ohmik kayıpların arttığını göstermiştir. Serpantin desen, düşük voltaj aralığında istikrarlı reaksiyon dağılımı ve kontrollü ohmik artış sergileyerek dengeli bir performans ortaya koymuştur. Buna karşın, dalgalı desen yüksek akım yoğunluklarında su birikimi ve taşınım dengesizlikleri nedeniyle ani direnç artışları göstermiş, ızgara desen ise düşük

voltajlarda artan direnç nedeniyle performans kaybına uğramıştır. Bu durum, PEM yakıt pili performansının yalnızca elektrokimyasal reaksiyonlara değil, aynı zamanda su yönetimi, nem dengesi ve membran iletkenliğine de bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Serpantin model üzerinden yürütülen kanal geometrisi analizleri, akış kanalının biçimsel özelliklerinin PEMFC performansında belirleyici olduğunu göstermiştir. 0,3 V sabit gerilim altında yapılan analizlerde M5 (yamuk kesitli kanal) modeli hem yüksek basınç dağılımı hem de homojen akış ve sıcaklık profiliyle en yüksek güç çıktısını sağlamıştır. Bu modelde yaklaşık 30 W güç değeri, 51,2 A akım ve %58 verim elde edilmiştir. M1 ve M2 gibi daha basit geometriler ise düşük akış homojenliği ve yetersiz reaktan taşınımı nedeniyle daha sınırlı performans sergilemiştir. M5 geometrisinde bağıl nem dağılımının %40–95 aralığında kontrol altında tutulduğu, su aktivitesinin 0,41–0,95 aralığında optimum seviyede gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kanal geometrisinin yalnızca akış direncini değil, aynı zamanda gaz taşınımı, su aktivitesi ve membran hidrasyonunu da doğrudan etkilediğini göstermiştir.

Parametre analizlerinde, basınç ve stokiyometri oranlarındaki artışın PEM yakıt pili performansını önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. 1,8 bar basınç koşulunda en yüksek güç çıktısı elde edilmiştir. Farklı sıcaklık koşulları incelendiğinde, 60 °C'nin optimum performans noktası olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklıkta membran yeterli nem seviyesini korumuş, proton iletkenliği yüksek düzeyde kalmıştır. 70 °C ve 80 °C sıcaklıklarda ise artan su buharlaşması membran kurumasına yol açmış, bu durum proton taşınım direncini yükselterek ohmik kayıpların artmasına ve hücre geriliminin düşmesine neden olmuştur. Böylece sıcaklık artışının belirli bir değerin üzerinde yakıt pili performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Stokiyometri analizlerinde ise yüksek stokiyometrik oranların (S3 düzeyi) kütle taşınım sınırlamalarını ortadan kaldırarak akım yoğunluğunu ve güç üretimini artırdığı saptanmıştır.

Parametrelerin sistem performansına katkı oranları Taguchi yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yüksek voltaj seviyelerinde performansa en fazla etki eden değişken sıcaklık, orta voltaj seviyelerinde basınç, düşük voltaj seviyelerinde ise stokiyometri oranı olmuştur. Katkı oranları sırasıyla sıcaklık için %34, basınç için %28,

stokiyometri için %22, bağıl nem için %10 ve malzeme özelliği için %6 olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, çok değişkenli optimizasyon amacıyla Optislang yazılımı kullanılmıştır. Yaklaşık 1500 iterasyon sonucunda optimum çalışma koşulları %80 anot bağıl nem, %90 katot bağıl nem, 60 °C sıcaklık, 1,8 bar basınç, H_2 stokiyometrisi 1,2 ve hava stokiyometrisi 4,0 olarak elde edilmiştir. Bu koşullar altında 0,6 V gerilimde 51,2 A akım ve 30,7 W güç değerine ulaşılmıştır. Analizler, basınç parametresinin tüm değişkenler arasında sistem performansına en fazla katkı sağlayan etken olduğunu ortaya koymuştur. Optislang üzerinden elde edilen bu sonuç taguchi analizinde 0.6V düzeyinde yapılan analiz sonucuyla örtüşmekte ve sonucu doğrulamaktadır.

Ayrıca, akış plaka malzemesi olarak AISI 316L paslanmaz çelik ve alüminyum karşılaştırılmıştır. 316L malzeme, 0,5 V gerilimde 32,6 W tepe gücü üreterek alüminyuma göre yaklaşık %5,4 daha yüksek performans sağlamıştır. Bu fark, 316L'nin yüksek elektrik iletkenliği ve korozyon direnci ile açıklanmıştır.

Genel olarak bu çalışma, PEM yakıt pillerinde performansın artırılabilmesi için akış alanı tasarımı, kanal geometrisi, malzeme seçimi ve işletme koşullarının bütüncül olarak optimize edilmesi gerektiğini açık biçimde ortaya koymuştur. Serpantin akış alanı, gaz taşınımı, sıcaklık dağılımı ve su yönetimi açısından en verimli desen olarak öne çıkmıştır. Yamuk kesitli M5 kanal geometrisi ise akış homojenliği ve basınç dengesi bakımından en uygun tasarımı sunmuştur. Bu çalışma, PEM yakıt pillerinde sistem verimliliği, dayanıklılık ve uzun ömür açısından önemli bir mühendislik yaklaşımı geliştirmiştir.

5.1 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu tez çalışması, PEM yakıt pili sistemlerinde akış alanı tasarımı, kanal geometrisi ve işletme koşullarının performans üzerindeki etkilerini çok yönlü bir yaklaşımla ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, sistem verimliliğini artırmak için bipolar plaka tasarımının ve işletme parametrelerinin birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamlı analizlerin sunduğu sonuçlar, ileride yapılabilecek çalışmalara güçlü bir temel oluşturmaktadır.

İleriye dönük olarak, benzer sayısal modeller farklı malzeme türleri, yeni akış alanı desenleri ve mikro kanal yapıları için uygulanabilir. Özellikle grafit, karbon kompozit, titanyum alaşımı veya iletken kaplamalı polimer tabanlı plakalar gibi alternatif malzemelerin değerlendirilmesi hem dayanım hem de ağırlık açısından önemli avantajlar sağlayabilir.

Ayrıca, üç boyutlu üretim teknolojilerinin (örneğin metal 3D baskı) gelişimi, kanal geometrilerinin karmaşık tasarımlarının fiziksel olarak üretilebilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yöntemlerle üretilecek optimize edilmiş akış alanlarının incelenmesi, su yönetimi ve basınç kaybı konularında önemli iyileştirmeler sağlayabilir.

Bununla birlikte, bu tezde belirlenen optimum parametre setleri farklı yakıt türleri, membran kalınlıkları veya katalizör yapılarıyla birleştirilerek yeniden analiz edilebilir. Bu tür çalışmalar, sistem davranışını çok boyutlu olarak anlamaya ve farklı uygulama senaryoları için en uygun tasarımın belirlenmesine katkı sunacaktır.

Son olarak, gelecekte çok hücreli yığın (stack) modellerine geçilmesi, hücreler arası akış dağılımı, sıcaklık dengesi ve basınç farklarının tüm sistem performansına etkilerinin değerlendirilmesine imkân verecektir. Böylece tek hücre analizlerinden elde edilen bulgular, yığın düzeyinde doğrulanarak sistem tasarımı açısından daha geniş bir mühendislik bakış açısı kazanılabilecektir.

KAYNAKLAR

- International Energy Agency, I. (2023). *World Energy Outlook 2023*. www.iea.org/terms

Alvaro, R. J., Alfonso, G. C., Carlos, P. G., Maria, A. M., Maria, R., Maria, C. S., Alvaro, P., Maria, D. P., Juan, C., & Karina, B. (2017). Synthesis of a proton exchange membrane from polyvinyl alcohol (PVA) modified with Va2O5 for fuel cells. *Contemporary Engineering Sciences*, *10*(32), 1561–1570. https://doi.org/10.12988/ces.2017.711195

Ansys Inc. (2021). *ANSYS Fluent theory guide* (Release 2021 R2). ANSYS Inc.

Assys Inc. (2023). *Simulating Proton-Exchange Membrane Fuel Cells using Non-Conformal Interfaces in Ansys Fluent*. https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/fluids/simulating-proton-exchange-membrane-fuel-cells-using-non-conformal-interfaces-in-ansys-fluent

BİLHAN, A. (2020). Yakıt Pili Uygulamaları için Kademeli Yükseltici DA/DA Dönüştürücü Devresinin Tasarımı. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, *11*(1), 29–37. https://doi.org/10.24012/dumf.527601

Giddey, S., Ciacchi, F. T., & Badwal, S. P. S. (2004). Design, assembly and operation of polymer electrolyte membrane fuel cell stacks to 1 kWe capacity. *Journal of Power Sources*, *125*(2), 155–165. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.08.026

Gürbüz, E., Grépin, E., Ringuedé, A., Lair, V., & Cassir, M. (2021). Significance of Molten Hydroxides With or Without Molten Carbonates in High-Temperature Electrochemical Devices. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 9). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.666165

Huo, H., Chen, J., Wang, K., Wang, F., Jin, G., & Chen, F. (2023). State Estimation of Membrane Water Content of PEMFC Based on GA-BP Neural Network. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(11). https://doi.org/10.3390/su15119094

Jiang, X. F., Han, M. F., & Peng, S. P. (2007). Manufacturing Processes of Solid Oxide Fuel Cell Components. *Key Engineering Materials*, *336–338*, 498–501. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.336-338.498

Karaman, O., Üniversitesi, A., Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, S., & Görüntüleme Teknikleri Programı, T. (2021). Azot-Katkılı 3 Boyutlu Grafen Mimari Üzerinde Desteklenen Paladyum Nanopartiküllerin Doğrudan Metanol Yakıt Hücrelerinde Elektrokatalizör Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. In *BEU Journal of Science* (Vol. 10, Issue 3).

Karanfil, G. (n.d.). *Proton Değişim Membran Yakıt Hücreleri: Termodinamiği, Bileşenleri ve Uygulama Alanları*.

KURT URHAN, B. (2021). Co3O4/Ni Köpük Nanokompozitlerinin Doğrudan Metanol Yakıt Hücresinde Elektrot Malzemesi Olarak Kullanımı. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *11*(2), 1354–1361. https://doi.org/10.21597/jist.878119

Lee, H. F., Chang, J. Y., & Chen-Yang, Y. W. (2018). Improvement in physical properties of single-layer gas diffusion layers using graphene for proton exchange membrane fuel cells. *RSC Advances*, *8*(40), 22506–22514. https://doi.org/10.1039/c8ra02062k

Lee, P. H., & Hwang, S. S. (2009). Performance characteristics of a PEM fuel cell with parallel flow channels at different cathode relative humidity levels. *Sensors*, *9*(11), 9104–9121. https://doi.org/10.3390/s91109104

Mathew, C., Boby, A., Varghese, P. R., Mohamed, S. N., & Singaravelu, D. L. (2025). Effect of multi-walled carbon nanotubes on the properties of composite bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Engineering Research Express*, *7*(1), 015552. https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb372

Peng, J., & Lee, S. J. (2006). Numerical simulation of proton exchange membrane fuel cells at high operating temperature. *Journal of Power Sources*, *162*(2 SPEC. ISS.), 1182–1191. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.08.001

Phuangngamphan, M., Okhawilai, M., Hiziroglu, S., & Rimdusit, S. (2019). Development of highly conductive graphite-/graphene-filled polybenzoxazine composites for bipolar plates in fuel cells. *Journal of Applied Polymer Science*, *136*(11). https://doi.org/10.1002/app.47183

Smith, P. J., Bennett, W. R., Jakupca, I. J., & Gilligan, R. P. (2021). *Effect of Reactant Pressure on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance*. http://www.sti.nasa.gov

Strickland, K., Pavlicek, R., Miner, E., Jia, Q., Zoller, I., Ghoshal, S., Liang, W., & Mukerjee, S. (2018). Anion Resistant Oxygen Reduction Electrocatalyst in Phosphoric Acid Fuel Cell. *ACS Catalysis*, *8*(5), 3833–3843. https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00390

Wilberforce, T., Ijaodola, O., Khatib, F. N., Ogungbemi, E. O., El Hassan, Z., Thompson, J., & Olabi, A. G. (2019). Effect of humidification of reactive gases on the performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Science of the Total Environment*, *688*, 1016–1035. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.397

EKLER

EK 1
EK 2
EK 3
EK 4