

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



**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PEM YAKIT  
PİLLERİNİN PERFORMANSI ÜZERİNE KANAL  
BLOKAJLARININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Alperen Latif DURAK**

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Taşıt Dinamiği ve Kontrol Bilim Dalı

ARALIK 2022

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

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN PEM YAKIT  
PİLLERİNİN PERFORMANSI ÜZERİNE KANAL BLOKAJLARININ  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Tez Yazarı  
**Alperen Latif DURAK**

Danışman  
Prof. Dr. Hanbey HAZAR

ARALIK 2022  
ELAZIĞ

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

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

---

Başlığı: Elektrikli Araçlarda Kullanılan PEM Yakıt Pillerinin Performansı Üzerine  
Kanal Blokajlarının Etkisinin İncelenmesi

Yazarı: Alperen Latif DURAK

İlk Teslim Tarihi: 06.12.2022

Savunma Tarihi: 28.12.2022

---

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hanbey HAZAR Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Cumali İLKILIÇ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Tahsin YÜKSEL Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*

Prof. Dr. Burhan ERGEN  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘‘Elektrikli Araçlarda Kullanılan PEM Yakıt Pillerinin Performansı Üzerine Kanal Blokajlarının Etkisinin İncelenmesi’’ Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

28.12.2022

**Alperen Latif DURAK**



# ÖNSÖZ

Son yüzyılda ulaştığımız refah düzeyi ve yaşam konforunu devam ettirebilmek için enerjiye yoğun bir ihtiyaç vardır. Enerjiye duyulan ihtiyacın en büyük payı fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Bu büyük payı karşılayan fosil yakıtların dünya üzerinde rezervleri sınırlı durumdadır. Ayrıca bu yakıtların enerjisinden faydalanabilmek için yanma işlemine tabi tutulmalıdır. Bu yanma işlemi sonrasında çevreye insan, hayvan ve doğaya zararlı atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu dezavantajları göz önüne alınacak olursa yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır. Dünyada bu yönde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları yenilenebilir ve çevreci olması bakımından fosil yakıtların önüne geçmektedir. Hidrojen, hem kendisinin enerji kaynağı olması hem de enerji depolayıcısı olarak kullanılması bakımından avantajları durumdadır. Yakıt hücreleri, hidrojenin enerjisinden yararlanmamız sağlayan cihazlardır. Yakıt hücresi teknolojisinin gelişmesi sayesinde gelecekte hidrojen yakıtının avantajlarından daha fazla yararlanmamızı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasına motivasyonumu sağlayan, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösterip, araştırmalarımda bana yardımını hiç eksik etmeyen danışman hocam Prof. Dr. Hanbey HAZAR'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli vaktini bana ayıran, tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle desteğini hiç esirgemeyen hocam Arş. Gör. Hüseyin SEVİNÇ'e teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca gerek maddi gerek manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkür ederim.

Uzakta olmasına rağmen konu hakkında tecrübeleriyle beni bilgilendiren arkadaşım Mustafa YILMAZ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.21.16** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

**Alperen Latif DURAK**  
ELAZIĞ, 2022

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
ÖZET .....	vi
ABSTRACT .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ .....</b>	<b>7</b>
2.1. Yakıt Pillerinin Matematiksel İfadesi.....	9
2.2. Yakıt Pili Çeşitleri .....	13
2.3. Yakıt Pili Bileşenleri .....	15
<b>3. BİPOLAR PLAKALAR .....</b>	<b>18</b>
3.1. Bipolar Plakalarda Yapılan Tasarımsal Geliştirmeler .....	22
<b>4. LİTERATÜRDE BİPOLAR PLAKALAR ÜZERİNE YAPILAN ENGEL UYGULAMALARI... 29</b>	
<b>5. MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>34</b>
5.1. Engel Varyasyonları .....	34
5.2. Yakıt Hücresinin Modellenmesi ve Analizi.....	39
5.3. Yakıt Hücresinin Üretimi .....	48
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>53</b>
6.1. Engellerin Şekil Varyasyonu Sonuçları.....	53
6.2. Engel Sayı Varyasyonlarının Sonuçları.....	71
6.3. Engellerin Yükseklik Varyasyonu Sonuçları.....	80
6.4. Engellerin Konum Varyasyonu Sonuçları .....	92
6.5. Yakıt Hücrelerinin Deneysel Performansları.....	105
<b>7. SONUÇLAR.....</b>	<b>108</b>
<b>8. ÖNERİLER.....</b>	<b>110</b>
KAYNAKLAR.....	111
ÖZGEÇMİŞ	

## ÖZET

---

### Elektrikli Araçlarda Kullanılan PEM Yakıt Pillerinin Performansı Üzerine Kanal Blokajlarının Etkisinin İncelenmesi

**Alperen Latif DURAK**

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2022, Sayfa: xiv + 119

---

Günümüz dünyasında sanayileşme ve artan insan nüfusu gibi faktörler nedeniyle enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Bu durum insanoğlunu, alternatif, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı ve teknolojisi arayışına itmiştir. Bu noktada hidrojen enerjisi ve yakıt pili teknolojisi geleceğin enerji kaynağı olarak görülmektedir. Yakıt hücreleri, hidrojen yakıtındaki kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal enerji cihazlarıdır. Bu tez çalışması temel olarak yakıt hücresi bileşeni olan bipolar plakaların daha yüksek akım yoğunluğu sağlayacak şekilde geliştirilmesini konu almaktadır. Bu amaçla, bipolar plakalarda bulunan akış kanalları üzerine, geometrik şekil, sayı, yükseklik ve konum olarak farklı varyasyonlarda engeller yerleştirilmiştir. İlk aşamada tasarlanan modellerin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metodu ile analizleri yapılmıştır. Ardından en verimli BPP akış alanına sahip yakıt pili ile standart serpantin tasarımına sahip yakıt pili aynı koşullarda deneysel olarak test edilmiş ve akım/gerilim eğrileri elde edilmiştir. Sonuç olarak, bipolar plakalara engel yerleştirilmesi, hücrenin akım ve güç yoğunluğu değerlerini arttırmaktadır. Yapılan deneysel testler sonucunda, optimize edilmiş engel biçiminde üretilen katot plakasının bulunduğu yakıt hücresinin çıkış gücü, standart serpantin yapısındaki yakıt hücresinin çıkış gücüne kıyasla arttığı görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda, hücrenin birim aktif alanından elde edilen net güç miktarı artırılmış bir yakıt hücresi elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yakıt hücresi, Bipolar plaka, Akış alanı engelleri

## ABSTRACT

---

### Investigation of the Effect of Channel Blockages on the Performance of PEM Fuel Cells Used in Electric Vehicles

**Alperen Latif DURAK**

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Automotive Engineering

December 2022, Pages: xiv + 119

---

In today's world, energy demand is increasing day by day due to factors such as industrialization and increasing human population. This situation has pushed mankind to seek an alternative, clean and sustainable energy source and technology. At this point, hydrogen energy and fuel cell technology are seen as the energy source of the future. Fuel cells are electrochemical energy devices that convert the chemical energy in hydrogen fuel directly into electrical energy. This thesis is basically about the development of bipolar plates, which are fuel cell components, to provide higher current density. For this purpose, obstacles with different variations in geometric shape, number, height and location were placed on the flow channels in the bipolar plates. In the first stage, the designed models were analyzed using the computational fluid dynamics (CFD) method. Then, the fuel cell with the most efficient BPP flow area and the fuel cell with the standard serpentine design were experimentally tested under the same conditions and current/voltage curves were obtained. As a result, placing barriers on bipolar plates increases the current and power density values of the cell. As a result of the experimental tests, it was observed that the output power of the fuel cell with the cathode plate produced in the optimized barrier shape increased compared to the output power of the fuel cell with the standard serpentine structure. As a result of the study, a fuel cell with increased net power amount obtained from the unit active area of the cell was obtained.

**Keywords:** Fuel cell, Bipolar plate, Flow field obstacles

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Örnek bir yakıt hücresinin şematik çalışma prensibi [53]..... 7
Şekil 2.2.	Örnek yakıt pili uygulamaları; telefon şarj ve taşıt uygulamaları [54,55]. ..... 8
Şekil 2.3.	Ticari olarak kullanılan örnek bir PEM yakıt pili yığını [56]. ..... 8
Şekil 2.4.	Bir PEMFC'deki temel girdi ve çıktılar..... 9
Şekil 2.5.	Bir yakıt hücresinin genel polarizasyon eğrisi [59]. ..... 12
Şekil 2.6.	PEM yakıt pilinin çalışma şeklinin şematik gösterimi [63]. ..... 14
Şekil 2.7.	Bir PEM hücresi bileşenlerinin şematik hali [67]. ..... 16
Şekil 2.8.	PEM yakıt hücresinin elemanları, (a) MEA, (b) BPP, (c) akım toplama plakası, (d) conta, (e) GDL, (f) son plaka [77–82]. ..... 17
Şekil 3.1.	Farklı malzeme ve tasarımlarda üretilmiş BPP'ler [84]..... 18
Şekil 3.2.	Temel BPP tasarımları, (a) serpantin, (b) paralel, (c) iç içe geçmiş, (d) pim..... 21
Şekil 3.3.	PEMFC hücresinde oluşan bazı taşınım olayları [114]..... 24
Şekil 3.4.	Klasik kanal tasarımı yaklaşımı tasarlanmış örnek akış alanı tasarımları [34,116–122]. ..... 25
Şekil 3.5.	Klasik kanal tasarımı yaklaşımı tasarlanmış örnek akış alanı tasarımları [108,123]. ..... 25
Şekil 3.6.	Biyo-benzetim kanal tasarım yaklaşımı ile hazırlanmış örnek akış alanı tasarımları [37,126–128]..... 26
Şekil 3.7.	PEMFC'lerde açık gözenekli metal köpük uygulamaları [39,130–133]..... 27
Şekil 3.8.	Akış kanalına yerleştirilmiş bir engel geometrisi ve bu engel modeli ile üretilmiş bipolar plaka [138]..... 28
Şekil 5.1.	Engel şekil varyasyonları, dikdörtgen (a), iç bükey ikizkenar yamuk (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), üçgen (e), iç bükey üçgen (f), iki kenarlı iç bükey üçgen (g), bir kenar dış bükey üçgen (h), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (ı), iki kenarlı dış bükey üçgen (j), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (k)..... 35
Şekil 5.2.	Engel sayısı varyasyonları, dört (a), beş (b), altı (c) ve yedi (d) adet engel yerleşimleri. .... 37
Şekil 5.3.	Engel yükseklik varyasyonları, 0.5 mm (a), 0.6 mm (b), 0.7 mm (c), 0.8 mm (d), 0.9 mm (e), 1 mm (f). ..... 37
Şekil 5.4.	Engel konum varyasyonları, boş plaka (a), plaka üst yarı engel konumlandırması (b), plaka alt yarı engel konumlandırması (c), tam plaka engel konumlandırması (d)..... 39
Şekil 5.5.	Yakıt hücresinin CATIA programında modellenmesi ve bileşenleri. .... 40
Şekil 5.6.	ANSYS "Design Modeler" ekranı. .... 41
Şekil 5.7.	Mesh işlemi yapılmış engel bulunmayan yakıt pili modeli..... 42
Şekil 5.8.	Ağ (mesh) bağımsızlığı grafiği. .... 43
Şekil 5.9.	MEA ve GDL bölgeleri 4 eş parçaya bölünmüş hücrenin mesh görüntüsü. .... 44

<b>Şekil 5.10.</b>	Akış kanalında engel bulunan yakıt hücresinin mesh işlemi sonucu görüntüsü. ....	44
<b>Şekil 5.11.</b>	PEM Yakıt Pili Modülü'ne ait görüntü. ....	45
<b>Şekil 5.12.</b>	ANSYS'deki analiz diziliminin son görünümü. ....	48
<b>Şekil 5.13.</b>	CNC ile işlenen akış plakaları, (a) serpantin, (b) engele sahip plaka. ....	49
<b>Şekil 5.14.</b>	Lazer kesim ile sıkıştırma plakalarının üretimi. ....	50
<b>Şekil 5.15.</b>	Plakalara sabitleme deliklerinin matkapla açılması işlemi. ....	50
<b>Şekil 5.16.</b>	Yakıt hücrelerin montaj aşamaları. ....	51
<b>Şekil 5.17.</b>	Üretilen engelli ve standart akış kanalına sahip yakıt hücreleri. ....	51
<b>Şekil 5.18.</b>	Yakıt pili test düzeneği. ....	52
<b>Şekil 6.1.</b>	Farklı engel şekillerine göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri. ....	54
<b>Şekil 6.2.</b>	Şekil varyasyonlarına göre katot basınç dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f). ....	56
<b>Şekil 6.3.</b>	Şekil varyasyonlarına göre katot basınç dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f). ...	57
<b>Şekil 6.4.</b>	Şekil varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f). ....	60
<b>Şekil 6.5.</b>	Şekil varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f). ....	61
<b>Şekil 6.6.</b>	Şekil varyasyonlarına göre H <sub>2</sub> kütle dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f). ....	63
<b>Şekil 6.7.</b>	Şekil varyasyonlarına göre H <sub>2</sub> kütle dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f). ....	64
<b>Şekil 6.8.</b>	Şekil varyasyonlarına göre O <sub>2</sub> kütle dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f). ....	66
<b>Şekil 6.9.</b>	Şekil varyasyonlarına göre O <sub>2</sub> kütle dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f). ....	67
<b>Şekil 6.10.</b>	Şekil varyasyonlarına göre H <sub>2</sub> O kütle dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f). ....	69
<b>Şekil 6.11.</b>	Şekil varyasyonlarına göre H <sub>2</sub> O kütle dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f). ...	70
<b>Şekil 6.12.</b>	Farklı engel sayılarına göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri. ....	71

<b>Şekil 6.13.</b>	Farklı engel sayılarına göre hücrelerin basınç dağılımları. ....	73
<b>Şekil 6.14.</b>	Farklı engel sayılarına göre hücrelerin sıcaklık dağılımları. ....	75
<b>Şekil 6.15.</b>	Farklı engel sayılarına göre hücrelerin H <sub>2</sub> kütle dağılımları. ....	77
<b>Şekil 6.16.</b>	Farklı engel sayılarına göre hücrelerin O <sub>2</sub> kütle dağılımları. ....	78
<b>Şekil 6.17.</b>	Farklı engel sayılarına göre hücrelerin H <sub>2</sub> O kütle dağılımları. ....	80
<b>Şekil 6.18.</b>	Farklı engel yüksekliklerine göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri. ....	82
<b>Şekil 6.19.</b>	Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin basınç dağılımları. ....	84
<b>Şekil 6.20.</b>	Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin sıcaklık dağılımları. ....	86
<b>Şekil 6.21.</b>	Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin H <sub>2</sub> kütle dağılımları. ....	88
<b>Şekil 6.22.</b>	Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin O <sub>2</sub> kütle dağılımları. ....	90
<b>Şekil 6.23.</b>	Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin H <sub>2</sub> O kütle dağılımları. ....	91
<b>Şekil 6.24.</b>	Farklı engel konumlarına göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri. ....	94
<b>Şekil 6.25.</b>	Farklı engel konumlarına göre hücrelerin basınç dağılımları. ....	96
<b>Şekil 6.26.</b>	Farklı engel konumlarına göre hücrelerin sıcaklık dağılımları. ....	98
<b>Şekil 6.27.</b>	Farklı engel konumlarına göre hücrelerin H <sub>2</sub> kütle dağılımları. ....	101
<b>Şekil 6.28.</b>	Farklı engel konumlarına göre hücrelerin O <sub>2</sub> kütle dağılımları. ....	102
<b>Şekil 6.29.</b>	Farklı engel konumlarına göre hücrelerin H <sub>2</sub> O kütle dağılımları. ....	104
<b>Şekil 6.30.</b>	Üretilen yakıt hücrelerinin deneysel ve nümerik akım/gerilim eğrisi. ....	105

## TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 2.1.</b> Yakıt pili türlerinin özellikleri [52,60].....	13
<b>Tablo 3.1.</b> BPP malzemelerinin avantaj ve dezavantajları [92–95]. ....	20
<b>Tablo 4.1.</b> Literatürdeki BPP'ler üzerine yapılan engel çalışmaları.....	29
<b>Tablo 5.1.</b> Yakıt pili türlerinin özellikleri [52,60].....	36
<b>Tablo 5.2.</b> Engel konumları.....	38
<b>Tablo 5.3.</b> Modellenen yakıt hücresinin geometrik ölçüleri.....	40
<b>Tablo 5.4.</b> Mesh bağımsızlığı.....	43
<b>Tablo 5.5.</b> Analizler sırasında kullanılan parametrelerin sayısal değerleri. ....	46
<b>Tablo 5.6.</b> PEM yakıt hücresi modülünde çözülen denklemler [142]. ....	46
<b>Tablo 6.1.</b> Engel geometrik şekil varyasyonu sonuçları. ....	53
<b>Tablo 6.2.</b> Engel şekil varyasyonlarına göre katot gaz difüzyon/kanal ara yüzeyi basınç değerleri. ....	55
<b>Tablo 6.3.</b> Engel şekil varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri. ....	59
<b>Tablo 6.4.</b> Engel sayı varyasyonu sonuçları.....	71
<b>Tablo 6.5.</b> Engel sayı varyasyonlarına göre katot plaklarının basınç değerleri.....	74
<b>Tablo 6.6.</b> Engel sayı varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri. ....	74
<b>Tablo 6.7.</b> Engel sayı varyasyonu sonuçları.....	81
<b>Tablo 6.8.</b> Engel yükseklik varyasyonlarına göre katot plaklarının basınç değerleri.....	83
<b>Tablo 6.9.</b> Engel yükseklik varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri. ....	85
<b>Tablo 6.10.</b> Engel konum varyasyonu sonuçları. ....	93
<b>Tablo 6.11.</b> Engel konum varyasyonlarına göre katot plaklarının basınç değerleri. ....	95
<b>Tablo 6.12.</b> Engel konum varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri.....	97

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

---

$A$	: Yüzey alanı
$a$	: Su aktivitesi
$\alpha$	: Dönüşüm katsayısı
$\beta$	: Membran protonik iletim katsayısı
$c_r$	: Yoğunlaşma sabiti
$D_i$	: Gaz fazı difüzyon katsayısı
$D_i^{ij}$	: Gaz türü kütle difüzyon katsayısı
$D_i^{eff}$	: Efektif gaz fazı difüzyon katsayısı
$D_l$	: Membran su difüzyon katsayısı
$\Delta G$	: Gibbs serbest enerjisi değişimi
$\Delta H$	: Entalpi değişimi
$\Delta S$	: Entropi değişimi
$E$	: Potansiyel gerilim
$E_{th}$	: Teorik potansiyel gerilim
$e^-$	: Elektron
$\varepsilon$	: Gözeneklilik
$F$	: Faraday sabiti
$G$	: Gibbs serbest enerjisi
$G_0$	: Standart sıcaklık ve basınçtaki Gibbs serbest enerjisi
$\Gamma \phi$	: Taşınan miktarın difüzyon katsayısı
$\gamma$	: Konsantrasyon üssü
$h$	: Entalpi
$h_f$	: Oluşum entalpisi
$h_L$	: Entalpi değişimi
$i$	: Akım yoğunluğu
$i_L$	: Akım yoğunluğu limiti
$i_0$	: Referans değişim akım yoğunluğu
$\eta$	: Yakıt hücresi termodinamik verimi
$\eta$	: Yerel yüzey aktivasyon kaybı
$j^{ref}$	: Referans akım yoğunluğu
$J_w^{diff}$	: Geri difüzyon akısı
$K$	: Mutlak geçirgenlik
$\lambda$	: Fazlalık katsayısı
$\lambda$	: Su içeriği
$M_m$	: Membran eşdeğer ağırlık
$\dot{m}$	: Kütle debisi
$n_{Avg}$	: Avagadro sayısı
$n_d$	: Ozmotik sürüklenme katsayısı
$n_e$	: Elektron sayısı
$\omega$	: Membran protonik iletim üssü
$P$	: Basınç
$P_0$	: Standart atmosfer basıncı
$P_{H_2}$	: Hidrojenin kısmi basıncı
$P_{H_2O}$	: Suyun kısmi basıncı

$P_{O_2}$	: Oksijenin kısmi basıncı
$P_{sat}$	: Doyma basıncı
$P_{wv}$	: Su buharı basıncı
$\phi$	: Taşınan miktar, elektrik potansiyeli
$\phi_{mem}$	: Membran faz potansiyeli
$\phi_{sol}$	: Katı faz potansiyeli
$q$	: Yük
$q_{el}$	: Elektron yükü
$R$	: Evrensel gaz sabiti
$R$	: Hacimsel transfer akımı
$R_i$	: İyonik direnç
$R_{ohm}$	: Ohmik direnç
$r_w$	: Yoğunlaşma oranı
$\rho_m$	: Yoğunluk
$S$	: Kaynak verimi
$S_\phi$	: Taşınan miktarın kaynak verimi
$s$	: Su doymunluğu
$S_f$	: Oluşum entropisi
$\sigma$	: Yüzey gerilmesi
$\sigma$	: Elektriksel iletkenlik
$\sigma_{mem}$	: Membran iyonik iletkenlik
$T$	: Sıcaklık
$t$	: Zaman
$\theta$	: Kontak açısı
$V$	: Hacim
$V_{cell}$	: Hücre voltajı
$V_{act}$	: Aktivasyon kaybı
$V_{con}$	: Konsantrasyon kaybı
$V_{ohm}$	: Ohmik kayıp
$V_{OC}$	: Açık devre gerilimi
$W_{el}$	: Elektriksel iş
$\zeta$	: Aktif yüzey alanı
$[ ]_{ref}$	: Referans akım yoğunluğu

## Kısaltmalar

---

AFC	: Alkali yakıt hücresi
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbon dioksit
DLFC	: Doğrudan sıvı yakıt hücresi
DMFC	: Doğrudan metanol yakıt hücresi
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
H <sub>2</sub> O	: Su
HC	: Hidrokarbon
MCFC	: Erimiş karbonat yakıt hücresi
MEA	: Membran elektrot grubu
NO <sub>x</sub>	: Azot oksitler
O <sub>2</sub>	: Oksijen
PAFC	: Fosforik asit yakıt hücresi
PEM	: Polimer elektrolit membran
PEMFC	: Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi
SOFC	: Katı oksit yakıt hücresi

# 1. GİRİŞ

Günümüzde enerjinin mevcudiyeti ve kullanımı ülkelerin ekonomik kalkınmalarının önemli bir ön koşulu olmuştur. Özellikle sanayileşmiş ülkelerin günlük yaşamlarının temelini oluşturmaktadır [1]. Günümüzde dünya enerji talebinin büyük bir kısmını, bulunabilirlikleri ve kolay kullanımları nedeniyle fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz ve kömür) karşılamaktadır. Ancak, sınırlı kaynaklara sahip olunması sebebiyle dünya fosil yakıt üretiminin yakın zamanda azalmaya başlayacağı düşünülmektedir. Diğer taraftan, artan dünya nüfusu ve insanların yaşam standartlarını iyileştirme isteklerinin bir sonucu olarak, dünyanın sıvı yakıtlara olan talebi artmaktadır. Küresel olarak bu durumun farkındalığının artması, uluslararası olarak sürdürülebilir bir enerji sistemine duyulan ihtiyacı arttırmıştır [2]. Diğer taraftan, insanoğlunun günlük yaşamında enerji ihtiyacını karşılarken kullandığı fosil yakıtlar, zararlı egzoz emisyonların oluşumuna neden olmaktadır. Fosil yakıtların yanma teknolojileri ile kullanımı sonucu salınan egzoz emisyonları, insan ve doğal yaşam üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan oksitler ( $CO_x$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$ ), hidrokarbonlar, (CH), kurum ve kül, katran damlacıkları ve diğer organik bileşikler hava kirliliğine neden olmaktadır. Küresel ısınma, sera etkisi ve doğal dengenin bozulması gibi kavramlar bu zararlı egzoz emisyonların küresel olarak artması sonucu ortaya çıkmıştır. Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)'nın yayınladığı raporlara göre, dünya son yüz yılda yaklaşık  $1,5^{\circ}C$  derece ısınmıştır [3]. Özellikle karbon salınımının ve karbon dioksit emisyonunun artması küresel ısınma, buzulların erimesi ve iklim değişikliğine neden olarak insan hayatını tehdit eder hale gelmiştir [4,5]. Bu nedenle bilim insanları enerji kaynağı olarak fosil yakıtların yerini alabilecek temiz ve verimli alternatif enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Nükleer enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik, jeotermal enerji, okyanus akıntıları, gelgitler ve dalgalar gibi oldukça fazla sayıda birincil enerji kaynağı mevcuttur [6–9]. Bu enerji kaynaklarının doğal koşullara sıkı bağlılıkları ve mobil sistemlere uygulanmadaki kısıtlamalar nedeniyle bu kaynaklar daha az güvenilir görülmektedir.

İnsanoğlunun temel yaşam ihtiyaçlarından olan ulaşım ihtiyacı, günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı motorlu taşıtlar tarafından karşılanmaktadır. Uluslararası Motorlu Araç Üreticileri Örgütü'nün 2021 yılı verilerine göre dünya çapında 57 milyon binek taşıt, 23 milyon ticari taşıt üretimi gerçekleşmiştir [10]. Çeşitli kaynaklara göre dünya üzerinde 1,4 milyardan fazla motorlu taşıt bulunmaktadır [11]. Her geçen yıl, motorlu taşıt üretiminin ve mevcut motorlu taşıt sayısının artması, sıvı fosil yakıtların (benzin ve motorin) tüketimini arttırmaktadır. Yeni petrol yataklarının keşfedilmesine rağmen dünyadaki fosil yakıtların sınırlı miktarda olması, ulaşım ihtiyaçlarının farklı enerji kaynakları ile karşılanması fikrini ortaya çıkartmıştır. Bilindiği üzere motorlu taşıtların büyük bir çoğunluğu içten yanmalı motorlar (buji ve sıkıştırma ateşlemeli motorlar) ile tahrik edilmektedir. Günümüzde, bu motorlarda alternatif yakıt olarak çeşitli alkol ve biyodizel katkıları

efektif olarak kullanılmaktadır [12,13]. Bu tip alternatif yakıtlar mevcut olmasına rağmen, içten yanmalı motorların tasarımı ve fiziksel kanunları gereği, fosil yakıtların motorların yanma odasında yakılması sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin yarısından daha az bir kısmı ancak mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir. Geriye kalan ısı enerjisi, motor soğutma sıvısı ve motor bloğu üzerinden atmosfere atılmaktadır [14]. Bu nedenle her ne kadar alternatif yakıtlar geliştirilse de, içten yanmalı motorlar yerine, yeni verimli ve temiz bir güç üretim teknolojisinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Günümüzde, motorlu taşıtlarda içten yanmalı motorların kullanılmasına alternatif olarak, hibrit ve elektrikli motorların kullanımı yaygınlaşmaktadır. İçten yanmalı ve hibrit motorlarda fosil yakıtların kullanımı sonucunda egzoz emisyonları oluşmaktadır. Dünya genelinde artan motorlu taşıtların ortaya koymuş olduğu diğer bir olumsuzluk ise egzoz emisyon salınımlarının artmasıdır. Özellikle şehirlerdeki hava kirliliğinin büyük bir bölümü içten yanmalı motorlu taşıtlardan kaynaklanmaktadır. Gün geçtikçe artış gösteren sayıları ile içten yanmalı motorlara sahip motorlu taşıtlar, insan sağlığını ve çevre kalitesini doğrudan veya dolaylı olarak tehdit eder hale gelmiş, zararlı egzoz emisyonlarının kontrolü kaçınılmaz bir hal almıştır. İçten yanmalı motora sahip taşıtlarda, fosil kökenli yakıtların kullanımı sonucu, karbondioksit (CO<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC), azot oksit (NO<sub>x</sub>), kükürt oksit (SO<sub>x</sub>) ve partikül madde (PM) gibi kirlenici ve zararlı egzoz emisyonları oluşmaktadır [15]. Bu zararlı egzoz emisyon türleri, hem insan sağlığına hem de ekolojik dengeye zarar vermektedir. Atmosfere salınan bu zararlı egzoz emisyonları sera etkisine sebep olarak çevre üzerinde ve çeşitli kanserojen etkilerle insanlar üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Fosil kaynakları kullanan konvansiyonel enerji üreticilerinin hem verim hem de çevresel kirlilik noktasında artık günümüzün dünyasında popülaritesinin azaldığı ve üretici firmaların artık yeni nesil çevreci teknolojileri benimsediği görülmektedir. Buna ek olarak dünya hükümetlerinin ulusal ve uluslararası almış olduğu kararlar ile toplumları daha verimli ve daha çevreci enerji kaynaklarına yönelttiği görülmektedir [16]. Son yıllarda ilgi odağı, sıfır emisyon salınımına sahip elektrikli araç teknolojisine kaymıştır. Ayrıca, güç yoğunluğu açısından enerji depolama üniteleri ve elektrik motorlarındaki önemli gelişmeler sayesinde, modern elektrikli taşıtların bu vaadi kitlesel pazar için geçerli bir seçenek haline gelmiştir [17]. Mevcut elektrikli araç teknolojileri içerisinde üç farklı elektrikli güç kombinasyonuna sahip taşıt vardır; i. Bataryalı elektrikli taşıtlar (BEV), ii. Hibrit elektrikli taşıtlar (HEV), iii. Yakıt hücreli elektrikli taşıtlar (FCEV). Bu üç tip elektrikli taşıt teknolojileri arasında, BEV ve FCEV' ler çalışırken sıfır emisyon salınımı yapmaktadır. Fakat BEV'ler de şarj edilen elektriğin, FCEV' ler de ise depolanan hidrojenin hangi kaynaklardan (fosil ya da yenilenebilir) üretildiğine göre karbon salınımı değişmektedir. Bu iki teknoloji arasında bazı ciddi farklılıklar vardır. Bunların başında, BEV'ler de batarya enerji taşıyıcısı görevi üstlenirken, FCEV' ler de hidrojenin (genellikle) enerji taşıyıcısı görevi üstlenmesi gelmektedir. Diğer bir fark ise BEV'lerin şarj sürelerinin, FCEV' lerin depolarının dolma sürelerine kıyasla yüksek olmasıdır [18]. Buna ek

olarak, mevcut batarya teknolojisinin ham maddesi olan lityumun dünyada sınırlı sayıda bulunması ve sonunun olması, lityum-iyon bataryaların sınırlı olabileceği gerçeğini göstermektedir. Bu nedenle yakıt pili teknolojisi, enerji ve mobil uygulamalarda kullanımı açısından kolaylığı, temiz ve çevreci olması (sıfır emisyon üretimi) sebepleri ile gelecek vaat eden yeşil enerji kaynaklarının başında gelmektedir [19]. Buna ek olarak uluslararası enerji ajansı, yakıt hücresi teknolojisinin iklim değişikliğini hafifletmek için anahtar enerji teknolojilerinden biri olarak göstermiştir [20].

Genel olarak yakıt hücreleri, yakıttaki kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal enerji cihazlarıdır. Konvansiyonel ısı döngülerine dayanan gaz türbinleri ve içten yanmalı motorlar gibi güç üreticilerinden farklı olarak, yakıt hücrelerinin maksimum verimliliği Carnot döngüsü ilkesi ile sınırlı değildir [21]. Yakıt, elektrolit, çalışma sıcaklığı, kapasite ve uygulama tiplerine göre yakıt hücreleri de farklılık göstermektedir. Tipik bir yakıt hücresinde, yakıt (hidrojen, metanol, doğal gaz, vb.) anoda sürekli olarak beslenirken, bir oksidan (genellikle havadan oksijen) sürekli olarak katoda beslenmektedir. Yakıt hücresi, kimyasal reaktanların tükendiği bir pilin aksine, elektrotlara yakıt/oksidan beslemesi sürdürüldüğü sürece teorik olarak enerji üretebilen bir enerji dönüştürme cihazıdır. Yakıt olarak hidrojeni ve reaktif olarak oksijen ya da havayı kullanarak elektrokimyasal olarak elektrik üreten polimer elektrolit membranlı yakıt hücreleri (PEMFC), daha düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlangıç performansı ve güç ünitesi olarak mobil sistemlerde kullanılabilirliği ile ortaya çıkan bir yeşil enerji dönüşüm teknolojisi olarak görülmektedir [22,23]. Genel olarak bir yakıt hücresi, membran elektrot grubu (MEA), çift kutuplu plaka (bipolar plate, BPP), akım iletim plakası, conta ve son plakadan oluşmaktadır. Yakıt hücresi, bu bileşenlerin anot ve katot şeklinde sandviç bir yapı oluşturmasıyla meydana gelmektedir [24]. Oluşan bu hücreler ise birbirlerine seri bağlanarak, bir yakıt pili yığını (stack) meydana getirmektedir. Hücrelerin bu şekilde seri bağlanması, oluşan yığının kapasitesini arttırmakta ve yakıt pilinin çıkış gücünü arttırmaktadır.

Yakıt pili yapısı içerisinde bipolar plakaların (BPP) önemli ve hayati görevleri mevcuttur. Bunların başında; reaktant gazların katalizör yüzeyi boyunca dağılımını sağlamak, yakıt hücresi yığnında bir hücreden diğerine elektron iletim yolları sağlamak, yığndaki bireysel hücreleri ayırmak, oluşan sıvı suyu hücrelerden uzaklaştırmak, soğutma geçişleri sağlamak, hücrelerden kimyasal reaksiyon sonucunda açığa çıkan ısının uzaklaştırılmasını sağlamak ve hücre yığın yapısına mekanik destek sağlamaktır [25,26]. BPP' ler, tipik bir yakıt hücresi kümesinde ağırlığın %60-80' ini, toplam maliyetin %20-30'unu ve toplam hacmin yaklaşık %80' ini oluşturmaktadır [27,28]. Yakıt pili yığını içerisinde BPP'ler ciddi alan kaplamasının yanında, BPP'lerin üretildiği malzeme ve üzerindeki akış alanı tasarımlarının da, buldukları hücrenin performansını etkileme kabiliyetleri mevcuttur. BPP'ler, üzerinde bulunan akış kanalları vasıtasıyla reaktant gazları katalizör yüzeyi boyunca yayılmasını sağlamaktadır. Bu reaktant gazların dengeli bir şekilde dağılması, hücrede oluşan kimyasal reaksiyonların da dengeli bir şekilde oluşmasına yol açmaktadır. Kötü bir akış

alanı tasarımına sahip BPP'ler, yakıt hücresi boyunca eşit olmayan gaz dağılımına, elektrolitte lokalize sıcak noktalara, dengesiz akım yoğunluğuna ve zayıf su yönetimi nedeniyle cihazın tamamen tahrip olmasına neden olabilmektedir [29]. Diğer taraftan, iyi bir akış alanı tasarımı ise hücredeki kimyasal reaksiyonları bütün katalizör yüzeyine homojen şekilde dağılmasını sağlayarak, hem bölgesel sıcak noktaların (yüksek reaksiyon bölgeleri) hem de bölgesel soğuk noktaların (düşük reaksiyon bölgeleri) oluşumunu engeller ve katalizör yüzeyinden maksimum şekilde faydalanılmayı sağlar. Böylece, yakıt pili yığınının veya hücresinden daha fazla akım yoğunluğunun elde edilmesi sağlanmaktadır [30]. Diğer taraftan, doğru bir BPP akış alanı tasarımı, reaksiyon tarafından üretilen suyu hücre yığınının kolayca tahliye ederek, su yönetimine yardımcı olmakta ve böylece su baskını olasılığını sınırlandırmaktadır [31].

Günümüze kadar olan ticari ve bilimsel çalışmalar neticesinde, bazı temel BPP tasarımları kabul görmüştür. Literatür tarafından genel olarak kabul görmüş bu tasarımlar serpantin (serpentine), paralel (parallel), iç içe geçmiş (interdigitated) ve iğne (pin) olarak adlandırılmışlardır [32]. Bu tasarımların kendilerine ait çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Dezavantajların başında, dengesiz reaktant dağılımı, yüksek basınç düşümü, düşük akım ve güç yoğunluğu, zayıf su yönetimi gibi hususlar bulunmaktadır. Bu nedenle konvansiyonel tasarımların birden fazla geliştirilmesi gereken hususu mevcuttur [33]. Geçmişten günümüze, BPP'lerin sahip olduğu akış alanlarının geliştirilmesi ve bu şekilde hücre performansının artırılması amacıyla literatürde farklı yaklaşımlar ve yöntemler kullanılmıştır. Bu amaçla, araştırmacılar öncelikle klasik kanal tasarımlarının farklı geometrik düzenlerde kullanarak, diğer bir ifade ile kanal ve rib konfigürasyonlarında farklılıklar yaparak, hücrenin ürettiği akım yoğunluğunu yükseltmeye çalışmıştır [34]. Devamındaki çalışmalar ise kanal derinliği, genişliği ve kanal kesit geometrisi gibi geliştirmeleri konu almıştır [35,36]. Bu geliştirme konularına ek olarak, BPP'lerin geliştirilmesi üzerine son yıllarda üç farklı konuda çalışmalar yapılmıştır. Bu konulardan birincisi akış alanı tasarımlarının biyo-benzetim yaklaşımı ile tasarlanmasıdır. Bu yaklaşımda özellikle canlı metabolizmalarındaki dolaşım, solunum ve taşıma gibi kütle transferinin bulunduğu sistemlerinden esinlenilmektedir [37]. Diğer bir akış alanı tasarım yaklaşımı ise gözenekli malzemelerin akış alanı içerisinde kullanılmasıdır. Bu alternatif akış alanları çoğunlukla açık bir yapıya sahiptirler, böylece geleneksel rib yapısının dezavantajlarını ortadan kaldırmaktadırlar [38]. Diğer taraftan gözenekli malzemelerin akış alanı olarak kullanılması yaklaşımı özellikle sıvı suyun tahliye edilmesi ve düşük basınç düşümü konularında araştırmacılar tarafından avantajlı olarak görülmektedir [32,39]. BPP'lerde akış alanı tasarımlarının yanında son yıllarda dikkat çeken diğer bir uygulama ise akış kanalları üzerine çeşitli ölçü ve şekillerde engellerin yerleştirilmesidir. PEMFC'lerin katot tarafındaki yavaş reaksiyon hızları nedeniyle, bazı çalışmalarda katot tarafı performans sınırlayıcı bir bileşen olarak kabul edilmiştir. Bu durum, araştırmacıların çabalarının çoğunu katot elektrotlarındaki reaksiyon hızlarını iyileştirmeye odaklamasına neden olmuştur [40]. Bu amaçla

başlayan çalışmalar sonucu PEMFC'lerin akış kanallarına yerleştirilen çeşitli engellerin reaktantların kütle transferinde iyileşme sağladığı, GDL bölgesinde reaktant konsantrasyonunu arttırdığı ve hücrenin elektriksel performansının yükselttiği görülmüştür [41,42]. Akış kanalları üzerine yerleştirilen engeller, reaktantları tamamen ya da kısmen kanaldan, gaz difüzyon katmanına ve katalizör yüzeyine doğru yönlendirmektedir. Bu şekilde "under-rib path" olarak adlandırılan rib altı gaz difüzyon bölgesine yönelen reaktantların akış hızı artmakta ve katalizör bölgesinde oluşan "drag", "adhesion" ve "viscous" kuvvetlerinin etkileri altındaki sıvı suyu kanala doğru süpürülmesini sağlamaktadır [26,43,44]. Bu konuda farklı engel şekilleri, sayıları ve ölçüleri üzerine (büyük çoğunluğu tek bir kanal üzerinde ve nümerik olacak şekilde) literatürde birçok çalışma yapılmıştır [31,42,45,46]. Literatürdeki çalışmalarda, akış kanalları üzerine yerleştirilen engellerin hücrenin elektriksel performansını ve su yönetimini iyileştirdiği bildirilmiştir [47]. Bu avantajlarının yanında, birçok çalışmada ifade edildiği üzere engel yerleştirilen modellerin yüksek basınç düşümüne neden olduğu, diğer bir ifade ile pompalama kayıplarını arttırdığı bildirilmektedir [44,48]. Engelli tasarımlar genel olarak değerlendirildiğinde, hücrenin güç yoğunluğunu, pompalama kayıplarının oluşturduğu parazit güç kaybından daha fazla arttırdığı için bu dezavantajına rağmen ümit vadetmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus kanala yerleştirilen engel geometrisinin, engel sayısının, engel yüksekliğinin ve engel konumunun optimize edilmesidir. Örneğin literatürdeki bazı çalışmalarda, engel yüksekliğinin tam kanal boyu olduğu durumlarda maksimum akım yoğunluğu sağladığı bildirilmiştir. Buna karşı ise basınç düşüm değerlerinin de normalin üstünde artış gösterdiği bildirilmiştir [49]. Diğer taraftan tasarlanan engel geometrisinin gerçek uygulama koşullarında test edilebilmesi için üretilebilir bir geometrik forma tasarlanması gerekmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda tasarlanan BPP'ler sadece simülasyon ortamında test edildiği için gerçek olarak üretilebilirliği sorgulanabilmektedir. Ayrıca, plakalara engel yerleşimleri tek düze olacak şekilde düzenlenmektedir, hâlbuki bu engellerin sadece plakaların özel (belirli) bölgelerinde bulunmasının detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Plakanın her yerine engel yerleştirmek yerine, sadece belirli bölgelerine engel yerleştirilmesinin performans açısından daha faydalı olabilme ihtimali de mevcuttur. Bu bilgiler ışığında, yakıt pillerinin önemli bileşenlerinden olan BPP'lerin kanal yapıları üzerine engel yerleştirilmesinin, uygun engel biçimleri kullanıldığında, hücrenin elektriksel performansını arttıracığı, su yönetimini iyileştireceği ve hücre ömrünü arttıracığı düşünülmektedir.

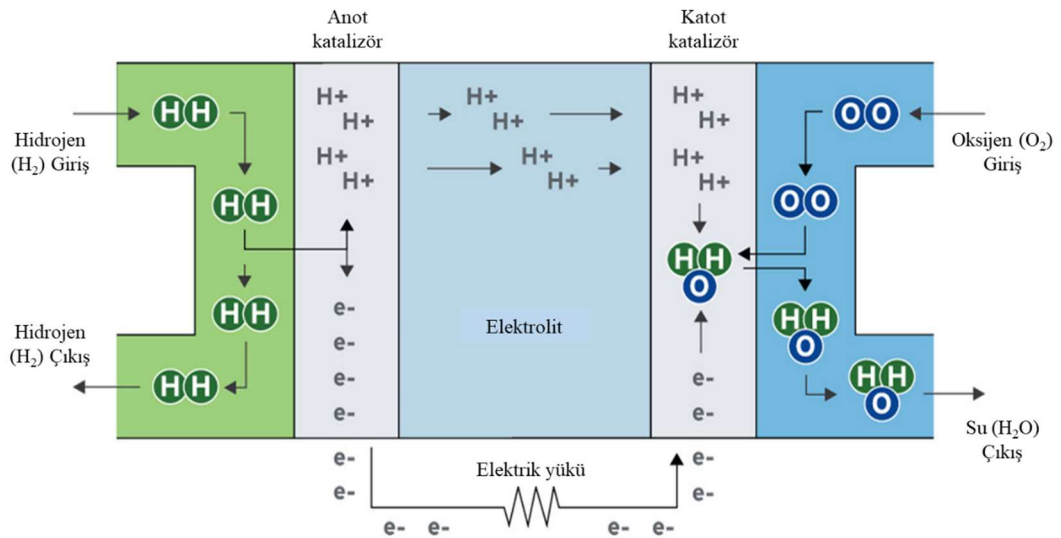
Bu tez çalışması temel olarak yakıt pili bileşenlerinden BPP'lerin daha yüksek akım yoğunluğu sağlayacak şekilde geliştirilmesini konu almaktadır. Bu amaçla, BPP'lerde bulunan akış kanalları üzerine, geometrik şekil, sayı, ölçüt ve konum olarak farklı varyasyonlarda engeller yerleştirilerek, hücrenin akım yoğunluğu değerlerinin artırılması hedeflenmiştir. Engel varyasyonları, literatürde ve ticari olarak kabul görmüş tekli serpantin akış alanı tasarımı üzerinde uygulanmıştır. Bu tez çalışması, temel olarak iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada tasarlanan modellerin hesaplamalı

akışkanlar dinamiği (CFD) metodu ile analizleri yapılmıştır. Bu aşamada öncelikli olarak kanala yerleştirilecek engellerin geometrik şekilleri üzerinde varyasyonlar yapılarak, yakıt hücresinde en yüksek net gücü sağlayan engelin geometrik şekli belirlenmiştir. Ardından sırasıyla sayı, ölçüt ve konum varyasyonları gerçekleştirilmiştir. CFD metodu ile gerçekleştirilen bu analizler sırasında yakıt hücresinin en yüksek net güç çıkışı sağlayan engel biçimleri belirlenirken aynı zamanda hücredeki reaktant kütle fraksiyonu, basınç ve sıcaklık dağılımı görüntüleri de incelenmiştir. Nihai olarak, analizler sonucu hücrede birim alan başına en yüksek net güç yoğunluğu ( $W/cm^2$ ) sağlayan, geometrik şekil, sayı, ölçüt ve konum olarak optimize edilmiş engellere sahip BPP tasarımı geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasının ikinci aşamasında ise optimize edilmiş engellere sahip BPP ve deneysel olarak karşılaştırmak için standart tekli serpantin tasarımına sahip BPP'ler üretilmiştir. Üretilen BPP'ler, tek hücreli bir yakıt pili yapısı oluşturmak için montaj edilmiştir. Ardından geliştirilmiş BPP akış alanına sahip yakıt pili ile standart serpantin tasarımına sahip yakıt pili aynı koşullarda deneysel olarak test edilmiş ve akım/gerilim (I-V) eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kendi aralarında ve analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu tez çalışması sonucunda, yakıt pilleri için birim alandan daha fazla güç üretimi sağlayabilen bir BPP imal edilmiştir. Bu şekilde, otomotiv, enerji, uzay ve havacılık gibi sektörlerde kullanımı yaygınlaşan, yenilenebilir ve temiz enerji uygulamaları arasında öne çıkan PEMFC'lerin daha verimli hale getirilmesine ve yaygınlaşmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

## 2. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ

Yakıt hücresi, yakıt ve bir oksitleyicinin elektrokimyasal olarak tepkimeye girerek elektrik ve bir dizi yan ürün ürettiği bir reaktördür. PEMFC'ler (hidrojen-oksijen yakıt hücresi) yakıt olarak hidrojen ve oksitleyici olarak oksijen kullanırken, ısı ve suyu yan ürün olarak meydana getirmektedirler [50]. Sir William Grove, hidrojen-oksijen yakıt hücresinin ilk başarılı operasyonel denemesini 1839'da gerçekleştirmiştir. Yaptığı "gazlı voltaik hücresi", hidrojen ve oksijenin tepkimesiyle elektrik ve su üretmiştir. 19. ve 20. yüzyıllarda yakıt hücreleri üzerine Ludwig Mond, Carl Langer, Friedrich Wilhelm Ostwald ve Francis Thomas Bacon gibi bilim insanları çalışmış, 21. yüzyılın teknolojik gelişmeleri ile birlikte günümüzdeki yakıt pili teknolojisine ulaşılmıştır [51].

Prensip olarak bir yakıt hücresi, iki elektrot (bir anot ve bir katot) arasına yerleştirilmiş bir elektrolitten oluşan bir pil gibi çalışmaktadır. Pilin aksine, bir yakıt hücresi tükenmemekte veya yeniden şarj edilmesini gerekmemektedir. Yakıt beslendiği sürece elektrik ve ısı şeklinde enerji üretmektedir. Oksijen katot tarafından, hidrojen ise anot tarafından geçerek elektrik, su ve ısı üretilmektedir. PEMFC'lerde anot tarafından beslenen hidrojen molekülleri katalizör yüzeyinde hidrojen iyonlarına ve elektronlara ayrılmakta, hidrojen iyonları membran üzerinden katot tarafına geçerken, elektronlar dış devreden katot tarafına akmakta ve elektrik akımını oluşturmaktadır. Katot tarafında ise hava veya doğrudan beslenen oksijen molekülleri, membran üzerinden gelen hidrojen iyonları ve dış devreden dolaşan elektronlar ile katalizör yüzeyinde reaksiyona girerek, sıvı su oluşturmakta ve ısı açığa çıkartmaktadır [52]. Şekil 2.1.'de örnek bir yakıt hücresinin şematik çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Örnek bir yakıt hücresinin şematik çalışma prensibi [53].

Tek hücreli bir yakıt pili temel olarak, membran elektrot grubu (MEA), bipolar, akım toplama, son (sıkıştırma) plakalarından ve sızdırmazlık contalarından oluşmaktadır. Tek bir yakıt pili hücresinden elde edilecek akım yoğunluğu miktarı değişken olup, reaktant debisi, çalışma sıcaklığı, reaktant nem oranı, çalışma basıncı ve stokiometrik oranlar gibi değişkenlerden etkilenmektedir. Diğer bir ifade ile yakıt hücrelerinin elektriksel performansı, hücre bileşenlerinin kimyasal yapısı, tasarımsal özellikleri ve çalışma parametreleri ile ilgilidir. Uygulama alanlarına göre yakıt pillerinden istenen akım/güç yoğunluğu miktarları veya yakıt pilinin üreteceği toplam akım/güç miktarları değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 2.2’ de gösterilmekte olan farklı yakıt pili uygulamalarında görüldüğü üzere bir telefonu şarj edebilen bir yakıt pili ile bir taşıta güç sağlayabilen yakıt pili farklı güç yoğunluklarına sahiptir.



Şekil 2.2. Örnek yakıt pili uygulamaları; telefon şarj ve taşıt uygulamaları [54,55].

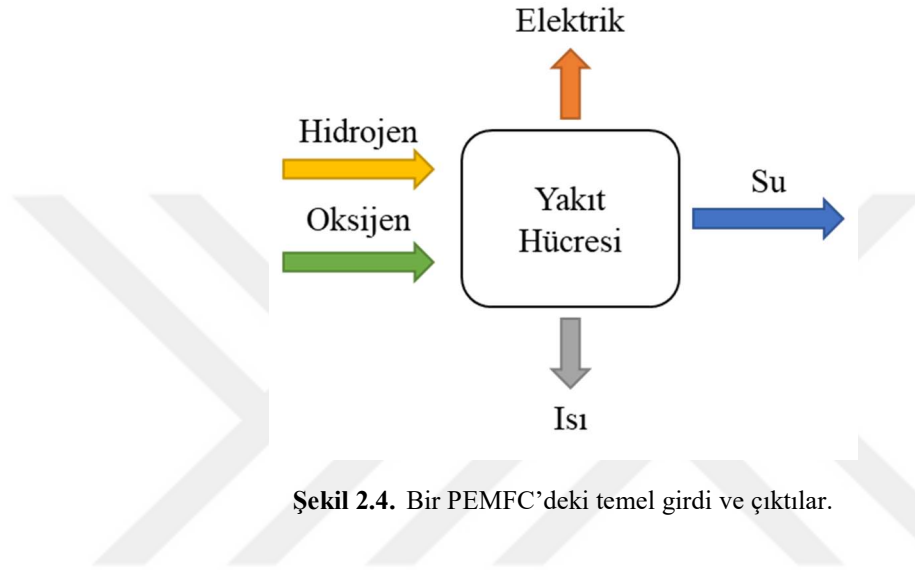
Yakıt pillerinin güç ve akım kapasitelerinin artırılması için birden fazla yakıt hücresi birbirine seri bir şekilde bağlanmaktadır. Sıralı şekilde hücrelerin bağlanması ile oluşan bu yapıya yakıt pili yığını (stack) adı verilmektedir. Şekil 2.3’de ticari olarak kullanılan bir yakıt pili yığını gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Ticari olarak kullanılan örnek bir PEM yakıt pili yığını [56].

## 2.1. Yakıt Pillerinin Matematiksel İfadesi

PEM yakıt hücreleri, yakıt olarak kullandığı hidrojenin kimyasal enerjisini elektrokimyasal yollarla elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu enerji dönüşümü sırasında, hücreye giren hidrojen ( $H_2$ ) ve oksijen ( $O_2$ ) molekülleri, hücreden su ( $H_2O$ ), ısı ve elektrik enerjisi olarak ayrılmaktadır. Şekil 2.4’de bir PEMFC’deki temel girdi ve çıktılar belirtilmektedir.



Şekil 2.4. Bir PEMFC’deki temel girdi ve çıktılar.

Yakıt hücresindeki elektrik gücü ve enerjisi kolaylıkla tanımlanabilirken, hidrojen, oksijen ve suyun kimyasal enerjileri kolaylıkla tanımlanamamaktadır. Bu nedenle, entalpi, Helmholtz fonksiyonu ve Gibbs serbest enerji kavramları kullanılmaktadır. Yakıt pillerinde Gibbs serbest enerjisi büyük bir öneme sahiptir. Bu, "basınç ve/veya hacimdeki değişikliklerle yapılan herhangi bir işi ihmal ederek, harici iş yapmak için mevcut olan enerji" olarak tanımlanabilmektedir. Bir yakıt hücresinde, 'dış iş', elektronları bir dış devre etrafında hareket ettirmeyi içerir - giriş ve çıkış arasındaki hacim değişikliği ile yapılan herhangi bir iş, yakıt hücresi tarafından kullanılmaz. Entalpi ise Gibbs serbest enerjisi artı entropi ile bağlantılı enerjidir [57]. PEMFC’ler için temel kimyasal reaksiyonlar şu şekildedir:



Hidrojen ve oksijenin denklem 2.3’deki reaksiyonu ekzotermik bir reaksiyon olup, reaksiyon sonucu ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Denklem 2.3 tekrar düzenlendiğinde:



Kimyasal reaksiyonlarda, ürünler ile girdiler yada reaktantların oluşum ısıları arasındaki fark, kimyasal reaksiyonun entalpisi ( $\Delta H$ ) olarak adlandırılır. Denklem 2.4, entalpi cinsinden değerlendirildiğinde [57]:

$$\Delta H = [(h_f)_{H_2O}] - [(h_f)_{H_2} + \frac{1}{2}(h_f)_{O_2}] \quad (2.5)$$

25°C ve 1 atm koşullarında, sıvı suyun oluşum entalpisi  $-286 \text{ kJ/mol}$  olup, Denklem 2.4'de yerine yazıldığında:



Denklem 2.6'ya göre 1 mol hidrojenin tamamen yanmasıyla ortaya çıkabilecek ısı miktarı 286 kJ olarak ifade edilmiştir. Klasik yanma reaksiyonlarının aksine, yakıt hücrelerinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonların tüm enerji girdisi entropi oluşumuna bağlı olarak elektriğe dönüşmemektedir. Yakıt hücrelerinde, entalpinin elektriğe dönüştürülebilir kısmı, Denklem 2.8'de gösterilen Gibbs serbest enerjisi ile ifade edilmektedir [57,58].

$$W_{el} = -\Delta G \quad (2.7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2.8)$$

Burada  $W_{el}$  elektriksel işi (J/mol),  $\Delta G$  Gibbs serbest enerji değişimini,  $\Delta H$  entalpi değişimini,  $\Delta S$  entropi değişimini ve  $T$  sıcaklığı ifade etmektedir. Ürünler ve reaktantların entropi değerleri arasındaki fark:

$$\Delta S = [(s_f)_{H_2O}] - [(s_f)_{H_2} + \frac{1}{2}(s_f)_{O_2}] \quad (2.9)$$

Yakıt hücrelerinin teorik elektriksel potansiyeli, sıcaklık ve basınca bağlı entalpi ve entropi değerlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Hücredeki elektriksel iş ( $W_{el}$ ),  $q$  yükü (Coulomb/mol) ve  $E$  potansiyel gerilim (V) çarpımı ile hesaplanmaktadır [58]:

$$W_{el} = q \cdot E \quad (2.10)$$

Yakıt hücrelerinde, hidrojen molü için transfer edilen yük ( $q$ ) miktarı:

$$q = n_e \cdot n_{Avg} \cdot q_{el} \quad (2.11)$$

Burada  $n_e$  hidrojenin molekül başına elektron sayısı ( $2e^-$ ),  $n_{Avg}$  Avogadro sayısı ( $6,02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) ve  $q_{el}$  ise bir elektronun yüküdür ( $1,602176634 \times 10^{-19} \text{ Coulombs}$ ). Faraday sabiti ise [58]:

$$F = n_{Avg} \cdot q_{el} \quad (2.12)$$

Denklem 2.11 tekrar düzenlendiğinde:

$$W_{el} = n_e \cdot F \cdot E \quad (2.13)$$

Yakıt hücresinin teorik potansiyeli (V) Gibbs serbest enerjisi ( $\Delta G$ ) cinsinden yazıldığında:

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e \cdot F} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14, standart koşullara göre hesaplandığında, yakıt hücresi gerilimi teorik olarak 1,23V değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Hücrede kayıp yaşanmadığı durumda, Gibbs serbest enerjisinin tamamı elektrik enerjisine dönüştüğü anlamını taşımaktadır. Atmosferik basınç haricinde farklı basınç koşullarında da yakıt hücresinin hesapları yapılabilmektedir. Basınca bağlı Gibbs serbest enerjisi değişimi ifade edildiğinde:

$$dG = V_m \cdot dP \quad (2.15)$$

Denklem 2.15'de  $V_m$  molar hacmi ( $\text{m}^3/\text{mol}$ ) ve  $P$  basıncı (Pa) göstermektedir. Bu denklem ideal gaz denkleminde düzenlendiğinde:

$$P \cdot V_m = R \cdot T \quad (2.16)$$

$$dG = R \cdot T \cdot \frac{dP}{P} \quad (2.17)$$

$$G = G_0 + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (2.18)$$

Burada  $G_0$ , standart koşullardaki Gibbs serbest enerjisini,  $P_0$ , standart basıncı,  $R$  ise ideal gaz sabitini ifade etmektedir. Yakıt hücrelerinde, farklı koşullarda hücre potansiyelini hesaplamada kullanılan denklem, "Nernst denklemi" olarak bilinmektedir. Bir hücredeki hidrojen ve oksijenin reaksiyonu için Denklem 2.18 düzenlendiğinde [58]:

$$\Delta G = \Delta G_0 + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}}\right) \quad (2.19)$$

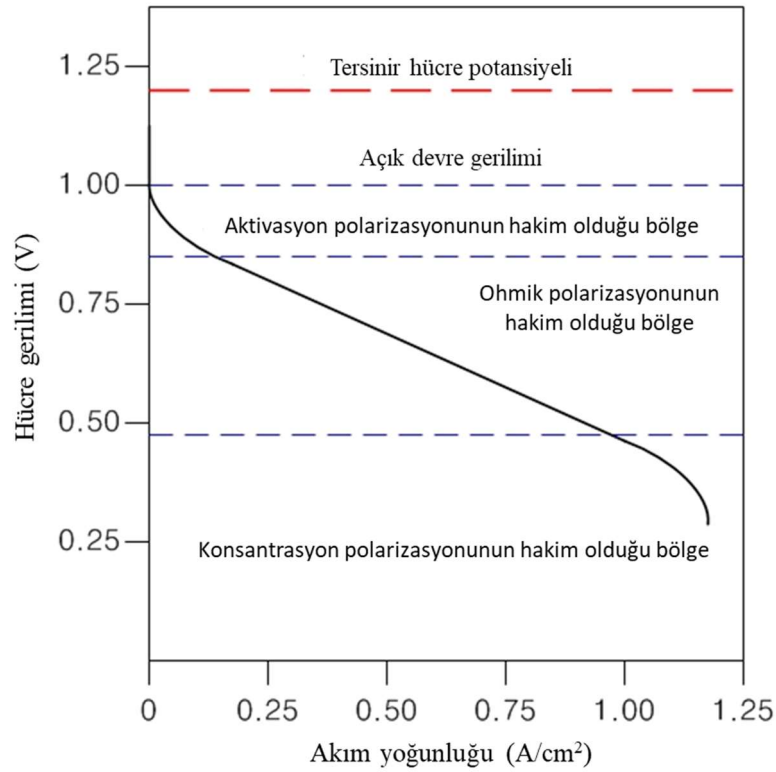
$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{n_e \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (2.20)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlere göre, reaktantların basıncı ve yoğunlukları hücre voltajına doğrudan etki etmektedir. Gerçek uygulamalarda, yakıt hücresinin açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ), teorik  $V_{OC}$  değerinden düşüktür. Yakıt hücrelerinde  $V_{OC}$  akım yoğunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir. Hücrede oluşan kayıplar genel olarak şu şekilde özetlenebilir [58]:

- Aktivasyon (kinetik) kayıpları,
- Ohmik (direnç) kayıplar,
- Konsantrasyon (kütle taşınımı) kayıpları.

Yakıt hücrelerinin gerilim/akım yoğunluğu değişimlerini ifade eden eğrilere polarizasyon eğrileri adı verilmektedir. Şekil 2.5’de bir yakıt hücresinin genel polarizasyon eğrisi gösterilmektedir. Hücrenin gerilimi, aktivasyon kayıpları ( $\Delta V_{act}$ ), ohmik kayıplar ( $\Delta V_{ohm}$ ) ve kütle kayıplarının ( $\Delta V_{con}$ ) toplamının, teorik hücre geriliminden çıkarılması ile elde edilmektedir [58];

$$V_{cell} = E_r - (\Delta V_{act} + \Delta V_{ohm} + \Delta V_{con}) \quad (2.21)$$



Şekil 2.5. Bir yakıt hücresinin genel polarizasyon eğrisi [59].

Tafel eşitliğine göre aktivasyon kaybı Denklem 2.22’de verilmektedir. Hücrede gerçekleşen diğer bir kayıp olan ohmik kayıplar, elektrot ve diğer hücre elemanlarının elektron akışına göstermiş olduğu direnç sebebi ile oluşmaktadır. Denklem 2.23’de ohmik kaybın ifade edilişi gösterilmektedir [58].

$$\Delta V_{act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (2.22)$$

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot R_i \quad (2.23)$$

Burada,  $R_i$ , membran ve elektrik iletimi yapan bileşenlerin toplam direnci olarak ifade edilmektedir. Konsantrasyon kayıpları ise elektrotlardaki reaktantların miktar olarak düşüş göstermesinden kaynaklanmaktadır. Konsantrasyon polarizasyonu neticesinde oluşan gerilim kaybı şu şekilde gösterilmektedir (akım yoğunluğu limiti  $i_L$ ):

$$\Delta V_{con} = \frac{R \cdot T}{n_e \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (2.23)$$

## 2.2. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri, çalışma sıcaklıklarına, verimliliklerine, uygulamalarına, elektrolit tiplerine ve maliyetlerine göre farklılık göstermektedirler [60]. Literatürde yakıt ve elektrolit seçimine göre yakıt pilleri altı farklı sınıfa ayrılmışlardır:

- Alkali yakıt pilleri (AFC),
- Fosforik asit yakıt pilleri (PAFC),
- Katı oksit yakıt pilleri (SOFC),
- Erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC),
- Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri (PEMFC),
- Doğrudan metanollü yakıt pilleri (DMFC).

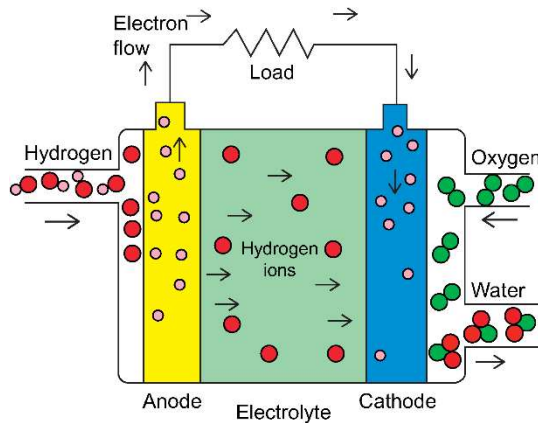
Bu yakıt pillerine ek olarak günümüzde mikrobiyal yakıt pilleri üzerine de çalışmalar yürütülmektedir. Tablo 2.1'de literatürde yaygın çalışılmış yakıt pillerinin karşılaştırmalı olarak özellikleri verilmektedir.

**Tablo 2.1.** Yakıt pili türlerinin özellikleri [52,60].

Yakıt Hücresi Tipi	Uygulama alanları	Avantajları	Dezavantajları	Sıcaklık	Güç
PEMFC	Otomotiv Portatif güç Askeri Uzay	Birçok uygulama için modüler, Yüksek güç yoğunluğu, Hızlı başlangıç, Mükemmel dinamik tepki,	Pahalı katalizör, Yakıt safsızlıklarına karşı hassas, Komplike su ve termal yönetim.	50-80 °C 120-200 °C	< 100 kW
AFC	Uzay Askeri	Hızlı reaksiyon kinetiği sayesinde yüksek elektrik verimliliği, Düşük maliyetli bileşenler, Geniş çalışma sıcaklığı ve basıncı,	Kirleticilere karşı son derece yüksek hassasiyet, Düşük güç yoğunluğu, Son derece aşındırıcı elektrolit, sızdırmazlık sorununa yol açar.	90-100 °C	< 100 kW

<b>PAFC</b>	Dağıtım uygulamaları	Teknolojik olarak olgun ve güvenilir, Yakıt safsızlıklarına karşı toleransı yüksek,	Yavaş başlama süresi, Düşük güç yoğunluğu, Kısmi olarak büyük sistemler, Pahalı katalizör,	150-200 °C	< 400 kW
<b>MCFC</b>	Elektrik üretim santralleri	Yüksek elektriksel verim, Yüksek seviyede ısı üretimi, Safsızlıklara karşı yüksek tolerans, Ucuz katalizör,	Yavaş başlama süresi, Düşük güç yoğunluğu, Elektrolit korozyonu ve buharlaşma kayıpları, Metal parçalarda korozyon,	600-700 °C	< 3 MW
<b>SOFC</b>	Güç jeneratörleri	Yüksek elektrik verimi, Yüksek seviyede ısı, Safsızlıklara karşı yüksek tolerans, İç reform imkânı, Yakıt esnekliği,	Yavaş başlama süresi, Düşük güç yoğunluğu, Yüksek termal stresler, Sızdırmazlık problemleri, Yüksek üretim maliyetleri.	700-1000 °C	< 2 MW

Katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pilleri gibi yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri elektrik üretim tesisleri gibi genellikle sabit uygulamalarda kullanılmaktadır [61]. Bu tip yüksek sıcaklık yakıt pillerinin ürettiği elektrik enerjisinin yanı sıra açığa çıkan yüksek ısının da kullanımı mevcuttur [62]. Diğer taraftan PEM, alkali ve direk metanol gibi yakıt pili tipleri daha düşük sıcaklıklarda çalışmalarını sebebi ile günlük yaşamda kullanılan portatif uygulamalarda kullanılabilirler. Belirtilen yakıt pilleri arasında, yakıt olarak hidrojeni ve reaktif olarak oksijen ya da havayı kullanarak elektrokimyasal olarak elektrik üreten PEMFC'ler, daha düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunluğu, hızlı başlangıç performansı ve güç ünitesi olarak mobil sistemlerde kullanılabilirliği ile dikkat çekmektedir. PEMFC'lerde hidrojen, proton iyonları oluşturmak ve anotta elektronları ortaya çıkartmak için katalizör tarafından aktive edilmektedir. Elektron dış devreye akmaya ve elektrik üretmeye zorlanırken proton zardan geçmektedir. Elektron daha sonra membran üzerinden katoda gelmekte ve su oluşturmak için oksijen ve proton iyonu ile reaksiyona girmektedir. Şekil 2.6'de bir PEMFC'nin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



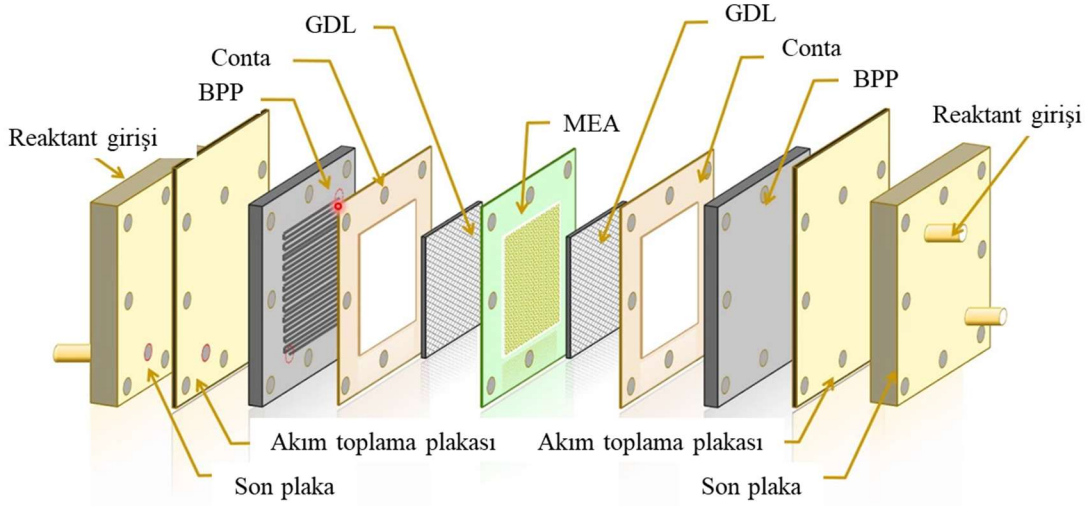
Şekil 2.6. PEM yakıt pilinin çalışma şeklinin şematik gösterimi [63].

Temel olarak PEMFC, membran elektrot grubu (MEA), bipolar, akım toplama, sıkıştırma plakaları ve sızdırmazlık elemanlarından oluşmaktadır. MEA, dağılmış bir katalizör tabakası, karbon kumaş veya gaz difüzyon tabakası ve zardan oluşmaktadır. Membranın görevi, protonları anottan katoda taşımak ve elektronların ve reaktantların geçişini engellemektir. Gaz difüzyon tabakası, bipolar plakalar tarafından taşınan reaktantların katalizör yüzeyine eşit olarak dağılması için kullanılmaktadır. Anottaki elektronlar, katoda doğru dış devreden geçerek elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. PEMFC'ler, çalışma sıcaklıkları 60 ila 100 °C arasında olan düşük sıcaklıklı yakıt hücreleridir. Hızlı başlatma işlemine sahip hafif kompakt sistemlerdir. Elektrolitin katılığından dolayı PEMFC'lerde elektrotların sızdırmazlığı diğer yakıt pili türlerine göre daha kolaydır. Ayrıca, daha uzun ömürlüdürler ve üretimi daha ucuzdur [64]. Verimlilik açısından, yakıt pilinin çalışma sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, o kadar yüksek verim elde edilebilir. Bunun nedeni daha yüksek reaksiyon hızıdır. Diğer taraftan, 100 °C' nin üzerindeki bir çalışma sıcaklığı, suyu buharlaştırarak ve membranda dehidrasyona neden olacaktır. Bu durum membranın proton iletkenliğinde azalmaya yol açacaktır. Ayrıca, MEA yakıt safsızlıklarına karşı hassastır. CO, kükürtlü bileşikler gibi kirleticiler kolayca MEA'yı zehirleyebilmektedir. Bu sebeple, PEMFC uygulamalarında %99,999 saflıkta hidrojen yakıt olarak tercih edilmektedir. PEMFC'lerin elektriksel verimliliği %40 ile %50 arasındadır ve çıkış gücü 250 kW'a kadar çıkabilmektedir [52]. PEMFC sistemleri genellikle taşınabilir ve sabit uygulamalarda kullanılabilir. Bununla birlikte, PEMFC'lerin yüksek verimlilik ve güç yoğunluğu seviyesinde sürekli elektrik enerjisi sağlayabilmeleri sebebiyle, ulaşım uygulamaları için en uygun yakıt pili tipi olarak görünmektedir. Ayrıca yakıt hücrelerinin güç üreten yığınlarında hareketli parça olmadığından minimum bakım ihtiyacı duymaktadırlar. PEMFC uygulamaları arasında ise yakıt pilli elektrikli araçlar (FCEV) en umut verici uygulamaların başında gelmektedir [65]. Bunun nedeni, bu tür sistemlerin topluluklar arasında kabul edilebilirliğini önemli ölçüde artırabilen teknoloji gelişiminin insanlar tarafından gözlemlenebilir olmasıdır.

### **2.3. Yakıt Pili Bileşenleri**

Bir yakıt hücresinin birincil bileşenleri, iyon ileten bir elektrolit, bir katot ve bir anottur. Birlikte, bu üçü genellikle membran elektrot grubu (MEA) veya sadece tek hücreli bir yakıt hücresi olarak adlandırılmaktadır [66]. Tipik bir PEMFC, membran (elektrolit), membranın her iki tarafında bulunan katalizör tabakası (elektrot), reaktantları katalizör yüzeyine dağıtıcı görevine sahip gaz difüzyon katmanları (GDL), reaktantları (hidrojen, oksijen veya hava) hücrenin aktif alanı boyunca dağılımını sağlayan BPP'ler, hücrede üretilen akımı toplayan akım toplama plakaları, MEA ile BPP'leri sıkıştırma ve hücreye mekanik destek sağlayan son plakalardan oluşmaktadır. Yakıt pili yığını oluşturulurken bu yapılar seri bir şekilde birbirlerine bağlanarak hücrenin elektriksel

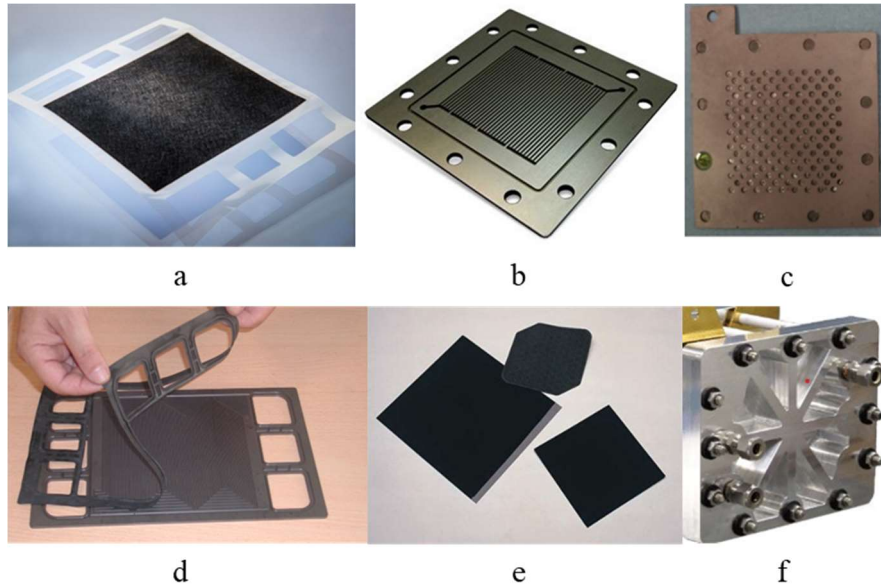
potansiyeli yükseltilmektedir. Yığın yapısında, bir BPP ve bir MEA şeklinde yerleştirilerek sıralama yapılmaktadır. Şekil 2.7’de bir PEM hücresi bileşenlerinin şematik hali gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Bir PEM hücresi bileşenlerinin şematik hali [67].

Bir yakıt hücresinin merkezinde membran bulunmaktadır. PEMFC’lerde, anottan katoda hidrojen iyonlarının geçişine izin verip, elektron akışına izin vermeyen, proton değişim membranı (PEM) adı verilen bir membran bulunmaktadır. Ticari olarak "Nafion" adı altında bilinen ve PEMFC’lerde yaygın olarak kullanılan membran perfluorosülfonatlanmış bir iyonomerdir [68]. Nafyonun sahip olduğu kimyasal kararlılık, iyi proton iletkenliği ve emsallerine kıyasla iyi mekanik mukavemeti PEMFC uygulamalarında en çok kullanılan membran haline getirmiştir [69–71]. Yakıt hücrelerinin diğer bir önemli elemanı ise katalizör katmanıdır. Diğer bir ifade ile katalizörler kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği elektrotlardır. Bu elektrotlar genellikle karbon ve platin tabanlı olarak hazırlanmaktadır. Mevcut uygulamalarda, yakıt hücrelerindeki en pratik katalizörler, yüksek oranda dağılmış platin (Pt) bazlı nanoparçacıklardır. Bu Pt nanoparçacıkları, aktif Pt yüzeyini arttırmak ve katalizör kullanımını iyileştirmek için normalde karbon parçacıkları üzerinde desteklenmektedir [72]. Hücrenin anot tarafında hidrojen moleküllerinin, hidrojen iyonlarına ( $H^+$ ) ve elektronlara ( $e^-$ ) ayrılması, katot tarafında ise oksijen, hidrojen iyonları ve elektronlar ile su ( $H_2O$ ) oluşumu katalizör katmanları üzerinde gerçekleşmektedir. Hücrenin diğer bir elemanı ise gaz difüzyon tabakasıdır (GDL). GDL, yüksek gözenekli yapısı ile reaktantların katalizör/membran yüzeylerine homojen bir şekilde dağılmasına yardımcı olmaktadır. GDL’nin yapısı hücredeki kütle taşınım kapasitesini etkilediği için hücre performansı üzerinde etkilidir. Buna ek olarak, reaksiyonlar sonucu katalizör yüzeyinde oluşan sıvı suyun kanallara aktarılmasına yardımcı olmaktadır. GDL’ in yapısı genellikle iki katmandan oluşmaktadır. Bunlar mikro gözenek (MPL)

ve makro gözenek substrat (MPS) katmanlarıdır. MPL katmanı karbon tozu ve hidrofobik maddelerden oluşmaktadır. MPS ise karbon kâğıdı veya karbon kumaş yapısındadır [73]. Yakıt pili hücrelerinde MEA farklı katmanlar içerebilmektedir. 3-katmanlı MEA yapısı, membran ve katalizör tabaklarını içerirken, 5-katmanlı MEA yapısı membran, katalizör ve GDL katmanlarını üzerinde bulundurmaktadır. Yakıt pili hücresinin önemli diğer bir bileşeni ise bipolar plakalardır. Bipolar plakalar, reaktant gazları hücrenin aktif alanı boyunca eşit olarak dağıtabilen, reaksiyonlar sonucu açığa çıkan elektrik akımını ve sıvı suyu toplayabilen, oluşan ısıyı hücreden uzaklaştırabilen ve fazla reaktantları tahliye edebilen önemli bir hücre bileşenidir [74]. Hücredeki diğer bileşenler ise akım toplama ve sıkıştırma plakalarıdır. Akım toplama plakaları, hücrede oluşan elektrik akımının toplandığı ve dış devre bağlantısının yapıldığı elemandır. Genellikle bakır, paslanmaz çelik, nikel, platin ve çeşitli altın kaplamaları yapılarak, iletkenliği yüksek metallerden oluşturulmaktadır [75]. Sıkıştırma, diğer bir adı ile son plakalar, MEA, BPP'ler ve akım toplama plakalarının sızdırmazlık sağlayacak şekilde sıkıştırılmasında kullanılmaktadır. Sıkıştırma plakaları genellikle cıvata ve somun bağlantı elemanları ile sabitlendiği için belirli seviyede mekanik mukavemete sahip olması gerekmektedir. Son plakaların diğer bir özelliği ise MEA ile BPP'lerin temas yüzeyini sıkıştırma kuvveti dengeli bir şekilde sağlamasıdır. Bu şekilde ohmik direnci olabildiğince düşürmek mümkündür. Aksi halde, elektriksel iletim yetersiz kalması durumunda, hücrede voltaj düşümü meydana gelmektedir [76]. Şekil 2.8'de örnek bir PEMFC'nin bileşenleri gösterilmektedir.



**Şekil 2.8.** PEM yakıt hücresinin elemanları, (a) MEA, (b) BPP, (c) akım toplama plakası, (d) conta, (e) GDL, (f) son plaka [77–82].

### 3. BİPOLAR PLAKALAR

Bir PEMFC yığını genellikle BPP'ler, MEA, sızdırmazlık contası ve son plakalardan oluşmaktadır [83]. Bu bileşenler arasında, BPP'ler, katot ve anot taraflarını ayırma, reaktant gazları dağıtma ve elektronları iletme gibi PEMFC yığınının hayati işlevlere sahiptir. Plakanın bir tarafı anot (-) kutup, diğer tarafı katot (+) kutup olmasından dolayı bipolar plaka (çift kutuplu plaka) olarak adlandırılmaktadır. BPP'ler tipik bir yakıt hücresi yığınının, ağırlığın %60-80' ini, toplam maliyetin %20-30'unu ve toplam hacmin yaklaşık %80' ini oluşturmaktadır [27,28]. Şekil 3.1' de farklı malzeme ve tasarım yapılarında örnek BPP'ler gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Farklı malzeme ve tasarımlarda üretilmiş BPP'ler [84].

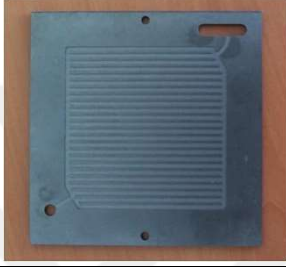

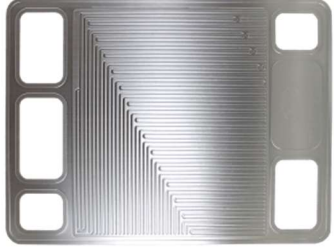
BPP, hücrede gaz besleme ve drenaj yapabilme işlemlerinin yanında, BPP üzerindeki akış kanallarının yapısı, reaksiyon gazının gaz difüzyon katmanına (GDL) difüzyonunu, kütle transferini ve su üretim sürecini doğrudan etkilemekle kalmaz, aynı zamanda elektrokimyasal reaksiyonun ısı transferini ve dağılımını da dolaylı olarak etkilemektedir. Bu fonksiyonel gereksinimleri karşılamak için ideal BPP'lerin yüksek termal/elektrik iletkenliğine, korozyon direncine, gaz bariyer özelliklerine, düşük yoğunluğa, iyi mekanik özelliklere, düşük maliyete ve kolay işlemeye sahip olması gerekmektedir [30]. BPP'lerin geliştirilmesi ve istenilen özelliklerin kazanılabilmesi adına yapılan çalışmalar genellikle iki ana gruba ayrılmaktadır.

Bu iki ana çalışma grubunun ilki BPP'lerin üretildiği malzemelerin ve yeni malzeme kompozisyonlarının geliştirilmesidir. Buna ek olarak, çeşitli kaplama malzemeleri ve yöntemleri kullanılarak BPP'lerin istenen fiziksel ve kimyasal özellikleri kazanması üzerine çalışmalar

yapılmaktadır. Günümüzde, yakıt pillerinde kullanılan BPP'ler de yaygın olarak kullanılan substrat malzemeler; esas olarak grafit, metal ve kompozit malzemelerdir [85]. Bu üç tip malzemeden yapılan BPP'ler farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olmasına rağmen genel olarak BPP'lerin performans gereksinimlerini tam olarak karşılayamamaktadırlar. Metal ve alaşımlardan üretilen BPP'ler, iyi mekanik özelliklere, elektrik iletkenliğine ve düşük maliyete sahiptirler. Bu özellikleri metal BPP'lerin daha ince biçimde üretilmesine olanak sağlamaktadır [86]. Diğer taraftan, uzun çalışma koşullarında metallerin korozyona maruz kalması, malzeme yüzeyinde ince bir pasif film tabakasının oluşmasına neden olmaktadır. Bu pasif film tabakası korozyon hızını yavaşlatmasına rağmen hücrenin çıkış gücünde azalmaya ve hücre ömrünün kısılmasına neden olmaktadır [30]. Metallerin korozyon dirençlerinin yükseltilmesi adına çeşitli kaplama türleri ve teknolojileri literatürde kullanılmaktadır [87,88]. Metal ve alaşımlı BPP'lere kıyasla grafit BPP'ler, düşük yoğunluklu, iyi korozyon direnci ve yakıt hücrelerinin uzun vadeli kararlı çalışmasının gereksinimlerini karşılayabilen karbon fiber GDL'lerle iyi afinite avantajlarına sahiptir. Diğer taraftan grafit yüksek gözenekliliğe, düşük mekanik mukavemete ve yüksek kırılgenliğe sahiptir. Reaktant gazların BPP'den geçmesini önlemek ve istenen mekanik özelliklerin kazanılması adına grafit BPP'ler genellikle daha kalın üretilmektedir. Bu durum grafit BPP'lerin daha büyük bir hacmi ve kütlesi olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, maliyetinin diğer malzemelere kıyasla yüksek olması ve işlenebilirliğinin zayıf olması, grafit malzemelerin diğer olumsuz taraflarıdır [89]. Kompozit BPP'ler, metal ve grafit malzemelerin bazı avantajlarını birleştirmektedir. Kompozit BPP'ler gelişme trendlerinden biri olan korozyon direnci, kolay kalıplama, küçük boyut ve yüksek mukavemet özelliklerine sahiptir. Kompozit BPP'lerin, yüksek maliyetleri ve yüksek arayüzey temas dirençleri üzerinde geliştirilmesi gereken konuların başında gelmektedir. Kompozit BPP malzemesi genellikle bir polimer reçine matrisinden ve grafit gibi iletken dolgu maddelerinden oluşmaktadır. Reçine, sadece grafit levhanın gücünü artırmakla kalmayıp aynı zamanda grafit levhanın gaz bariyeri özelliklerini de iyileştiren bir takviye maddesi ve bir bağlayıcı görevi görmektedir [30]. Tablo 3.1' de BPP malzemelerinin avantaj ve dezavantajları verilmektedir. BPP'lerin geliştirilmesi için yapılan ikinci ana çalışma grubu ise BPP'lerin tasarimsal olarak geliştirilmesidir. BPP'lerin üzerinde bulunan akış kanallarının tasarımı, hücre verimliliği ve ömrü açısından büyük öneme sahiptir. Genel olarak, herhangi bir hücre yığını için karakteristik performansı belirleyen birkaç faktör mevcuttur. Bu faktörlerden bazıları şu şekildedir [90,91]:

- Yakıt hücresinin çalışma koşulları,
- Kütle taşınımı,
- Su yönetimi,
- Yakıt hücresinin elektrokimyasal kinetiği,
- Sıkıştırma basıncı ve hidrojen gaz sızıntıları.

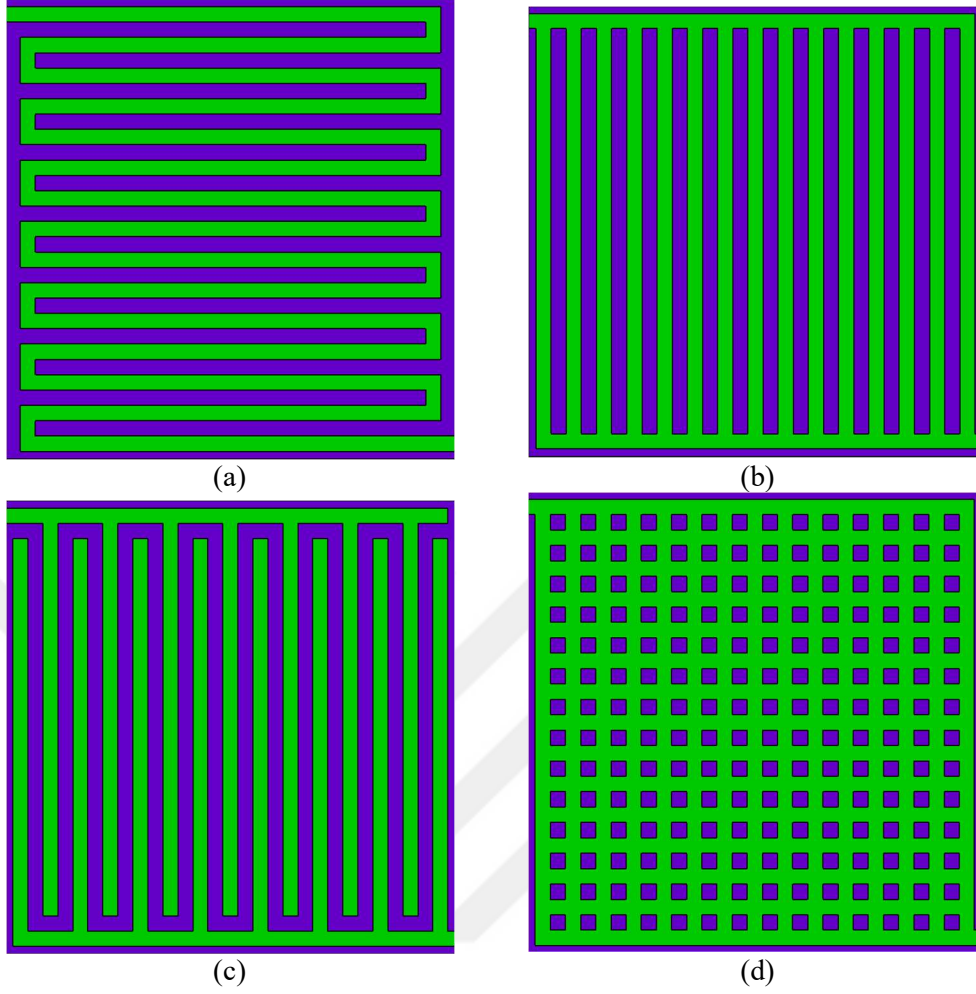
**Tablo 3.1.** BPP malzemelerinin avantaj ve dezavantajları [92–95].

Kategori	Kompozit	Grafit	Metal
<b>Avantaj</b>	İyi korozyon direnci, İyi mekanik özellikler, Maliyetin yüksek olmaması, Hava sızdırmazlığı, Düşük ağırlık.	Yüksek korozyon direnci, Yüksek elektriksel iletkenlik, Düşük yoğunluk, İyi kimyasal direnç.	İyi mekanik, elektrik ve ısıl iletkenlik, Toplu üretime uygun,
<b>Dezavantaj</b>	Düşük iletkenlik.	Kırılgan, Gözenekli, Yüksek maliyet, Üretimi zaman alıcı.	Korozyon problemi.
<b>Görseli</b>			

Yığının genel verimliliği, ihtiva ettiği her bir hücrelerin performansına bağlıdır. Yakıt pili yığını oluşturan her hücre, herhangi bir zamanda farklı bir hidrojen akış hızı almakta ve bu genellikle her hücre için BPP geometrisinden kaynaklanmaktadır. Kötü bir akış alanı tasarımına sahip BPP'ler, yakıt hücresi boyunca eşit olmayan gaz dağılımına, elektrolitte lokalize sıcak noktalara, dengesiz akım yoğunluğuna ve zayıf su yönetimi nedeniyle cihazın tamamen tahrip olmasına neden olabilmektedir [29]. Uygun BPP geometrisi nedeniyle gazların eşit olarak dağıldığı durumlarda, akım yoğunluğu da eşit olarak dağıtılmakta ve bu da hücre çalışma sıcaklığının dengeli şekilde dağılmasına yol açmaktadır. Doğru bir BPP akış alanı tasarımı, reaksiyon tarafından üretilen suyu hücre yığınından kolayca tahliye ederek, su yönetimine yardımcı olmakta ve böylece su baskını olasılığını sınırlandırmaktadır.

Genel olarak, akış alanı yapısını geliştirmek veya optimize etmek için gaz kanalı ve difüzyon tabakası arasındaki kütle transferinin artırılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir [96]. Bu amaçla, çeşitli analiz programları ile elde edilen sayısal simülasyonlar, sonlu elemanlar analizi ve çeşitli deneysel kurulumlar kullanılarak BPP geometrisinin tasarımlarını geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır [97,98]. Günümüze kadar olan ticari ve bilimsel çalışmalar neticesinde, bazı temel BPP tasarımları kabul görmüştür.

Literatür tarafından genel olarak kabul görmüş bu tasarımlar serpantin (serpentine), paralel (parallel), iç içe geçmiş (interdigitated) ve pim (pin) olarak adlandırılmışlardır. Şekil 3.2' de bu temel tasarımlar gösterilmektedir.



**Şekil 3.2.** Temel BPP tasarımları, (a) serpantin, (b) paralel, (c) iç içe geçmiş, (d) pim.

Bu tasarımların kendilerine ait çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Literatürde ve ticari olarak kullanılan BPP tasarımları arasında en yaygın kullanılan tasarım serpantin tasarımıdır. Tekli (single) serpantin tasarımında akış, girişten çıkışa tek bir kanal vasıtasıyla bütün aktif alanı dolaşmaktadır. Bu tasarımın yüksek akış hızına bağlı su tahliyesi diğer tasarımlara kıyasla daha gelişmiştir. Diğer taraftan, serpantin akış alanı büyük ve küçük aktif alanı sahip yakıt pilleri için uygun olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Bunun nedeni olarak, ardışık kanallar arasındaki nispeten yüksek bölgesel basınç düşüşünden dolayı GDL'de iyi kaburga altı konveksiyon sağlamasıdır [99,100]. Tekli serpantin tasarımında kanalların uzunluğu boyunca reaktantların tüketilmesi, kanal yolu boyunca akım yoğunluğunun düşmesine, düzensiz reaktant dağılımına ve katalizör katmanından yeteri kadar faydalanamamaya yol açmaktadır. Serpantin tasarımlarının en büyük handikaplarından biri girişten çıkışa yüksek basınç düşümü oluşturmalarıdır. Bu tasarım tipinde akış alanında bulunan köşelerin (dönüş bölgeleri) fazla olması yüksek basınç düşümüne yol açmaktadır [101,102]. Basınç düşümü kavramı parazit güç olarak tabir edilen pompalama kayıplarını arttırmakta ve yakıt pilinin ürettiği net güç değerini etkilemektedir [103]. Serpantin akış

alanı tasarımının diğer bir olumsuz tarafı ise uzun-dar kanal ve kısa kıvrımlı kanal yollarının yüksek bir akış direncine yol açmasıdır. Akış kanalı boyunca tükenen reaktantlar nedeniyle, GDL' de çoğunlukla dağınık bir reaktant dağılımı oluşmaktadır [24]. Çoklu (multiple) serpantin akış alanlarında ise girişten çıkışa reaktantlar kesintisiz tek bir kanal yerine, birden fazla kesintisiz kanal yapısı ile taşınmaktadır. Tekli serpantin tasarımına kıyasla çoklu serpantin tasarımlarında daha az kanal yolu ve daha az köşeli yapıdan oluşmasına bağlı olarak, daha az basınç düşümü ve daha iyi bir su yönetimine sahiptir [104].

En yaygın ikinci BPP tasarımı paralel akış alanı tasarımıdır. Paralel akış alanları genel olarak, bir ana giriş ve bir ana çıkış kanallarını dikey olarak birbirine bağlayan paralel yerleştirilmiş kanallardan oluşmaktadır. Paralel tasarımlar, temel akış alanları arasında genellikle en düşük elektriksel performans sağlayan akış alanı tipi olarak gösterilmiştir [99,104]. Paralel akış alanı tasarımında her bir paralel kanala giren reaktant miktarı eşit olmadığından, kanallar arasında düzensiz gaz dağılımı oluşmaktadır. Bu durum düzensiz reaksiyon ve sıcaklık dağılımına yol açmakta ve hücrenin ömrü ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

İç içe geçmiş (interdigitated) akış alanları, reaktantları rib'lerin altından GDL'lere yönlendiren çıkmaz kanal tasarımlarına sahip olan akış alanlarıdır. Reaktantların bu şekilde hareketi, bu bölgelerde sıvı suyun çıkarılmasını kolaylaştırarak katalizörlerin etkin kullanımını artıran, rib altı konvektif bir akışa neden olmaktadır. Bu tasarımlar özellikle yüksek akım yoğunluğu ile çalışan yakıt pillerinde oluşan aşırı suyun tahliyesinde önemli bir göreve sahiptir. İç içe geçmiş akış alanı tasarımları, homojen reaktant dağılımı ve yüksek performans sağlamaktadır. Bu avantajlarına rağmen iç içe geçmiş akış alanları yaygın kullanılmamaktadır. Bu tip tasarımlarda GDL gözenekliliği ve kalınlığına bağlı olarak yüksek basınç düşüşü mevcuttur [105].

Pim tipi akış alanı, düzenli bir düzende düzenlenmiş sütunlu pimlerden (genellikle kübik veya dairesel) oluşmaktadır. Reaktif maddeler, BPP üzerinde oluklar yaratılarak tasarlanan ağ benzeri kanallar aracılığıyla hareket etmektedir. Bu tip akış alanına sahip BPP'lerde, tipik bir kanal yapısı bulunmamaktadır [106]. Kanal yapısının kısa olması daha düşük akış direncine neden olmaktadır ve bu nedenle basınç düşümü değerleri diğer modellere kıyasla daha düşüktür [107]. Bu tasarımların bazı sınırlamaları mevcuttur. Akış alanında gaz bazen eşit olarak dağılmaz, bu da bazı olası su yönetimi sorunlarına ve eşit olmayan sıcaklık dağılımına yol açmaktadır [108].

### **3.1. Bipolar Plakalarda Yapılan Tasarımsal Geliştirmeler**

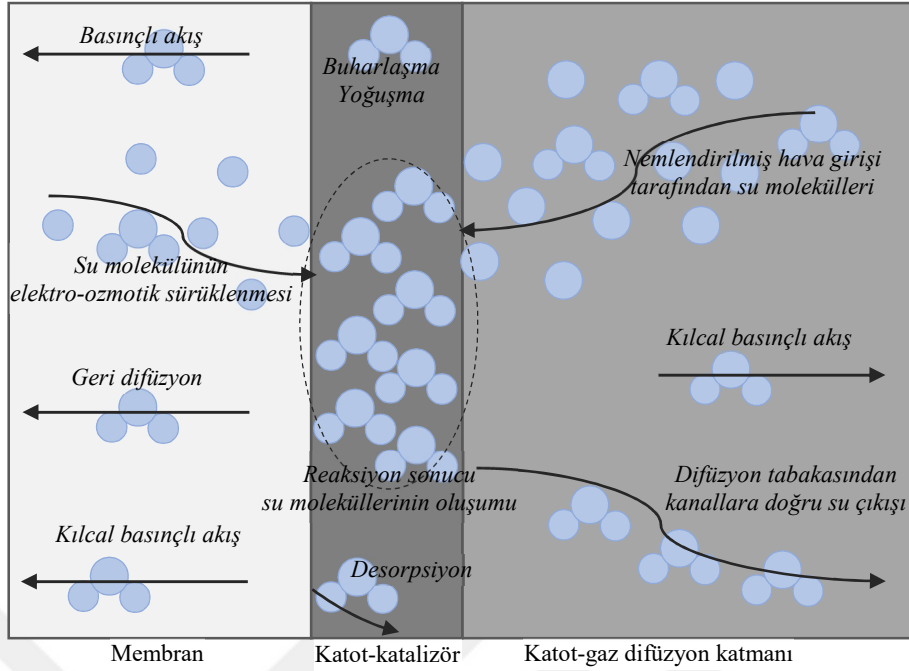
Yakıt hücrelerinin kritik bileşeni olan BPP'lerin geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar, BPP'lerin malzeme yapıları ve BPP'lerin akış alanı tasarımları üzerine odaklanmaktadır. Bu iki farklı geliştirme konusu ise birçok alt başlıktan oluşan araştırma konularına sahiptir. Bipolar plaka, PEMFC yığnında bir MEA ile eşit derecede önemli bir bileşendir, başlıca eylemi elektrot malzemesini desteklemek, akımı toplamak ve iletmek, reaktantları ayırmak ve akışı

yönlendirmektir. Bu nedenle, BPP'lerin sahip olması gereken özellikler şu şekilde özetlenebilir [24,109–111]:

- MEA' ya mekanik destek sağlayabilecek mukavemete sahip olmalıdır,
- BPP'lerin yüzeyi, gaz ve su kanalı olarak işleme akış alanına ihtiyaç duyar. Bu nedenle, iyi bir işleme performansı sağlanmalıdır;
- Oluşan akımın iletimi için yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır,
- Düşük gaz geçirgenliğine sahip olmalıdır,
- PEMFC'nin elektroliti asidik bir ortam olması nedeniyle, hücrenin operasyon ömrünü artırmak için BPP'ler iyi kimyasal ve elektrokimyasal korozyon direncine sahip olmalıdır;
- Reaksiyonlar sonucu oluşan ısının hücreden uzaklaştırılabilmesi için BPP'ler iyi termal iletkenliğe ve düşük termal genleşme katsayısına sahip olmalıdır,
- Hücrede oluşan sıvı suyun tahliyesine uygun olmalıdır,
- Büyük ölçekli ticari üretime uygun olması için BPP'ler düşük maliyetli olmalıdır.

Belirtilen bu özelliklerin bir kısmı BPP'lerin üretildiği malzeme tipleri ile alakalıdır. Diğer taraftan, istenen gereksinimlerin bir kısmı ise BPP'lerin tasarımları ile alakalıdır. PEMFC'lerde; suyun oluşumu, suyun faz değişimi, suyun taşınımı, elektrokimyasal reaksiyonlar, üç boyutlu ısı transferi, elektron ve proton taşınımı gibi kompleks ve kontrol etmesi kolay olmayan hususlar mevcuttur. Şekil 3.3' de PEMFC hücresinde oluşan bazı taşınım olayları şematik olarak gösterilmektedir. Bu karmaşık fenomenler, deneysel araştırma yoluyla kolayca anlamlandırılmayan durumlardır. Buna ek olarak, PEMFC'ler üzerine yapılan deneysel çalışmaların maliyetleri yüksektir. Bu nedenle, PEMFC'lerin performanslarının artırılması üzerine yapılan çalışmalarda (özellikle BPP'lerin akış alanı tasarımları) modelleme ve simülasyon tekniklerinden yaygın olarak faydalanılmaktadır [97,98].

Günümüzde, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (computational fluid dynamics, CFD) modelleme tekniği, akış kanalının tasarımını değerlendirmek, reaktant dağılımlarını analiz etmek ve PEMFC'nin performansını değerlendirmek için kullanılan en popüler tekniktir. PEMFC'nin CFD modelleri temel olarak temel taşıma denklemlerinden ve elektrokimyasal denklemlerden oluşmaktadır. Temel taşıma denklemi kütle, momentum, enerji koruma denklemi ve tür taşıma denklemini içermektedir. Elektrokimyasal denklemler, elektrokimyasal denklemler, akım koruma denklemi ve aktifleştirilmiş polarizasyonun yönetici denkleminde oluşmaktadır [112,113].

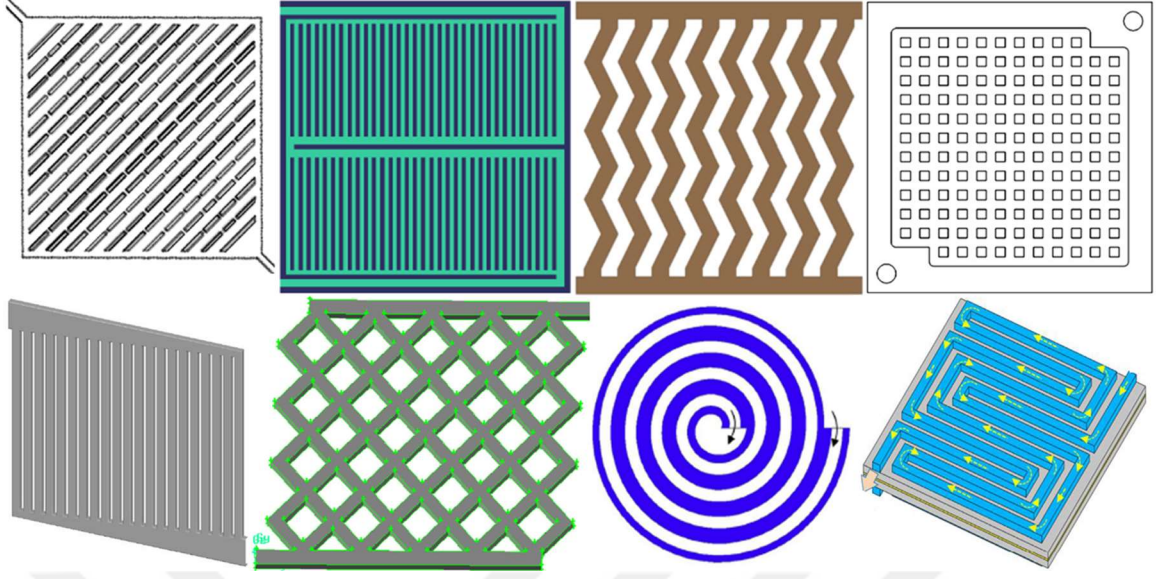


**Şekil 3.3.** PEMFC hücresinde oluşan bazı taşınım olayları [114].

Araştırmacıların bir kısmı, PEMFC'lerin elektriksel performansının artırılması, su yönetiminin iyileştirilmesi ve hücre ömrünün artırılması konusunda hücrenin akış alanının kritik bir öneme sahip olduğunu bildirmiştir [115]. Özellikle, BPP'lerdeki akış alanı tasarımları doğrudan, membran/katalizör yüzeyine reaktantların dağılımını etkilemektedir [30]. Bu amaçla araştırmacılar, yakıt pilleri için farklı yaklaşımlarda akış alanı tasarımları geliştirmektedir. Genel olarak bu farklı akış alanı tasarımları sınıflandırılmak istendiğinde şu dört ana başlık altında özetlenebilir;

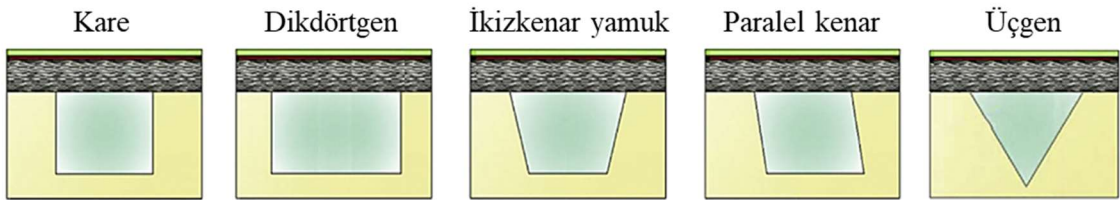
- Klasik kanal tasarım yaklaşımı,
- Biyo-benzetim kanal tasarım yaklaşımı,
- Gözenekli akış alanı tasarım yaklaşımı,
- Engelli kanal tasarım yaklaşımı.

İlk yaklaşım, BPP'lerin akış alanlarının klasik kanal konfigürasyonlarında farklı geometrik biçimlerde oluşturulmasından türetilmektedir. Literatürde en temel akış alanı geometrileri olan serpantin, paralel, iç içe geçmiş ve pim tipi akış alanları bu sınıfa girmektedir. Bu akış alanlarının dışında literatürde farklı biçimlerde kanal-rib yapısından oluşmuş birçok akış alanı tasarlanmıştır. Şekil 3.4' de klasik kanal tasarımı yaklaşımı tasarlanmış örnek akış alanı tasarımları gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Klasik kanal tasarımı yaklaşımı tasarlanmış örnek akış alanı tasarımları [34,116–122].

Klasik kanal tasarımı yaklaşımı, kanal konfigürasyonlarının (kanal yolu uzunluğu, kanal genişliği ve aktif alan/kanal oranı gibi) ampirik olarak değiştirilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşımdaki fikir birliği, daha geniş rib aralığı, daha dar ve daha kısa kanallar ve yol uzunluğuna sahip akış alanlarının kullanılmasının reaktan dağılımını iyileştirmesidir. Bununla birlikte, bu modifikasyonlar, daha düşük membran hidrasyonu ve membran iletkenliği, daha yüksek bir basınç düşüşü ve etkisiz su ve ısı yönetimi ile sonuçlanma eğilimindedir [24]. Akış alanı deseninin değiştirilmesine ek olarak, kanal yapıları üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar, kanal genişliği, yüksekliği ve kanal kesitinin geometrisi üzerine gerçekleştirilmektedir. Bu tip çalışmalarda ortak olarak dikkat edilen kriter genellikle kanal/rib oranıdır. Diğer bir ifade ile kanalın kapladığı aktif alanın, rib'lerin kapladığı aktif alana oranı belirtilmektedir. Şekil 3.5' de BPP' lerin literatürde kullanılmış bazı kanal kesit şekilleri verilmektedir.

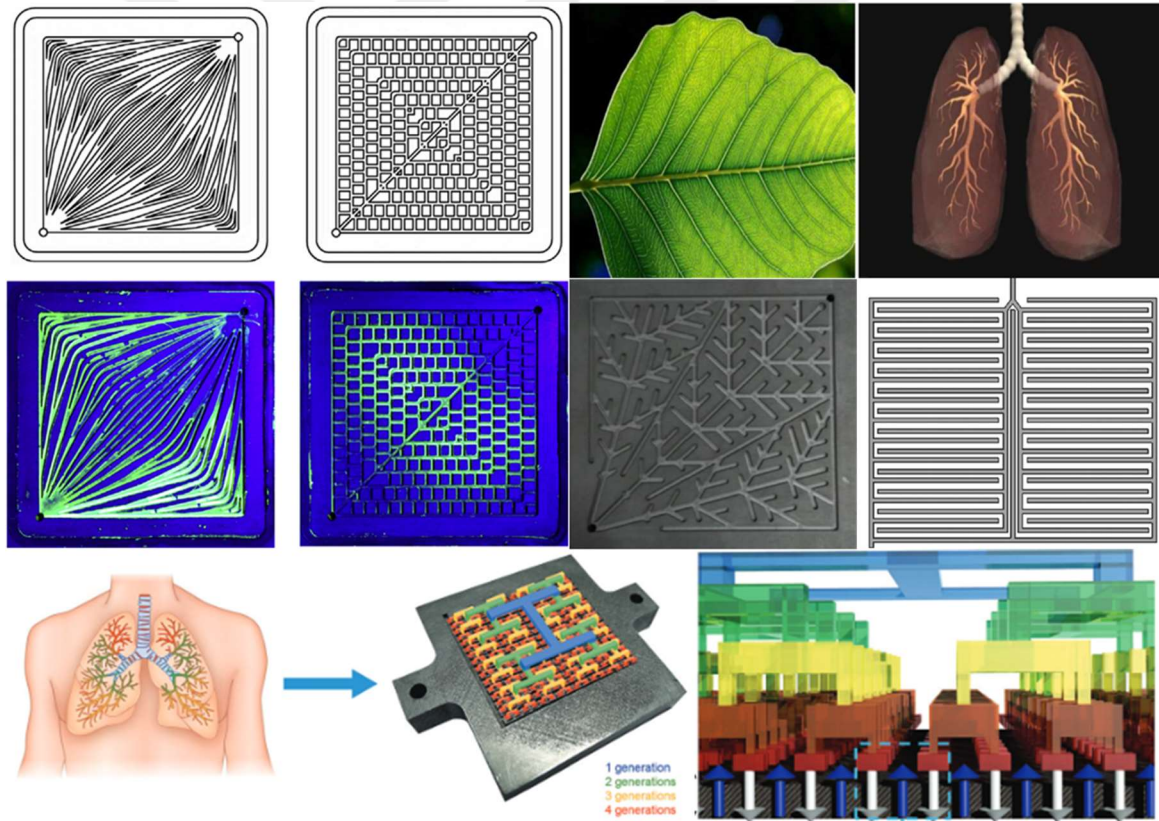


Şekil 3.5. Klasik kanal tasarımı yaklaşımı tasarlanmış örnek akış alanı tasarımları [108,123].

Klasik kanal tasarımlarında, akış kanallarının genişliği, hücrenin kanal/rib oranını etkilemektedir. Bu ise BPP' nin elektrik ve ısı iletkenliğini doğrudan etkilemektedir. Buna ek olarak, reaktantların dağılımını ve basınç düşümünü de etkilemektedir. Akış kanalının yüksekliği ise reaktant hızını

doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, akış kanallarının yükseklik ve genişliği hücre performansını ve ömrünü etkileyen önemli değişkenlerdir [108,124].

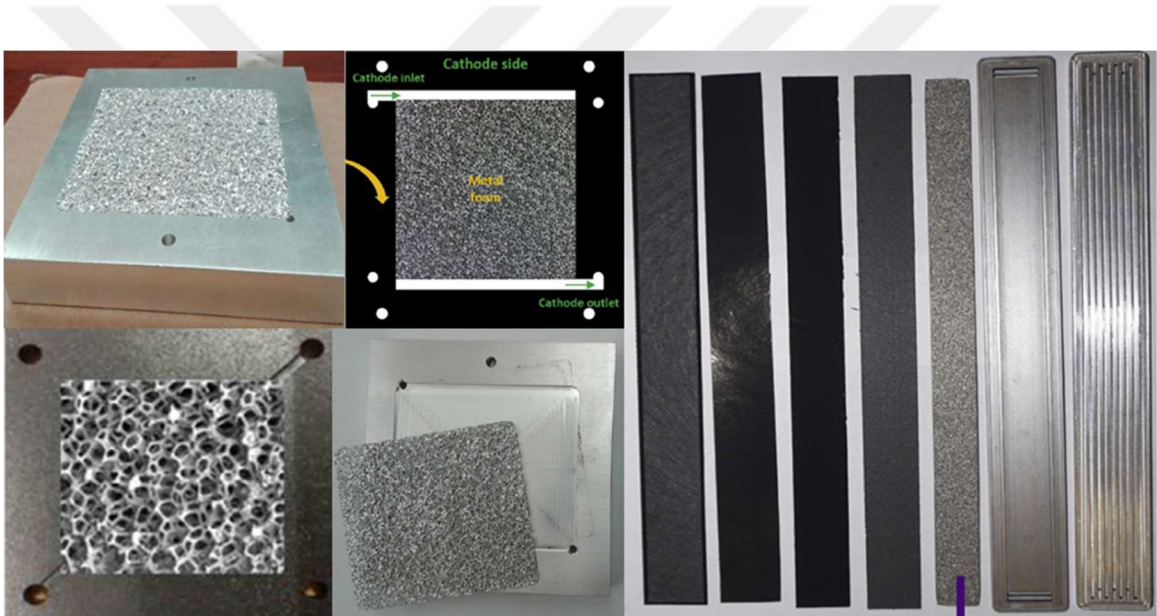
Son yıllarda, BPP'lerin akış alanlarının tasarımlarında yeni bir yaklaşım, araştırmacılar tarafından benimsenmektedir. Bu yaklaşım, BPP'lerin akış alanlarını biyolojik sistemlerden esinlenerek (benzetim yaparak) geliştirilmesini konu almaktadır. Bu yaklaşımda özellikle canlı metabolizmalarındaki dolaşım, solunum ve taşıma gibi kütle transferinin bulunduğu sistemlerinden esinlenilmektedir [37]. Literatürdeki bio-benzeşim ile hazırlanan BPP'lerin büyük bir kısmında ağaç, akciğer ve yaprak formları kullanılmıştır [92]. Şekil 3.6'da literatürde bio-benzetim yaklaşımı ile hazırlanmış bazı akış alanı desenleri gösterilmektedir. Geleneksel akış kanallarıyla karşılaştırıldığında, biyo-benzetim ile tasarlanmış akış kanalları, kütle ve ısı transferi sürecini önemli ölçüde iyileştirebildiği ve PEMFC'lerin genel performansını arttırabildiği birçok çalışmada ifade edilmiştir [125].



Şekil 3.6. Biyo-benzetim kanal tasarım yaklaşımı ile hazırlanmış örnek akış alanı tasarımları [37,126–128].

Günümüzde dikkat çeken diğer bir yaklaşım ise açık gözenekli metal köpüklerin akış kanalı/rib kombinasyonu yerine kullanılmasıdır. Açık hücreli metal köpük, ağ benzeri bir içyapıya sahip oldukça gözenekli (%95 gözenekliliğe ulaşan) bir malzemedir. Açık gözenekli metal köpüklerin yüksek gözeneklilik oranı, onlara yüksek geçirgenlik özelliği kazandırırken, akışkanların taşınması

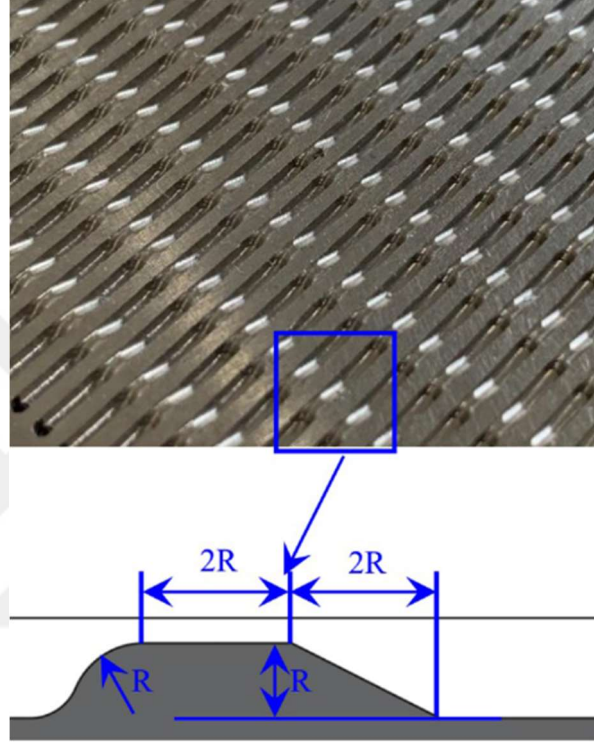
ve dağıtılması hususunda avantaj sağlamaktadır. Metal köpüklerin malzemeleri, birbirine bağlarla bağlanan izotropik gözeneklerden oluşan açık gözenekli bir yapıya sahiptir. Gözenek dizisi, ana malzeme ile aynı özelliklere sahip ancak ağırlığın bir kısmında katı homojen bir matris oluşturmaktadır [129]. Bu alternatif akış alanları çoğunlukla açık bir yapıya sahiptirler, böylece geleneksel rib yapısının dezavantajlarını ortadan kaldırmaktadırlar [38]. Diğer taraftan gözenekli malzemelerin akış alanı olarak kullanılması yaklaşımı özellikle sıvı suyun tahliye edilmesi ve düşük basınç düşümü konularında araştırmacılar tarafından avantajlı olarak görülmektedir [32,39]. Bu tasarımlarda, açık gözenekli metal köpük malzemeler kullanılmakta ve bunlarında çeşitli çalışmalarda üç-boyutlu olarak modellenmesi yapılarak akış alanları simüle edilmektedir. Şekil 3.7’ de literatürde açık gözenekli metal köpüklerin akış alanı olarak kullanıldığı bazı çalışmalar gösterilmektedir.



Şekil 3.7. PEMFC’lerde açık gözenekli metal köpük uygulamaları [39,130–133].

Bipolar plakaların geliştirilmesi ve hücrenin birim alanlarından daha fazla akım yoğunluğu sağlamak amacıyla yapılan diğer bir yaklaşım ise akış kanalları üzerine çeşitli biçimlerde engellerin yerleştirilmesidir. Bu yaklaşımla, akış kanalında akmakta olan reaktantların bir kısmının belli aralıklarla GDL içerisine zorunlu olarak yönlendirilmesi sağlanmaktadır. GDL bölgesine ek olarak yönlendirilen reaktantların bu bölgede konsantrasyonlarının artışı sağlanmaktadır [41,42]. Bu durum ayrıca "under-rib path" olarak adlandırılan rib altı gaz difüzyon bölgesine yönelen reaktantların akış hızı artmakta ve katalizör bölgesinde oluşan "sürüklenme", "yapışma" ve "viskoz" kuvvetlerinin etkileri altındaki sıvı suyu kanala doğru süpürülmesini sağlamaktadır [48,134]. Bu şekilde hücrede oluşan suyun tahliye edilmesi kolaylaşmaktadır [31]. Blokajlar, zorlanmış konveksiyon ısı ve kütle transferini dengelemek için pasif bir kontrol tekniği olarak ifade edilmiştir

[135]. Literatürde, kanala yerleştirilen blokların, reaksiyon alanındaki oksijen içeriğini arttırdığı, rib altı konveksiyonu arttırdığı ve katalizör katmanındaki elektrokimyasal reaksiyon kinetiğini iyileştirdiği belirtilmiştir [136,137]. bu nedenle bu yöntem hücre performansını %5-30'a kadar artırabilir. Şekil 3.8' de akış kanalına yerleştirilmiş bir engel geometrisi ve bu engel modeli ile üretilmiş bipolar plaka gösterilmektedir.



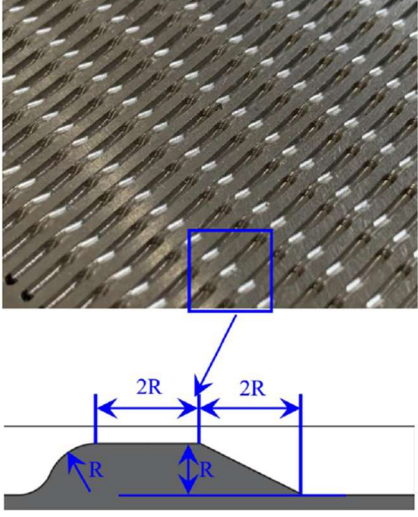
**Şekil 3.8.** Akış kanalına yerleştirilmiş bir engel geometrisi ve bu engel modeli ile üretilmiş bipolar plaka [138].

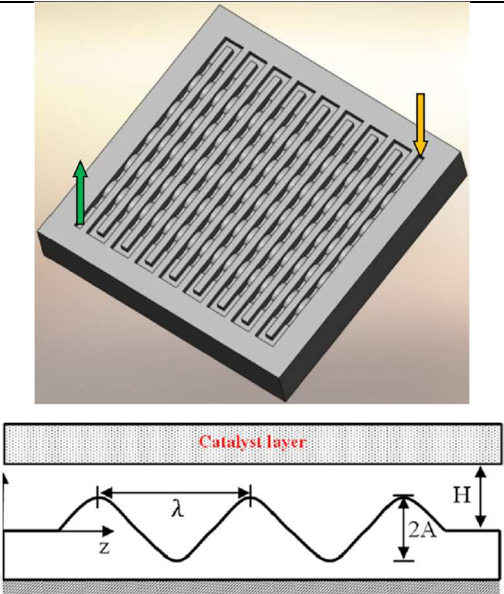
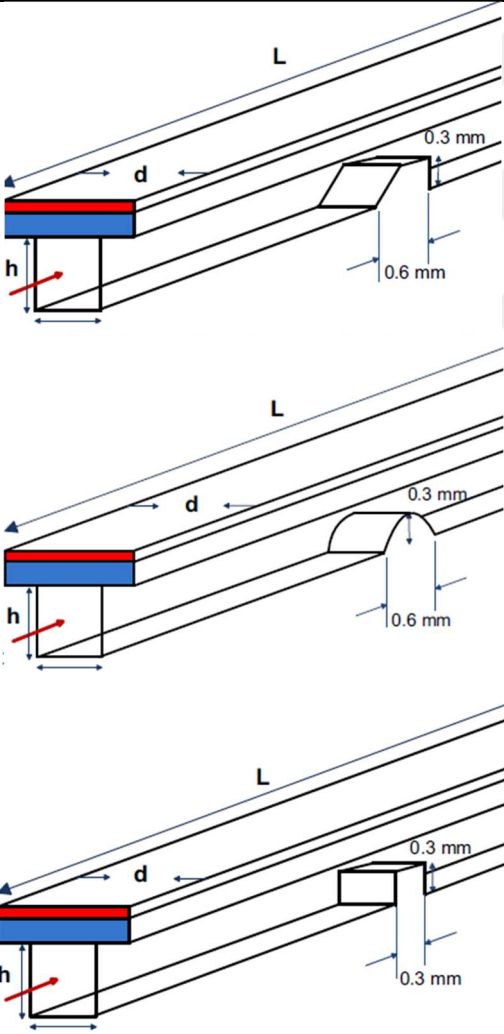
Literatürdeki çalışmalarda, akış kanalları üzerine yerleştirilen engellerin hücrenin elektriksel performansını ve su yönetimini iyileştirdiği bildirilmiştir [47]. Bu avantajlarının yanında, birçok çalışmada ifade edildiği üzere engel yerleştirilen modellerin yüksek basınç düşümüne neden olduğu, diğer bir ifade ile pompalama kayıplarını arttırdığı bildirilmektedir [48,134]. Engelli tasarımlar genel olarak değerlendirildiğinde, hücrenin güç yoğunluğunu, pompalama kayıplarının oluşturduğu parazit güç kaybından daha fazla arttırdığı için bu dezavantajına rağmen ümit vadetmektedir. Literatürdeki çalışmalarda kanala yerleştirilen engel şekilleri, yükseklikleri, sayıları ve konumları üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, hücredeki basınç düşüm değerleri ve net güç değerleri dikkate alınarak, en verimli BP modelinin belirlenmesine çalışılmıştır.

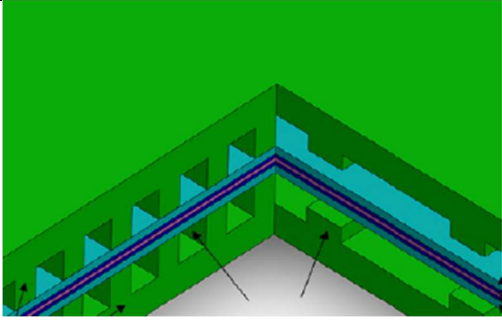
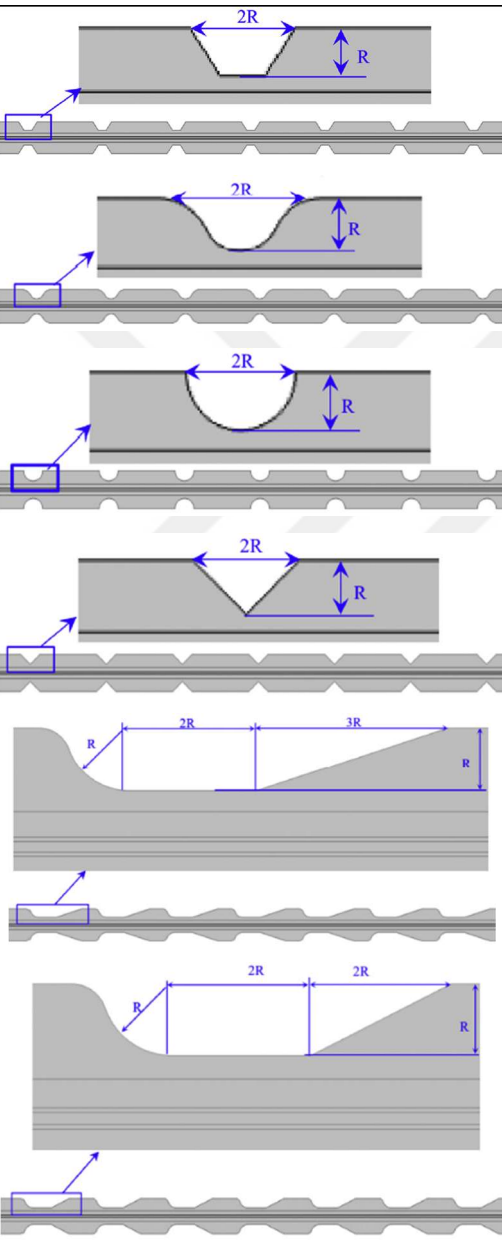
#### 4. LİTERATÜRDE BİPOLAR PLAKALAR ÜZERİNE YAPILAN ENGEL UYGULAMALARI

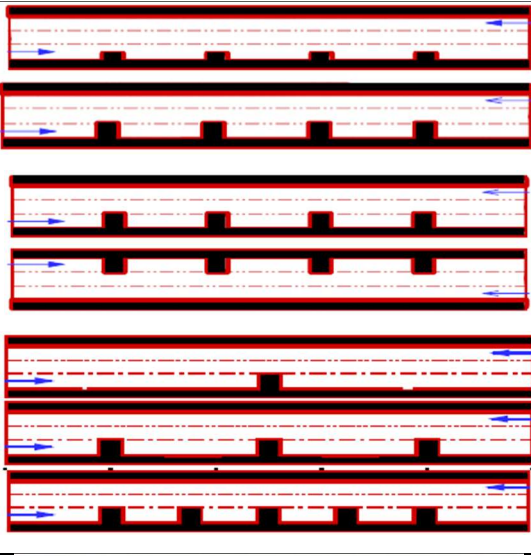
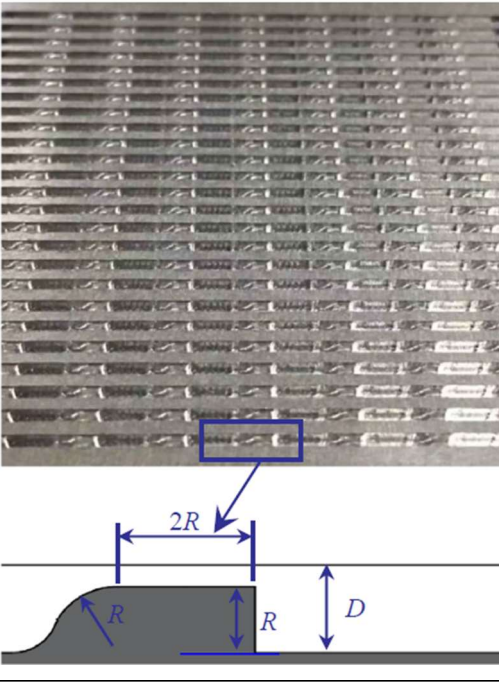
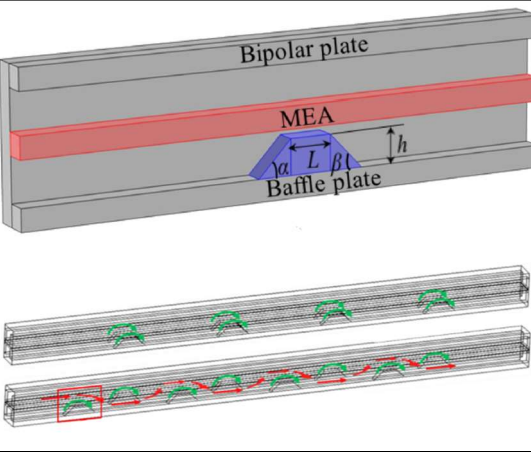
Yakıt hücrelerinin verimini ve net güç çıkışını arttırmak ve su yönetimini iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmaların başında akış kanalları üzerine yerleştirilen blok/engel uygulamaları gelmektedir. Bu amaçla literatürde birçok çalışma yapılmış olup, çalışmaların birçoğu kanala yerleştirilen engelin biçimi, sayısı, yüksekliği, uzunluğu, sıklığı ve konumu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların büyük bir kısmı sadece düz bir kanal yapısına sahip tek hücreli bir yakıt pili yapısında, ANSYS ve COMSOL gibi analiz programlarında modellenerek analiz edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar arasında sayılı çalışmada tam plaka yapısında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda dikkat çeken diğer bir husus ise engel/blok şeklinin sınırlı biçimlerde olmasıdır. Bazı nümerik çalışmalarda ise engel şekilleri, gerçek koşullarda üretimi zor geometrik şekillerde tasarlandığı görülmüştür. Genel olarak literatür değerlendirildiğinde, akış alanları üzerine yerleştirilen engellerin, hücrenin akım ve güç yoğunluğunu arttırdığı ve su yönetimini iyileştirdiği ifade edilmiştir. Buna karşın, çalışmaların hemen hemen hepsinde basınç düşüm değerlerinin artış gösterdiği bildirilmiştir. Literatürdeki bilgiler ışığında, kanallara yerleştirilen engel/blokların fiziksel ve konum olarak optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Tablo 4.1’de literatürde bipolar plakalar üzerine engel/blokların yerleştirilmesi ile yapılan çalışmalar verilmektedir.

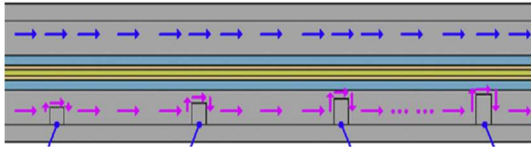
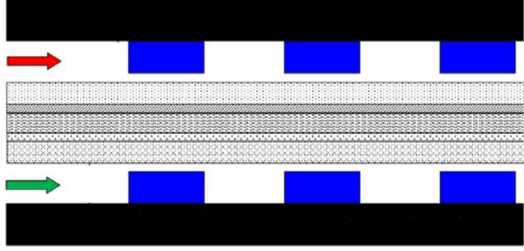
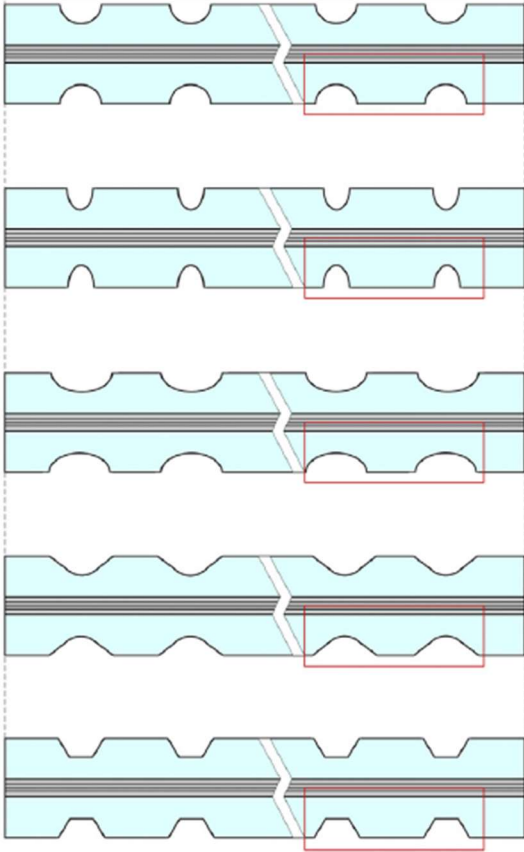
**Tablo 4.1.** Literatürdeki BPP’ler üzerine yapılan engel çalışmaları.

Şekil	Optimizasyon parametresi	Hücrenin aktif alanı	Hücresel değişimler	Tam plaka ya da tek	Net güç değişimi	Referans
	Engel şekli	25 cm <sup>2</sup>	Basınç düşümünde artış,	Tam plaka	↑ %10 < W < %60	[138]

	Engel uzunluğu ( $\lambda$ )	0,75 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	↑ %7.94 < W < %29.17	[139]
	Engel şekli ve konumu	1,2 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	↑ %0.05 < W < %3.11	[42]

	Engel aralığı/ engel sayısı	25 cm <sup>2</sup>	Kütle transferinde iyileşme, Basınç düşümünde artış,	Tam plaka	.	[46]
	Engel şekli ve ölçüleri	1 cm <sup>2</sup>	Hücre akım yoğunluğunda artış,	Tek kanal	.	[140]

	Engel sayısı / yüksekliği / anot katot	0,4 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	<p style="text-align: center;">↑ %0 &lt; W &lt; %30</p>	[44]
	Engel şekli	25 cm <sup>2</sup>	Hücre akım yoğunluğunda artış,	Tam plaka	-	[48]
	Engel şekli ve engel konumlandırılması	26,95 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	<p style="text-align: center;">↑ %2,54 &lt; W &lt; %6,39</p>	[47]

	Engel boyutu ve ölçüsü	2 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	↑ %0 < W < %10,9	[49]
	Engel sayısı	0,45 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	↑ %0 < W < %8,5	[141]
	Engel şekli ve boyutu	0,5 cm <sup>2</sup>	Hücre net gücünde artış, Basınç düşümünde artış	Tek kanal	↑ %0 < W < %16,83	[41]

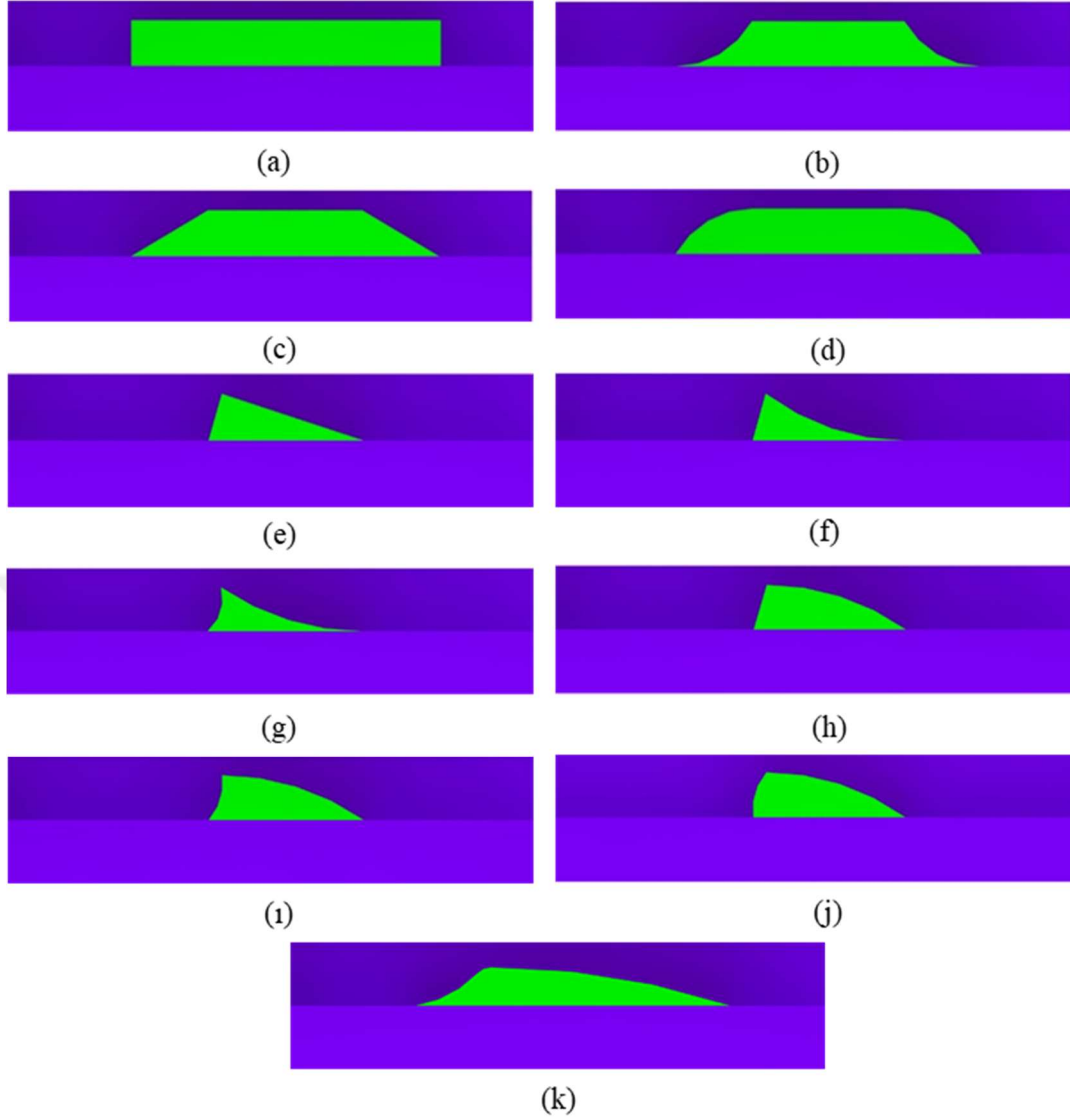
## 5. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışması temel olarak yakıt pili bileşenlerinden BPP'lerin daha yüksek akım yoğunluğu sağlayacak şekilde geliştirilmesini konu almaktadır. Bu amaçla, BPP'lerde bulunan akış kanalları üzerine, geometrik şekil, ölçüt, sayı ve konum olarak farklı varyasyonlarda engeller yerleştirilerek, hücrenin akım yoğunluğu değerlerinin artırılması hedeflenmiştir. Engel varyasyonları, literatürde ve ticari olarak kabul görmüş tekli serpantin akış alanı tasarımı üzerinde uygulanmıştır. Bu tez çalışması, temel olarak iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada, tasarlanan modellerin CFD metodu ile analizleri yapılmıştır. Bu aşamada öncelikli olarak kanala yerleştirilecek engellerin geometrik şekilleri üzerinde varyasyonlar yapılarak, yakıt hücresinde en yüksek net gücü sağlayan engelin geometrik şekli belirlenmiştir. Ardından sırasıyla ölçüt, sayı ve konum varyasyonları gerçekleştirilmiştir. CFD metodu ile gerçekleştirilen bu analizler sırasında yakıt hücresinin en yüksek net güç çıkışı sağlayan engel biçimleri belirlenirken aynı zamanda hücredeki reaktant kütle fraksiyonu, basınç, sıcaklık ve reaksiyon ısı dağılımı görüntüleri de incelenmiştir. Nihai olarak, analizler sonucu hücrede birim alan başına en yüksek net güç yoğunluğu ( $W/cm^2$ ) sağlayan, geometrik şekil, ölçüt, sayı ve konum olarak optimize edilmiş engellere sahip BPP tasarımı geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasının ikinci aşamasında ise optimize edilmiş engellere sahip BPP ve deneysel olarak karşılaştırmak için standart tekli serpantin tasarımına sahip BPP'ler üretilmiştir. Üretilen BPP'ler, tek hücreli bir yakıt pili yapısı oluşturmak için montaj edilmiştir. Ardından geliştirilmiş BPP akış alanına sahip yakıt pili ile standart serpantin tasarımına sahip yakıt pili aynı koşullarda deneysel olarak test edilmiş ve akım/gerilim (I-V) eğrileri elde edilmiştir.

### 5.1. Engel Varyasyonları

- **Engellerin Şekil Varyasyonları**

Tez çalışmasının ilk aşamasında öncelikle akış kanallarına yerleştirilecek engellerin şekilsel olarak tasarımları eskiz olarak çizilmiş daha sonra üç boyutlu olarak CATIA programında modellenmesi yapılmıştır. Engel şekilleri tasarlanırken, akışa karşı direnç oluşturmama, reaktantları gaz difüzyon bölgesine kolay yönlendirebilme, basınç düşümü, su tahliyesi ve üretilebilirlik konuları dikkate alınmıştır. Bu kısıtlara uygun olarak, toplamda 11 adet engel şekli tasarlanmıştır. Modellenen engel şekilleri Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Daha sonra bu şekilleri ANSYS Fluent programında analiz edilmiş (tasarlanan engel şekilleri, serpantin akış alanı üzerinde analiz edilmiştir) ve bu engel şekilleri arasında daha yüksek net güç çıkışı sağlayan engel şekli bir sonraki varyasyon için kabul edilmiştir.



**Şekil 5.1.** Engel şekil varyasyonları, dikdörtgen (a), iç bükey ikizkenar yamuk (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), üçgen (e), iç bükey üçgen (f), iki kenarlı iç bükey üçgen (g), bir kenar dış bükey üçgen (h), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (i), iki kenarlı dış bükey üçgen (j), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (k).

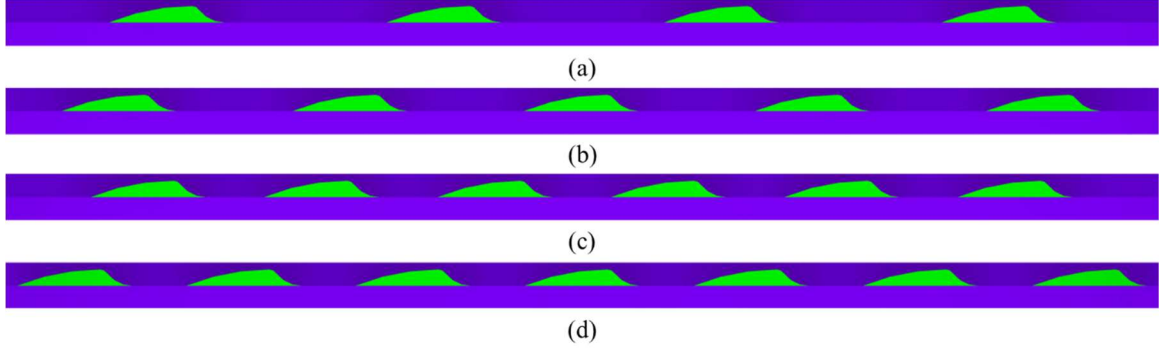
Şekil varyasyonları, yakıt hücresinin sadece katot plakasında olacak şekilde modellemeler yapılmış ve analiz edilmiştir. Şekil varyasyonu sırasında ayrıca, katot plakasında bulunan engel sayısı (7) ve engel yükseklikleri (0,7 mm) sabit olarak alınmıştır. Buna ek olarak üçgen şekil varyasyonlarında, üçgen şeklinin daha dik olan kısmı akış yönüne ters bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Engel şekilleri modellenirken, uzunluk olarak iki farklı ölçü (2,5 ve 5 mm) kullanılmıştır. Şekil 5.1'deki engel şekillerinin geometrik ölçüleri Tablo 5.1'de verilmektedir.

**Tablo 5.1.** Yakıt pili türlerinin özellikleri [52,60].

Engel Adı	Yükseklik (mm)	Uzunluk (mm)
Dikdörtgen	0,7	5
İç bükey ikizkenar yamuk	0,7	5
İkizkenar yamuk	0,7	5
Dış bükey ikizkenar yamuk	0,7	5
Üçgen	0,7	2,5
İç bükey üçgen	0,7	2,5
İki kenarlı iç bükey üçgen	0,7	2,5
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm	0,7	2,5
Bir kenar dış bükey üçgen	0,7	2,5
İki kenarlı dış bükey üçgen	0,7	2,5
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm	0,7	5

- **Engellerin Sayı Varyasyonları**

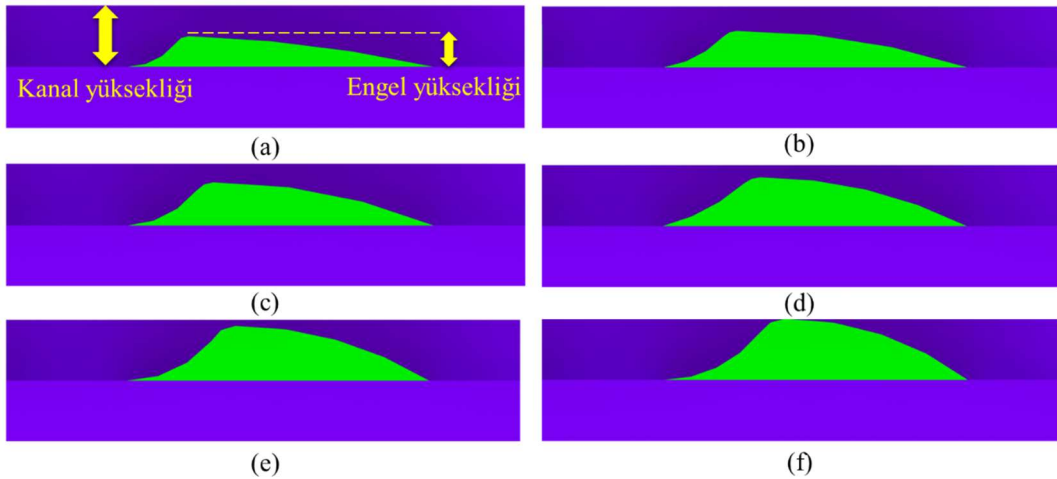
Akış kanalına yerleştirilecek engelin şekilsel olarak belirlenmesinin ardından, akış plakasında bulunan her bir kanala yerleştirilecek engel sayısının belirlenmesi için engel sayılarında farklı varyasyonlar yapılmıştır. Bu aşamadan önceki şekil varyasyonu sırasındaki analizlerde engel sayısı yedi adet olarak belirlenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ise analizler dört farklı engel sayısı belirlenerek yapılmıştır. Buradaki engel sayısı, akış plakasındaki her bir yatay kanala yerleştirilen engel sayısını ifade etmektedir. Akış alanı olarak kullanılan serpantin her bir yatay kanalına, dört, beş, altı ve yedi sayılarında engel yerleştirilmiştir. Şekil 5.2’de her bir yatay kanala yerleştirilen engellerin sayısal olarak yerleşimleri gösterilmektedir. Bir önceki aşamadaki gibi, kanala yerleştirilen engelin daha dik olan yüzeyi, akış yönünün tersine bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Engel sayı varyasyonları, yakıt hücresinin sadece katot plakasında olacak şekilde modellenmeler yapılmış ve analiz edilmiştir. Sayı varyasyonu sırasında ayrıca, katot plakasında bulunan engel şekli (Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm) ve engel yükseklikleri (0,7 mm) sabit olarak alınmıştır. Bu aşamada da hücrenin basınç düşümü ve güç yoğunluğu değerleri dikkate alınarak, hücrenin birim aktif alandan ürettiği maksimum net güç değeri tespit edilmiştir. Nihai olarak, en yüksek net güç çıktısı sağlayan engel sayısı belirlenerek bir sonraki engel varyasyonunda sabit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.2. Engel sayısı varyasyonları, dört (a), beş (b), altı (c) ve yedi (d) adet engel yerleşimleri.

- **Engellerin Yükseklik Varyasyonu**

Akış kanallarına yerleştirilecek engelin, en yüksek net güç sağlayacak şekilde tespiti için altı farklı engel yüksekliği analiz edilmiştir. Bu optimizasyon aşamasında, engel yüksekliğinin kanal yüksekliğine oranı olarak kabul edilen altı farklı oran (0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kanal yüksekliği (derinliği) sabit olup 1 mm' dir. Diğer bir ifade ile engel yükseklikleri 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 mm olarak kullanılmıştır. Bu aşamada özellikle basınç düşüm değerlerine de dikkat edilmiştir. Daha önceki şekilde ve sayı varyasyonlarında sabit kabul edilen engel şekli ve sayısında, sadece katot plakasında engel olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3' de engel yüksekliği varyasyonunda analiz edilen engel biçimleri gösterilmektedir. Analizler serpentine akış alanı deseni üzerinde gerçekleştirilmiştir. Nihai olarak, en yüksek net güç çıktısı sağlayan engel yüksekliği belirlenerek bir sonraki varyasyona geçilmiştir.



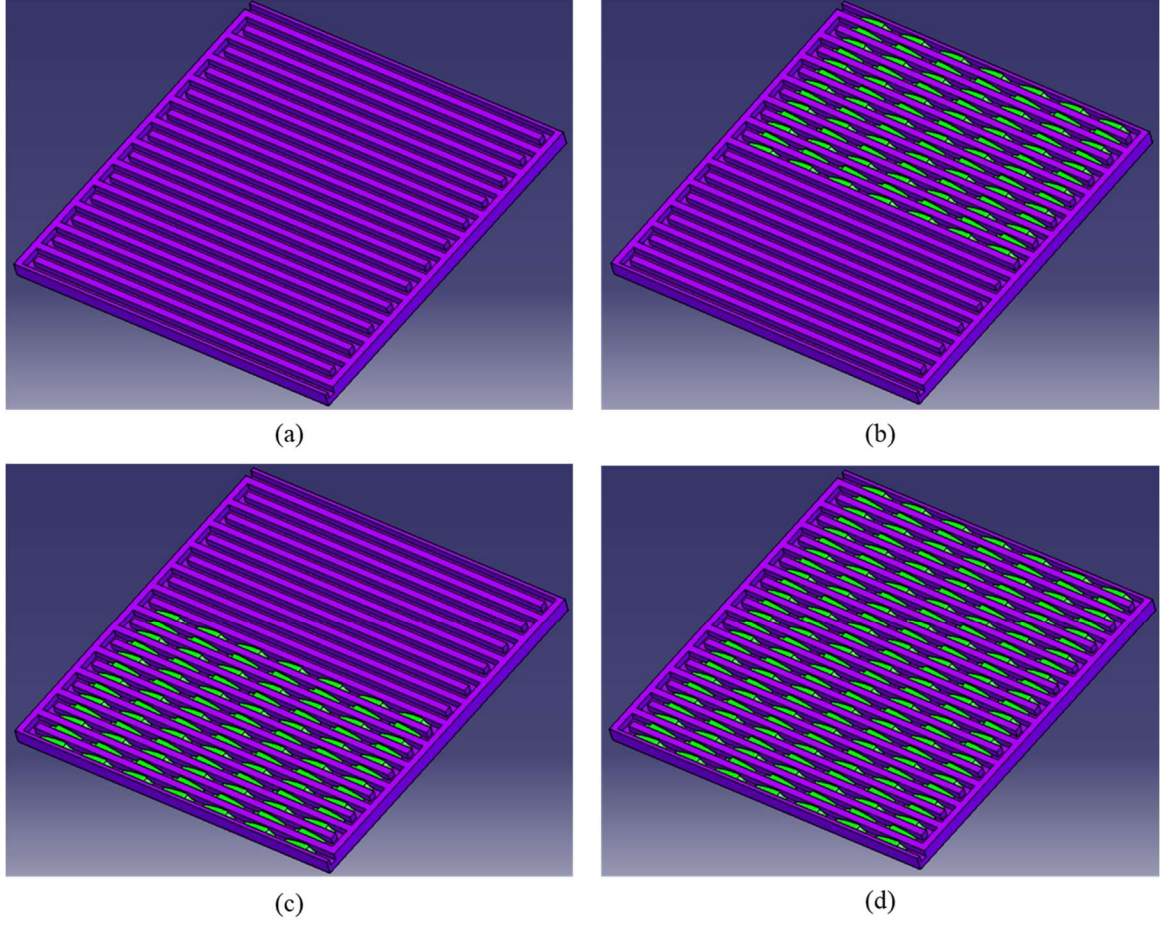
Şekil 5.3. Engel yükseklik varyasyonları, 0.5 mm (a), 0.6 mm (b), 0.7 mm (c), 0.8 mm (d), 0.9 mm (e), 1 mm (f).

- **Engellerin Konum Varyasyonu**

Engellerin şekil, sayı ve yükseklik varyasyonlarının analiz edilmesinden sonra, hücre içerisinde akış kanallarına yerleştirilecek bu engellerin konum varyasyonlarına geçilmiştir. Konum varyasyonları, anot ve katot plaklarında akış kanalının hangi bölgesine engel yerleştirilmesinin daha fazla net güç çıkışına neden olduğunun belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Tablo 5.2’de engellerin hücredeki konumları verilmektedir. Engel konumları belirlenirken, "tam plaka" veya "yarı plaka" ifadeleri kullanılmıştır. Burada "tam plaka" ifadesi ile engellerin anot ve/veya katot plakasının bütün kanallarında engel konumlandırılmış anlamına gelmektedir. Diğer taraftan "yarı plaka" ifadesi ile anot ve/veya katot plakasındaki kanalların yarısı engeller konumlandırılmış anlamına gelmektedir. Üst ya da alt yarı olarak tabir edilen konum ise plakanın en üstte/en altta bulunan akış kanalı ile plakanın ortasında bulunan kanal arasında bulunan bölgedir. Konum analizleri sırasında, daha önceki varyasyonlarda belirlenen ve en yüksek güç çıkışı sağlayan engel şekli, tek bir yatay kanaldaki engel sayısı ve engel yükseklikleri sabit kabul edilmiştir. Akış alanı deseni olarak önceki varyasyonlardaki gibi serpantin tasarımı kullanılmıştır. Şekil 5.4’de engel konumlarının üç boyutlu olarak gösterimi verilmektedir.

**Tablo 5.2.** Engel konumları.

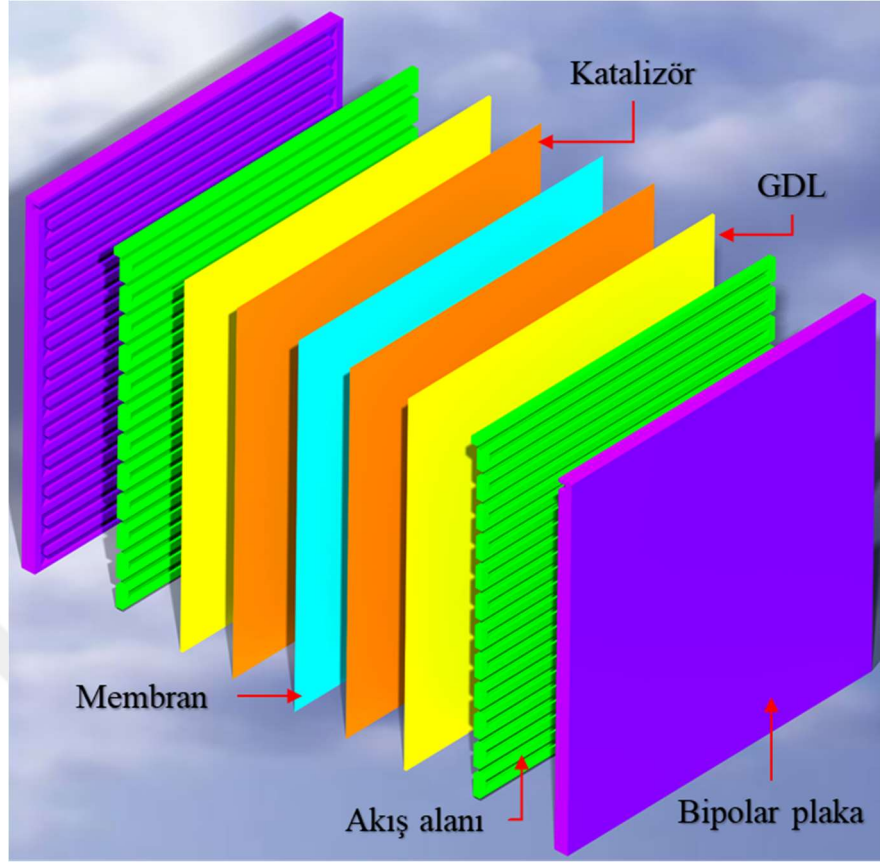
Konum Adı	Anot Tam Plaka	Katot Tam Plaka	Anot Alt Yarı	Katot Alt Yarı	Anot Üst Yarı	Katot Üst Yarı
Serpantin (boş)						
Her iki tam plakada da engel mevcut	X	X				
Sadece anot plakasında engel mevcut	X					
Sadece katot plakasında engel mevcut		X				
Sadece anot plakasının alt yarısında engel mevcut			X			
Sadece katot plakasının alt yarısında engel mevcut				X		
Sadece anot plakasının üst yarısında engel mevcut					X	
Sadece katot plakasının üst yarısında engel mevcut						X
Her iki plakanın sadece üst yarısında engel mevcut					X	X
Her iki plakanın sadece alt yarısında engel mevcut			X	X		



**Şekil 5.4.** Engel konum varyasyonları, boş plaka (a), plaka üst yarı engel konumlandırması (b), plaka alt yarı engel konumlandırması (c), tam plaka engel konumlandırması (d).

## 5.2. Yakıt Hücresinin Modellenmesi ve Analizi

Tez çalışması kapsamında analiz edilecek engellere sahip yakıt hücresinin modellemeleri üç boyutlu olarak CATIA programında yapılmıştır. Üç boyutlu olarak, belirlenen aktif alan ölçüsünde yakıt hücresi modellenmiştir. Hücre modellenirken, anot ve katot tarafları olmak üzere, bipolar plaka, gaz difüzyon tabakası ve katalizör olarak modellenmiş, anot ve katot taraflarının tam ortasında ise membran modellenmiştir. Şekil 5.5’de CATIA programında modellenmiş bir yakıt hücresi elemanları ile gösterilmektedir. Çalışma kapsamında standart olarak serpantin akış alanı tipi kullanılmış, bütün engel varyasyonları bu akış alanı üzerine uygulanmıştır. Modellenen hücrenin aktif alanı  $25 \text{ cm}^2$  ( $50 \times 50 \text{ mm}$ ) olacak şekilde modellenmiştir. Akış kanalının ölçüleri bütün engel varyasyonlarında sabit olup,  $1 \text{ mm}$  derinlik ve  $1 \text{ mm}$  genişlik ölçülerinde modellenmiştir. Tablo 5.3’ de modellenen yakıt hücresinin geometrik ölçüleri verilmektedir.



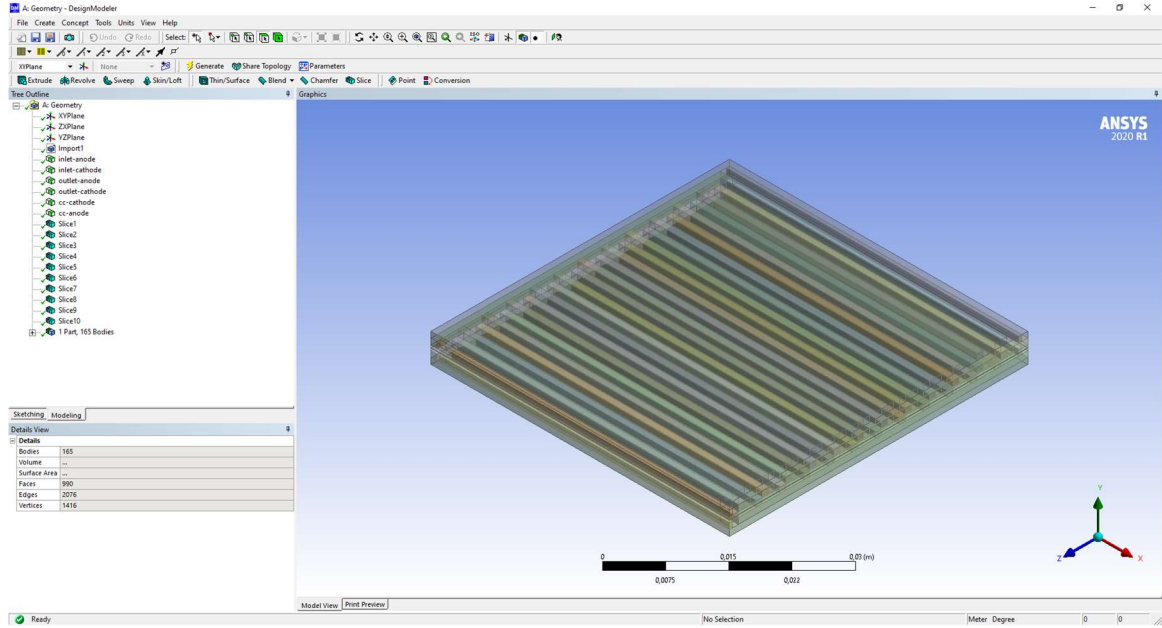
Şekil 5.5. Yakıt hücresinin CATIA programında modellenmesi ve bileşenleri.

Tablo 5.3. Modellenen yakıt hücresinin geometrik ölçüleri.

Parametre	Değer	Birim
Aktif yüzey alanı	25	cm <sup>2</sup>
Kanal derinliği	1	mm
Kanal genişliği	1	mm
Membran kalınlığı	0,051	mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0,025	mm
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0,365	mm
Bipolar plaka taban kalınlığı	2	mm

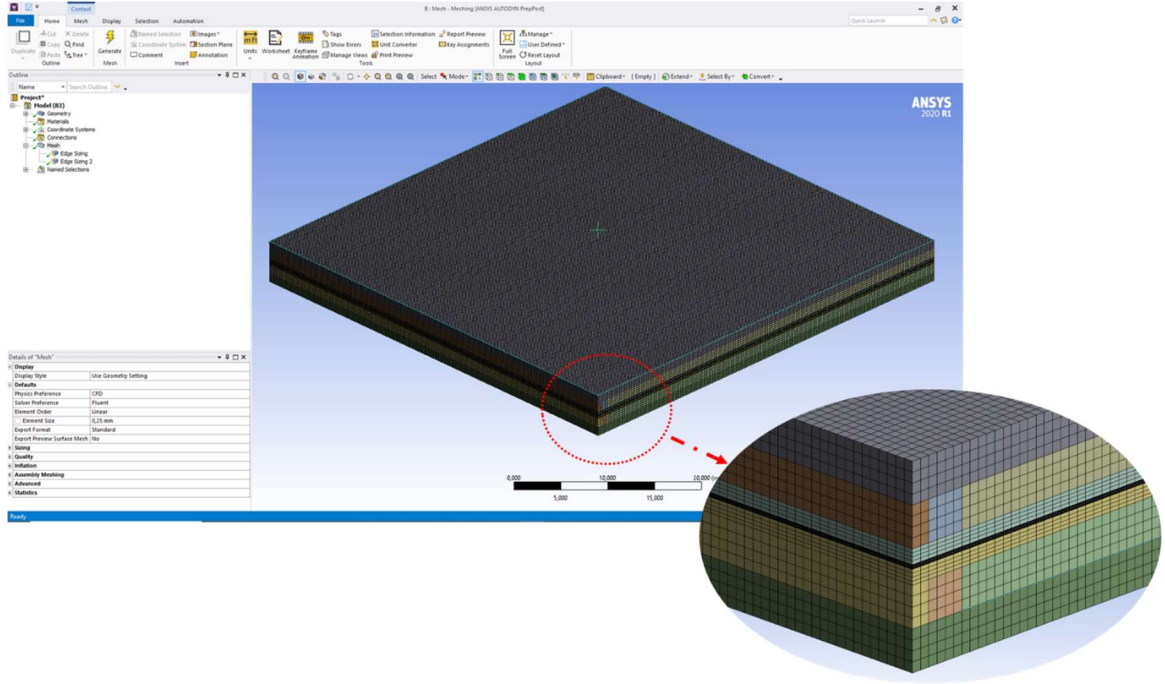
Üç boyutlu olarak katı modeli çizilen yakıt hücrelerinin analiz ortamına aktarılabilmesi için öncelikli olarak CATIA programında stp. uzantılı olarak kaydedilmiş ve analiz programındaki uygulamaya geçilmiştir. Bu tez çalışmasında, literatürde yakıt hücrelerinin simülasyonları, akışkanların analizleri ve farklı koşullar altında davranışları için sıkça kullanılan ANSYS paket programı kullanılmıştır. Yakıt hücrelerinin analizleri CFD (hesaplama akışkanlar dinamiği) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. ANSYS programında, "Geometry" sekmesi kullanılarak öncelikle yakıt hücresinin reaktant giriş ve çıkış portları, akım toplama bölgelerinin tanımlamaları "Design

Modeler” kısmında yapılmıştır. Daha sonra yine aynı modülde, mesh işlemini daha kolay ve düzgün yapabilmesi için yakıt hücresinin bazı parçaları daha küçük parçalara bölünmüş daha sonra ise bütün parçalar tek bir “part” olacak şekilde birleştirilmiştir. Şekil 5.6’de “Design Modeler” ekranı gösterilmektedir. Tek “part” olarak düzenlenen yakıt hücresi parçalarının bir kısmı akışkan, bir kısmı ise katı madde formunda tanımlanmıştır. Burada, GDL, katalizör, membran ve akış kanalları akışkan formunda, bipolar plaka ve parçaları katı olarak tanımlanmıştır.



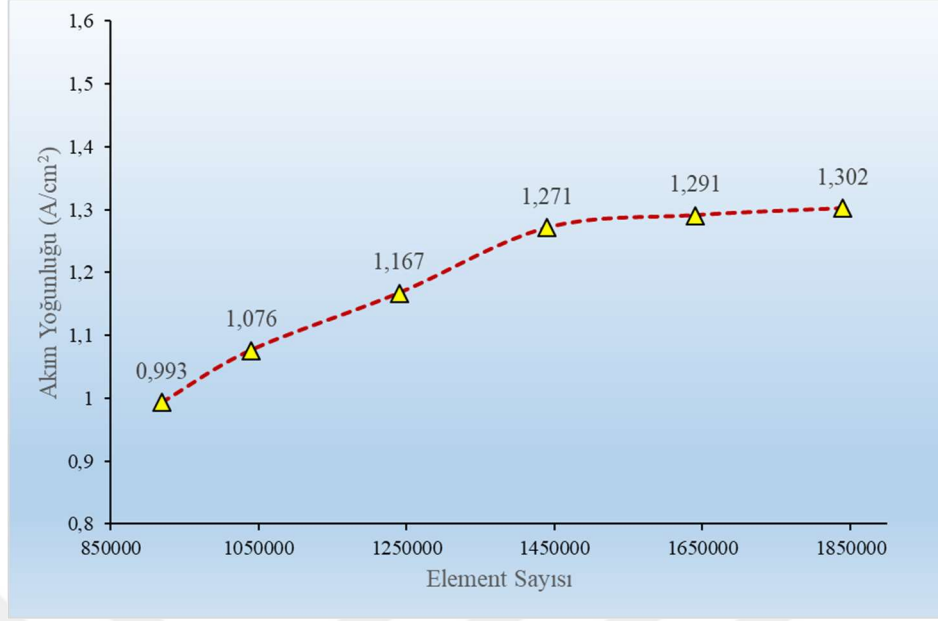
Şekil 5.6. ANSYS “Design Modeler” ekranı.

Yakıt hücresinin geometrik tanımlamaları yapıldıktan sonra, “mesh” işlemine geçilmiştir. Mesh işlemi, ANSYS programında yapılacak analiz işlemlerinin en kritik aşaması olarak kabul edilmektedir. Mesh kalitesi, sayısal analizin sonuçlarını, analiz süresini ve yakınsama oranını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, mesh kalitesinin bir göstergesi olan “orthogonal quality” ve “skewness” değerleri dikkate alınmıştır. Burada ortalama “orthogonal quality” değerlerinin 0.9 - 1 aralığında olmasına ve ortalama “skewness” değerlerinin ise 0 - 0.25 aralığında olmasına dikkat edilmiştir. Bu değerler özellikle engel bulunan modellerde daha fazla önem kazanmıştır. Mesh işlemi sırasında dikkat edilen diğer bir parametre ise element sayısıdır. Element sayısının az olması, analiz sonuçlarının yakınsama oranını düşürürken, fazla olması ise gereksiz yere analiz süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, “grid independence” analizi de yapılmıştır. Mesh işlemi sırasında, “element size” parametresi 0.25 mm olarak belirlenmiştir. Burada, element ebatı, elde edilecek element sayısı, bilgisayarın hesaplama gücü ve analiz süresi gibi parametreler dikkate alınarak karar verilmiştir. Şekil 5.7’de mesh işlemi yapılmış engel bulunmayan yakıt pili modeli gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Mesh işlemi yapılmış engel bulunmayan yakıt pili modeli.

Şekil 5.7’de bulunan yakıt pilinde engel bulunmaması nedeniyle, hücrenin sahip olduğu parçalar 0.25 mm ölçüsüne tam olarak bölünebildiği için, tam olarak düzgün altıyüzlü (hexahedron) forma ulaşabilmiştir. 0.25 mm arıtt ölçüsünde ve düzgün altıyüzlü formunda mesh işlemi yapılmasının ardından, membran, anot ve katot katalizör ve GDL katmanları farklı sayılarda katmanlara bölünerek element sayısı ve akım yoğunluğu değerleri arasındaki ilişkiyi veren "grid independence" analizi yapılmıştır. Şekil 5.8’de ağ (mesh) bağımsızlığı grafiği gösterilmektedir. Ağ bağımsızlığı analizi yapılırken, farklı element sayılarına sahip meshlerin hücrenin akım yoğunluğu (aynı çalışma koşullarda) üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu çalışmada altı farklı sayıda element sayısına sahip model karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç ihtiyaç duyulan en düşük element sayısını belirleyerek analiz süresini kısaltmaktır. Tablo 5.4’de mesh bağımsızlığı değerleri sayısal olarak verilmektedir. Tablo 5.4’de, 1’den 6’ya kadar meshler isimlendirilmiştir. Burada 1. Mesh membran, katalizörler ve GDL’leri (anot ve katot dahil) tek parça halinde analiz edildiği modeli ifade etmektedir. 6. Mesh ise membran, katalizörler ve GDL’lerin (anot ve katot dahil) altı parçaya bölüldüğü modeli ifade etmektedir. Ayrıca, ağ bağımsızlığı analizi 0.4V hücre geriliminde gerçekleştirilmiştir.

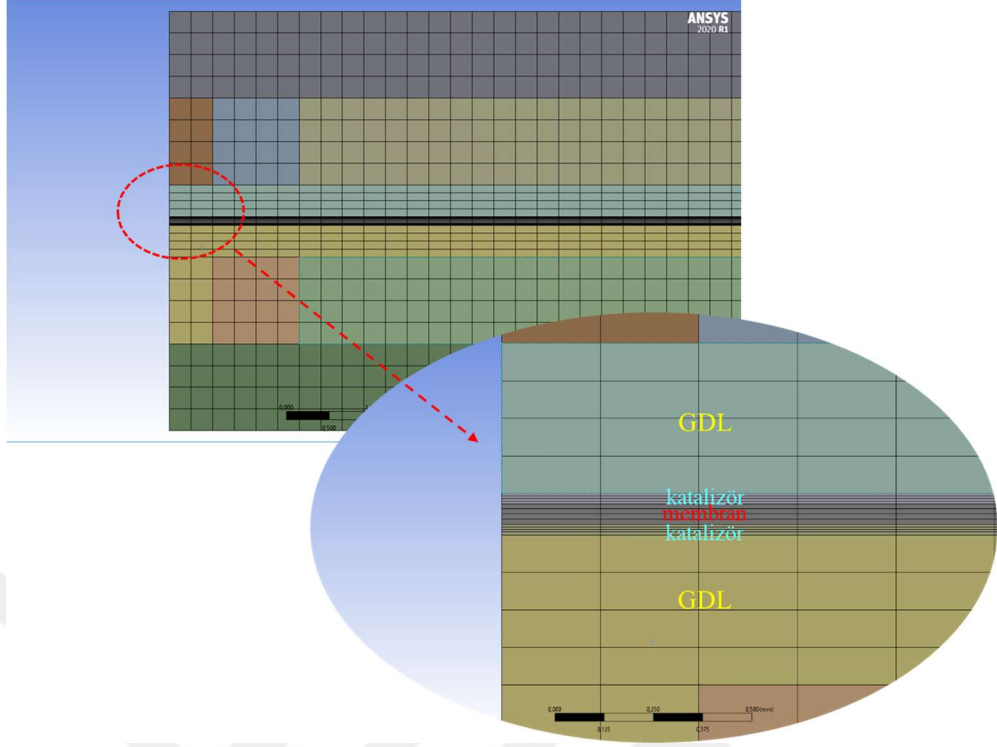


Şekil 5.8. Ağ (mesh) bağımsızlığı grafiği.

Tablo 5.4. Mesh bağımsızlığı.

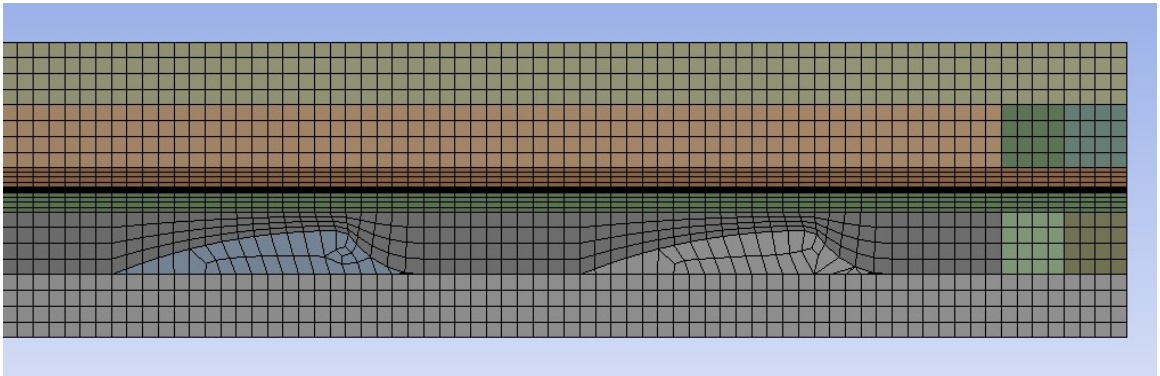
	1. Mesh	2. Mesh	3. Mesh	4. Mesh	5. Mesh	6. Mesh
Element sayısı	920.000	1.040.000	1.240.000	1.440.000	1.640.000	1.840.000
Ortogonal kalite (ortalama)	1	1	1	1	1	1
Çarpım (Skewness)	0	0	0	0	0	0
Akım yoğunluğu (A/cm <sup>2</sup> )	0,993	1,076	1,167	1,271	1,291	1,302

Şekil 5.8 ve Tablo 5.4'deki değerler incelendiğinde 4. Mesh' den sonra akım yoğunluğu değerlerinin yatay olarak değiştiği görülmektedir. Bu sebeple, en yüksek yakınsama ve en düşük analiz süresinin elde edilmesi için 4. Mesh tipi bu tez çalışmasında diğer analizler için kabul edilmiştir. Başka bir ifade ile membran, katalizörler ve GDL'lerin (anot ve katot dahil) dört parçaya bölündüğü ağ modeli kabul edilmiştir. Şekil 5.9'da, MEA ve GDL bölgeleri 4 eş parçaya bölünmüş mesh görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.9. MEA ve GDL bölgeleri 4 eş parçaya bölünmüş hücrenin mesh görüntüsü.

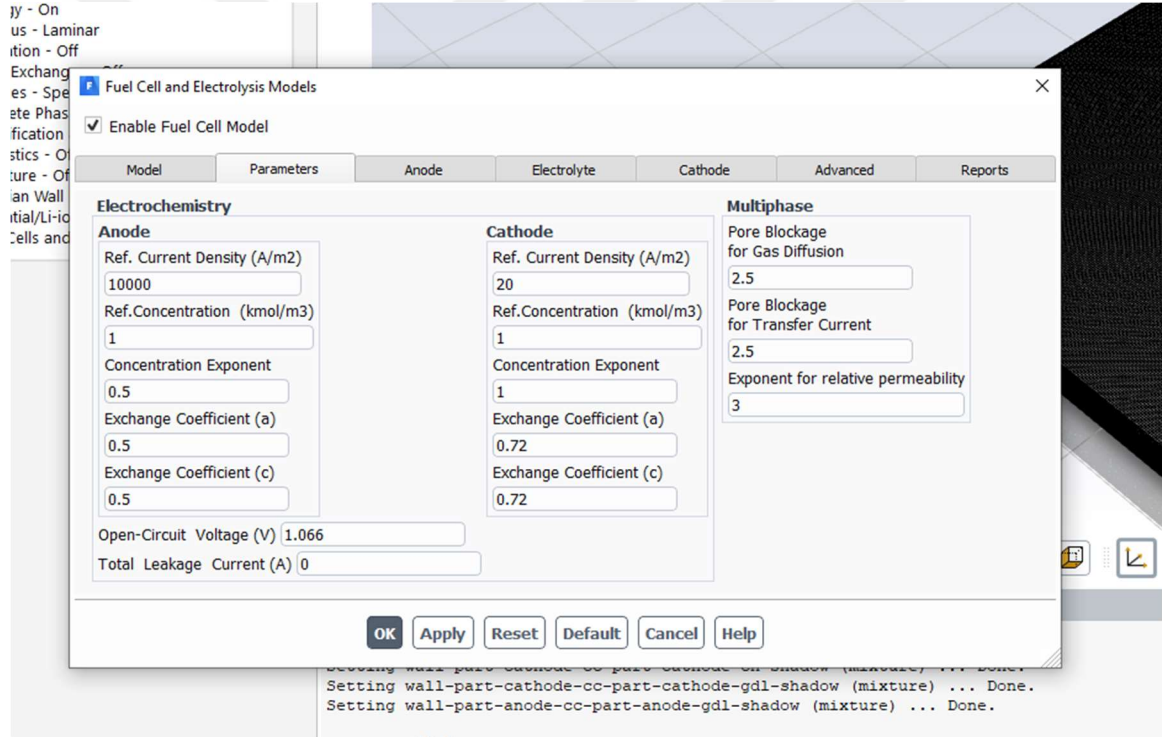
Diğer taraftan akış kanalında engel bulunan yakıt hücresinin modelinde, engel üzerinde bulunan kavisli yapı nedeniyle, yakıt hücresinin her bir hücre elemanı düzgün altıyüzlü yapısına bölünememektedir. Bu sebeple hücrenin bazı bölgeleri düzgün dört yüzlü (tetrahedron) ve diğer geometrik biçimlerden oluşabilmektedir. Şekil 5.10'de engele sahip yakıt hücresinin mesh biçimi gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Akış kanalında engel bulunan yakıt hücresinin mesh işlemi sonucu görüntüsü.

Bu çalışma kapsamında, engele sahip modellerin ortalama "orthogonal quality" değerleri 0.9 - 1 aralığında ve ortalama "skewness" değerlerinin ise 0 - 0.1 aralığında olması sağlanmıştır. Akış kanalına yerleştirilen engelin biçimine göre element sayıları farklılık göstermiştir. Analiz

aşamasında otuzdan fazla yakıt hücresi modeli analiz edilmiş, bu modellerin element sayıları 1.440.000 ile 1.528.000 arasında değişmiştir. Element sayısındaki ve ortogonal kalitedeki farklılığın az olması modeller arasında yapılacak karşılaştırmaların doğruluk oranını arttırmıştır. Mesh işlemi tamamlanan yakıt hücresi modelleri, ANSYS programının Fluent ekranına aktarılarak, yakıt hücresinin hangi sınır şartlarında ve çalışma koşullarında simüle edileceği belirlenmiştir. Fluent ekranında öncelikle "PEM Yakıt Pili Modülü", komut satırına girilen komutlar ile aktif edilmiştir. Daha sonra bu modülde, yakıt hücresinin elektrokimyasal parametrelerinin sayısal değerleri girilmiştir. Bu değerler arasında, membran, katalizör, GDL ve bipolar plakalar gibi elemanların elektriksel iletkenlikleri, anot ve katot için referans akım yoğunlukları, konsantrasyon üsleri, açık devre voltajı, yüzey temas dirençleri, hücrenin aktif alan ölçüsü ve gözeneklilik gibi parametreler mevcuttur. Şekil 5.11'de PEM Yakıt Pili Modülü'ne ait görüntü verilmektedir.



Şekil 5.11. PEM Yakıt Pili Modülü'ne ait görüntü.

PEM Yakıt Pili Modülüne ilgili parametreler girildikten sonra hücrenin malzeme özellikleri "Materials" sekmesinden girilmiştir. Ardından, hücrenin sınır şartlarının tanımlandığı bölüm olan "Boundary Conditions" sekmesinden, hücrenin giriş ve çıkış reaktant debileri, nem oranları, basınç ve sıcaklık değerleri ve hücrenin çalışma gerilimi gibi değişkenler belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında yakıt hücresi 0.9V ile 0.3V arasındaki gerilim değerlerinde simüle edilmiştir. Sınır şartları tanımlandıktan sonra "Solution" ve "Controls" sekmelerinde parametreler girilmiştir. "Solution" kısmında, çözümler için "First Order Upwind" seçilmiştir. Analiz başlatılmadan önce

"Initialization" işlemi yapılmış ve "Calculate" komutu ile analizler başlatılmıştır. Tablo 5.5’de yakıt hücresi analizlerinde kullanılan parametreler verilmektedir.

**Tablo 5.5.** Analizler sırasında kullanılan parametrelerin sayısal değerleri.

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim
Açık devre voltajı, $V_{OC}$	1,066	V	Membran protonik iletim katsayısı, $\beta$	1	-
Anot referans akım yoğunluğu, $j_a^{ref}$	10000	A/m <sup>2</sup>	Membran protonik iletim üssü, $\omega$	1	-
Katot referans akım yoğunluğu, $j_c^{ref}$	20	A/m <sup>2</sup>	Katalizör tabakası gözenekliliği, $\varepsilon_{cat}$	0,6	-
Anot referans mol konsantrasyonu, $[H_2]_{ref}$	1	kmol/m <sup>3</sup>	Gaz difüzyon tabakası gözenekliliği, $\varepsilon_{gd}$	0,6	-
Katot referans mol konsantrasyonu, $[O_2]_{ref}$	1	kmol/m <sup>3</sup>	Reaktan çıkış basıncı, $P$	101325	Pa
Anot konsantrasyon üssü, $\gamma_a$	0,5	-	Reaktan giriş sıcaklığı, $T$	333,15	K
Katot konsantrasyon üssü, $\gamma_c$	1	-	Hidrojen giriş debisi,	0,2	slpm
Anot dönüşüm katsayısı, $\alpha_a$	0.5	-	Hava giriş debisi,	0,6	slpm
Katot dönüşüm katsayısı, $\alpha_c$	0.72	-	Anot nemlilik, $RH_a$	0,4	-
Membran eşdeğer ağırlık, $M_m$	1100	kg/kmol	Katot nemlilik, $RH_c$	0,3	-

Tablo 5.5’ de verilen değerlerde ANSYS Fluent programında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler gerçekleştirilirken bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller temel olarak kütle, momentum, enerji korunum ve transfer denklemleri ile ilgilidir. Analizler kapsamında yapılan kabuller şu şekilde özetlenebilir:

- Reaktant akışının sürekli, stabil ve laminar formda olduğu,
- Yer çekiminin ihmal edildiği,
- Reaktantların gaz formunda olması ve ideal gaz davranışı sergilemesi,
- Faz değişiminin olmadığı,
- Reaktantların giriş sıcaklıkları ve çıkış basınçlarının sabit olduğu,
- Membranın tümüyle nemlendirildiği ve iyonik iletkenliğin sabit olduğu,
- Tüm bileşenlerin homojen yapıda ve izotropik olduğu kabul edilmiştir.

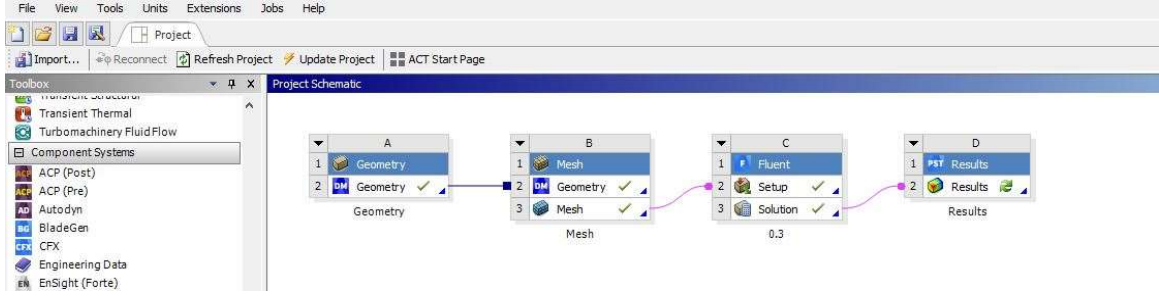
Tablo 5.6’ da PEM yakıt hücresi modülünde çözülen denklemler verilmiştir.

**Tablo 5.6.** PEM yakıt hücresi modülünde çözülen denklemler [142].

Elektron taşınımı	$\nabla \cdot (\sigma_{sol} \nabla \phi_{sol}) + R_{sol} = 0$
	$R_{sol} = \begin{cases} -R_{an} = (\zeta_{an} j_{an}^{ref}) \left( \frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} (e^{\alpha_{an} F \eta_{an} / RT}) \\ R_{cat} = (\zeta_{cat} j_{cat}^{ref}) \left( \frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{cat}} (e^{-\alpha_{cat} F \eta_{cat} / RT}) \end{cases}$
Protonik taşınım	$\nabla \cdot (\sigma_{mem} \nabla \phi_{mem}) + R_{mem} = 0$

	$R_{mem} = \begin{cases} R_{an} = (\zeta_{an} j_{an}^{ref}) \left( \frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} (e^{\alpha_{an} F \eta_{an} / RT}) \\ -R_{cat} = (\zeta_{cat} j_{cat}^{ref}) \left( \frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{cat}} (e^{-\alpha_{cat} F \eta_{cat} / RT}) \end{cases}$
Yerel yüzey aktivasyon kaybı	$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem}$ $\eta_{cat} = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{OC}$
Türlerin hacimsel kaynak terimleri	$S_{H_2} = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} R_{an} < 0$ $S_{O_2} = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} R_{cat} < 0$ $S_{H_2O} = \frac{M_{w,H_2O}}{2F} R_{cat} > 0$
Akımın korunumu	$\int_{anode} R_{an} dV = \int_{cathode} R_{cat} dV$
Termal enerji çözümü	$S_h = h_{react} - R_{an,ctl} \eta_{an,ctl} + I^2 R_{ohm} + h_L$
Sıvı suyun hacimsel oranı	$\frac{\partial(\varepsilon \rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{V}_l s) = r_w$ $r_w = c_r \max \left( \left[ (1-s) \frac{P_{wv} - P_{sat}}{RT} M_{w,H_2O} \right], [-s \rho_l] \right)$
Kapiler basınç	$p_c = \begin{cases} \frac{\sigma \cos \theta_c}{\left( \frac{K}{\varepsilon} \right)^{0,5}} (1,417(1-s) - 2,12(1-s)^2 + 1,263(1-s)^3) & \theta_c < 90^\circ \\ \frac{\sigma \cos \theta_c}{\left( \frac{K}{\varepsilon} \right)^{0,5}} (1,417s - 2,12s^2 + 1,263s^3) & \theta_c > 90^\circ \end{cases}$
Gaz fazı türlerinin difüzyon hızı	$D_i = \varepsilon^{1,5} (1-s)^{r_s} D_i^0 \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\gamma_p} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\gamma_t}$ $D_{eff}^{ij} = \varepsilon^{1,5} D_i^{ij}$
Elektrolit (iyonik) iletkenliği	$\sigma_{mem} = \beta (0,514\lambda - 0,326)^{\omega} e^{1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)}$
Ozmotik sürüklenme katsayısı	$n_d = 2,5 \frac{\lambda}{22}$
Geri difüzyon akısı	$J_w^{diff} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{H_2O} D_l \nabla \lambda$
Membran su difüzyon hızı	$D_l = f(\lambda) e^{\left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)}$
Su içeriği	$\lambda = 0,043 + 17,18\alpha - 39,85\alpha^2 + 36\alpha^3 \quad (\alpha < 1)$ $\lambda = 14 + 1,4(\alpha - 1) \quad (\alpha > 1)$
	$\alpha = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s$

ANSYS Fluent’de gerçekleştirilen analizler sonrasında, ANSYS programının ana menüsünde “Results” modülü Fluent’e bağlanarak, hücrenin sıcaklık, basınç ve reaktant kütle dağılımları elde edilmiştir. Şekil 5.12’de ANSYS programından nihai sonuçların alınması için “Results” modülünün eklenmesi ve ANSYS’deki analiz diziliminin son görünümü verilmektedir.



**Şekil 5.12.** ANSYS'deki analiz diziliminin son görünümü.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan yakıt hücresi analizleri, her bir farklı varyasyon için 0.9V – 0.3V aralığındaki hücre gerilimlerinde 0.1V aralıklarla gerçekleştirilmiş, her bir varyasyon için hücrenin akım gerilim (I-V) eğrileri elde edilmiştir. "Results" kısmındaki hücrenin sıcaklık, basınç ve reaktant kütle dağılımları ise 0.4V gerilim değerinde alınmış ve kıyaslanmıştır.

### 5.3. Yakıt Hücresinin Üretimi

Yakıt hücresinin ANSYS'DE analizleri yapıldıktan sonra, engel varyasyonları arasında en yüksek güç yoğunluğu sağlayan model belirlenmiş ve bu bipolar plaka modelinin üretimine geçilmiştir. Çalışma kapsamında 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip tek hücreli bir yakıt hücresi üretilmiştir. Tek hücreli yapıda oluşturulan bu yakıt pili, 2 adet akış plakası, 2 adet akım toplama plakası, 2 adet sıkıştırma plakası, 1 adet MAE, 4 adet pnömatik rekor, conta ve sızdırmazlık elemanlarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında bir adet standart serpantin akış alanına sahip yakıt hücresi üretilirken, bir adet akış alanında engel bulunan yakıt hücresi üretilmiştir. Her iki yakıt hücresinde de aynı malzemeler, aynı ölçü ve miktarlarda kullanılmıştır. Bu şekilde, deneysel olarak akış kanalına engel yerleştirilmesinin sonuçları standart model ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Üretilen akış plakaları, 316L paslanmaz çelik malzemeden üretilmiştir. Analizler sonucu belirlenen engel modeli ve serpantin akış alanı CNC işlemi ile plakalar üzerine işlenmiştir. Şekil 5.13'de CNC yöntemi ile işlenen akış plakaları gösterilmektedir.



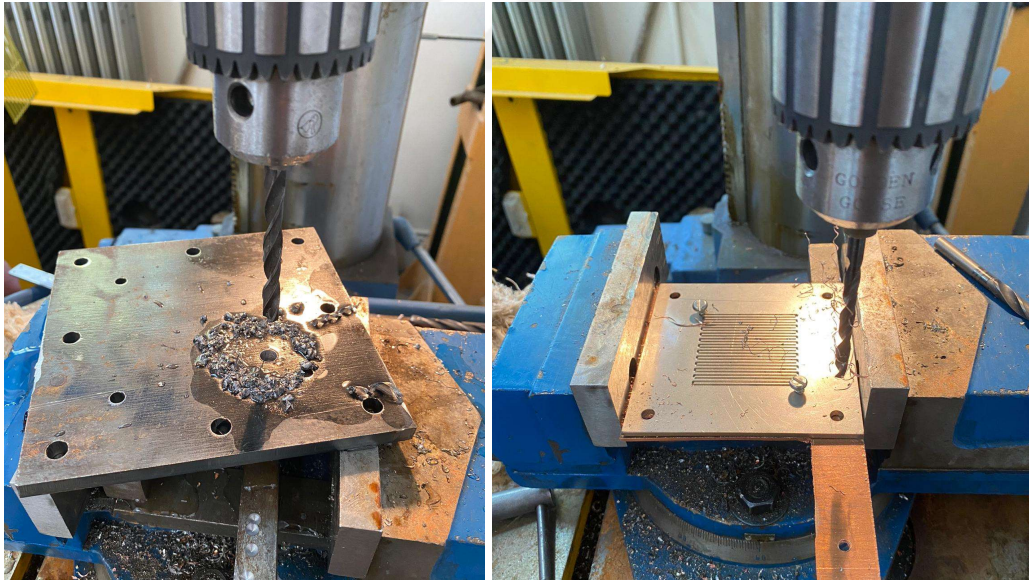
**Şekil 5.13.** CNC ile işlenen akış plakaları, (a) serpantin, (b) engele sahip plaka.

Akış plakalarının kanal ve engel biçimleri işlendikten sonra, lazer kesim ile sıkıştırma plakaları demir malzemedan kesilerek elde edilmiştir. Şekil 5.14’de lazer kesim ile sıkıştırma plakalarının üretimi gösterilmektedir. Sıkıştırma plakalarının üretiminden sonra, montaj sırasında plakaların doğru şekilde hizalanması hususunda gerekli olan sabitleme saptamaları için gerekli delikler Fırat Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği atölyesinde, matkap kullanılarak açılmıştır. Şekil 5.15’de plakalara delik açma işlemi gösterilmektedir.

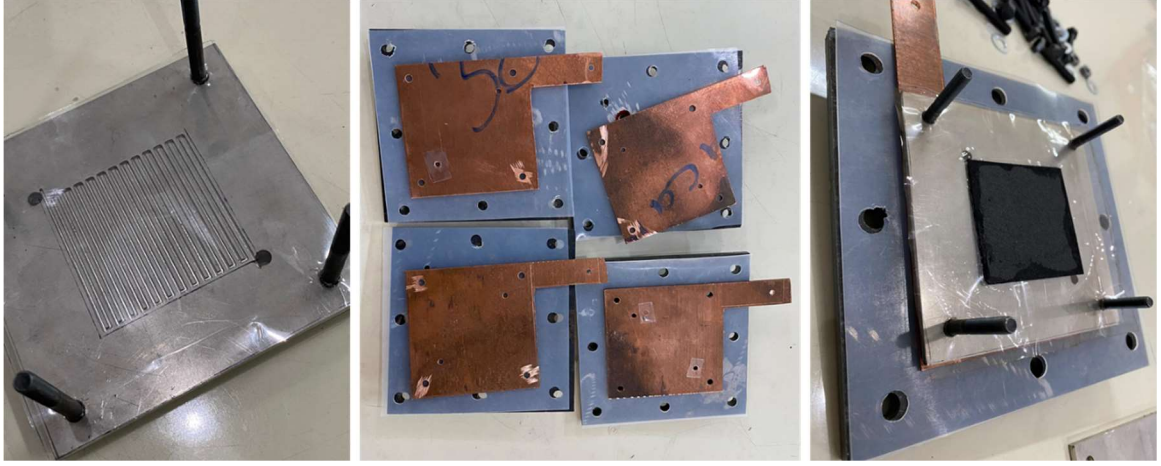
Plakaların üretiminin tamamlanması ile yakıt hücrelerinin montaj aşamasına geçilmiştir. Montaj sırasında, gaz sızdırmazlığına ve kısa devre olmaması için yalıtkanlık hususlarına dikkat edilmiştir. Bu amaçla, katı ve sıvı conta kullanımı yapılmıştır. Montaj işlemine öncelikli olarak pnömomatik rekorların sıkıştırma plakalarına sıkılması ve önlem olarak sıvı conta ile kaçak yapabilecek bölgelerin kapatılması ile başlanmıştır. Daha sonra sıkıştırma plakası üzerindeki sabitleme deliklerine, 4 adet saptama yerleştirilerek, diğer hücre elemanları sırasıyla üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 5.16’da hücrenin montaj aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Lazer kesim ile sıkıştırma plakalarının üretimi.

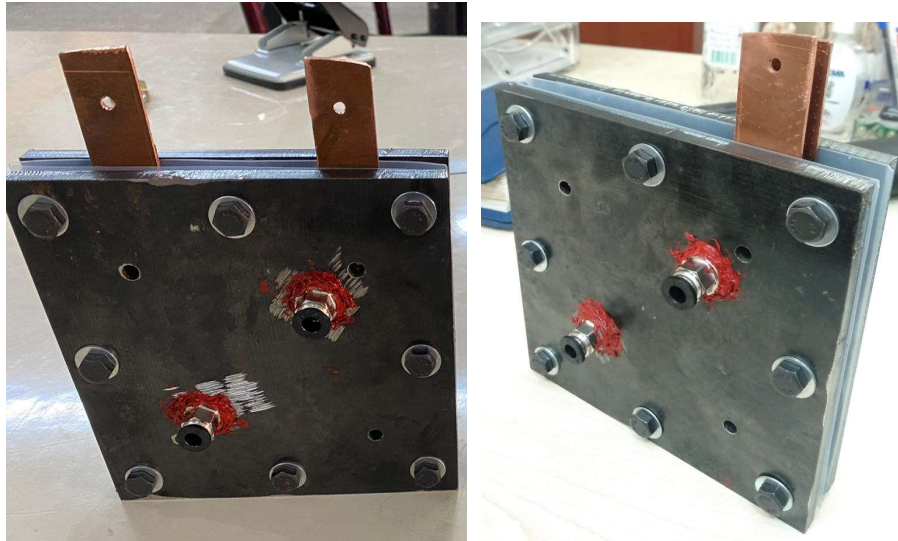


Şekil 5.15. Plakalara sabitleme deliklerinin matkapla açılması işlemi.



Şekil 5.16. Yakıt hücrelerin montaj aşamaları.

Hücreler montaj edilirken, sıkıştırma plakası üzerine bir katman katı conta, contanın üzerine akım toplama plakası, üzerine akış plakası, akış plakası üzerine bir kat conta, conta üzerine ise MEA yerleştirilerek hücrenin bir tarafı (anot ya da katot) konumlandırılmıştır. Hücrenin diğer tarafı ise simetrik bir şekilde yerleştirilmiştir. Sandviç şeklinde bütün bileşenler yerleştirilmiş ve hidrolik bir pres altında sabit tutularak, montaj civataları sıkılmıştır. Sıkıştırma plakalarındaki civatalar 4 Nm tork değeri ile sıkılmıştır. Çalışma kapsamında hücrelerde kullanılan MEA'da, Nafion 212 membran ve 0,5 mg/cm<sup>2</sup> Pt yüklü karbon katalizör kullanılmıştır. Şekil 5.17'de hücrelerin montajı tamamlanmış halleri gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Üretilen engelli ve standart akış kanalına sahip yakıt hücreleri.

Yakıt hücrelerinin üretiminin tamamlanmasının ardından, hücrelerin deneysel olarak test edilmesi için bir yakıt pili test düzeneğine bağlanmıştır. Şekil 5.18’da yakıt pili test standı gösterilmektedir. Bu test standı ile yakıt hücresi istenen çalışma koşullarında çalıştırılabilmekte ve davranışları incelenebilmektedir. Test standı, elektronik yük hücresi, nemlendirme üniteleri, kütle akış kontrolörleri, selenoid valfler, ısıtıcı, sıcaklık sensörleri, kontrol bilgisayarı ve gaz tüplerinden oluşmaktadır.



Şekil 5.18. Yakıt pili test düzeneği.

Testlere başlamadan önce yakıt hücreleri test standı üzerine montaj edilmiştir. Daha sonra yakıt hücresinin kararlı bir çalışma durumuna ulaştığından emin olmak için US yakıt hücresi konseyi (USFCC) tarafından önerilen aktivasyon süreci izlenerek deneylerden önce aktive edilmiştir. Aktivasyon süreci, şu şekilde sürdürülmüştür:

- 60 dakika - 0,6 V;
- 20 dakika - 0.7 V;
- 20 dakika - 0,5 V;
- 2. ve 3. adımları dokuz kez tekrarlanacak;
- 20 dakika - 0.7 V;
- 1 dakika - açık devre gerilimi

Deneysel testler, simülasyon koşullarına olabildiğince yakın şekilde gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Hücreye giren reaktant sıcaklıkları 60°C olarak ayarlanmıştır. Anot tarafının nemlendirme oranı %40-50 aralığında, katot tarafındaki nemlendirme oranı ise %30-40 aralığında değişmiştir. Deneyler, 0.1V gerilim değişiminde, 0,9V - 0,3V aralığında elde edilmiştir. Kütleli debiler ise anot tarafında 0.2 slpm, katot tarafında ise 0.6 slpm olarak belirlenmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

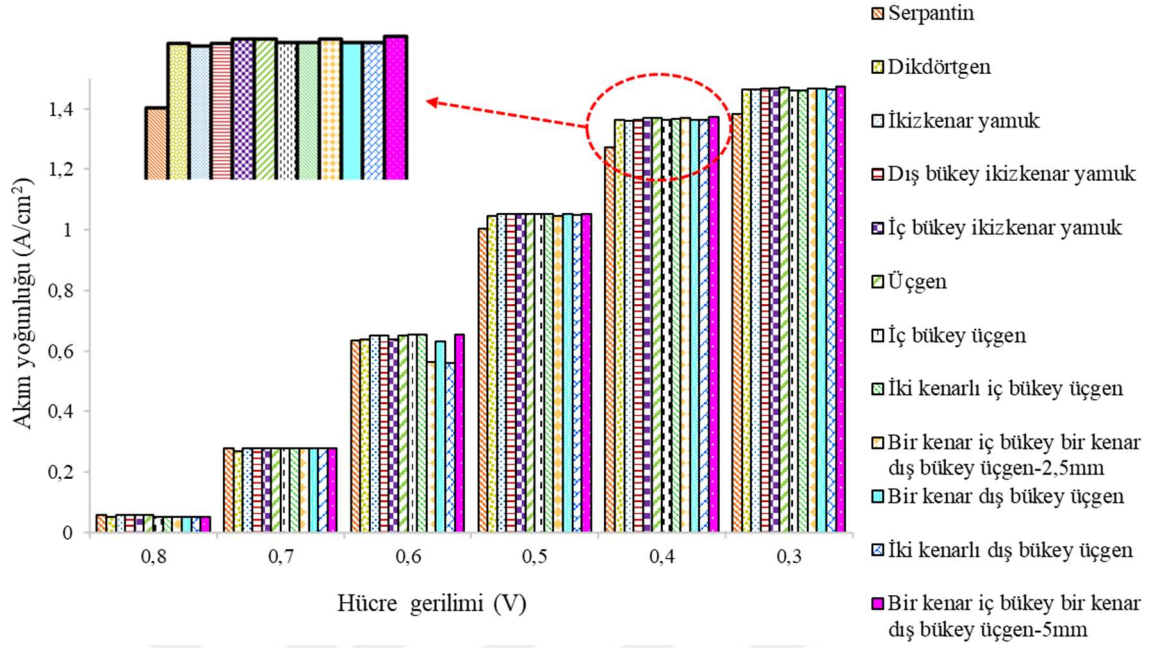
Bu tez çalışmasında, yakıt hücrelerinin en önemli elemanlarından olan bipolar plakalarda akış kanalı üzerine yerleştirilen farklı şekil, sayı, yükseklik ve konumdaki engeller ile hücreden elde edilen net güç çıkışı arttırılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla, ANSYS programında birçok engel varyasyonu serpantin akış alanı tipi üzerinde aynı koşullarda analiz edilerek, her bir varyasyonda en yüksek güç çıkışı sağlayan model belirlenip, bir sonraki varyasyonda sabit tutulmuştur. Net güç çıkışı belirlenirken basınç düşümüne dayalı pompalama kaybı dikkate alınmıştır. Buna ek olarak, yine ANSYS programında, basınç, sıcaklık, hidrojen, oksijen ve su kütle dağılımları elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Simülasyon sonuçları doğrultusunda en yüksek çıkış gücü sağlayan yakıt hücresi modeli ve standart serpantin modeli üretilerek deneysel olarak test edilmiş ve I-V eğrileri elde edilmiştir.

### 6.1. Engellerin Şekil Varyasyonu Sonuçları

Şekil varyasyonları sırasında bütün varyasyonlar serpantin akış alanı tipi üzerine yerleştirilmiştir. Bu aşamada, Şekil 5.1’de gösterilen engel şekilleri analiz edilmiştir. Tablo 6.1’de engel şekillerinin neden olduğu basınç düşüm değerleri ve hücrelerin net güç çıkış değerleri verilmektedir. Değerler hücrenin maksimum güç çıkışı sağladığı 0,4V gerilim değerinde alınmıştır. Şekil 6.1’de ise engel şekillerine göre katot plakasına yerleştirilen engellerin akım yoğunluğu/gerilim değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 6.1.** Engel geometrik şekil varyasyonu sonuçları.

Model adı	Akım yoğ. (A/cm <sup>2</sup> )	Güç yoğ. (W/cm <sup>2</sup> )	Katot basınç düş. (ΔP, kPa)	Pompa. kayı (W)	Net güç (W)
Serpantin (boş)	1,2708	0,5083	5,15	0,1033	12,605
Dikdörtgen	1,3678	0,5471	30,31	0,5624	13,116
İç bükey ikizkenar yamuk	1,3688	0,5475	31,04	0,5746	13,113
İkizkenar yamuk	1,3586	0,5434	25,22	0,4749	13,111
Dış bükey ikizkenar yamuk	1,3624	0,5450	27,21	0,5061	13,118
Üçgen	1,3648	0,5459	33,45	0,6151	13,032
İç bükey üçgen	1,3646	0,5458	34,40	0,6308	13,015
İki kenarlı iç bükey üçgen	1,3649	0,5459	34,32	0,6294	13,019
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm	1,3695	0,5478	33,06	0,6085	13,086
Bir kenar dış bükey üçgen	1,3646	0,5458	30,10	0,5588	13,087
İki kenarlı dış bükey üçgen	1,3646	0,5458	32,09	0,5924	13,054
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm	1,3657	0,5463	28,78	0,5363	13,121



**Şekil 6.1.** Farklı engel şekillerine göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri.

Tablo 6.1 ve Şekil 6.1 incelendiğinde, yakıt hücresinin katot kanalı üzerine yerleştirilen engellerin hücrenin akım yoğunluğunu arttırdığı tespit edilmiştir. Katot akış kanalına engel yerleştirilmesi ile akış kanalından GDL bölgesine geçen reaktant miktarının arttığı, GDL ve katalizör yüzeylerindeki reaktant konsantrasyonlarının yükseldiği düşünülmektedir [46]. Bu durum akış kanalından, katalizör yüzeyine kütle transferinin gelişmesi anlamına gelmekte ve hücreden üretilen elektrik akımı miktarının artmasının bir nedeni olduğu düşünülmektedir [143]. Bu analizler sırasında 11 farklı engel şekli denenmiştir (aynı yükseklik, sayı ve konumda). Şekil farklılıkları, hücrenin akım yoğunluğu değerlerini değiştirme konusunda beklenenden daha düşük etki göstermiş, farklı engel şekillerinin hücrenin akım yoğunluğu değerlerini çok düşük miktarda etkilediği görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken husus boş serpantine kıyasla kanala engel yerleştirilmesi hücre performansını kayda değer artırırken, yerleştirilen engel şeklinin düşük miktarda değişime neden olmasıdır. Engel şekilleri arasında, bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey olan üçgen formu en yüksek net güç çıkışı sergilemiştir. En yüksek güç çıkışı sağlayan engel şekli ile engel bulunmayan standart serpantine sahip hücrenin güç çıkışları kıyaslandığında %4,09 oranında bir artış tespit edilmiştir. Engel şekilleri arasında en düşük güç çıkışına sahip iç bükey üçgen formu ile standart serpantin kıyaslandığında, %3,25'lik bir artış belirlenmiştir. Tablo 6.1 incelendiğinde, engellerin katot basınç düşüm değerlerini arttırdığı ve bununla pompalama kaybını arttırdığı belirlenmiştir. Katot plakası akış kanallarına engel yerleştirilmesi parazit bir kayıp olan pompalama kaybını arttırmasına rağmen, engel formunun hücrenin akım yoğunluğuna yapmış olduğu pozitif katkı,

hücresinin net güç çıkışını yükseltmiştir. Benzer değişimler literatürdeki çalışmalarda da görülmüştür [134,138].

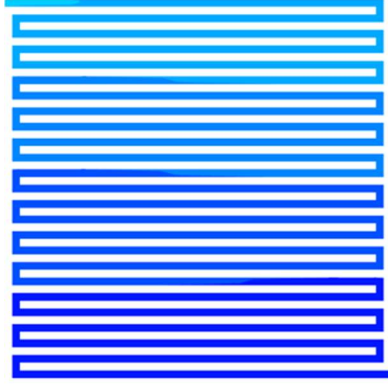
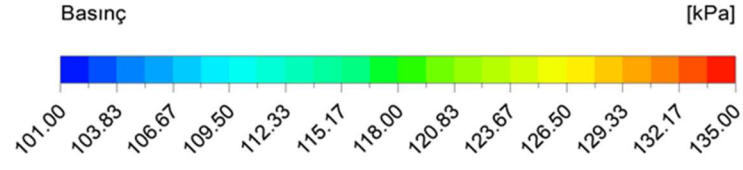
- *Engel şekillerinin basınç dağılım görüntüleri*

Basınç dağılımları özellikle akış kanallarına engel yerleştirilen çalışmalarda dikkat çeken önemli bir parametredir [144]. Bu önem, engellerin akışa karşı göstermiş olduğu dirençten kaynaklanıp, yüksek basınç düşümü oluşturmaktadır. Basınç düşümü, kanal ve geçitlerdeki sürtünmenin veya hücre içinden geçen reaktant gazların bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle katot tarafındaki basınç düşümü, sıvı suyun katot tarafında oluşması ve tahliye edilmesi gerektiğinden dolayı daha fazla öneme sahiptir. Basınç düşümü sıvı suyun hücreden tahliyesi için istenen bir etken olmasına rağmen, yüksek basınç düşümü hücreye reaktant "pompalamak" için gereken parazitik gücü arttırmaktadır [145]. Tablo 6.2’de engel şekillerine göre analiz edilmiş hücrelerin katot akış plakasının giriş-çıkış basınç değerleri ve basınç düşüm değerleri verilmektedir.

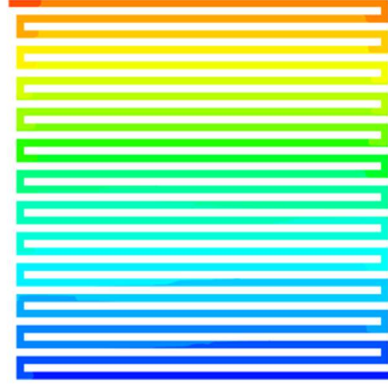
**Tablo 6.2.** Engel şekil varyasyonlarına göre katot gaz difüzyon/kanal ara yüzeyi basınç değerleri.

Model adı	Basınç (giriş) (kPa)	Basınç (çıkış) (kPa)	Katot basınç düş. ( $\Delta P$ , kPa)
Serpantin (boş)	106,47	101,32	5,15
Dikdörtgen	131,64	101,32	30,31
İç bükey ikizkenar yamuk	132,36	101,32	31,04
İkizkenar yamuk	126,54	101,32	25,22
Dış bükey ikizkenar yamuk	128,34	101,32	27,21
Üçgen	134,78	101,32	33,45
İç bükey üçgen	135,72	101,32	34,40
İki kenarlı iç bükey üçgen	135,65	101,32	34,32
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm	134,38	101,32	33,06
Bir kenar dış bükey üçgen	131,43	101,32	30,10
İki kenarlı dış bükey üçgen	133,41	101,32	32,09
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm	130,10	101,32	28,78

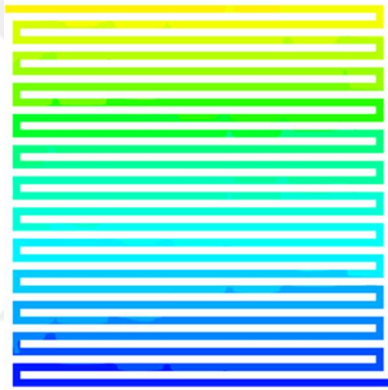
Tablo 6.2 incelendiğinde, akış alanına engel yerleştirilmesi hücrenin katot plakasında oluşan basınç düşüm değerlerinde yükselmeye neden olduğu görülmüştür. Engel bulunmayan serpantin akış alanında 5,15 kPa basınç düşümü gerçekleşirken, diğer engele sahip katot plakalarında 25,22-34,40 kPa aralığında basınç düşümleri gerçekleşmiştir. Engel şekilleri arasında en düşük basınç düşümü 25,22 kPa ile ikizkenar yamuk şeklinde gerçekleşirken, en yüksek basınç düşümü 34,40 kPa ile iç bükey üçgen engel formunda olduğu görülmüştür. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’ de, katot akış kanalına yerleştirilen farklı engel şekillerinin, hücrenin katot plakalarındaki basınç dağılım görüntüleri verilmektedir.



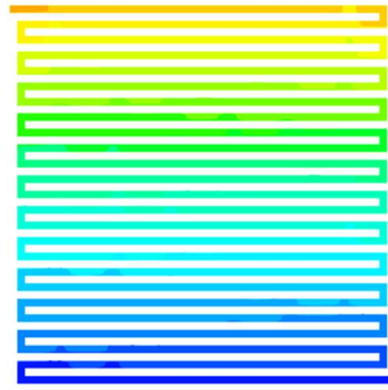
(a)



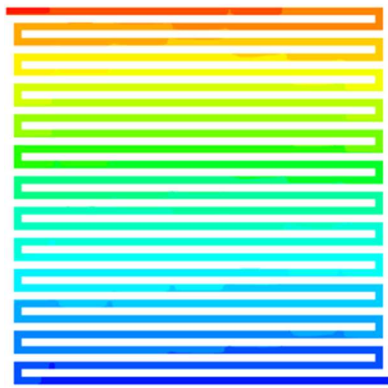
(b)



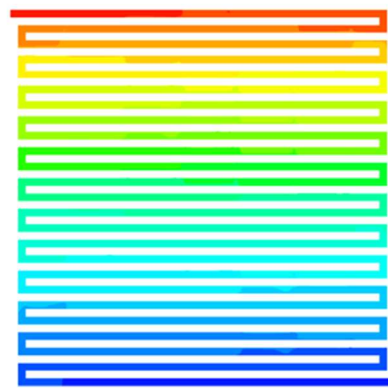
(c)



(d)

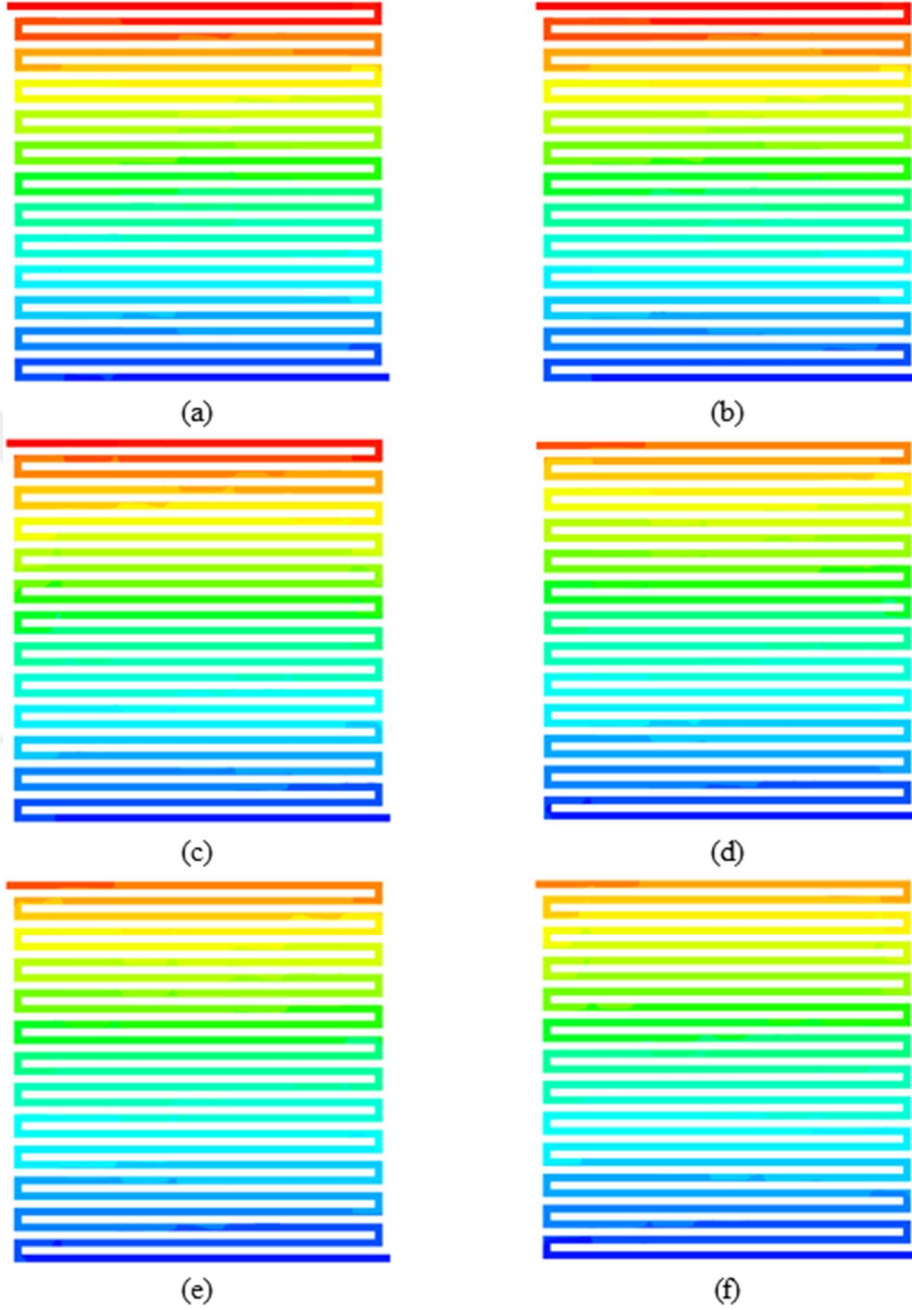
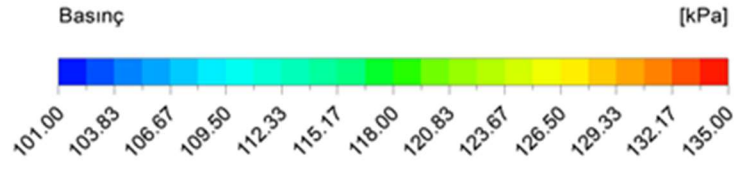


(e)



(f)

**Şekil 6.2.** Şekil varyasyonlarına göre katot basınç dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f).



**Şekil 6.3.** Şekil varyasyonlarına göre katot basınç dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f).

Basınç dağılımı görüntüleri, hücrenin katot akış plakası ile katot GDL'nin temas ettiği yüzeyden alınmıştır. Basınç dağılımları incelendiğinde, serpantin modeline özgü olarak reaktant girişinden çıkışına basınç değerlerinin azalarak devam ettiği görülmektedir [103]. Bu durum reaktant akışı sırasında viskoz etkilerden ve akış kanalının köşe bölgelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir [146]. Engele sahip katot plakalarında da benzer şekilde girişten çıkışa doğru basınç değerleri azalma göstermiş fakat engel şekillerine göre bu değerler değişmiştir. Katot plakasına yerleştirilen engel sayısı ve yüksekliklerinin eşit olduğu dikkate alındığında, engel şekilleri arasında ikizkenar yamuk ve dış bükey ikizkenar yamuk formları en düşük basınç düşümü değerlerini sergilemiştir. Engel şekilleri arasında dış bükey formlarındaki engellerin, iç bükey formlara kıyasla daha az reaktantı GDL bölgesine yönlendirme kapasitesine sahip olduğu düşünülmektedir. Diğer bir ifade ile iç bükey formlar daha fazla reaktantı gözenekli bölgeye yönlendirmekte, omuz (rib) altı konveksiyonu arttırdığı düşünülmektedir. Bu durum ise gözenekli alan ve oluşan sıvı suyun neden olduğu daha yüksek viskoz kaybın oluşmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir [134].

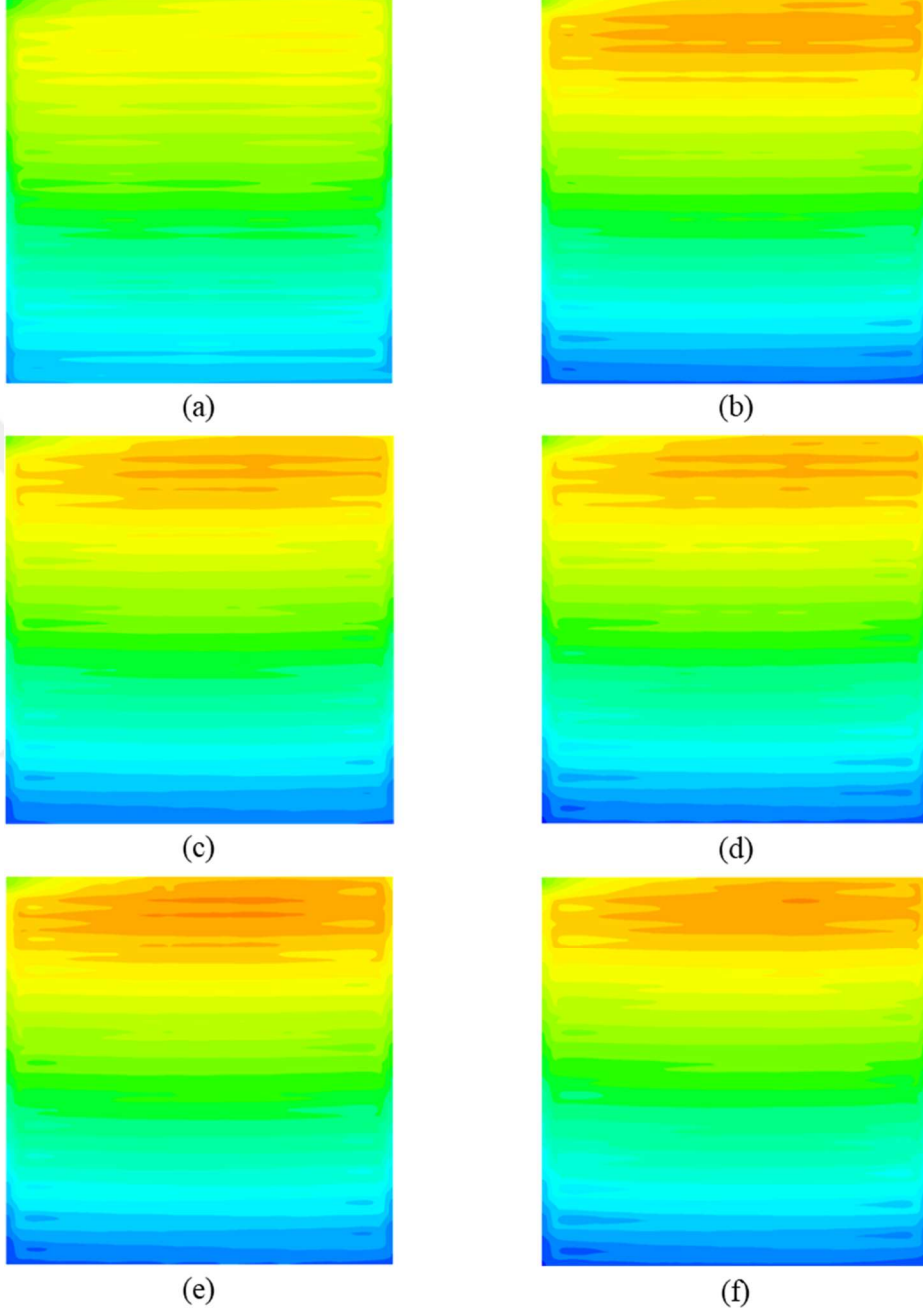
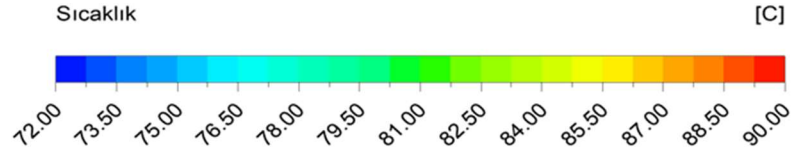
- *Engel şekillerinin sıcaklık dağılım görüntüleri*

Yakıt hücrelerinin analizleri yapılırken dikkat edilen diğer bir parametre ise sıcaklık dağılımlarıdır. Yakıt hücrelerinde katot katalizör yüzeyinde oluşan elektrokimyasal reaksiyon (ekzotermik reaksiyon) sonucu ısı enerjisi açığa çıkmakta ve katalizör/membran yüzeylerinin sıcaklık değerlerini arttırmaktadır. Bu elektrokimyasal reaksiyonların daha fazla olduğu bölgelerde sıcaklık değerleri de fazla olmakta, düşük reaksiyon gerçekleşen bölgelerde ise düşük sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Tablo 6.3'de engel olmayan standart serpantin modeli ve farklı şekillerde engellerin yerleştirildiği modellerin katalizör/membran yüzeylerindeki sıcaklık değerleri verilmektedir. Oluşan bu sıcaklık değerlerine dikkat edildiğinde, katot akış kanalına engel yerleştirilen modellerin tamamında standart serpantine kıyasla maksimum sıcaklık değerleri yükselmiştir. Buna ek olarak, yine bütün engele sahip modellerde, standart serpantine kıyasla minimum sıcaklık değerleri düşmüştür. Aktif alan içerisindeki sıcaklık değişimi boş serpantin modelde 11,10°C olarak tespit edilirken, farklı engel biçimlerine sahip modellerde bu 13,95°C - 14,89°C aralığında değişen değerlerde olduğu görülmüştür. Bu veriler ışığında, engel yerleştirilen modellerin hücrenin belirli bölgelerinde (özellikle reaktant giriş bölgesi) daha fazla reaksiyon sağladığı, bu şekilde aktif alandaki reaktant tüketimini daha kısa kanal yolu mesafesinde tükettiği düşünülmektedir. Ayrıca, aktif alanın çıkış bölgelerine yakın reaktantların daha fazla tükenmesi bu bölgelerdeki elektrokimyasal reaksiyonları azaltmış ve oluşan ısı miktarını azaltmış olabileceği düşünülmektedir. Akış kanalına yerleştirilen engellerin, aktif alanda sıcaklık artışına neden olduğu, literatürdeki bazı çalışmalarda da bildirilmiştir [147,148].

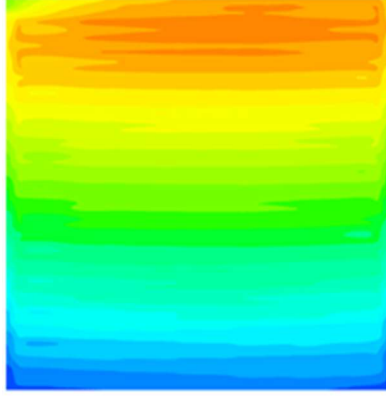
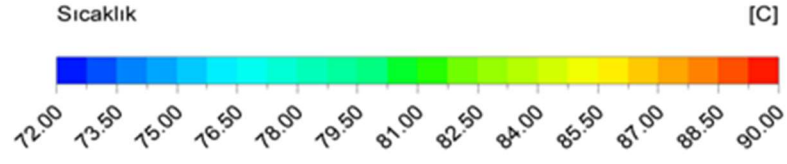
**Tablo 6.3.** Engel şekil varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri.

Model adı	Max. sıcaklık (°C)	Min. sıcaklık (°C)	Sıcaklık değişimi ( $\Delta T$ , °C)
Serpantin (boş)	85,26	74,16	11,10
Dikdörtgen	87,00	72,78	14,22
İç bükey ikizkenar yamuk	87,26	72,75	14,51
İkizkenar yamuk	86,83	72,88	13,95
Dış bükey ikizkenar yamuk	86,87	72,69	14,18
Üçgen	87,22	72,71	14,51
İç bükey üçgen	87,75	72,92	14,83
İki kenarlı iç bükey üçgen	87,70	72,81	14,89
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm	87,54	72,96	14,58
Bir kenar dış bükey üçgen	87,59	72,79	14,80
İki kenarlı dış bükey üçgen	87,36	72,97	14,39
Bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm	87,08	72,70	14,38

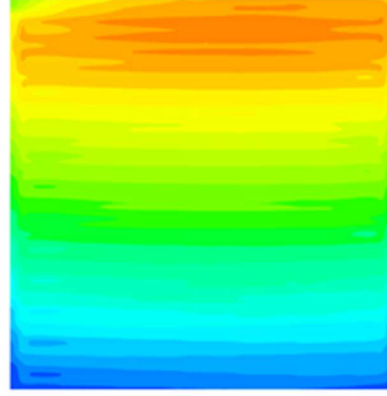
Şekil 6.4 ve 6.5’de farklı engel şekillerinin hücrenin aktif alanındaki membran/katalizör yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Dağılımlar genel olarak incelendiğinde, bütün dağılımlarda reaktantların giriş bölgesi ve aktif alanın üst bölgesinde sıcaklık miktarının en yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durumun aktif alanın üst bölgesindeki yüksek reaktant konsantrasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Giriş bölgesinden itibaren hidrojen ve oksijen tüketilerek ilerlediği için aktif alanın alt bölgelerine doğru elektrokimyasal reaksiyon yoğunluğu azalmaktadır. Önceki çalışmalarda da serpantin kanal tasarımına sahip yakıt hücrelerinde benzer sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir [34,103]. Akış alanına engel yerleştirilen modellere dikkat edildiğinde, özellikle hidrojen ve oksijen konsantrasyonlarının yüksek olduğu aktif alanın üst bölgelerinde daha fazla elektrokimyasal reaksiyon oluşturduğu ve bunun sonucu olarak da yüksek sıcaklık değerlerinin oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak, engellerin taze reaktantları aktif alanın üst bölgelerinde, standart serpantine kıyasla daha fazla tüketmesi aktif alanın alt bölgelerine daha az hidrojen ve oksijen ulaşmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Bu durumun ise akış kanalına engel yerleştirilen modellerin aktif alanlarının alt bölgelerinde, standart serpantine kıyasla daha düşük sıcaklık bölgelerinin oluşmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Standart serpantinın membran/katalizör yüzeyinde ortalama sıcaklık değeri 81,04°C olarak tespit edilmiştir. Engele sahip modeller arasında, en düşük ortalama sıcaklık değerini üçgen modeli 81,29°C ile en yüksek ortalama sıcaklık iç bükey üçgen modelinde 81,82°C olarak tespit edilmiştir. Bu bilgiler neticesinde, katot akış alanına engel yerleştirilmesi hücrenin elektrokimyasal reaksiyon gerçekleştirme potansiyelini arttırdığı, buna karşın engel şekillerindeki farklılıkların membran/katalizör yüzey sıcaklığı üzerinde düşük etki oluşturduğu kanısına varılmıştır.



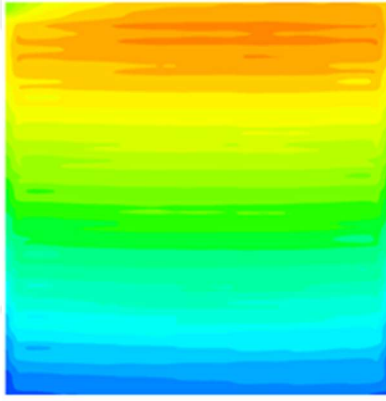
**Şekil 6.4.** Şekil varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f).



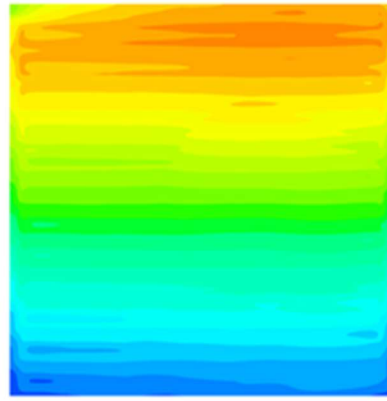
(a)



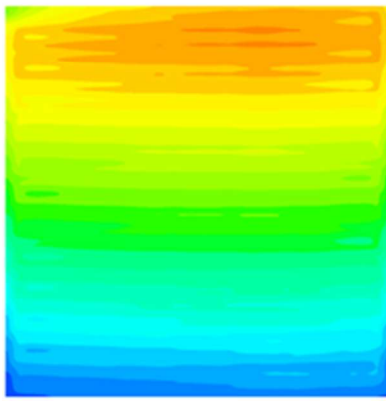
(b)



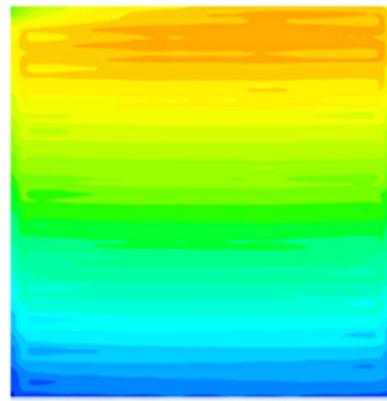
(c)



(d)



(e)



(f)

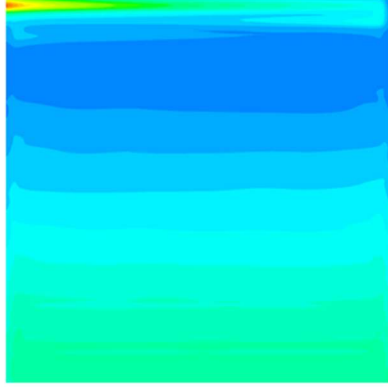
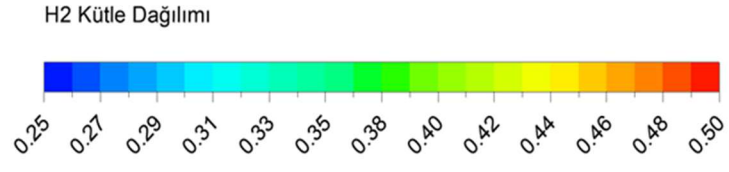
**Şekil 6.5.** Şekil varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f).

- *Engel şekillerinin H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

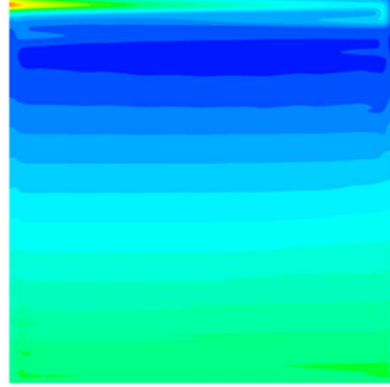
Anot tarafından beslenen hidrojen moleküllerinin ve katot tarafından beslenen oksijen moleküllerinin katalizör yüzeyinde dağılım oranları ve biçimleri, hücredeki elektrokimyasal reaksiyonların oluşma derecesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Katalizör yüzeyine fazladan ulaşan reaktantlar hücrenin daha fazla reaksiyon oluşturmaya ve dolayısıyla akım yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır [149].

Şekil 6.6 ve 6.7’de engel şekillerine göre hücrelerin anot GDL/katalizör yüzeyinden alınan hidrojen (H<sub>2</sub>) kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Tüm modellerin anot kanal girişlerinde H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O oranı 0,6-0,4 olarak tanımlanmıştır. Genel olarak reaksiyon yoğun olarak gerçekleştiği bölgelerde hidrojen oranlarının azaldığı görülmektedir. Anot tarafında hidrojen moleküllerinin katalizör yüzeyinde reaksiyona girmesi ile hidrojen moleküllerinin azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalarda da bu durumun, hidrojenin reaksiyona katılmasından kaynaklandığı bildirilmiştir [150]. Buna ek olarak, hücre aktif alanında yukarıdan aşağı kademeli olarak H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının arttığı görülmektedir. Bu durum ise aktif alanın alt bölgelerine doğru taze reaktant konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir.

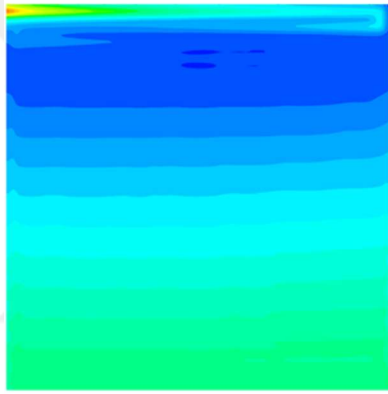
Şekil 6.6 ve 6.7’ye dikkat edildiğinde, katot akış alanına engel yerleştirilmesi, reaksiyonların yoğun olarak gerçekleştiği bölgedeki H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarını bir miktar daha azalttığı tespit edilmiştir. Diğer bir ifade ile bu bölgelerde engellerin daha fazla hidrojen molekülünü GDL üzerinden katalizör yüzeyine ileterek, daha fazla tüketim sağladığı düşünülmektedir. Bu durum ise aynı bölgeden daha fazla reaksiyon oluşumu, ısı üretimi sağladığı ve akım yoğunluğunu arttırdığı düşünülmektedir. Sıcaklık dağılım görüntüleri de bu durumu desteklemektedir. Literatürdeki çalışmalarda da akış kanalına engel yerleştirmenin reaktantların kütle transferlerini iyileştirdiği ve katalizör yüzeyine ulaşan reaktant konsantrasyonunu yükselttiği belirtilmektedir [41]. Standart engel bulunmayan serpantin modelinde, anot katalizör/GDL yüzeyindeki ortalama H<sub>2</sub> kütle oranı 0,3079 olarak tespit edilmiştir. Engele sahip modeller arasında, en düşük ortalama H<sub>2</sub> kütle oranı iç bükey üçgen modeli 0,3018 ile en yüksek ortalama H<sub>2</sub> kütle oranı üçgen modelinde 0,3154 olarak tespit edilmiştir. Standart serpantine kıyasla, modellerin büyük çoğunluğunda H<sub>2</sub> kütle oranı azalmıştır. En yüksek azalma %2 oranında iç bükey üçgen formundaki engelde görülmüştür. İç bükey üçgen formunun daha fazla hidrojen molekülünü GDL üzerinden katalizör bölgesine ileterek, reaktant tüketimini arttırdığı düşünülmektedir. Netice olarak, engel şekillerindeki farklılıkların, hücrenin aktif alanındaki H<sub>2</sub> kütle dağılımı üzerinde beklenenden daha az bir etki oluşturduğu görülmüştür.



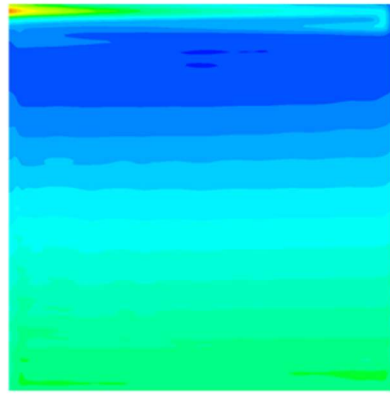
(a)



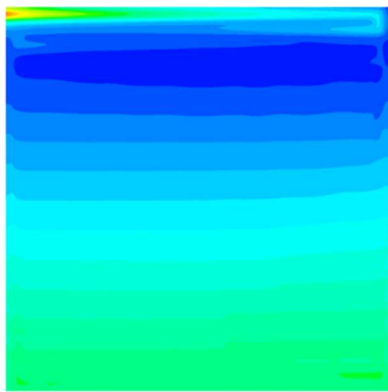
(b)



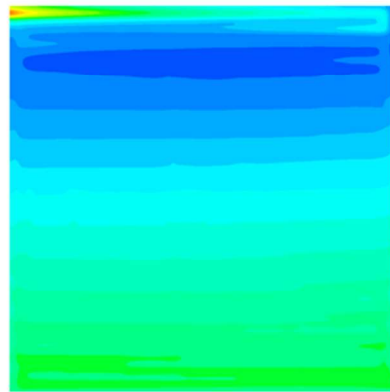
(c)



(d)

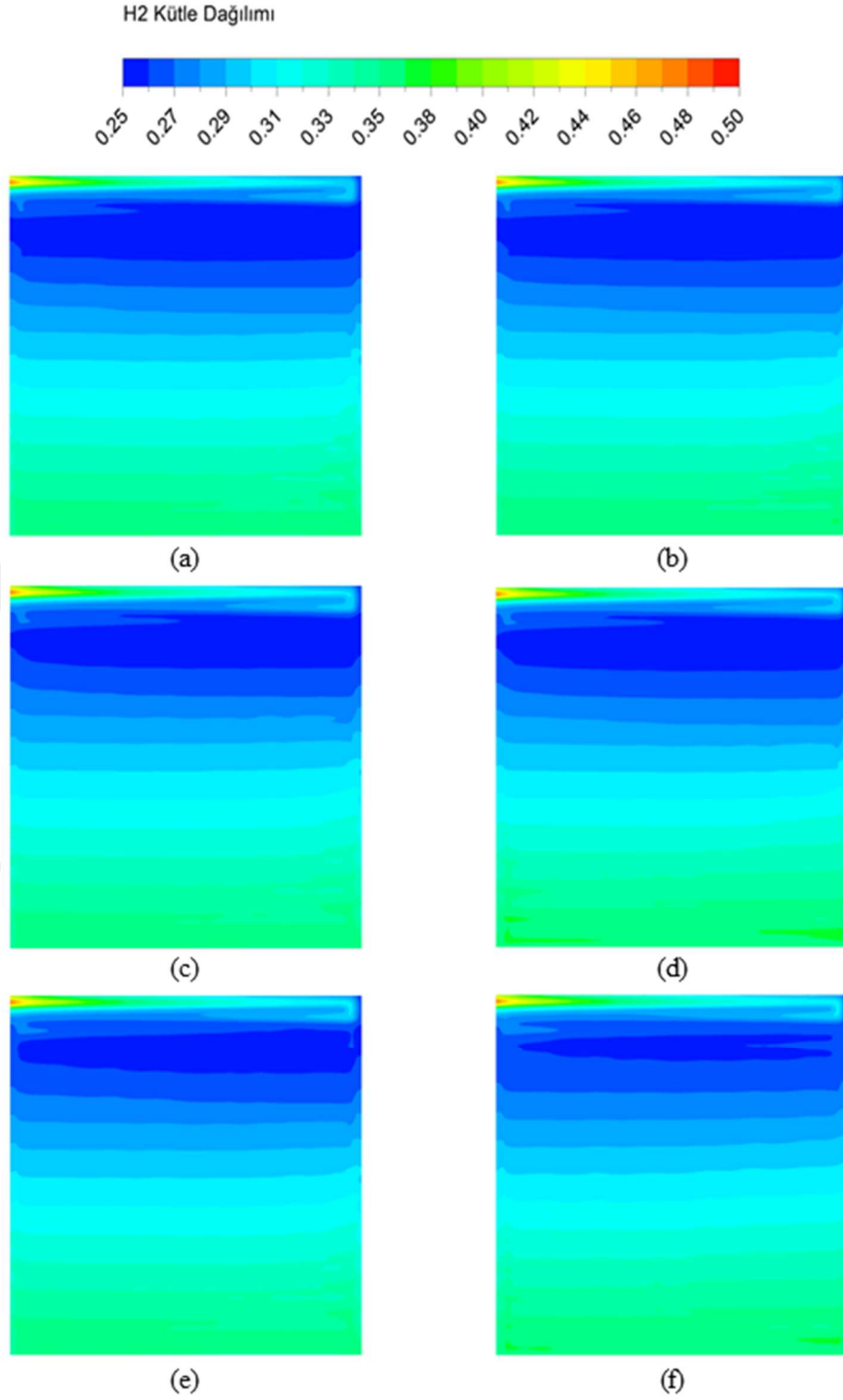


(e)



(f)

**Şekil 6.6.** Şekil varyasyonlarına göre H<sub>2</sub> kütle dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f).

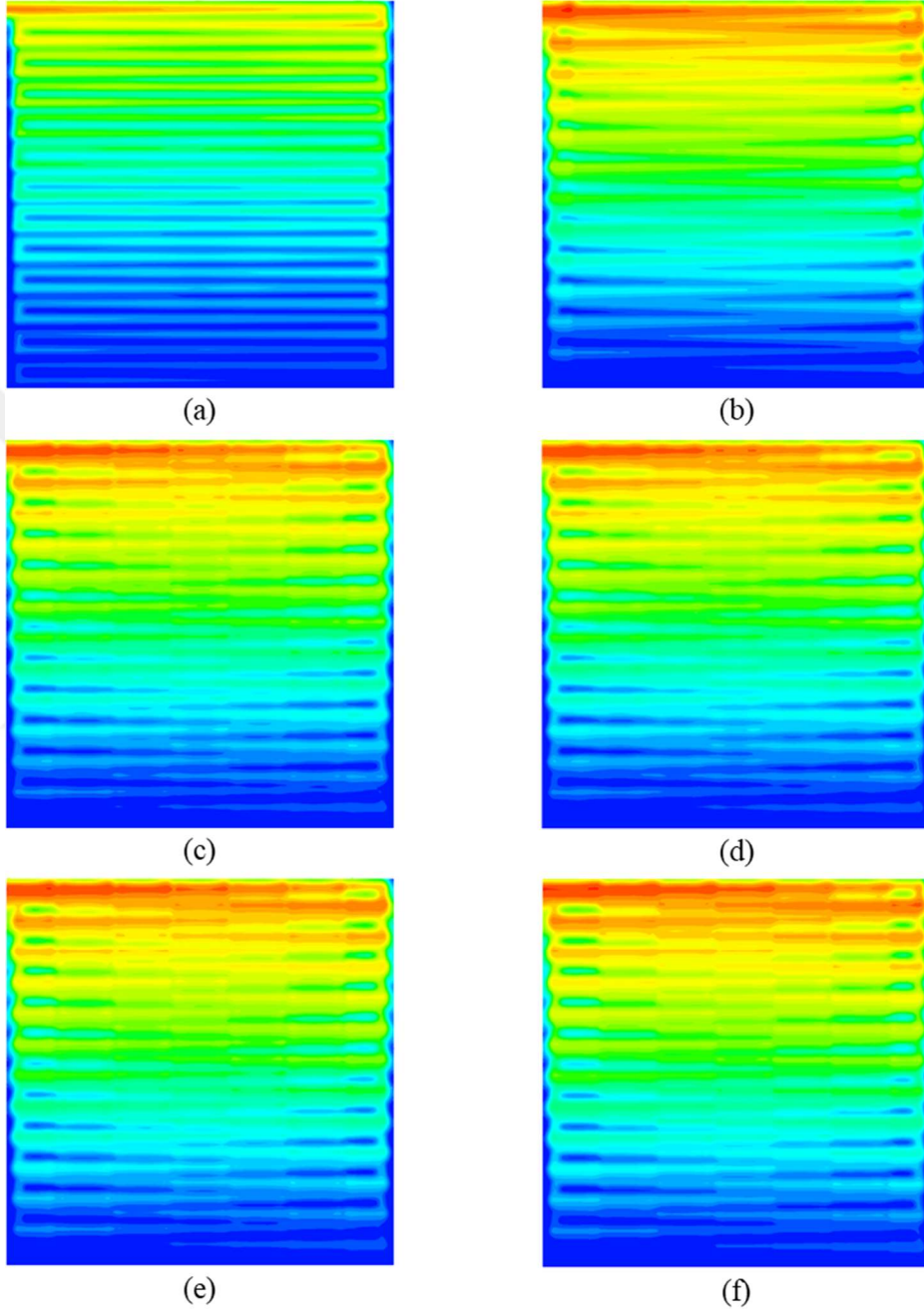
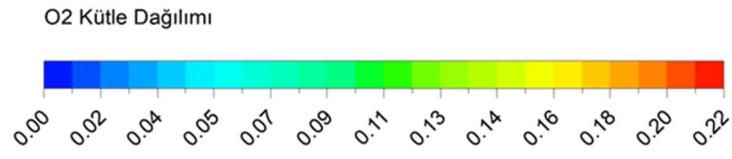


**Şekil 6.7.** Şekil varyasyonlarına göre H<sub>2</sub> kütle dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f).

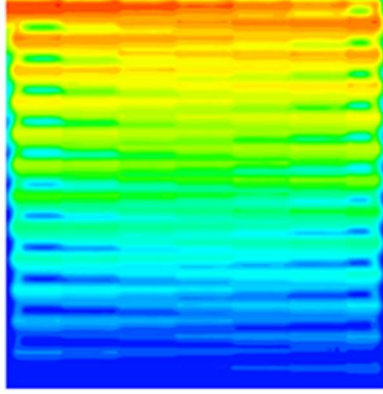
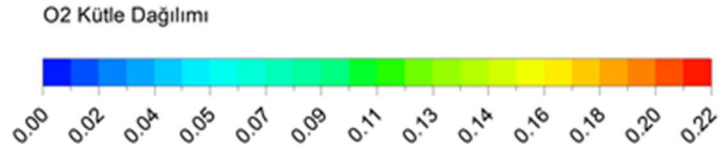
- *Engel şekillerinin O<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Yakıt hücrelerinin performansını belirleyen diğer bir kütle dağılım parametresi ise katot bölgesindeki O<sub>2</sub> kütle dağılımıdır. Katot tarafından beslenen hava içerisindeki oksijen molekülleri, GDL üzerinden katalizör üzerinde dağılarak elektrokimyasal reaksiyonu tamamlama görevine sahiptir. Bu reaksiyonun dağılımı ve seviyesi hücrede oluşan sıvı suyun durumunu, açığa çıkan ısıyı ve akım değerlerini etkilemektedir. Analizler modellenirken, katot tarafındaki O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O oranları 0,21/0,3 olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.8 ve 6.9'da farklı engel şekillerinin hücrenin katot GDL/katalizör yüzeyinde oluşturduğu O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Görüntüler genel olarak değerlendirildiğinde engel bulunmayan serpantin ve engel bulunan modellerin hepsinde akış kanalının başlangıcından çıkışına kadar kademeli olarak O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunun azaldığı görülmektedir. Bu durumun girişten çıkışa kanal boyunca devam eden reaksiyonlar sonucu O<sub>2</sub> kütle miktarının tüketilerek azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir [151]. Ayrıca, elektrokimyasal reaksiyon sonucu su oranının da artması aktif alanın son bölümlerinde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunu oldukça düşük seviyelerde görüntülenmesine neden olduğu düşünülmektedir. Önceki çalışmalarda serpantin tasarımlarında benzer değişimler görülmüştür [152].

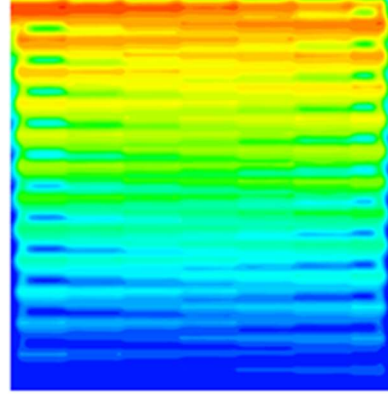
Şekil 6.8 (a)'da bulunan boş serpantin dağılımına dikkat edildiğinde, O<sub>2</sub> kütle miktarı kanal yapısı içerisinde düzgün bir dağılım gösterirken, Şekil 6.8 ve 6.9'daki engellere sahip modellerde O<sub>2</sub> kütle miktarı kanal içerisinden GDL içerisine doğru dağınık bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun akış kanalı içerisindeki engellere çarpan oksijenin (özellikle reaktant giriş bölgelerinde) ciddi bir kısmının GDL içerisine yönelmesine neden olarak, daha fazla oksijeni katalizör yüzeyine ulaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dikkat edildiğinde, engel bulunan konumlarda, düz bir akış görüntüsü yerine boğum yapmış ve O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu artmış olduğu görülmektedir. Standart serpantin girişten itibaren ilk iki yatay kanalında O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu yoğun görünürken, engele sahip plaklarda girişten itibaren ilk dört yatay kanalda yüksek O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu görülmektedir. Literatürdeki akış alanına engel yerleştirilmiş çalışmalarda da engellerin katalizör yüzeyine reaktant kütle transferini hızlandırdığı bildirilmiştir [42]. Diğer taraftan, engel bulunan modellerde aktif alanın üst bölgesinde hızla tükenen oksijenden dolayı boş serpantin modeline kıyasla alt bölgelerde daha düşük O<sub>2</sub> kütle fraksiyon değerleri elde edilmiştir. Engel bulunmayan serpantin modelinde, katot GDL/katalizör yüzeyindeki ortalama O<sub>2</sub> kütle fraksiyon değeri 0,064 olarak tespit edilirken. Engele sahip modeller arasında, en düşük ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı ikizkenar yamuk formunda 0,086 oranında ve en yüksek ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı üçgen modelinde 0,093 oranında tespit edilmiştir. Bütün engel bulunan modellerde katalizör yüzeyine ulaşan O<sub>2</sub> kütle oranı serpantine kıyasla artış göstermiştir. Bu artış oranı %34,4 - %45,3 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, katot plakasına engel yerleştirilmesi anot tarafının aksine katalizör yüzeyine beslenen reaktant kütle transferine önemli seviyede iyileştirme sağladığı görülmüştür.



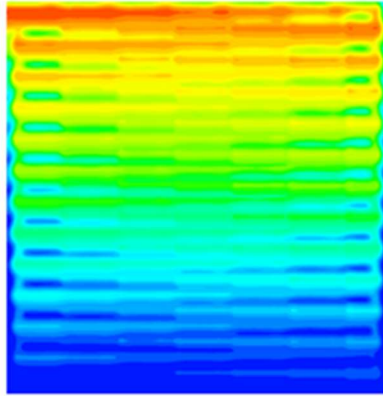
**Şekil 6.8.** Şekil varyasyonlarına göre O<sub>2</sub> kütle dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f).



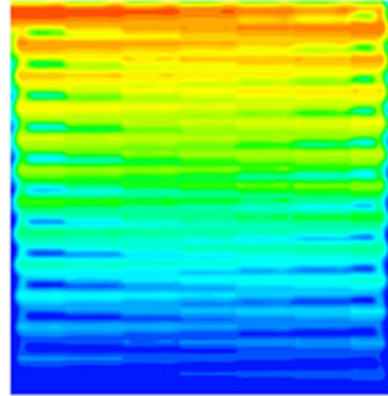
(a)



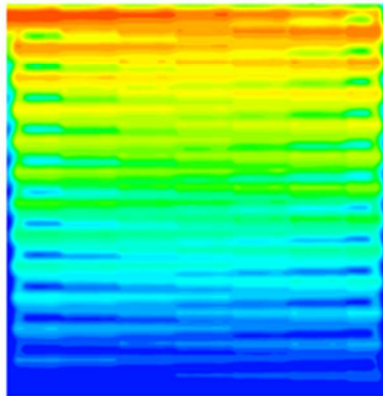
(b)



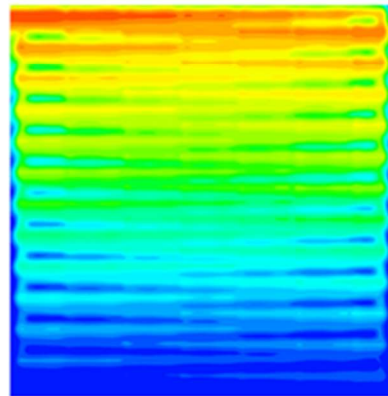
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 6.9.** Şekil varyasyonlarına göre O<sub>2</sub> kütle dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f).

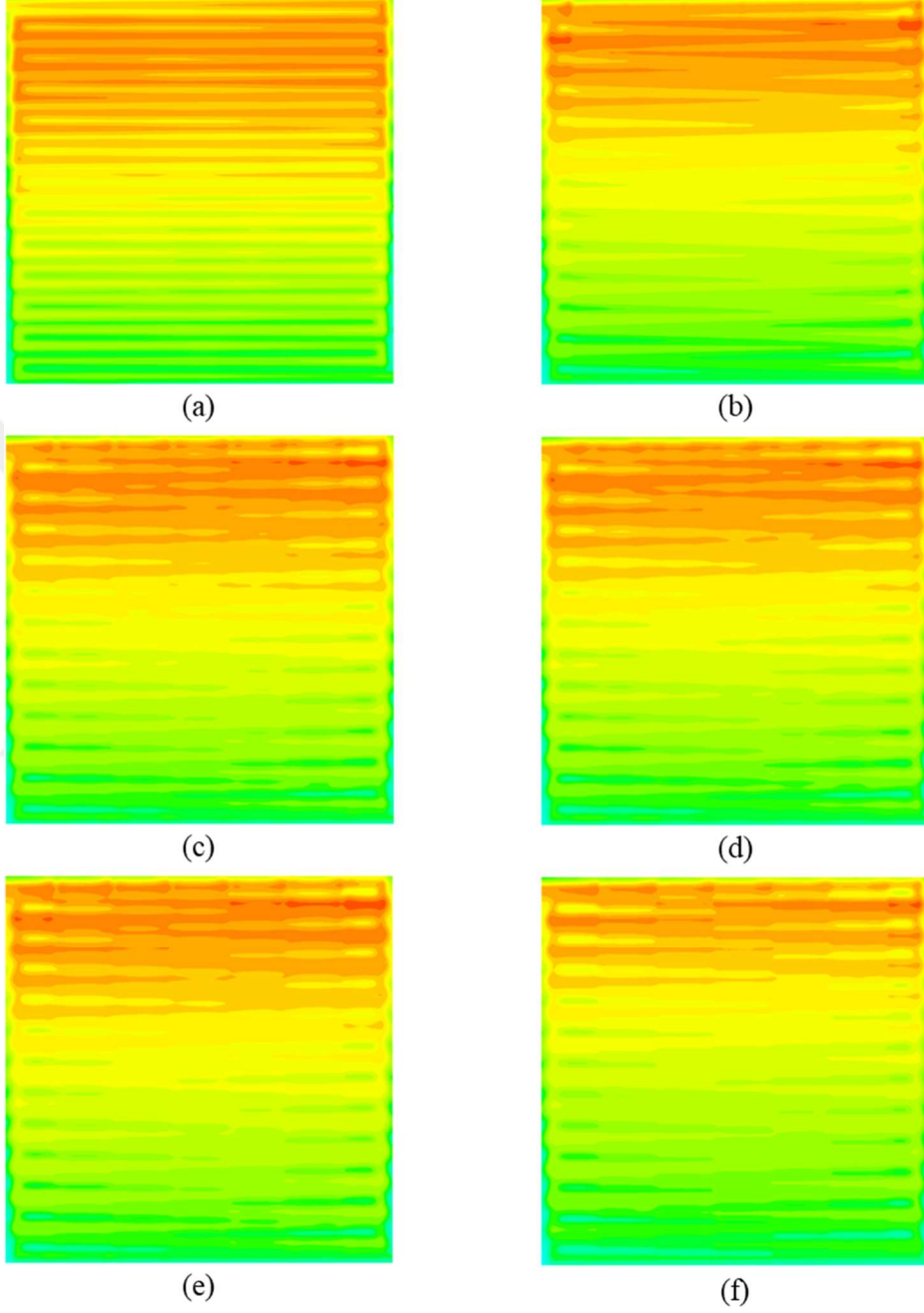
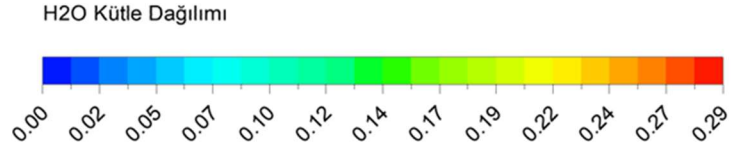
- *Engel şekillerinin H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri*

Yakıt hücrelerindeki diğer bir önemli parametre ise su (H<sub>2</sub>O) kütle fraksiyonudur. Analizler sırasında, hücre içerisindeki reaktantlar ideal gaz fazında kabul edilmiştir. Hücredeki elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan su gaz fazında kabul edilmiştir. Buradaki su bir sis bulutu olarak ANSYS tarafından ifade edilmiştir [142]. H<sub>2</sub>O kütle dağılımları sıvı su dağılımını göstermeyip, hidrojen ve oksijenin reaksiyonu sonucu açığa çıkan gaz fazındaki suyu göstermekte ve sıvı suyun oluşabileceği yoğun veya zayıf bölgeleri ifade etmektedir.

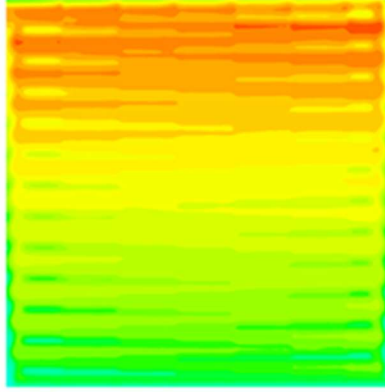
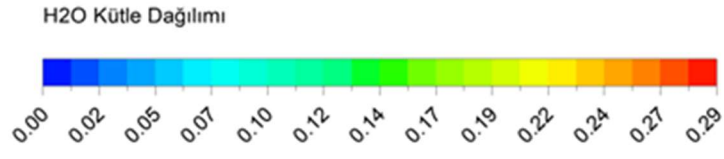
Şekil 6.10 ve 6.11’de H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının, engel şekillerine göre dağılımları gösterilmektedir. Görüntüler katot GDL/katalizör yüzeyinden alınmıştır. Genel olarak görüntüler incelendiğinde, aktif hücre alanının üst bölgesinde reaksiyonlar sonucu H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun aktif alanın giriş bölgesindeki yüksek reaktant konsantrasyonlarına bağlı olarak, elektrokimyasal reaksiyon aktivitesinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 6.10’ daki standart serpantin ve engelli diğer modellere dikkat edildiğinde, genel olarak benzer bir H<sub>2</sub>O kütle dağılımı görülmektedir. Benzer şekilde aktif alanın üst bölgelerinde daha yüksek bir H<sub>2</sub>O kütle oranı görülmekte ve bütün modellerde bu oran aktif alanın çıkışına doğru azalarak devam etmektedir. Engelli modellerde, standart serpantine kıyasla aktif alanın üst kısmında bulunan ilk birkaç kanalda daha fazla H<sub>2</sub>O kütle oranı olduğu görülmektedir. Bu durumun, engellerin reaktantları GDL üzerinden katalizör yüzeylerine bir miktar daha fazla göndermesinden ve taze reaktantları aktif alan içerisinde daha kısa mesafelerde reaksiyona girmesine neden olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir ifade ile engeller reaktantları daha fazla katalizör yüzeyine yönlendirerek, daha küçük bir alanda yüksek reaksiyon aktivitesi sağlamış olduğu düşünülmektedir.

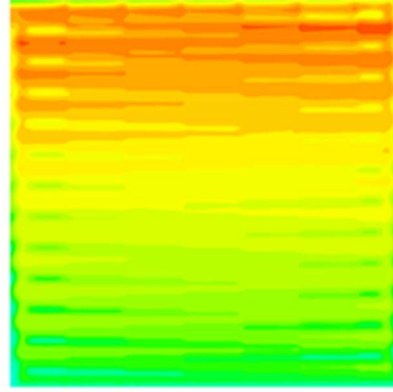
Standart serpantin aktif alan içerisinde en yüksek H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,268 olarak belirlenirken, engelli modellerde ise en yüksek H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,281 ile iç bükey üçgen formunda görülmüştür. Akış alanlarına engel yerleştirilen bütün modellerin aktif alanlarındaki maksimum H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonları yükselmiştir. Bu artış oranı %2,24 - %4,85 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, katot akış plakasına engel yerleştirilmesi ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarını çok fazla etkilememiş gibi görünmesine rağmen, yüksek orandaki H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonların görüldüğü bölgeyi daraltmış ve daha kısa bir reaktant akış bölgesinde yoğunlaştırmıştır. Bu durum daha fazla reaktant beslenmesi durumunda aktif alanın diğer bölgelerinde de H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının arttırılabileceği ve hücreden reaksiyonlar sonucu elde edilebilecek akım yoğunluğunun arttırılabileceği anlamını taşımaktadır.



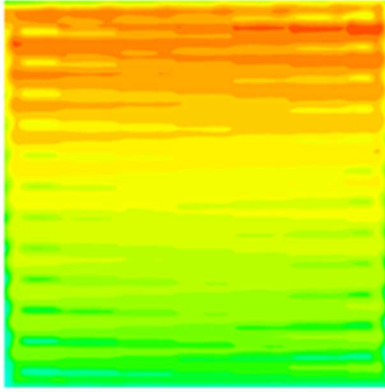
**Şekil 6.10.** Şekil varyasyonlarına göre H<sub>2</sub>O kütle dağılımları, boş serpantin (a), dikdörtgen (b), ikizkenar yamuk (c), dış bükey ikizkenar yamuk (d), iç bükey ikizkenar yamuk (e), üçgen (f).



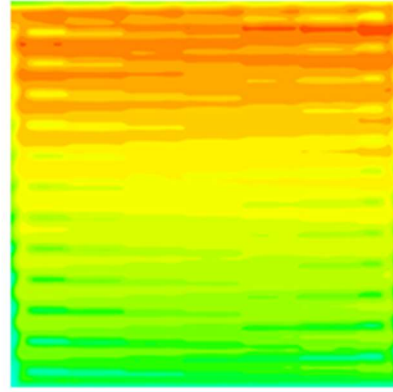
(a)



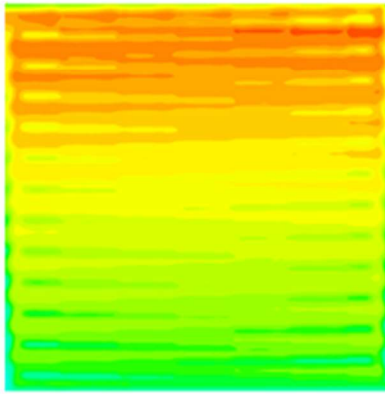
(b)



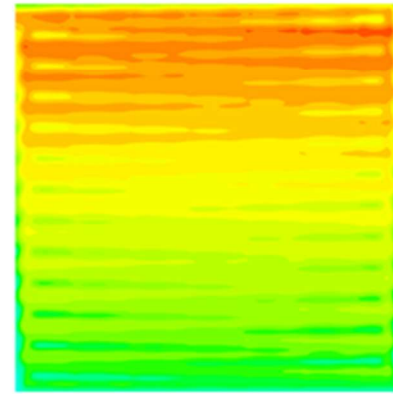
(c)



(d)



(e)



(f)

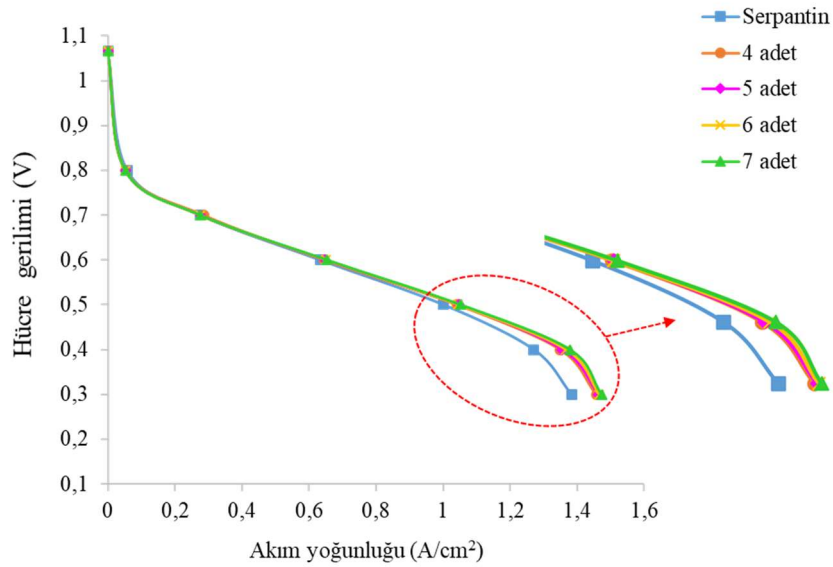
**Şekil 6.11.** Şekil varyasyonlarına göre H<sub>2</sub>O kütle dağılımları, iç bükey üçgen (a), iki kenarlı iç bükey üçgen (b), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-2,5mm (c), bir kenar dış bükey üçgen (d), iki kenarlı dış bükey üçgen (e), bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm (f).

## 6.2. Engel Sayı Varyasyonlarının Sonuçları

Engel şekilleri arasında en yüksek hücre net güç üretimi sağlayan bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm engel formu, devamındaki varyasyonlar için belirlenmiş ve diğer varyasyonlar için sabit kabul edilmiştir. Şekil varyasyonu ardından her bir kanala yerleştirilen engel sayısının optimize edilmesi için sayı varyasyonuna geçilmiştir. Bu amaçla katot plakasının her bir yatay kanalına 4, 5, 6 ve 7 adet engel yerleştirilecek şekilde dört farklı model bu aşamada analiz edilmiştir. Şekil varyasyonunda olduğu gibi sayı varyasyonunda da serpantin akış alanı üzerine engeller yerleştirilerek analiz edilmiştir. ANSYS’ deki analizler şekil varyasyonundaki aynı sınır şartları ve koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.4’de engel sayılarının neden olduğu basınç düşüm değerleri ve hücrelerin net güç çıkış değerleri verilmektedir. Değerler hücrenin maksimum güç çıkışı sağladığı 0,4V gerilim değerinde alınmıştır. Şekil 6.12’de ise engel sayılarına göre katot plakasına yerleştirilen engellerin akım yoğunluğu/gerilim değerleri gösterilmektedir.

**Tablo 6.4.** Engel sayı varyasyonu sonuçları.

Model adı	Akım yoğ. (A/cm <sup>2</sup> )	Güç yoğ. (W/cm <sup>2</sup> )	Katot basınç düş. ( $\Delta P$ , kPa)	Pompa. kaybı (W)	Net güç (W)
Serpantin (boş)	1,2708	0,5083	5,15	0,1033	12,605
4 adet engel	1,3496	0,5398	23,02	0,4363	13,060
5 adet engel	1,3555	0,5422	26,12	0,4906	13,064
6 adet engel	1,3657	0,5463	28,78	0,5363	13,121
7 adet engel	1,3785	0,5514	32,09	0,5924	13,193



**Şekil 6.12.** Farklı engel sayılarına göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri.

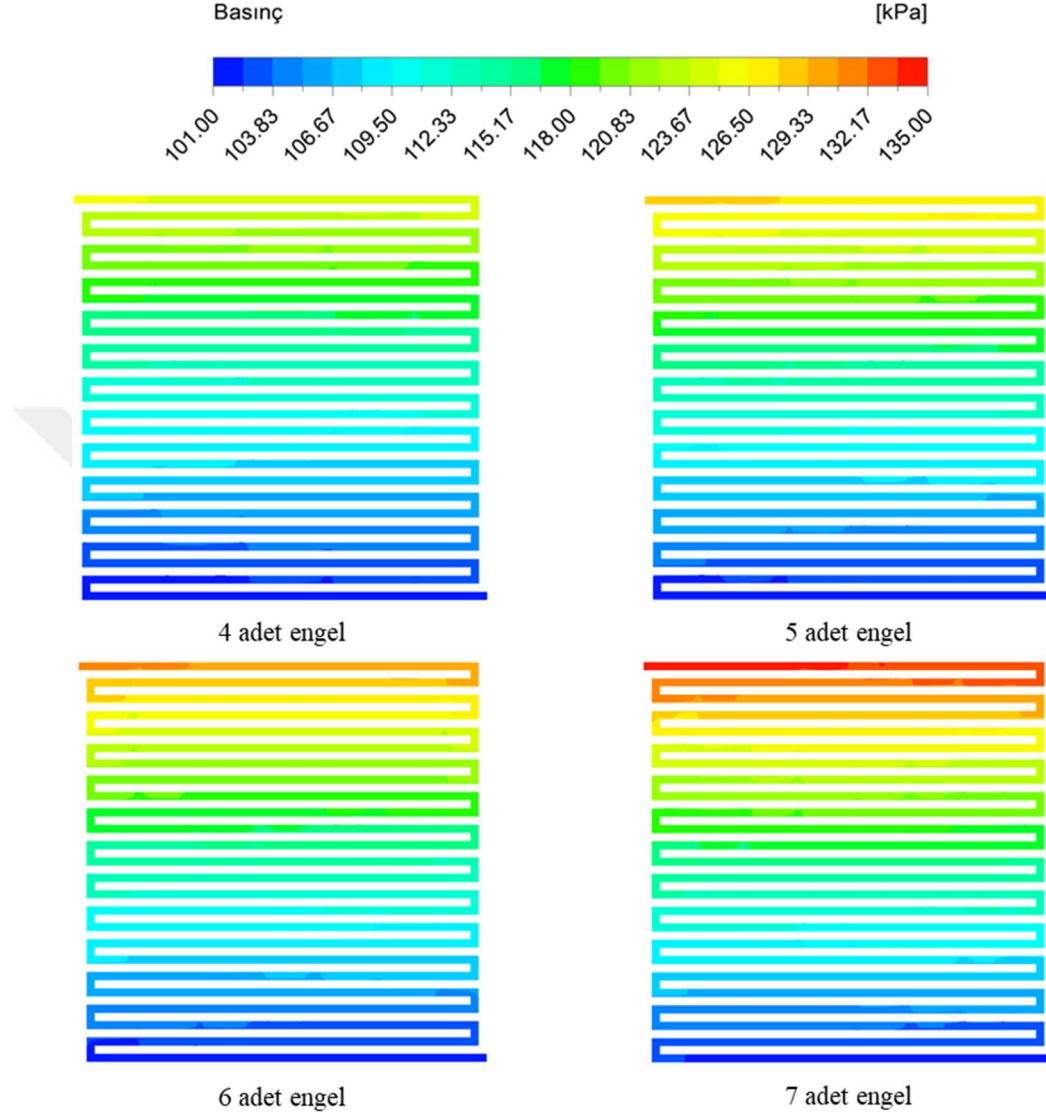
Tablo 6.4 ve Şekil 6.12 incelendiğinde, yakıt hücresinin katot kanalı üzerine yerleştirilen engellerin hücrenin akım yoğunluğunu arttırdığı tespit edilmiştir. Katot plakasının her bir yatay kanalına yerleştirilen engel sayısının artması ile akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Katot akış kanalına engel yerleştirilmesi ile akış kanalından GDL bölgesine geçen reaktant miktarının arttığı, GDL ve katalizör yüzeylerindeki reaktant konsantrasyonlarının yükseldiği düşünülmektedir [46]. Bu durum akış kanalından, katalizör yüzeyine kütle transferinin gelişmesi anlamına gelmekte ve hücreden üretilen elektrik akımı miktarının artmasının bir nedeni olduğu düşünülmektedir [143]. Hücrenin katot akış plakası 25 yatay kanaldan oluşmaktadır. Her bir yatay kanala 4 adet engel yerleştirilmesi ile aktif alan içerisinde toplam 100 noktada akış GDL üzerinden katalizöre yönlendirilir iken 7 adet engel yerleştirildiği durumda 175 noktada akış katalizöre yönlendirilmektedir. Bu nedenle, kanallara yerleştirilen engel sayısının artması reaktantların daha fazla noktada katalizör yüzeyine yönelmesine neden olmaktadır. Bunun neticesinde katalizör yüzeyindeki reaktant ve reaksiyon oranları arttırılmış olmakta ve akım yoğunluğu değerleri yükselmektedir. Engel sayısının artmasına bağlı akım yoğunluğu değerlerindeki artış benzer çalışmalarda da ortaya konulmuştur [46]. Standart serpantine kıyasla, katot plakalarında 4, 5, 6 ve 7 adet engel bulunan hücrelerin akım yoğunlukları sırasıyla %6,20, %6,67, %7,47 ve %8,47 oranlarında artış göstermiştir.

Tablo 6.4 incelendiğinde, yatay kanallara yerleştirilen engel sayısı akım yoğunluğunda artışa neden olurken, diğer taraftan basınç düşüm değerlerinde de artışa neden olmaktadır. Standart serpantinde engel olmaksızın basınç düşüm değeri 5,15 kPa olarak tespit edilirken, 4, 5, 6 ve 7 adet engel bulunan hücrelerin basınç düşüm değerleri sırasıyla 23,02 kPa, 26,12 kPa, 28,78 kPa ve 32,09 kPa olarak belirlenmiştir. Dikkat edildiğinde kanala eklenen her bir engel basınç düşüm değerini arttırmış, reaktantları pompalamak için gereken gücü arttırmıştır. Bu basınç düşüm değerleri dikkate alınarak hücrenin net güç çıkışları değerlendirildiğinde, kanala engel yerleştirilmesinin pompalama kaybını arttırmasına rağmen hücrenin net güç çıkışında artış sağladığı belirlenmiştir. Standart serpantine kıyasla, katot plakalarında 4, 5, 6 ve 7 adet engel bulunan hücrelerin net güç değerleri sırasıyla %3,61, %3,64, %4,09 ve %4,67 oranlarında artış göstermiştir.

- *Engel sayılarının basınç dağılım görüntüleri*

Engel sayı varyasyonlarında en önemli etken olan basınç düşüm değerlerinin incelenmesi için katot kanal/GDL yüzeyinden alınan basınç görüntüleri (0,4V'de) Şekil 6.13'de gösterilmektedir. Basınç dağılımları genel olarak incelendiğinde, serpantin akış alanı doğası gereği, reaktant girişinden çıkışına kadar kanal boyunca basınç değerlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Benzer değişimler literatürdeki serpantin modellerinde görülmüştür [153]. Tablo 6.5'de standart serpantin ve farklı sayıda engel bulunan modellere ait reaktantların hücreye giriş ve çıkış basınç değerleri ve modellerin basınç düşüm değerleri verilmektedir. ANSYS programında modelleme yapılırken,

bütün modellerin çıkış basınç değeri 101325 Pa (1 atm) olarak belirlenmiş ve modellerin giriş basınç değerleri simüle edilmiştir.



Şekil 6.13. Farklı engel sayılarına göre hücrelerin basınç dağılımları.

Analizler neticesinde, katot plakasının yatay kanallarına engel yerleştirilmesi giriş basınç değerlerinin yükselmesine neden olduğu görülmüştür. Şekil 6.13'e dikkat edildiğinde, engel sayısının artırılması özellikle giriş kanalındaki basınç değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Engel sayısının artması basınç düşüm değerlerini doğrudan etkilemiştir. Serpantine kıyasla katot plakalarında 4, 5, 6 ve 7 adet engel bulunan hücrelerin giriş basınç değerleri sırasıyla %16,78, %19,70, %22,19 ve %25,30 oranlarında artış göstermiştir. Standart serpantinde engel olmaksızın basınç düşüm değeri 5,15 kPa olarak tespit edilirken, 4, 5, 6 ve 7 adet engel bulunan hücrelerin basınç düşüm değerleri sırasıyla 23,02 kPa, 26,12 kPa, 28,78 kPa ve 32,09 kPa olarak

belirlenmiştir. Engel sayısındaki artışa bağlı olarak basınç düşüm değerleri yükselmesine rağmen yükselen basınç değerlerinin hücrede oluşan suyun tahliyesine katkı yaptığı ve reaktantların katalizör yüzeyine olan kütle transferini iyileştirdiği düşünülmektedir [49].

**Tablo 6.5.** Engel sayı varyasyonlarına göre katot plaklarının basınç değerleri.

Model adı	Basınç (giriş) (kPa)	Basınç (çıkış) (kPa)	Katot basınç düş. ( $\Delta P$ , kPa)
Serpantin (boş)	106,47	101,32	5,15
4 adet engel	124,34	101,32	23,02
5 adet engel	127,45	101,32	26,12
6 adet engel	130,10	101,32	28,78
7 adet engel	133,41	101,32	32,09

- *Engel sayılarının sıcaklık dağılım görüntüleri*

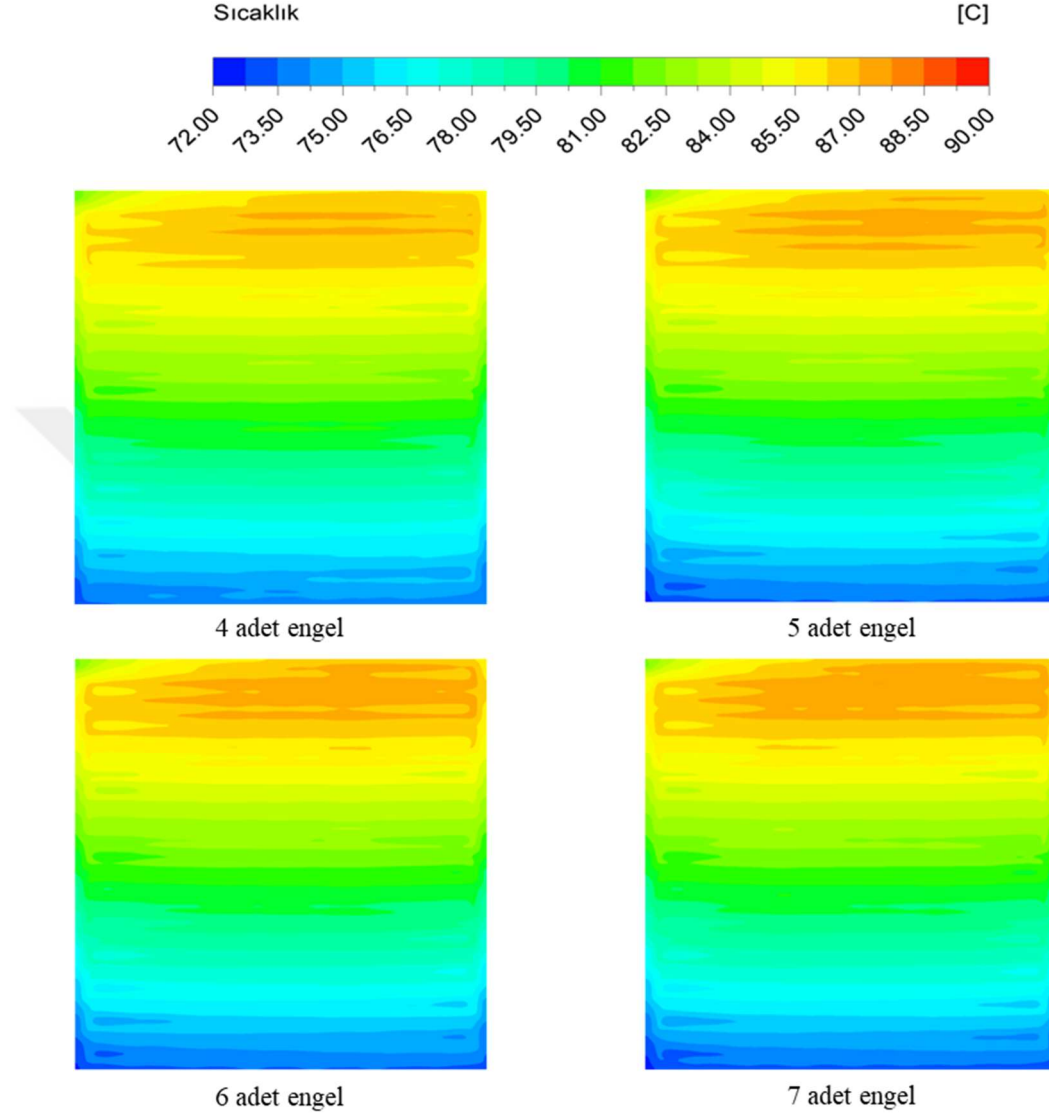
Sıcaklık dağılımı görüntüleri hücrede reaksiyonların bölgesel olarak ne yoğunlukta gerçekleştiğini gösteren önemli bir parametredir. Tablo 6.6’da katot plakasının her bir yatay kanalına yerleştirilen farklı sayıdaki engellerin katot katalizör/membran yüzeyinde oluşturmuş olduğu en yüksek, en düşük sıcaklık değerleri ve farkları verilmektedir. Oluşan bu sıcaklık değerlerine dikkat edildiğinde, katot akış kanalına engel yerleştirilen modellerin tamamında standart serpantine kıyasla maksimum sıcaklık değerleri yükselmiştir. Buna ek olarak, yine bütün engele sahip modellerde, standart serpantine kıyasla minimum sıcaklık değerleri düşmüştür. Yatay kanallara yerleştirilen engel sayısının artması hücrelerin katot katalizör/membran yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değerlerini yükseltirken, en düşük sıcaklık değerlerini de azalttığı ve aktif alan içerisindeki sıcaklık farkını arttırdığı tespit edilmiştir. Aktif alan içerisindeki sıcaklık değişimi boş serpantin modelde 11,10°C olarak tespit edilirken, farklı engel sayılarına sahip modellerde bu 13,61°C - 14,51°C aralığında değişen değerlerde olduğu görülmüştür.

**Tablo 6.6.** Engel sayı varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri.

Model adı	Max. sıcaklık (°C)	Min. sıcaklık (°C)	Sıcaklık değişimi ( $\Delta T$ , °C)
Serpantin (boş)	85,26	74,16	11,10
4 adet engel	86,61	73,00	13,61
5 adet engel	86,91	72,64	14,27
6 adet engel	87,08	72,70	14,38
7 adet engel	87,10	72,59	14,51

Şekil 6.14’e dikkat edildiğinde, her bir yatay kanala yerleştirilen engel sayısındaki artış genel sıcaklık dağılımı görüntülerinde büyük bir farklılık sağlamamıştır. Aktif alandaki genel dağılım bütün modellerde benzer olup, reaksiyonların yoğun olarak gerçekleştiği, reaktantların giriş

bölgesinde yoğunlaşmıştır. Buradaki görüntülerde, engel sayısının artmasının maksimum sıcaklık bölgesinin biraz daha geniş alana yayılmasına neden olduğu görülmüştür.



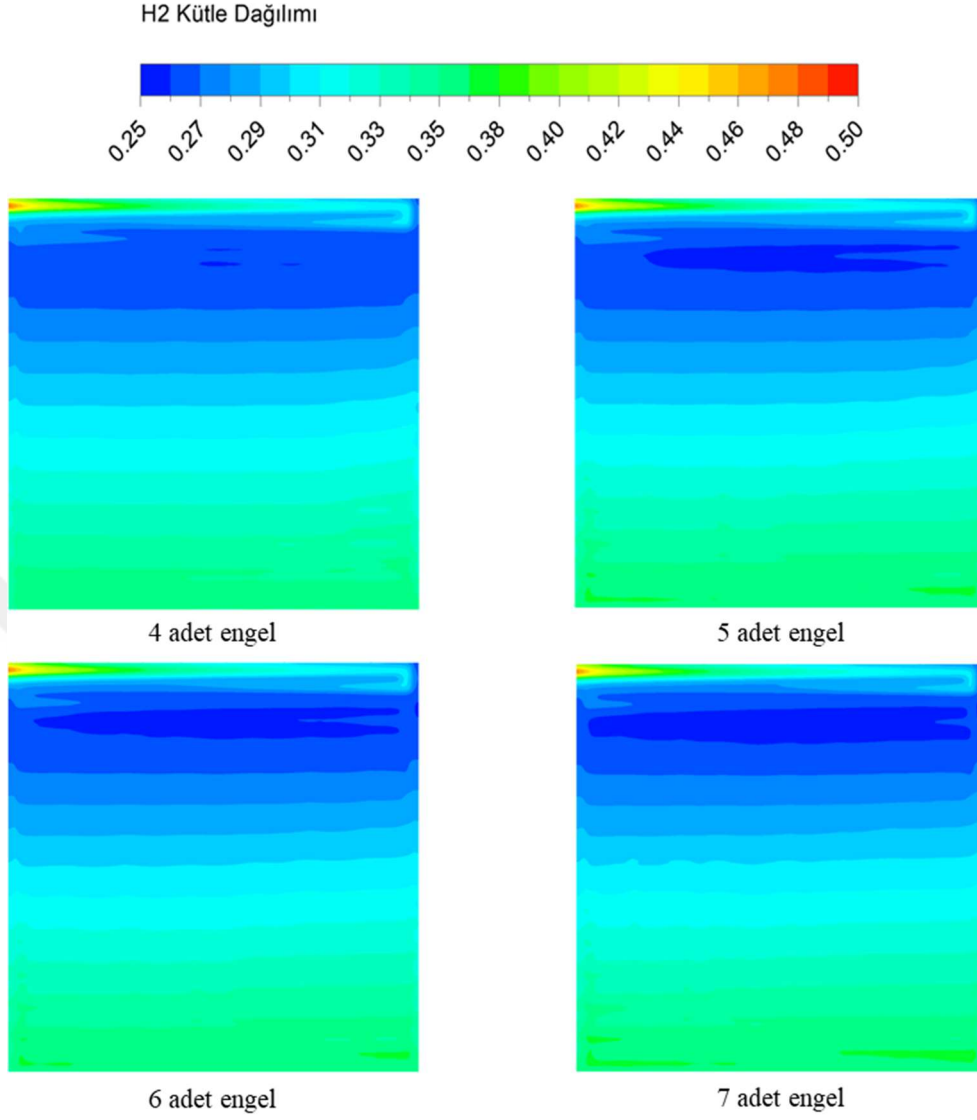
Şekil 6.14. Farklı engel sayılarına göre hücrelerin sıcaklık dağılımları.

Engel sayısının artması, reaktant konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgelerde, reaksiyon yoğunluğunun artırması sonucu sıcaklık değerlerinde artışa neden olmaktadır. Diğer taraftan aktif alanın reaktant giriş bölgelerinde hızla tükenen taze reaktantlardan dolayı, aktif alanın alt/çıkış bölgelerinde reaktant konsantrasyonu daha düşük olmaktadır. Bu nedenden dolayı, reaktant çıkış bölgelerine yakın alanlarda engel sayısı fazla olan modellerde daha düşük sıcaklık değerleri tespit edilmiştir.

- *Engel sayılarının H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Farklı engel sayılarının oluşturduğu H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri Şekil 6.15’ de verilmektedir. Görüntüler hücrelerin anot GDL/katalizör yüzeyinden alınan hidrojen (H<sub>2</sub>) kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Tüm modellerin anot kanal girişlerinde H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O oranı 0,6-0,4 olarak tanımlanmıştır. Genel olarak reaksiyon yoğun olarak gerçekleştiği bölgelerde hidrojen oranlarının azaldığı görülmektedir. Anot tarafında hidrojen moleküllerinin katalizör yüzeyinde reaksiyona girmesi ile hidrojen moleküllerinin azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalarda da bu durumun, hidrojenin reaksiyona katılmasından kaynaklandığı bildirilmiştir [150]. Buna ek olarak, hücre aktif alanında yukarıdan aşağı kademeli olarak H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının arttığı görülmektedir. Bu durum ise aktif alanın alt bölgelerine doğru taze reaktant konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir. Ayrıca, katot tarafında da oksijen konsantrasyonunun azalması, anot tarafında aktif alanın alt bölgelerinde hidrojenin yeterince reaksiyona girmemesi ve artmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Şekil 6.15 incelendiğinde, engel sayısının değişmesi genel H<sub>2</sub> kütle dağılımlarında büyük şekilde bir değişikliğe yol açmamıştır. Engel sayısının artması, aktif alanın üst bölgesinde tüketilen hidrojen moleküllerinin artmasına ve düşük seviyede H<sub>2</sub> kütle oranlarının bu bölgelerde oluşmasına yol açmıştır. Katot plakasının her bir yatay kanalına yerleştirilen engel sayısının artması ile daha fazla noktada hidrojen molekülleri katalizör yüzeyine doğru yönlendirilmekte ve katalizör yüzeyine kütle transferi arttırılmaktadır. Bu şekilde özellikle hidrojen konsantrasyonu açısından yüksek olan bölgelerde engel sayısının artması, bu bölgelerde hidrojenin daha hızlı tüketilmesine neden olduğu düşünülmektedir. Standart engel bulunmayan serpantin modelinde, anot katalizör/GDL yüzeyindeki minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu 0,2720 olarak tespit edilirken, engel bulunan modellerde minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu 0,2560 ile 0,2597 arasında değişmiştir. H<sub>2</sub> kütle fraksiyonunun engel bulunan modellerde daha düşük görülmesinin nedeni, hidrojen tüketiminin ve reaksiyon oranının engel bulunan modellerde daha yüksek olması ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Katot plakasının yatay kanallarında 7 adet engel bulunan modelin minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, standart serpantine kıyasla %5,88 oranında düşük olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan yatay kanallarında 4 adet engel bulunan modelin minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, standart serpantine kıyasla %4,52 oranında düşük olduğu da görülmüştür.

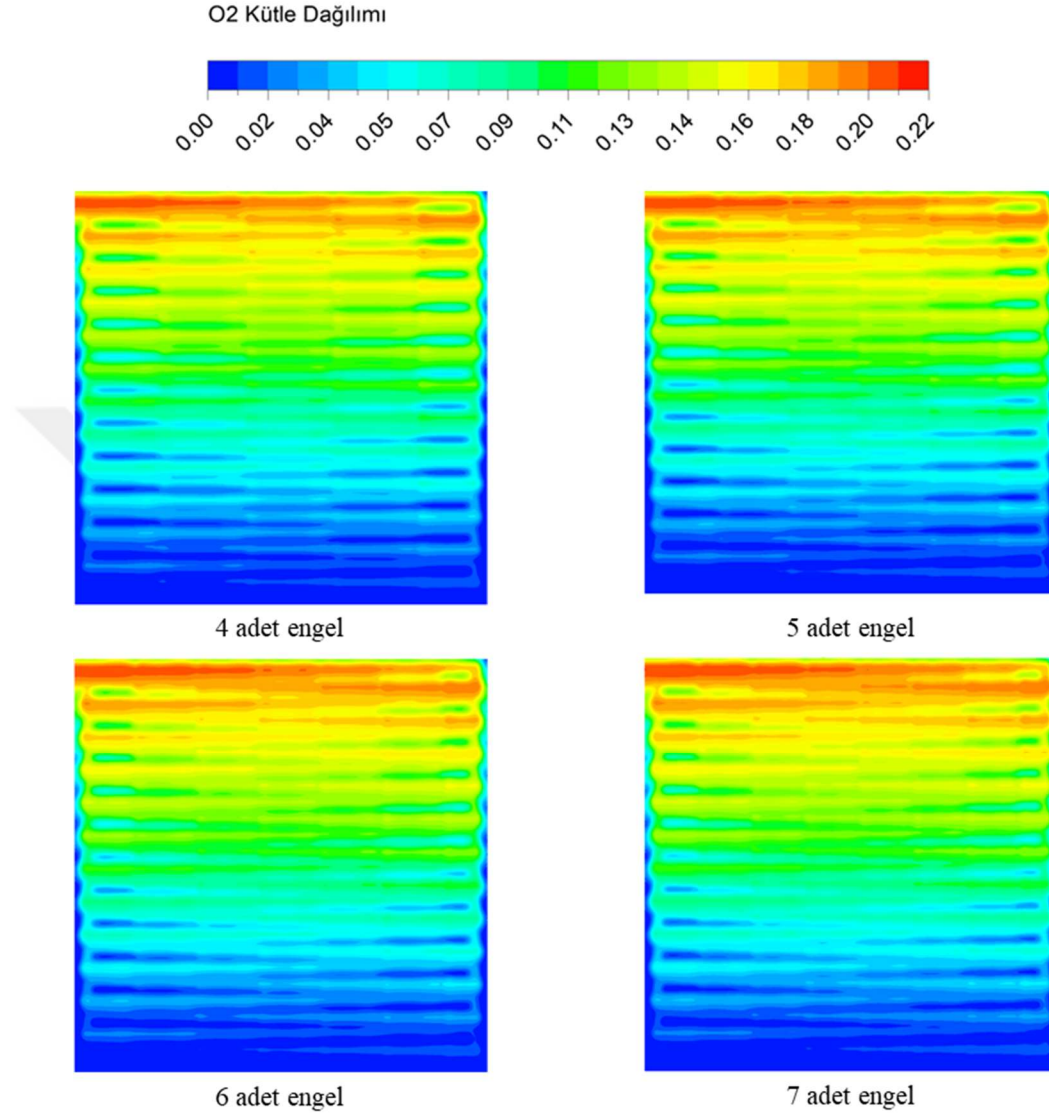


Şekil 6.15. Farklı engel sayılarına göre hücrelerin H<sub>2</sub> kütle dağılımları.

- *Engel sayılarının O<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Katot tarafından beslenen hava içerisindeki oksijen molekülleri, GDL üzerinden katalizör yüzeyine dağılarak elektrokimyasal reaksiyonu tamamlama görevine sahiptir. Bu reaksiyonun dağılımı ve seviyesi hücrede oluşan sıvı suyun durumunu, açığa çıkan ısıyı ve akım değerlerini etkilemektedir. Analizler modellenirken, katot tarafındaki O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O oranları 0,21/0,3 olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.16'da farklı engel sayılarının hücrenin katot GDL/katalizör yüzeyinde oluşturduğu O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Serpantin akış alanı deseni sonucu olarak bütün modellerde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları kanal girişinden çıkışına kadar kademeli olarak azalarak/tüketilerek devam etmiştir. O<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarındaki bu kademeli azalma literatürdeki benzer çalışmalarda da görülmüştür [153]. Bu durumun girişten çıkışa kanal boyunca devam eden reaksiyonlar sonucu O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunun tüketilerek azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir [151]. Ayrıca, elektrokimyasal

reaksiyon sonucu su oranının da artması aktif alanın son bölümlerinde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunu oldukça düşük seviyelerde görüntülenmesine neden olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 6.16.** Farklı engel sayılarına göre hücrelerin O<sub>2</sub> kütle dağılımları.

Engel sayılarına göre O<sub>2</sub> kütle dağılımları incelendiğinde, oksijenin aktif alana girdiği katot plakasının ilk yatay kanalında farklılıklar gözlemlenmiştir. Kanaldaki engel sayısının artması, katalizör yüzeyindeki oksijen konsantrasyonunun yüksek olduğu alanların genişlemesine neden olduğu görülmüştür. Plakanın ilk iki yatay kanalında bu farklılıklar gözlemlenirken, genel olarak benzer dağılımlar görülmüştür. Katot kanallarına yerleştirilen engel sayısının artması, oksijen moleküllerinin katalizör yüzeyine ulaşma miktarını arttırdığı düşünülmektedir. Literatürdeki engel bulunan çalışmalarda da katalizör yüzeyine olan kütle transferinin arttığı bildirilmiştir [41]. Dikkat edildiğinde, engel bulunan konumlarda, düz bir akış görüntüsü yerine boğum yapmış ve O<sub>2</sub> kütle

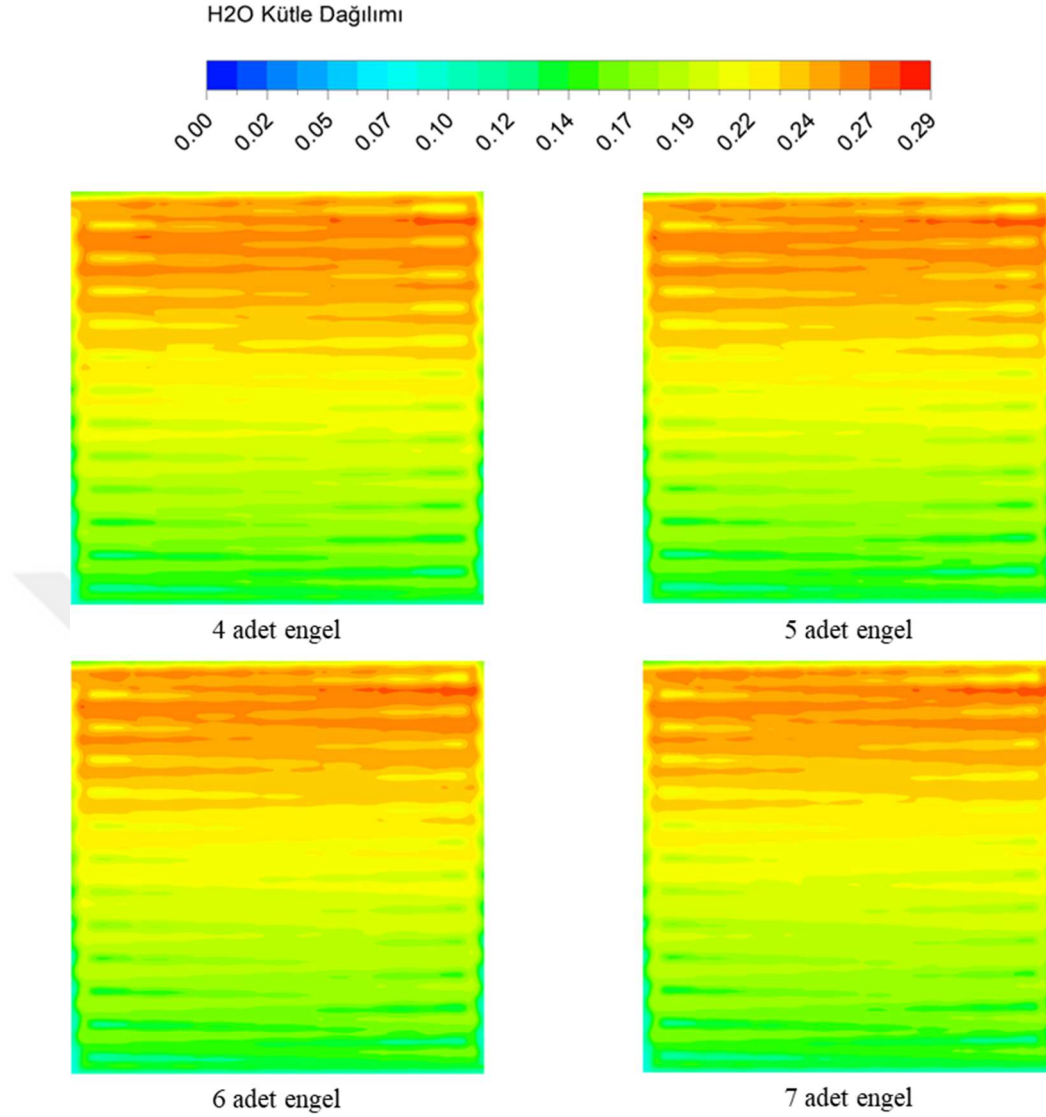
fraksiyonu artmış olduğu görülmektedir. Engel bulunmayan serpantin modelinde, katot GDL/katalizör yüzeyindeki ortalama O<sub>2</sub> kütle fraksiyon değeri 0,064 olarak tespit edilirken. Engele sahip modeller arasında, en düşük ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı 4 adet engel bulunan modelde 0,085 oranında ve en yüksek ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı 7 adet engel bulunan modelde 0,091 oranında tespit edilmiştir. Bütün engel bulunan modellerde katalizör yüzeyine ulaşan O<sub>2</sub> kütle oranı serpantine kıyasla artış göstermiştir. Bu artış oranı %32,8 - %42,2 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, katot plakasındaki engel sayısının artırılması katalizör yüzeyine beslenen reaktant kütle transferine önemli seviyede iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

- *Engel sayılarının H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri*

H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri sıvı su dağılımını göstermeyip, hidrojen ve oksijenin reaksiyonu sonucu açığa çıkan gaz fazındaki suyu göstermekte ve sıvı suyun oluşabileceği yoğun veya zayıf bölgeleri ifade etmektedir. Şekil 6.17’de farklı sayıda engel bulunan modellerin katot katalizör/GDL yüzeyindeki H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon dağılımları gösterilmektedir. Hücredeki elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan su gaz fazında kabul edilmiştir. ANSYS tarafından buradaki suyun bir sis bulutu olduğu ifade edilmiştir [142].

Görüntüler incelendiğinde, hücre aktif alanının giriş bölgelerinden aşağı (reaktant çıkış bölgesine doğru) H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının azalarak devam ettiği görülmektedir. Bu durumun reaktantların kanal boyunca tüketilmesine ve çıkış bölgelerine yakın alanlarda reaksiyonların azalmasına bağlı değiştiği düşünülmektedir. Engel sayılarının H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon dağılımları üzerindeki etkileri dikkate alındığında genel olarak benzer dağılım karakteristiği görülmüştür. Engel sayısının artması, elektrokimyasal reaksiyon aktivitesinin yüksek olduğu alanların genişlemesine neden olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir ifade ile katalizör yüzeyindeki reaksiyon oranları ve alanları bir miktar artmıştır. Bu durumun, daha fazla engel sayesinde oksijen moleküllerinin engellere çarparak daha fazla oranda GDL içerisine yönelmesine ve katalizör yüzeyine ulaşan oksijen moleküllerinin artması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Standart serpantin aktif alan içerisinde en yüksek H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,268 olarak belirlenirken, engelli modellerde ise en yüksek H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,275 ile 7 adet engel bulunan modelde görülmüştür. Akış alanlarına engel yerleştirilen bütün modellerin aktif alanlarındaki maksimum H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonları yükselmiştir. Bu artış oranı %2,16 - %2,61 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, katot akış plakasındaki engel sayısının artırılması ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarını çok fazla etkilememiş gibi görünmesine rağmen, anot tarafında beslenen hidrojen miktarının da bu değişimi sınırlayabileceği düşünülmektedir. Bu durum daha fazla reaktant beslenmesi durumunda aktif alanın diğer bölgelerinde de H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının artırılabilirliği ve hücreden reaksiyonlar sonucu elde edilebilecek akım yoğunluğunun artırılabilirliği anlamını taşımaktadır.



Şekil 6.17. Farklı engel sayılarına göre hücrelerin H<sub>2</sub>O kütle dağılımları.

### 6.3. Engellerin Yükseklik Varyasyonu Sonuçları

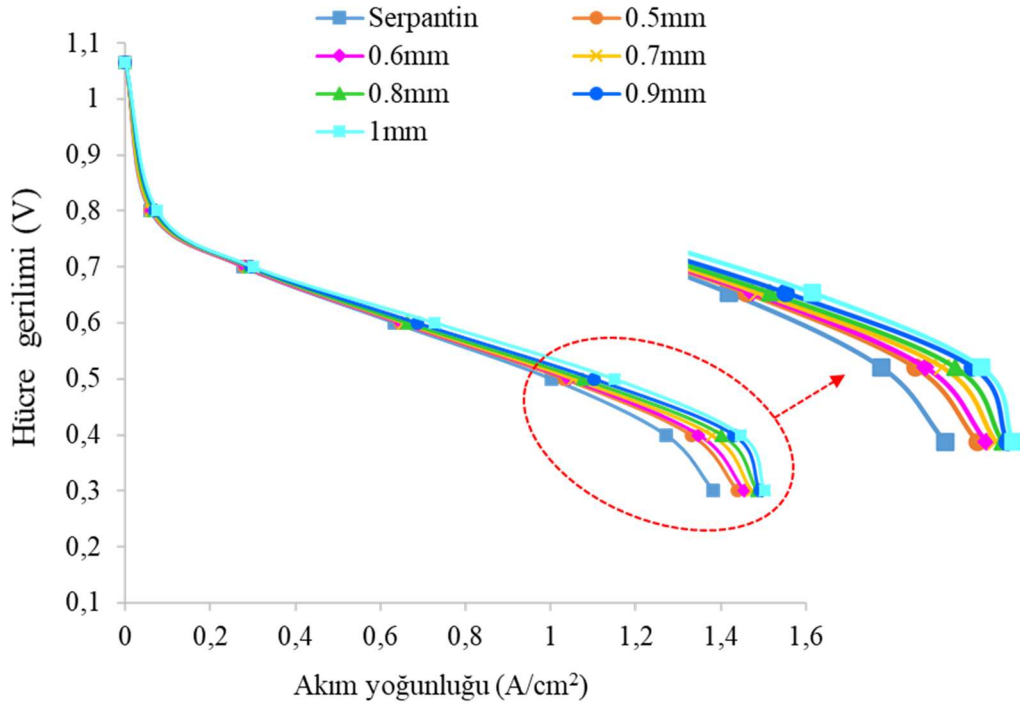
Birinci ve ikinci engel varyasyonları sonucu, en yüksek hücre net güç üretimi sağlayan bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm engel formu ve hücrenin her bir yatay kanalında 7 adet engel sayısı devamındaki varyasyonlar için belirlenmiş ve diğer varyasyonlar için sabit kabul edilmiştir. Engel sayı varyasyonu ardından, engel yüksekliğinin optimize edilmesi için yükseklik varyasyonuna geçilmiştir. Bu amaçla, 0,5 - 1 mm arasında 0,1mm aralıklarla artan 6 farklı yüksekliğe sahip 6 farklı model analiz edilmiştir. Şekil ve sayı varyasyonunda olduğu gibi yükseklik varyasyonunda da kanal derinliği 1 mm olan serpantin akış alanı üzerine engeller yerleştirilerek analiz edilmiştir. ANSYS' deki analizler şekil ve sayı varyasyonundaki aynı sınır şartları ve koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.7'de engel yüksekliklerinin neden olduğu basınç düşüm değerleri ve hücrelerin net güç çıkış değerleri verilmektedir. Değerler hücrenin

maksimum güç çıkışı sağladığı 0,4V gerilim değerinde alınmıştır. Şekil 6.18’de ise katot plakasına yerleştirilen engel yüksekliklerine göre modellerin akım yoğunluğu/gerilim değerleri verilmektedir.

**Tablo 6.7.** Engel sayı varyasyonu sonuçları.

Model adı	Akım yoğ. (A/cm <sup>2</sup> )	Güç yoğ. (W/cm <sup>2</sup> )	Katot basınç düş. (ΔP, kPa)	Pompa. kaybı (W)	Net güç (W)
Serpantin (boş)	1,2708	0,5083	5,15	0,1033	12,605
0.5 mm engel	1,3303	0,5321	14,39	0,2802	13,022
0.6 mm engel	1,3483	0,5393	20,87	0,3982	13,085
0.7 mm engel	1,3785	0,5514	32,09	0,5924	13,193
0.8 mm engel	1,4013	0,5605	55,02	0,9555	13,057
0.9 mm engel	1,4317	0,5727	97,55	1,4752	12,842
1 mm engel	1,4474	0,5790	177,04	2,4239	12,050

Tablo 6.6’ daki sayısal değerler incelendiğinde, akış kanallarına yerleştirilen engel yüksekliğinin artması akım yoğunluğu değerlerinde artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Buradaki artış, kademeli şekilde ve her engel yüksekliği arttığında yükselmiştir. Engel yüksekliğindeki artışın katot kanalındaki reaktantları daha fazla GDL içerisine yönlendirdiği düşünülmektedir. Kanal içerisinde düz şekilde akış rejimi gösteren oksijen molekülleri, engellerin üst bölgesi ile GDL arasındaki daralan alandan geçmeye zorlanmaktadır. Bu daralan kanal geçişinde oksijen moleküllerinin bir kısmı GDL içerisine yönlendirilerek katalizör yüzeyine ulaşmaktadır. Engel yüksekliğinin artması bu kesiti daha da daraltmakta ve daha fazla oksijen molekülünü GDL içerisine ve katalizöre doğru yönlendirmektedir. Bunun neticesinde ise katalizör yüzeyinde yüksek konsantrasyonlu ve daha geniş alanlara yayılan oksijen molekülleri oluşmakta ve elektrokimyasal reaksiyon aktivitesi artmaktadır. Artan reaksiyon sonucunda ise açığa çıkan elektron, ısı ve su miktarları da artış göstermektedir. Standart serpantine kıyasla, katot plakalarında 0,5mm, 0,6mm, 0,7mm, 0,8mm, 0,9mm ve 1mm yüksekliğinde engel bulunan hücrelerin akım yoğunlukları sırasıyla %4,68, %6,10, %8,47, %10,27, %12,66 ve %13,90 oranlarında artış göstermiştir. Literatürdeki engel yükseklikleri üzerine yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar görülmüştür [44,49].



**Şekil 6.18.** Farklı engel yüksekliklerine göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri.

Tablo 6.6' daki sayısal ifadelerin gösterdiği diğer bir önemli kaide ise engel yüksekliklerinin artmasının katot plakasındaki basınç farkı/basınç düşüm değerlerini yükseltmesidir. Plakanın giriş ve çıkış basınçları arasındaki fark pompalama gücünü ifade etmekte olup, yüksek basınç düşümlerinin hücrenin net güç çıktısını düşürdüğü bilinmektedir. Katot plakasının kanallarında bulunan engel yüksekliklerinin artması, basınç düşüm değerlerinin de artmasına neden olduğu görülmüştür. Özellikle 0.8mm engel yüksekliği değerinde ve sonrasındaki artışlarda, basınç düşüm değerlerinin hücrenin net gücünü düşürücü şekilde parazit pompalama kaybını arttırdığı görülmüştür. Standart serpantinde engel olmaksızın basınç düşüm değeri 5,15 kPa olarak tespit edilirken, 0,5mm, 0,6mm, 0,7mm, 0,8mm, 0,9mm ve 1mm yüksekliğinde engel bulunan hücrelerin basınç düşüm değerleri sırasıyla 14,39 kPa, 20,87 kPa, 32,09 kPa, 55,02 kPa, 97,55 kPa ve 177,04 kPa olarak belirlenmiştir. Bu basınç düşüm değerleri dikkate alınarak hücrenin net güç çıkışları değerlendirildiğinde, kanaldaki engel yüksekliklerinin arttırılması pompalama kaybını arttırmasına rağmen hücrenin net güç çıkışında artış sağladığı (1mm hariç) belirlenmiştir. Standart serpantine kıyasla, katot plakalarında 0,5mm, 0,6mm, 0,7mm, 0,8mm ve 0,9mm yüksekliğinde engel bulunan hücrelerin net güç değerleri sırasıyla %3,31, %3,81, %4,66, %3,58 ve %1,88 oranlarında artış göstermiştir. 1mm kanal yüksekliğinde ise standart serpantine kıyasla %4,40 oranında hücre net gücünde düşüş belirlenmiştir. Şekil 6.18' de gösterilen I-V eğrisine dikkat edildiğinde ise hücrelerin aktivasyon ve ohmik kayıp bölgelerinde benzer sonuçlar elde edilirken, kanaldaki engel yüksekliğinin arttırılması daha çok konsantrasyon bölgelerindeki kayıplarda fark oluşturduğu

görülmüştür. Genel olarak en yüksek akım yoğunluğu değerleri 1mm engel yüksekliğinde görülmesine rağmen pompalama kaybının yüksek olması hücrenin net güç çıkışını düşürmüştür. Bu aşamada 0,7 mm engel yüksekliği en yüksek net güç çıktısını sağlayan model olarak belirlenmiştir.

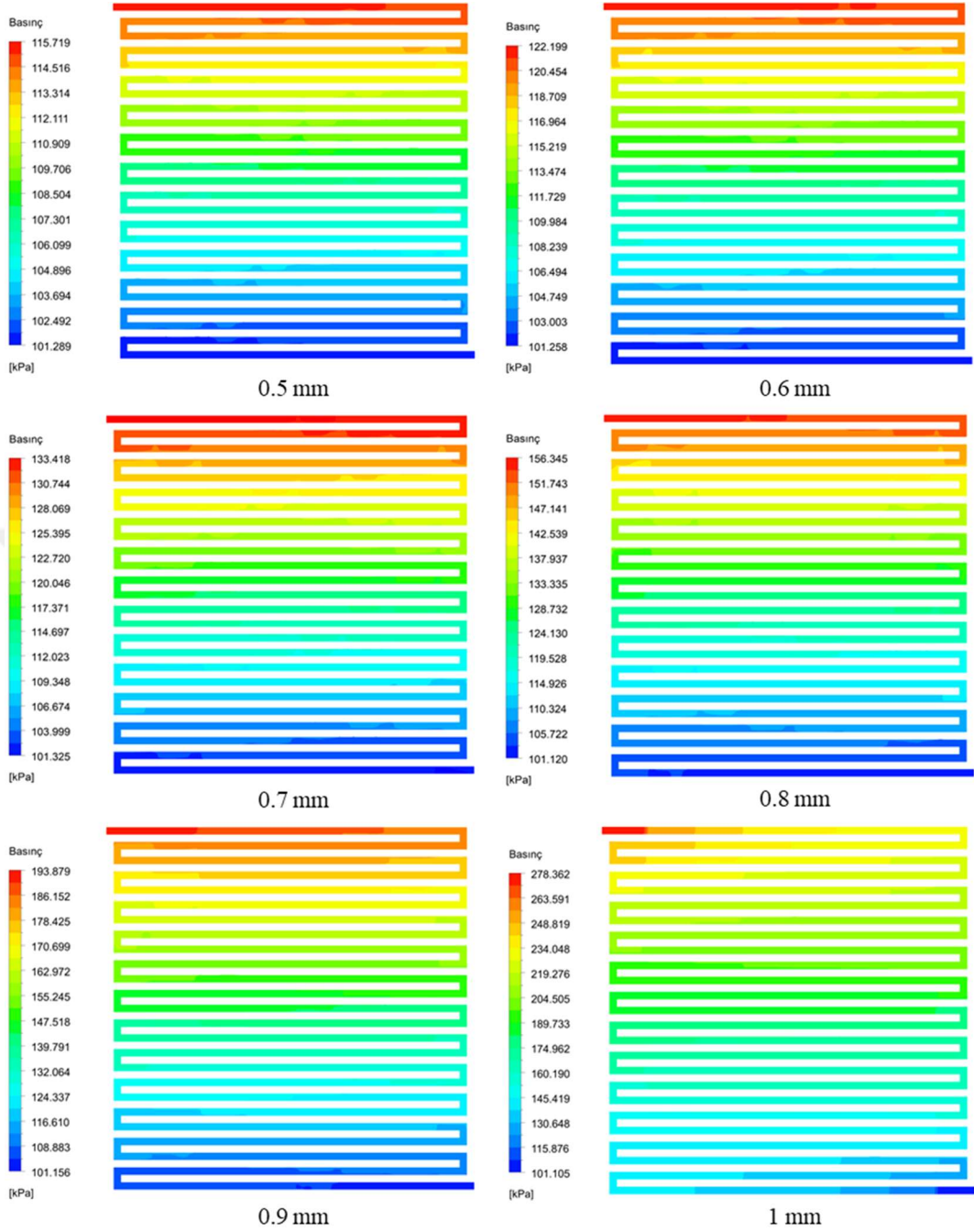
- *Engel yüksekliklerinin basınç dağılım görüntüleri*

Engel yüksekliklerinin neden olduğu basınç düşümleri nedeniyle, hücredeki basınç dağılımı görüntüleri ve değerleri büyük önem arz etmektedir. Şekil 6.19’da gösterilmekte olan basınç görüntüleri 0.4V hücre geriliminde ve katot kanal/GDL yüzeyinden alınmıştır. Basınç dağılımları genel olarak incelendiğinde, serpantin akış alanı doğası gereği, reaktant girişinden çıkışına kadar kanal boyunca basınç değerlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Benzer değişimler literatürdeki serpantin modellerinde görülmüştür [153]. Tablo 6.8’de standart serpantin ve farklı yüksekliklerde engel bulunan modellere ait reaktantların hücreye giriş ve çıkış basınç değerleri ve modellerin basınç düşüm değerleri verilmektedir. ANSYS programında modelleme yapılırken, bütün modellerin çıkış basınç değeri 101325 Pa (1 atm) olarak belirlenmiş ve modellerin giriş basınç değerleri simüle edilmiştir.

**Tablo 6.8.** Engel yükseklik varyasyonlarına göre katot plakalarının basınç değerleri.

Model adı	Basınç (giriş) (kPa)	Basınç (çıkış) (kPa)	Katot basınç düş. ( $\Delta P$ , kPa)
Serpantin (boş)	106,47	101,32	5,15
0.5 mm engel	115,72	101,32	14,39
0.6 mm engel	122,20	101,32	20,87
0.7 mm engel	133,42	101,32	32,09
0.8 mm engel	156,34	101,32	55,02
0.9 mm engel	193,88	101,32	97,55
1 mm engel	278,36	101,32	177,04

Analizler neticesinde, katot plakasındaki engel yüksekliklerinin artırılması, giriş basınç değerlerinin yükselmesine neden olduğu görülmüştür. Diğer engel varyasyonlarından farklı olarak engel yüksekliği varyasyonunda basınç değerleri ciddi miktarda artış göstermiştir. Bu nedenle basınç farklarının sağlıklı gösterimi için Şekil 6.19’da gösterilen basınç dağılımları kendi skalalarında gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin basınç dağılımları.

Şekil 6.19'a dikkat edildiğinde, katot plakasının girişinden çıkışına bütün modellerde basınç değerlerinin kademeli olarak düştüğü görülmüştür. 0.8mm yüksekliğine kadar basınç düşüm değerleri kabul edilebilir aralıkta olup, 0.9mm ve 1mm engel yüksekliği değerlerinde basınç düşümleri ciddi miktarda yükselmiştir. Standart serpantinde engel olmaksızın basınç düşüm değeri 5,15 kPa olarak tespit edilirken, 0,5mm, 0,6mm, 0,7mm, 0,8mm, 0,9mm ve 1mm yüksekliğinde engel bulunan hücrelerin basınç düşüm değerleri sırasıyla 14,39 kPa, 20,87 kPa, 32,09 kPa, 55,02 kPa, 97,55 kPa ve 177,04 kPa olarak belirlenmiştir.

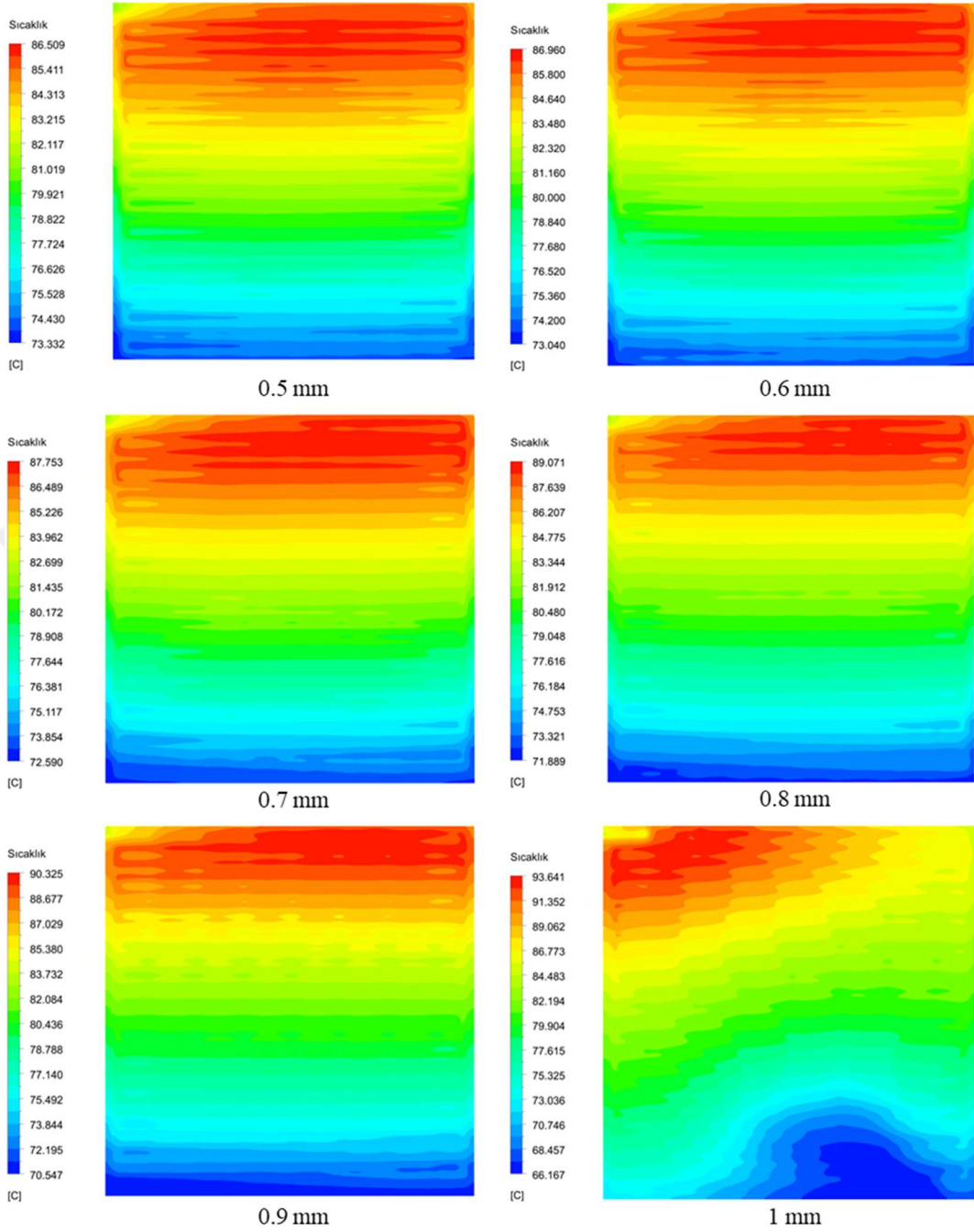
- *Engel yüksekliklerinin sıcaklık dağılım görüntüleri*

Sıcaklık dağılımı görüntüleri hücrede reaksiyonların bölgesel olarak ne yoğunlukta gerçekleştiğini gösteren önemli bir parametredir. Tablo 6.9’da katot plakasının farklı yükseklikteki engellerin katot katalizör/membran yüzeyinde oluşturmuş olduğu en yüksek, en düşük sıcaklık değerleri ve farkları verilmektedir. Oluşan bu sıcaklık değerlerine dikkat edildiğinde, katot akış plakasındaki engel yüksekliklerinin artırılması, modellerin tamamında standart serpantine kıyasla maksimum sıcaklık değerleri yükseltmiştir. Buna ek olarak, yine bütün engele sahip modellerde, standart serpantine kıyasla minimum sıcaklık değerleri düşmüştür. Katot plakasındaki engel yüksekliklerinin artması hücrelerin katot katalizör/membran yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değerlerini yükseltirken, en düşük sıcaklık değerlerini de azalttığı ve aktif alan içerisindeki sıcaklık farkını arttırdığı tespit edilmiştir. Aktif alan içerisindeki sıcaklık değişimi boş serpantin modelde 11,10°C olarak tespit edilirken, farklı engel yüksekliklerine sahip modellerde bu 13,18°C – 27,47°C aralığında değişen değerlerde olduğu görülmüştür.

**Tablo 6.9.** Engel yükseklik varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri.

Model adı	Max. sıcaklık (°C)	Min. sıcaklık (°C)	Sıcaklık değişimi ( $\Delta T$ , °C)
Serpantin (boş)	85,26	74,16	11,10
0.5 mm engel	86,51	73,33	13,18
0.6 mm engel	86,96	73,04	13,92
0.7 mm engel	87,75	72,59	15,16
0.8 mm engel	89,07	71,89	17,18
0.9 mm engel	90,32	70,55	19,77
1 mm engel	93,64	66,17	27,47

Şekil 6.20’de hücrelerin katot katalizör/membran yüzeyinden alınan sıcaklık dağılım görüntüleri verilmektedir. Aktif alandaki genel dağılımların 1mm hariç bütün modellerde benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca, reaksiyonların yoğun olarak gerçekleştiği, reaktantların giriş bölgesinde sıcaklık değerlerinin maksimum seviyelere çıktığı görülmüştür. Buradaki görüntülerde, engel yüksekliğinin artmasının maksimum sıcaklık bölgesinin biraz daha geniş alana yayılmasına neden olduğu görülmüştür.



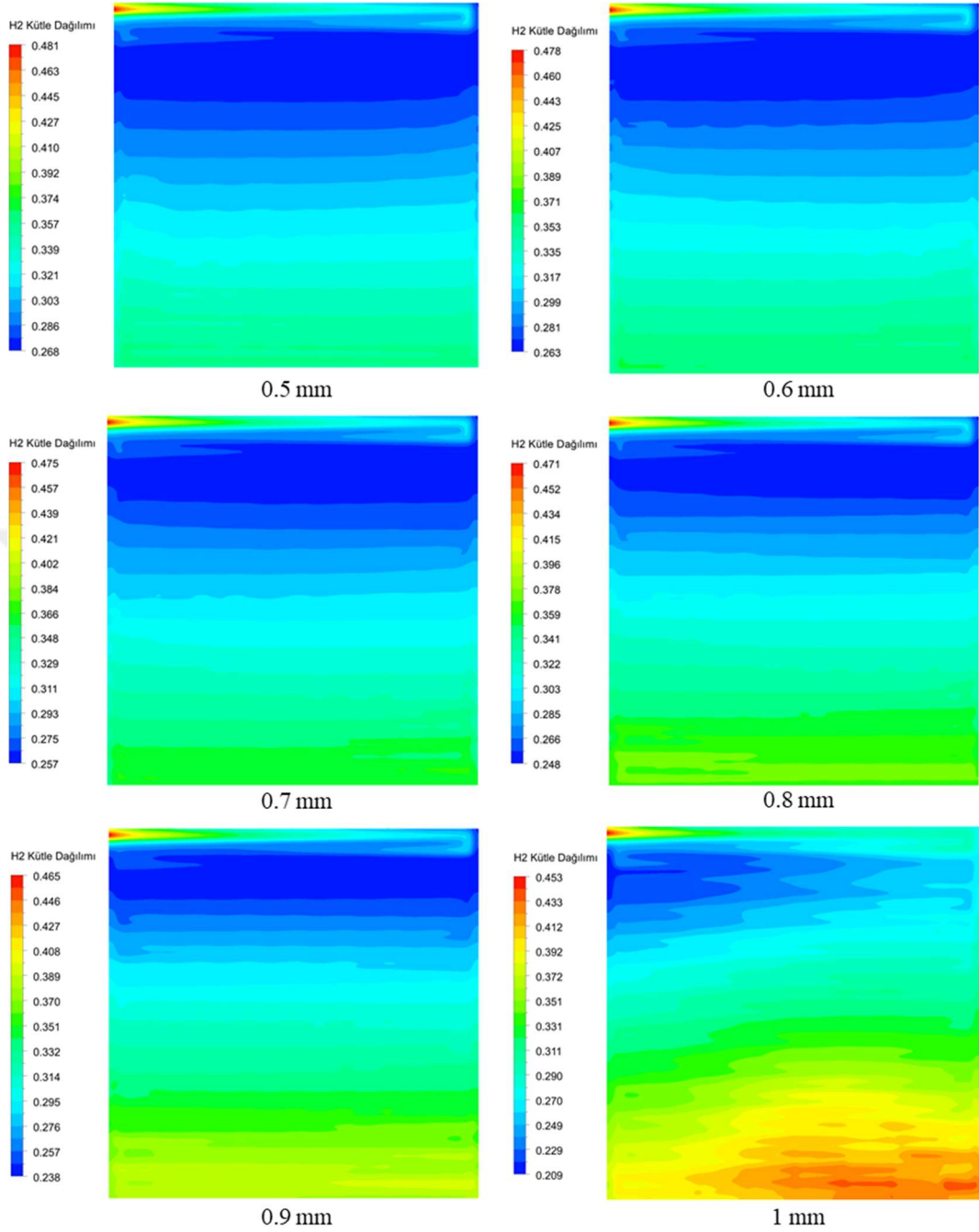
**Şekil 6.20.** Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin sıcaklık dağılımları.

Şekil 6.20'ye dikkat edildiğinde, engel yüksekliğinin artması, reaktant konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgelerde, reaksiyon yoğunluğunu arttırdığı ve bu şekilde sıcaklık değerlerinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan aktif alanın reaktant giriş bölgelerinde hızla tükenen taze reaktantlardan dolayı, aktif alanın alt/çıkış bölgelerinde reaktant konsantrasyonu daha düşük olmaktadır. Reaktant çıkış bölgelerine yakın alanlarda engel yüksekliği fazla olan modellerde daha düşük sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Burada 1mm engel yüksekliğine sahip modelin sıcaklık dağılımı diğer modellerden farklı gerçekleşmiştir. 1mm engel yapısında, kanalı tamamen kapatan

engelin, reaktant akışını tamamen rib altı bölge olarak ifade edilen, GDL tabakasının içerisine yönlendirmiştir. Bu sebeple reaksiyonlar kanal şeklinin etkisinde dağılmamış, GDL gözenekliliğine göre dağılım sergilemiştir. Standart serpantine kıyasla, katot plakalarında 0.5mm, 0.6mm, 0.7mm, 0.8mm ve 0.9mm yüksekliğinde engel bulunan hücrelerin maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla %1,47, %1,99, %2,92, %4,47, %5,93 ve %9,83 oranlarında artış göstermiştir.

- *Engel sayılarının H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Farklı engel yüksekliklerinin oluşturduğu H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri Şekil 6.21’ de verilmektedir. Görüntülerde hücrelerin anot GDL/katalizör yüzeyinden alınan hidrojen (H<sub>2</sub>) kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Tüm modellerin anot kanal girişlerinde H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O oranı 0,6-0,4 olarak tanımlanmıştır. Genel olarak, katot tarafında oksijen ve anot tarafında hidrojen konsantrasyonlarının yüksek olduğu giriş bölgelerinde, elektrokimyasal reaksiyonlar yoğun olarak gerçekleşmekte ve bu bölgelerde H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalarda da bu durumun, hidrojenin reaksiyona katılmasından kaynaklandığı bildirilmiştir [150]. Buna ek olarak, hücre aktif alanında yukarıdan aşağı kademeli olarak H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının arttığı görülmektedir. Bu durum ise aktif alanın alt bölgelerine doğru katot tarafındaki oksijen konsantrasyonunun azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir. Şekil 6.21 incelendiğinde, engel yüksekliğinin artması, H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının azaldığı veya hızla tüketildiği, yüksek reaksiyon aktivitesinin görüldüğü bölgeleri daraltmıştır. Burada, engel yüksekliğinin artması ile kanaldan GDL/katalizör yüzeyine olan H<sub>2</sub> kütle transferi artarak, daha dar bir alanda katalizör yüzeyinde yüksek hidrojen konsantrasyonunun oluşmasına ve hızla tüketilmesine neden olduğu düşünülmektedir. Aktif alanın çıkış bölgelerine doğru H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının arttığı görülmektedir. Normalde çıkış bölgelerinde hidrojen konsantrasyonu azalmaktadır. Fakat H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu ifadesi kütleli olarak diğer bileşenlerin (H<sub>2</sub>O) oranları ile alakalı olup, hücrenin çıkış bölgelerinde nem miktarının azalması sonucunda az olan hidrojen kütlelerinin H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu olarak yüksek görünmesi ile açıklanabilmektedir.



**Şekil 6.21.** Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin H<sub>2</sub> kütle dağılımları.

Standart engel bulunmayan serpantin modelinde, anot katalizör/GDL yüzeyindeki minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu 0,2720 olarak tespit edilirken, engel bulunan modellerde minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu 0,2081 ile 0,2674 arasında değişmiştir. Minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonunun engel bulunan modellerde daha düşük görülmesinin nedeni, hidrojen tüketiminin ve reaksiyon oranının engel bulunan modellerde daha yüksek olması ile alakalı olduğu düşünülmektedir. Katot plakasında 0,5 mm yüksekliğinde engel bulunan modelin minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, standart serpantine kıyasla %1,69 oranında düşük olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan 1mm yüksekliğinde engel

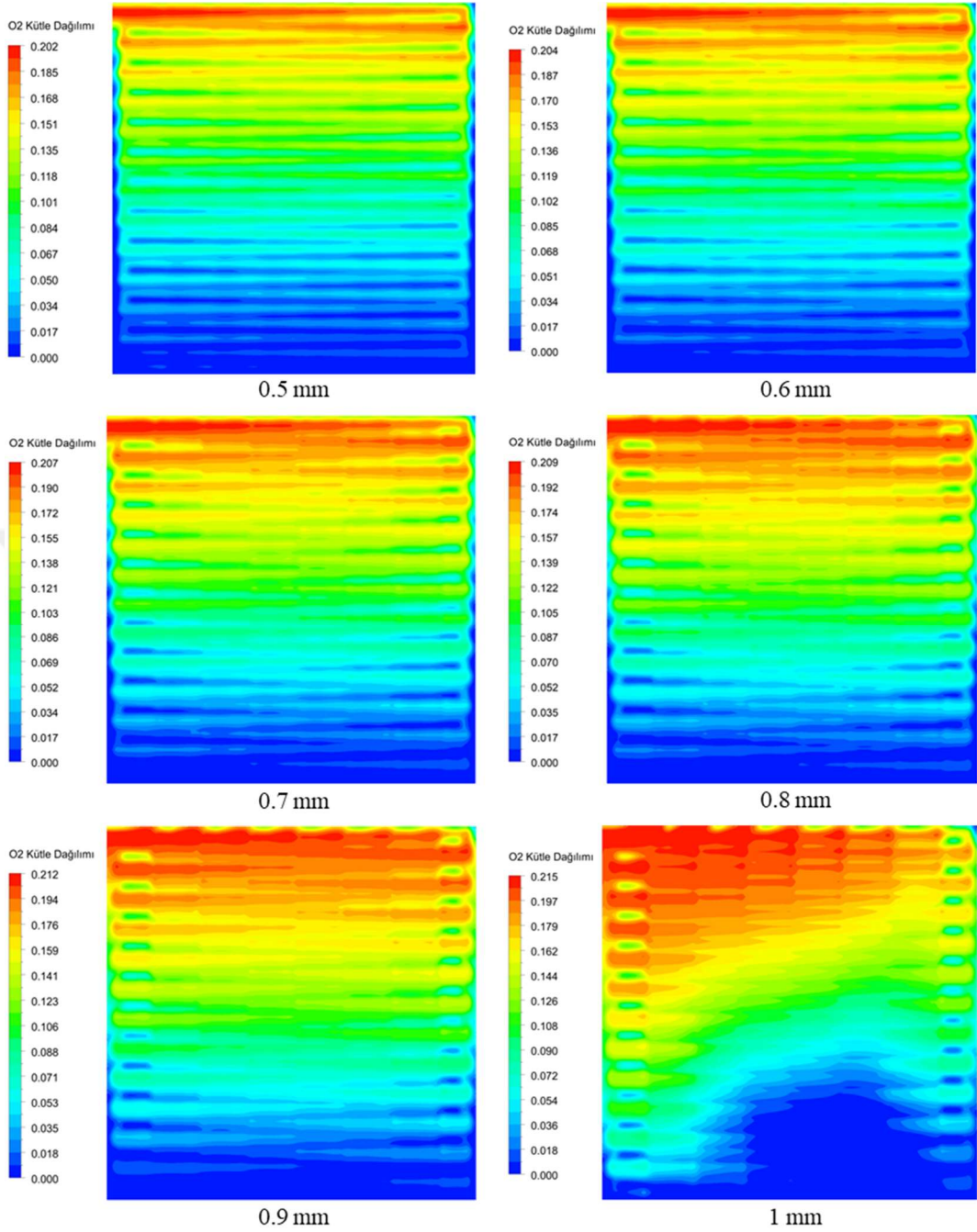
bulunan modelin minimum H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, standart serpantine kıyasla %23,49 oranında düşük olduğu da görülmüştür.

- *Engel sayılarının O<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Şekil 6.22’de farklı engel yüksekliklerinin hücrenin katot GDL/katalizör yüzeyinde oluşturduğu O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Bu reaksiyonun dağılımı ve seviyesi hücrede oluşan sıvı suyun durumunu, açığa çıkan ısıyı ve akım değerlerini etkilemektedir. Analizler modellenirken, katot tarafındaki O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O oranları 0,21/0,3 olarak tanımlanmıştır. Serpantin akış alanı deseni sonucu olarak bütün modellerde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları kanal girişinden çıkışına kadar kademeli olarak azalarak/tüketilerek devam etmiştir. O<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarındaki bu kademeli azalma literatürdeki benzer çalışmalarda da görülmüştür [153]. Bu durumun girişten çıkışa kanal boyunca devam eden reaksiyonlar sonucu O<sub>2</sub> kütle miktarının tüketilerek azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir [151]. Ayrıca, elektrokimyasal reaksiyon sonucu su oranının da artması aktif alanın son bölümlerinde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunu oldukça düşük seviyelerde görüntülenmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.22 incelendiğinde, engel bulunan konumlarda, düz bir akış görüntüsü yerine boğum yapmış ve O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu artmış olduğu görülmektedir. Görüntülerde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunun yüksek olduğu alanların en yüksekliğinin artması ile artış gösterdiği tespit edilmiştir. 1 mm engel yüksekliğine sahip model hariç bütün modeller kanal yapısı düzeninde bir dağılım sergilerken, 1 mm de kanal düzeni O<sub>2</sub> kütle dağılımını etkilememiştir. Bu durumun, 1mm engel yüksekliğinin kanal yapısını tamamen bloke etmesiyle, reaktant akışını tamamen GDL içerisine yönlendirmeye zorlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Engel bulunmayan standart serpantin modelinde, katot GDL/katalizör yüzeyindeki ortalama O<sub>2</sub> kütle fraksiyon değeri 0,064 olarak tespit edilirken. Engele sahip modeller arasında, en düşük ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı 0,5mm yüksekliğinde engel bulunan modelde 0,079 oranında ve en yüksek ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı 1mm yüksekliğinde engel bulunan modelde 0,111 oranında tespit edilmiştir. Bütün engel bulunan modellerde katalizör yüzeyine ulaşan O<sub>2</sub> kütle oranı serpantine kıyasla artış göstermiştir. Bu artış oranı %23,44 - %73,44 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, katot plakasındaki engel yüksekliğinin arttırılması katalizör yüzeyine beslenen hidrojen kütle transferine önemli seviyede iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

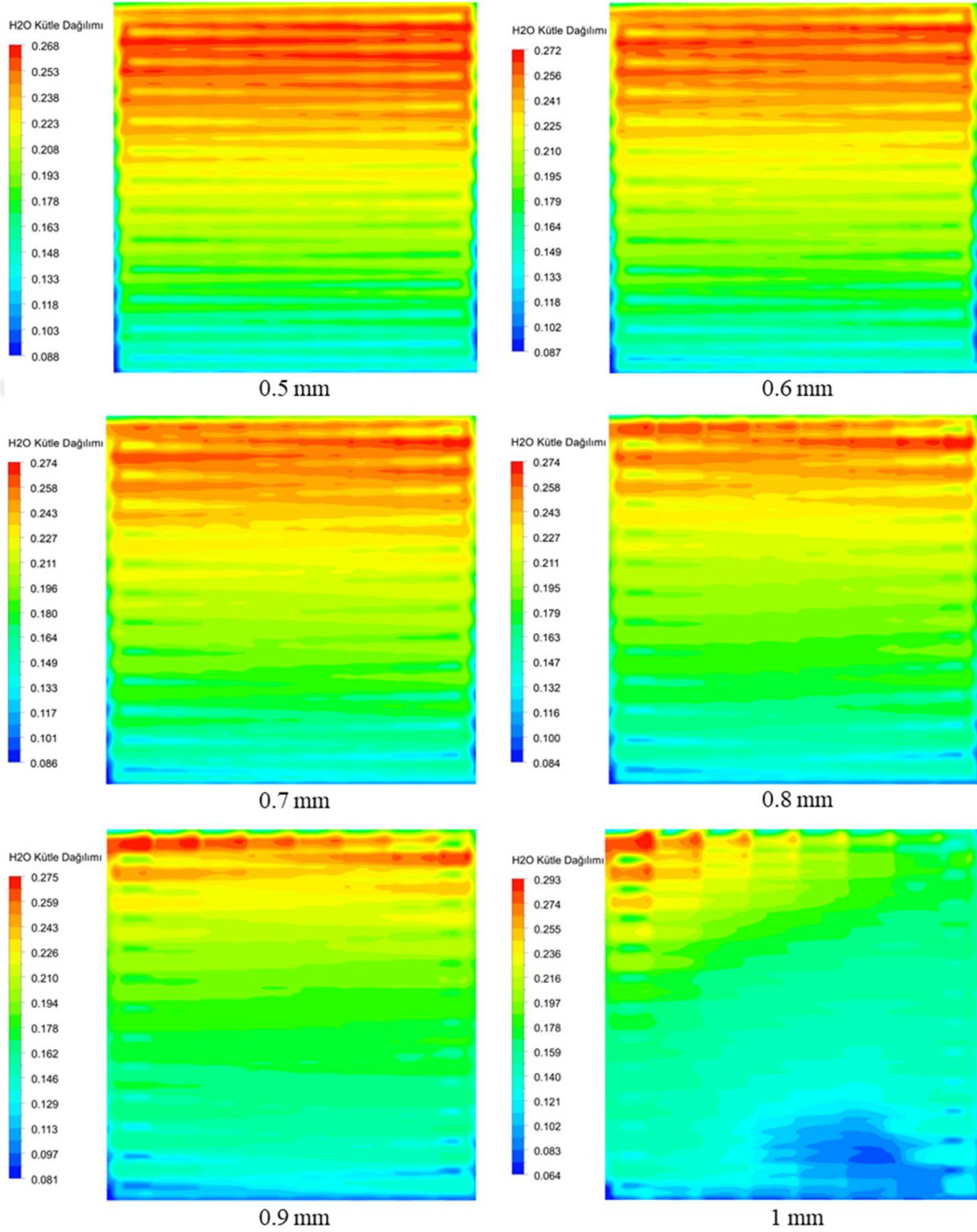


Şekil 6.22. Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin O<sub>2</sub> kütle dağılımları.

- *Engel yüksekliklerinin H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri*

H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri sıvı su dağılımını göstermeyip, hidrojen ve oksijenin reaksiyonu sonucu açığa çıkan gaz fazındaki suyu göstermekte ve sıvı suyun oluşabileceği yoğun veya zayıf bölgeleri ifade etmektedir. Şekil 6.23’de farklı yükseklikte engellere sahip modellerin katot katalizör/GDL yüzeyindeki H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon dağılımları gösterilmektedir. Hücredeki

elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan su gaz fazında kabul edilmiştir. ANSYS tarafından buradaki suyun bir sis bulutu olduğu ifade edilmiştir [142].



Şekil 6.23. Farklı engel yüksekliklerine göre hücrelerin H<sub>2</sub>O kütle dağılımları.

Görüntüler incelendiğinde, hücre aktif alanının giriş bölgelerinden aşağı (reaktant çıkış bölgesine doğru) H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının azalarak devam ettiği görülmektedir. Bu durumun reaktantların kanal boyunca tüketilmesine ve çıkış bölgelerine yakın alanlarda reaksiyonların azalmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Engel yüksekliklerinin H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon dağılımları üzerindeki

etkileri dikkate alındığında, 1mm engel yüksekliğine sahip model haricinde genel olarak benzer dağılım karakteristiği görülmüştür. Engel yüksekliğinin artmasının elektrokimyasal reaksiyon aktivitesinin daha dar alanlarda oluşmasına fakat daha yüksek yoğunlukta gerçekleşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Diğer bir ifade, plakadaki engel yüksekliğinin artması ile katalizör yüzeyindeki reaksiyon oranları artarken, maksimum H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon değerleri artış göstermiştir. Bu durum maksimum reaksiyon oluşan bölgede H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon değerlerini yükseltirken, aktif alan yüzeyindeki ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon değerlerini azaltmaktadır. Bu durumun, engel yüksekliğinin artması ile oksijen moleküllerinin engellere çarparak daha fazla oranda GDL içerisine yönlenmesine ve katalizör yüzeyine ulaşan oksijen moleküllerinin artması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.23' ün sayısal değerlerine dikkat edildiğinde, standart serpantin aktif alan içerisinde ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,2081 olarak belirlenirken, engelli modellerde ise en yüksek ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,2801 ile 0,5 mm engel yüksekliği bulunan modelde, en düşük ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,1604 ile 1 mm engel yüksekliği bulunan modelde görülmüştür. Akış alanlarına engel yerleştirilen bütün modellerin aktif alanlarındaki maksimum H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonları yükselmiştir. Bu artış oranı %0,86 - %9,71 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, katot akış plakasındaki engel yüksekliğinin artırılması ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarını çok fazla etkilememiş gibi görünmesine rağmen, anot tarafında beslenen hidrojen miktarının da bu değişimi sınırlayabileceği düşünülmektedir. Bu durum daha fazla reaktant beslenmesi durumunda aktif alanın diğer bölgelerinde de H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının arttırılabileceği ve hücreden reaksiyonlar sonucu elde edilebilecek akım yoğunluğunun arttırılabileceği anlamını taşımaktadır.

#### **6.4. Engellerin Konum Varyasyonu Sonuçları**

Birinci, ikinci ve üçüncü engel varyasyonları sonucu, en yüksek hücre net güç üretimi sağlayan bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm engel formu, hücrenin her bir yatay kanalında 7 adet engel sayısı ve 0.7 mm engel yüksekliği devamındaki konum varyasyonu için belirlenmiştir. Engel yüksekliği varyasyonu ardından, engel konumlarının optimize edilmesi için konum varyasyonuna geçilmiştir. Bu amaçla, katot ve anot plakaları üzerinde 9 farklı konumda engeller yerleştirilmiş modeller analiz edilmiştir. Engel konumları belirlenirken, "tam plaka" veya "yarı plaka" ifadeleri kullanılmıştır. Burada "tam plaka" ifadesi ile engellerin anot ve/veya katot plakasının bütün kanallarında engel konumlandırılmış anlamına gelmektedir. Diğer taraftan "yarı plaka" ifadesi ile anot ve/veya katot plakasındaki kanalların yarısı engeller konumlandırılmış anlamına gelmektedir. Üst ya da alt yarı olarak tabir edilen konum ise plakanın en üstte/en altta bulunan akış kanalı ile plakanın ortasında bulunan kanal arasında bulunan bölgedir. Tablo 6.10'da konum varyasyonları sırasında engellerin yerleştirildiği bölgelerin adları, akım yoğunlukları ve net güç çıktıları verilmektedir. Şekil, sayı ve yükseklik varyasyonunda olduğu gibi yükseklik

varyasyonunda serpantin akış alanı üzerine engeller yerleştirilerek analiz edilmiştir. ANSYS’deki analizler şekil, sayı ve yükseklik varyasyonundaki aynı sınır şartları ve koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Değerler hücrenin maksimum güç çıkışı sağladığı 0,4V gerilim değerinde alınmıştır.

**Tablo 6.10.**Engel konum varyasyonu sonuçları.

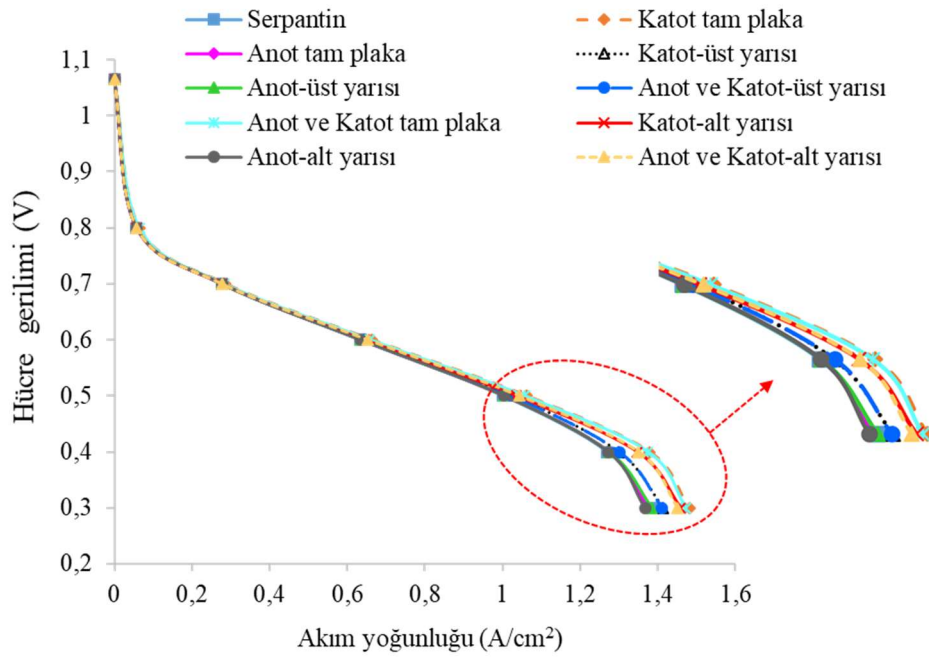
Model adı	Akım yoğ. (A/cm <sup>2</sup> )	Güç yoğ. (W/cm <sup>2</sup> )	Katot basınç düş. (ΔP, kPa)	Pompa. kaybı (W)	Net güç (W)
Serpantin (boş)	1,2708	0,5083	5,15	0,1033	12,605
Her iki tam plakada da engel mevcut	1,3746	0,5498	31,22	0,5777	13,169
Sadece anot plakasında engel mevcut	1,2733	0,5093	5,22	0,1071	12,626
Sadece katot plakasında engel mevcut	1,3785	0,5514	32,09	0,5924	13,193
Sadece anot plakasının alt yarısında engel mevcut	1,2733	0,5093	5,34	0,1070	12,626
Sadece katot plakasının alt yarısında engel mevcut	1,3479	0,5392	17,89	0,3438	13,136
Sadece anot plakasının üst yarısında engel mevcut	1,2740	0,5096	5,32	0,1066	12,633
Sadece katot plakasının üst yarısında engel mevcut	1,2989	0,5196	20,79	0,3967	12,593
Her iki plakanın sadece üst yarısında engel mevcut	1,3007	0,5203	21,25	0,4048	12,602
Her iki plakanın sadece alt yarısında engel mevcut	1,3500	0,5400	16,97	0,3275	13,183

Tablo 6.10’deki engel konum varyasyonlarının sayısal sonuçları incelendiğinde, öncelikle hücrenin herhangi bir plakasının herhangi bir bölgesine engel yerleştirilmesi, boş serpantine kıyasla akım yoğunluğunu arttırdığı görülmektedir. Dikkat çeken diğer bir husus ise katot plakasına yerleştirilen engellerin, anot plakasına yerleştirilen engellerden daha fazla akım yoğunluğunda artış sağladığı tespit edilmiştir. Her iki plakaya da engel yerleştirilmesi, çoğunlukla daha yüksek akım yoğunluğu sağladığı da görülmüştür. Anot plakasının alt, üst ya da tam olarak engel yerleştirilmesi, akım yoğunluğu üzerinde kayda değer bir farklılık oluşturmaz iken katot durum tam tersi oluşmuştur. Katot plakasının tam olarak engel modelinden oluşması, alt ve üst yarılarında engel bulunan modellere kıyasla daha fazla akım yoğunluğu oluşturmuştur. Tablo 6.10’da görüldüğü üzere en yüksek akım yoğunluğu 1,3785 A/cm<sup>2</sup> ile sadece katot plakasının tamamında engel bulunan modelde, en düşük akım yoğunluğu 1,2708 A/cm<sup>2</sup> ile standart serpantin modelinde görülmüştür. Buna ek olarak, her iki tam plakada engel bulunan modelin ise 1,3746 A/cm<sup>2</sup> ile en yüksek ikinci değere ulaştığı görülmüştür.

Engel konumları arasında dikkat çeken diğer bir husus ise katot basınç düşüm değerleri ve pompalama kayıp değerleridir. Genel olarak, engel yerleştirilen bütün modellerde katot basınç düşüm değerleri serpantine kıyasla artış göstermiştir. Anot plakasında engel bulunan modellerin katot basınç düşüm değerleri, katot plakasında engel bulunan modellerden düşük elde edilmiştir. Anot tarafı için basınç düşüm değerleri engellerin alt ya da üst yarısında olması ciddi farklılıklar göstermemiştir. Katot tarafı için ise engellerin üst yarıda olması daha yüksek basınç düşümü oluşmasına yol açmıştır. Tablo 6.10’da görüldüğü üzere en yüksek katot basınç düşümü 33,46 kPa

ile sadece katot plakasının tamamında engel bulunan modelde, en düşük akım yoğunluğu 5,15 kPa ile standart serpantin modelinde görülmüştür.

Engel konumlarına göre hücrelerin net güç çıktı verileri dikkate alındığında, en yüksek net güç çıkışı 13,193 W değeri ile sadece katot plakasının tamamında engel bulunan modelde, en düşük net güç çıkışı 12,593 W değeri ile katot plakasının üst yarısında engel bulunan modelde görülmüştür. Serpantine kıyasla, katot plakasının tamamında engel bulunan modelin net güç çıkışında %4,67 oranında artış görülmüştür. Şekil 6.24’de ise engel varyasyonları sonucu hücrelerin oluşturduğu akım yoğunluğu/gerilim grafiği verilmektedir. Konum varyasyonları hücrelerdeki aktivasyon ve ohmik kayıp bölgelerinde kayda değer bir gelişme sağlamadığı görülmüştür. Konum farklılıklarının etkileri küresel kayıp bölgelerinde kendini göstermiştir.



Şekil 6.24. Farklı engel konumlarına göre hücrenin akım yoğunluğu-gerilim değerleri.

- *Engel konumlarının basınç dağılım görüntüleri*

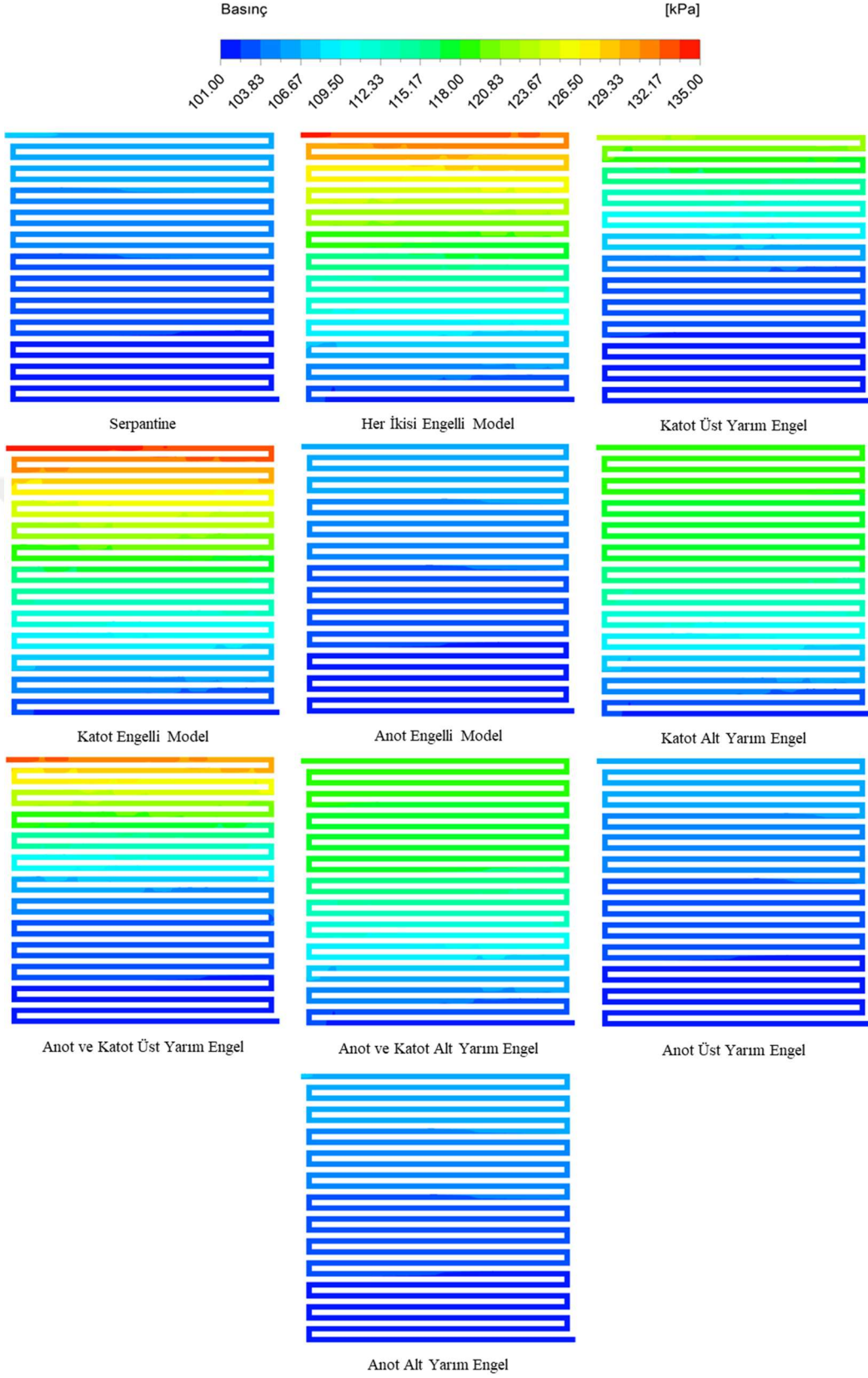
Şekil 6.25’de engel konumlarına göre hücrelerin basınç dağılımları gösterilmektedir. Basınç görüntüleri 0.4V hücre geriliminde ve katot kanal/GDL yüzeyinden alınmıştır. Basınç dağılımları genel olarak incelendiğinde, serpantin akış alanı doğası gereği, reaktant girişinden çıkışına kadar kanal boyunca basınç değerlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Benzer değişimler literatürdeki serpantin modellerinde görülmüştür [154]. Tablo 6.11’de standart serpantin ve farklı yüksekliklerde engel bulunan modellere ait reaktantların hücreye giriş ve çıkış basınç değerleri ve modellerin basınç düşüm değerleri verilmektedir. ANSYS programında modelleme yapılırken,

bütün modellerin çıkış basınç değeri 101325 Pa (1 atm) olarak belirlenmiş ve modellerin giriş basınç değerleri simüle edilmiştir.

**Tablo 6.11.** Engel konum varyasyonlarına göre katot plakalarının basınç değerleri.

Model adı	Basınç (giriş) (kPa)	Basınç (çıkış) (kPa)	Katot basınç düş. ( $\Delta P$ , kPa)
Serpantin (boş)	106,47	101,32	5,15
Her iki tam plakada da engel mevcut	132,54	101,32	31,22
Sadece anot plakasında engel mevcut	106,54	101,32	5,22
Sadece katot plakasında engel mevcut	133,41	101,32	32,09
Sadece anot plakasının alt yarısında engel mevcut	106,66	101,32	5,34
Sadece katot plakasının alt yarısında engel mevcut	119,18	101,32	17,89
Sadece anot plakasının üst yarısında engel mevcut	106,64	101,32	5,32
Sadece katot plakasının üst yarısında engel mevcut	122,11	101,32	20,79
Her iki plakanın sadece üst yarısında engel mevcut	122,57	101,32	21,25
Her iki plakanın sadece alt yarısında engel mevcut	118,29	101,32	16,97

Analizler neticesinde, katot plakalarındaki engel modellerinin anot plakalarındaki engel modellerine kıyasla daha fazla basınç farkı oluşturduğu tespit edilmiştir. Standart serpantin, anot tam plaka, anot üst ve anot alt yarımalarında engel bulunan modeller birbirine benzer bir basınç dağılımı göstermiştir. Bu grup en düşük basınç (5-6 kPa) farkı oluşturan, diğer bir ifade ile en düşük pompalama kaybı oluşturan konumlar olmuştur. Diğer taraftan, anot ve katot üst yarım, katot üst yarım ve katot alt yarımalarında engel bulunan modeller ise kendi aralarında benzer dağılımlar göstermiştir. Bu grupta ise hücrelerin giriş ve çıkış basınç farkları bir miktar (17-18 kPa) artış göstermiştir. Her iki plakada tam engel bulunan, katot tam plaka ve anot-katot üst yarım engel bulunan modeller ise en yüksek basınç (30-32 kPa) farkı değerlerini oluşturmuş ve kendi aralarında benzer dağılım göstermiştir. Genel olarak plakaların üst yarılı ve katot tarafına engel yerleştirilmesi kayda değer farklılıklar oluşturduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ise aktif alanın reaktant giriş bölgesinde yüksek konsantrasyonda oksijen ve hidrojenin bulunması ve reaksiyon aktivitesinin bu bölgede yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



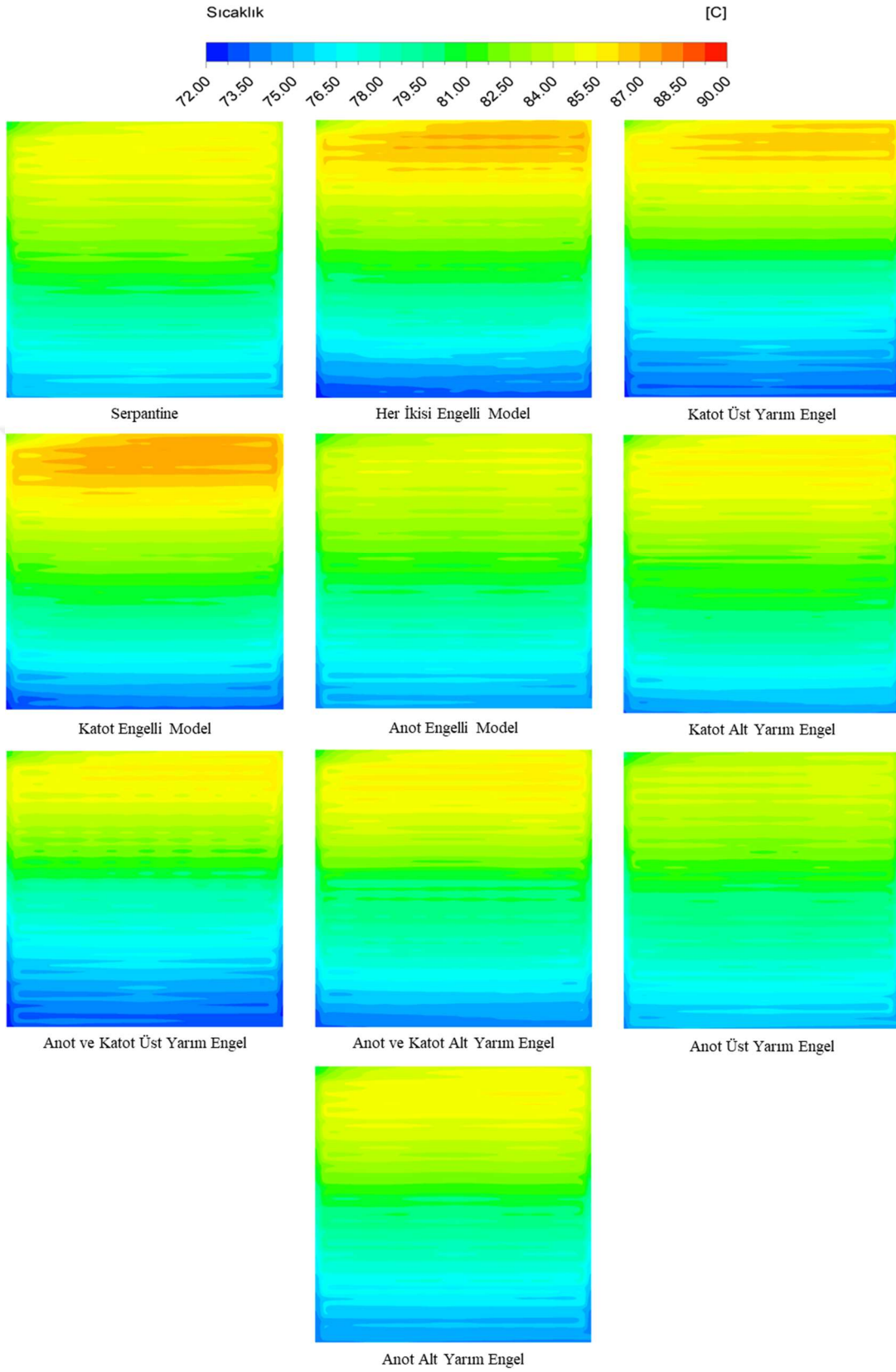
Şekil 6.25. Farklı engel konumlarına göre hücrelerin basınç dağılımları.

- *Engel konumlarının sıcaklık dağılım görüntüleri*

Sıcaklık dağılımı görüntüleri hücrede reaksiyonların bölgesel olarak ne yoğunlukta gerçekleştiğini gösteren önemli bir parametredir. Tablo 6.12’de katot plakasının farklı konumlarda bulunan engellerin katot katalizör/membran yüzeyinde oluşturmuş olduğu en yüksek, en düşük sıcaklık değerleri ve farkları verilmektedir. Katot katalizör/membran yüzeyindeki sıcaklık değerlerine dikkat edildiğinde, anot plakasına engel yerleştirilmesi katot katalizör/membran yüzeyinde oluşan maksimum sıcaklık değerlerini düşürürken, katot plakasına engel yerleştirilmesi yüzeyde oluşan maksimum sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Bu durumun, katot tarafındaki oksijen moleküllerinin kütle transferinin anot tarafındaki hidrojen kütle transferinden daha baskın bir etkiye sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna ek olarak, katot tarafında oluşan suyun oksijenin katalizör yüzeyine ulaşmasını sınırladığı, engellerin akışı bu kısımlara zorla yönlendirmesi ile reaksiyon aktivitesinin zayıf olduğu alanlarda elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağladığı düşünülmektedir. Diğer taraftan, minimum sıcaklık değerlerine dikkat edildiğinde, serpantine kıyasla maksimum sıcaklık değerleri yükselmiş modellerin minimum sıcaklık değerlerinde azalma görülmüştür. Bu durumun ise engel konumlarına göre daha yüksek reaksiyon aktivitesi oluşturarak, daha fazla reaktantın tüketilmesi ve özellikle aktif alanın çıkış bölgelerinde reaktant konsantrasyonunun azalması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Katot katalizör/membran yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değeri sadece tam katot plakasında engel bulunan modelde 87,09 °C olarak elde edilmiştir. Standart serpantin en yüksek sıcaklık değeri 85,26 °C olarak belirlenirken, Sadece anot plakasının üst yarısında engel bulunan modelde 84,30°C olarak belirlenmiştir. Buradaki maksimum sıcaklık en yüksek reaksiyon yoğunluğunun olduğu bölgede ortaya çıkan değerdir. Aktif alan içerisindeki sıcaklık değişimi boş serpantin modelde 11,10°C olarak tespit edilirken, farklı engel yüksekliklerine sahip modellerde bu 9,67°C – 14,50°C aralığında değişen değerlerde olduğu görülmüştür. Şekil 6.26’da hücrelerin katot katalizör/membran yüzeyinden alınan sıcaklık dağılım görüntüleri verilmektedir.

**Tablo 6.12.** Engel konum varyasyonlarına göre katot katalizör/membran yüzeyi sıcaklık değerleri.

Model adı	Max. sıcaklık (°C)	Min. sıcaklık (°C)	Sıcaklık değişimi (ΔT, °C)
Serpantin (boş)	85,26	74,16	11,10
Her iki tam plakada da engel mevcut	86,63	72,38	14,25
Sadece anot plakasında engel mevcut	84,64	73,76	10,88
Sadece katot plakasında engel mevcut	87,09	72,59	14,50
Sadece anot plakasının alt yarısında engel mevcut	85,20	75,53	9,67
Sadece katot plakasının alt yarısında engel mevcut	85,56	73,46	12,10
Sadece anot plakasının üst yarısında engel mevcut	84,30	74,10	10,20
Sadece katot plakasının üst yarısında engel mevcut	86,21	72,56	13,65
Her iki plakanın sadece üst yarısında engel mevcut	85,49	72,39	13,10
Her iki plakanın sadece alt yarısında engel mevcut	85,55	72,91	12,64



Şekil 6.26. Farklı engel konumlarına göre hücrelerin sıcaklık dağılımları.

Şekil 6.26'daki görüntüler incelendiğinde, aktif alanın yukarisından aşagısına doğru serpantine ve engel bulunan bütün modellerde sıcaklık değerlerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Bu durumun girişten çıkışa doğru reaktant konsantrasyonunun azalmasına bağlı reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Serpantin tasarımından kaynaklanan bu durum literatürdeki çalışmalarda da benzer şekilde rapor edilmiştir [34,103]. Aktif alanın üst bölgesinde yoğunlaşan bölgelere dikkat edildiğinde, sadece tam katot plakasında engel olan modelde sıcaklık değerlerinin diğer modellerden daha yüksek ve daha geniş alana yayıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, her iki tam plakada engel bulunan modelde de yüksek sıcaklık dağılımı tespit edilmiştir. Bu modellerin ardından diğer bir yüksek sıcaklık dağılımı gösteren model ise katot plakasının sadece üst bölgesinde engel bulunan modeldir. Anot alt yarım ve anot tam plaka modelleri ise en düşük ortalama sıcaklık değerlerini göstermiştir.

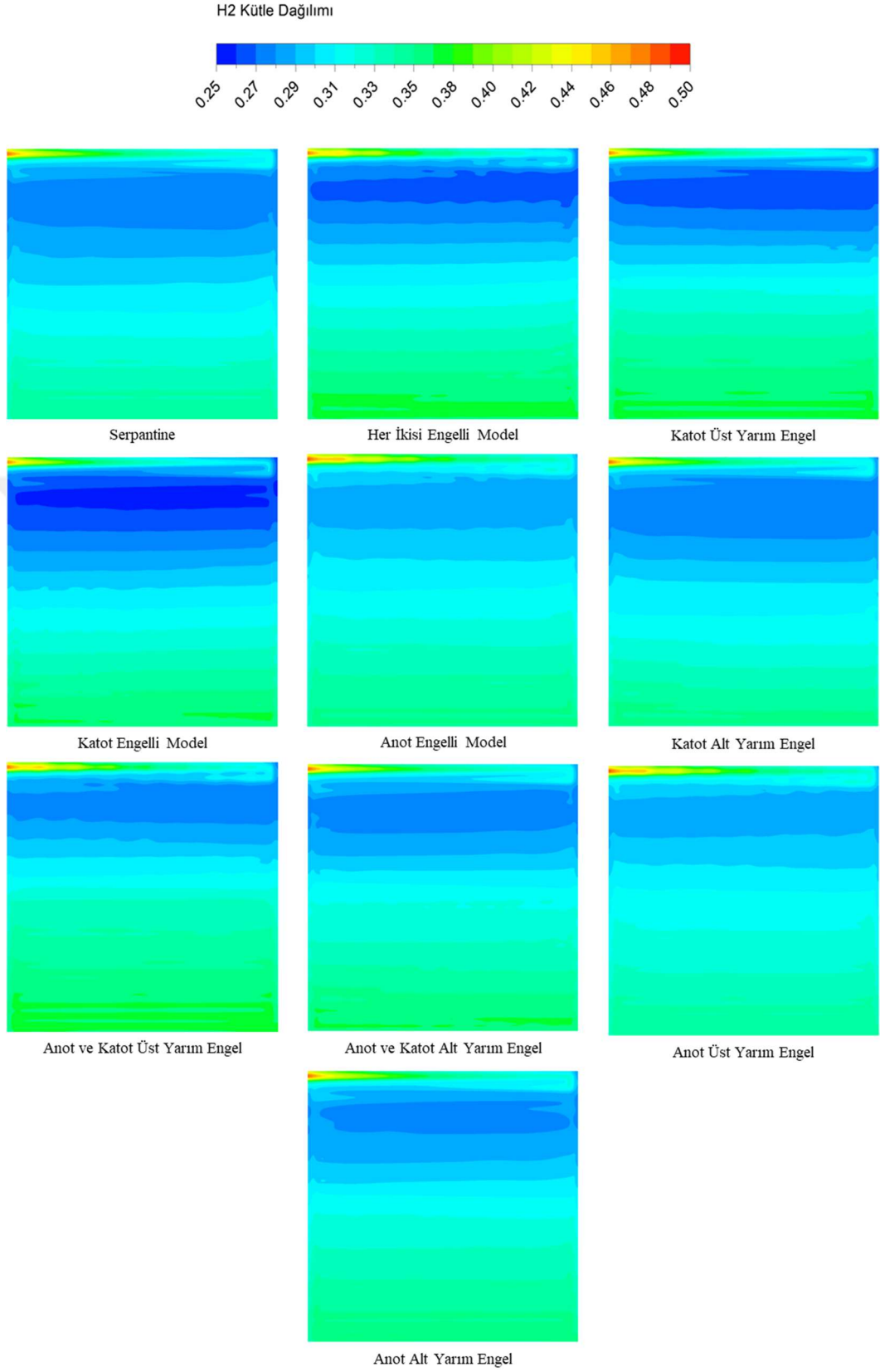
- *Engel konumlarının H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Farklı engel konumlarının oluşturduğu H<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri Şekil 6.27' de verilmektedir. Görüntülerde hücrelerin anot GDL/katalizör yüzeyinden alınan hidrojen (H<sub>2</sub>) kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Tüm modellerin anot kanal girişlerinde H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O oranı 0,6-0,4 olarak tanımlanmıştır. Genel olarak, katot tarafında oksijen ve anot tarafında hidrojen konsantrasyonlarının yüksek olduğu giriş bölgelerinde, elektrokimyasal reaksiyonlar yoğun olarak gerçekleşmekte ve bu bölgelerde H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının azaldığı görülmektedir. Benzer şekilde literatürdeki çalışmalarda da bu durumun, hidrojenin reaksiyona katılmasından kaynaklandığı bildirilmiştir [151]. Buna ek olarak, hücre aktif alanında yukarıdan aşağı kademeli olarak H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının arttığı görülmektedir. Bu durumun, serpantin akış kanalı boyunca yukarıdan aşağı doğru H<sub>2</sub>O konsantrasyonunun, hidrojen konsantrasyonundan daha fazla azalma göstermiş olabileceğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Analiz koşullarında anot kısmında nem oranının kısmen düşük olması ve reaksiyonlar sonucunda oluşan ısının etkisiyle anottaki çıkış bölgelerinde hidrojen kütle fraksiyonu H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonundan düşük olabileceği düşünülmektedir. Katot plakasına engel yerleştirilen modellerde anot plakasına engel yerleştirilen modellere kıyasla daha düşük H<sub>2</sub> kütle fraksiyonları görülmüştür. Şekil 6.27 incelendiğinde, katot tam plakada engel bulunan, her iki tam plakada engel bulunan ve katot üst yarısında engel bulunan modeller en düşük H<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarının olduğu modellerdir. Diğer bir ifade ile en yüksek hidrojen tüketiminin ve en yüksek reaksiyon aktivitesinin olduğu modellerdir. Anot plakasına engel yerleştirilmesin, standart serpantine benzer sonuçlar ortaya çıkartmıştır. Standart engel bulunmayan serpantin modelinde, anot katalizör/GDL yüzeyindeki ortalama H<sub>2</sub> kütle oranı 0,3079 olarak tespit edilmiştir. Engele sahip modeller arasında, en düşük ortalama H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, sadece tam katot plakada engel bulunan modelde, en yüksek ortalama H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu ise sadece anot alt yarısında engel bulunan modelde olduğu tespit edilmiştir. Serpantine kıyasla sadece tam katot plakada engel

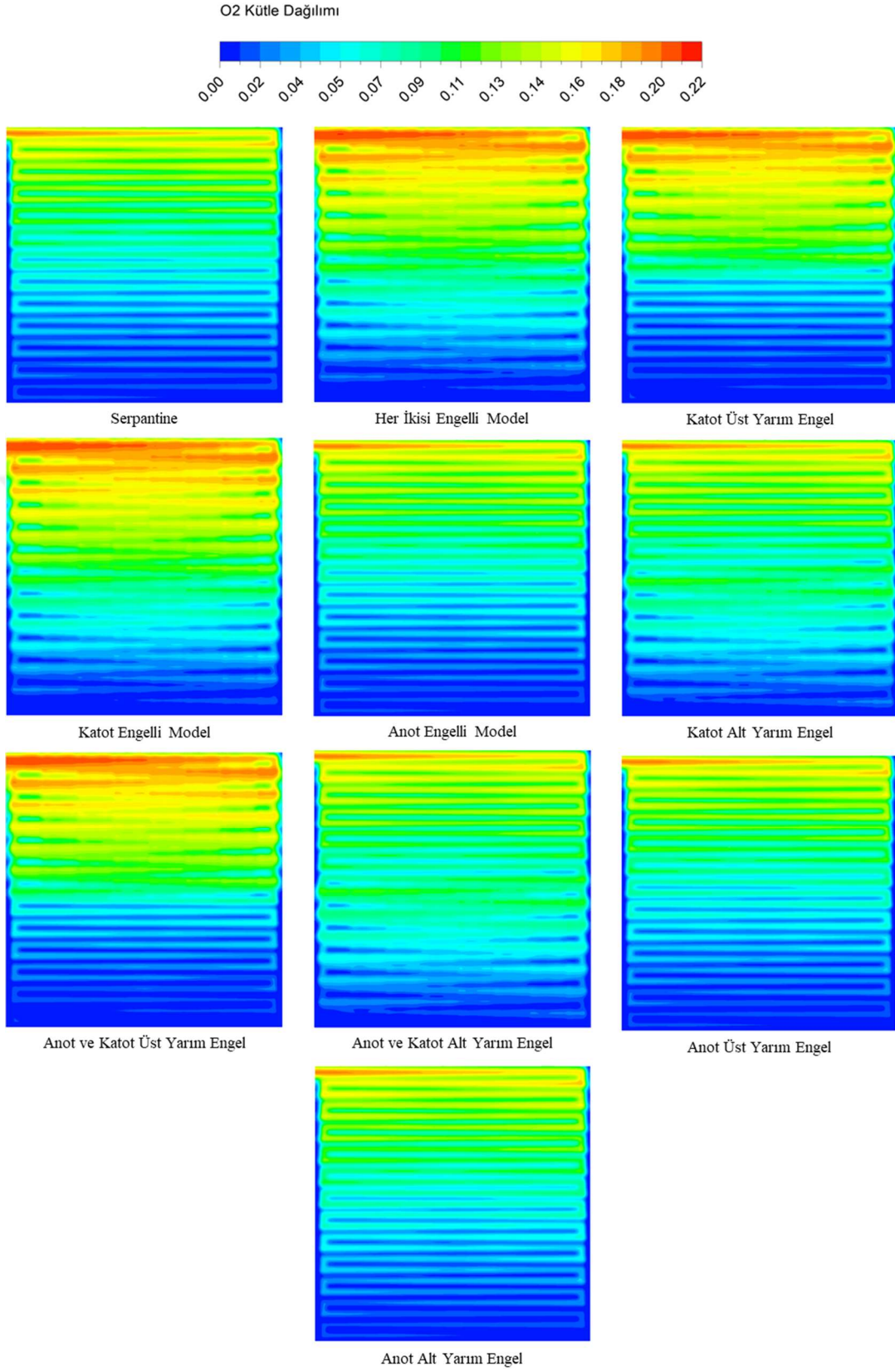
bulunan modelin en düşük H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu %5,88 oranında azalma gösterirken, sadece anot plakasının alt yarısında engel bulunan modelin en düşük H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu %3,57 oranında azalma göstermiştir.

- *Engel konumlarının O<sub>2</sub> kütle dağılım görüntüleri*

Şekil 6.28’de farklı engel konumlarının hücrenin katot GDL/katalizör yüzeyinde oluşturduğu O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları gösterilmektedir. Bu reaksiyonun dağılımı ve seviyesi hücrede oluşan sıvı suyun durumunu, açığa çıkan ısıyı ve akım değerlerini etkilemektedir. Analizler modellenirken, katot tarafındaki O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O oranları 0,21/0,3 olarak tanımlanmıştır. Serpantin akış alanı deseni sonucu olarak bütün modellerde O<sub>2</sub> kütle fraksiyonları kanal girişinden çıkışına kadar kademeli olarak azalarak/tüketilerek devam etmiştir. O<sub>2</sub> kütle fraksiyonlarındaki bu kademeli azalma literatürdeki benzer çalışmalarda da görülmüştür [154]. Bu durumun girişten çıkışa kanal boyunca devam eden reaksiyonlar sonucu O<sub>2</sub> kütle miktarının tüketilerek azalmasına bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir [152]. Şekil 6.28 incelendiğinde, katot plakasına yerleştirilen engellerin, anot plakasına kıyasla katot GDL/katalizör yüzeyinde daha fazla O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu oluşturduğu görülmüştür. Anot plakasına yerleştirilen engeller, konumları fark etmeksizin standart serpantin dağılımına çok benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Bu durum anot tarafındaki kütle transferinin iyileşmesinin katot GDL/katalizör yüzeyindeki O<sub>2</sub> dağılımına çok fazla bir etki göstermediği tespit edilmiştir. Diğer taraftan katot plakasına engel yerleştirilmesi katot GDL/katalizör yüzeyindeki O<sub>2</sub> kütle fraksiyonunu arttırmıştır. Özellikle katot üst yarım bölgesinde engel bulunması, reaktant konsantrasyonlarının yüksek olduğu bölgelerde katalizör yüzeyine daha fazla oksijen molekülünün ulaşmasını sağladığı düşünülmektedir. Her iki tam plakada engel bulunan, sadece katot tam plakada engel bulunan, katot üst yarısında engel bulunan ve her iki üst yarım plakada engel bulunan modeller, standart serpantine kıyasla daha yüksek ortalama O<sub>2</sub> kütle fraksiyon değerleri göstermiştir. Engel bulunmayan standart serpantin modelinde, katot GDL/katalizör yüzeyindeki ortalama O<sub>2</sub> kütle fraksiyon değeri 0,064 olarak tespit edilirken. Engelle sahip modeller arasında, en düşük ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı anot alt yarısında engel bulunan modelde 0,063 oranında ve en yüksek ortalama O<sub>2</sub> kütle oranı katot tam plakada engel bulunan modelde 0,091 oranında tespit edilmiştir. Anot alt, anot üst ve anot tam plakada engel bulunması, standart serpantinden daha düşük O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu sonuçları vermiştir. Katot tam plakada engel bulunan modelin O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, standart serpantine oranla %51,67 artış göstermiştir. Genel olarak katot plakasında engel olan modellerin O<sub>2</sub> kütle fraksiyonu, standart serpantine oranla %17,46 - %51,67 aralığında bir oranla artış göstermiştir. Sonuç olarak, katot plakasına engel yerleştirilmesi katalizör yüzeyine beslenen oksijen kütle transferine önemli seviyede iyileştirme sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 6.27. Farklı engel konumlarına göre hücrelerin H<sub>2</sub> kütle dağılımları.



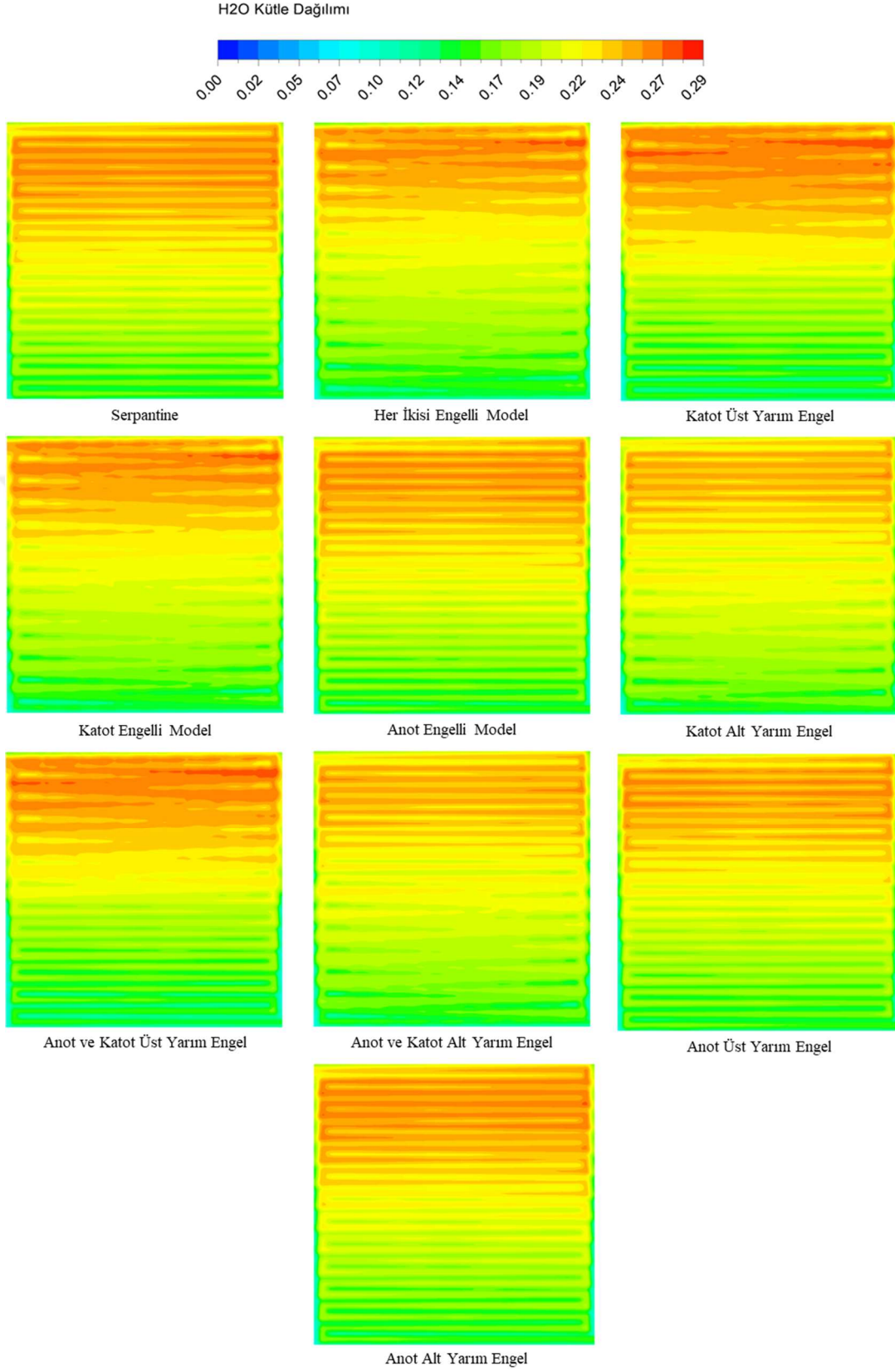
Şekil 6.28. Farklı engel konumlarına göre hücrelerin O<sub>2</sub> kütle dağılımları.

- *Engel konumlarının H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri*

H<sub>2</sub>O kütle dağılım görüntüleri sıvı su dağılımını göstermeyip, hidrojen ve oksijenin reaksiyonu sonucu açığa çıkan gaz fazındaki suyu göstermekte ve sıvı suyun oluşabileceği yoğun veya zayıf bölgeleri ifade etmektedir. Şekil 6.29'de farklı konumlarda engellere sahip modellerin katot katalizör/GDL yüzeyindeki H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon dağılımları gösterilmektedir. Hücredeki elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan su gaz fazında kabul edilmiştir. ANSYS tarafından buradaki suyun bir sis bulutu olduğu ifade edilmiştir [143]. Görüntüler incelendiğinde, hücre aktif alanının giriş bölgelerinden aşağı (reaktant çıkış bölgesine doğru) H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının azalarak devam ettiği görülmektedir. Bu durumun reaktantların kanal boyunca tüketilmesine ve çıkış bölgelerine yakın alanlarda reaksiyonların azalmasına bağlı değiştiği düşünülmektedir.

Şekil 6.29'daki dağılımlar incelendiğinde, anot plakasına yerleştirilen engellerin, katot katalizör/GDL yüzeyindeki H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonları üzerinde kayda değer bir etki bırakmadığı görülmüştür. Diğer taraftan katot plakasının özellikle üst yarısındaki engellerin H<sub>2</sub>O kütle fraksiyon değerlerinin yükselttiği tespit edilmiştir. Katot plakasının üst yarısında engel bulunan modellerin diğer modellerden farklı olarak, rib altı bölgeye daha fazla reaktantı yönlendirdiği görülmektedir. Bu durum görüntülerdeki dağılımlardan anlaşılabilir, katot üst yarısında engel bulunan modellerin H<sub>2</sub>O kütle dağılımları kanal yapısının bir projeksiyonu şeklinde değil de kanaldan taşmış bir reaktant dağılımı sergilemektedir. Bu durumun, reaktant konsantrasyonlarının yüksek olduğu bölgelerde engeller yardımıyla katalizör yüzeyindeki reaktant artışı sonucu, su oluşumun artmasına bağlı geliştiği düşünülmektedir.

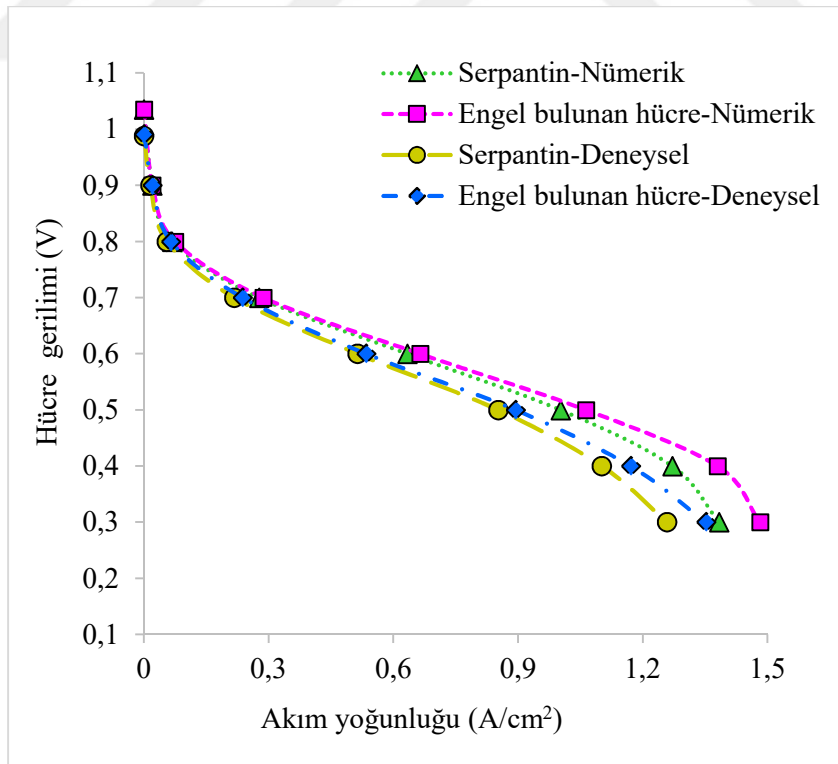
Şekil 6.29'ün sayısal değerlerine dikkat edildiğinde, standart serpantin aktif alan içerisinde ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,2081 olarak belirlenirken, engelli modellerde ise en yüksek ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,2056 ile anot alt yarısında engel bulunan modelde, en düşük ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonu 0,2028 ile her iki plakanın alt yarısında engel bulunan modelde görülmüştür. Katot plakasının üst yarısında engel bulunan bütün modellerin aktif alanlarındaki maksimum H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonları yükselmiştir. Bu artış oranı %2,65 - %3,66 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, engel konumlarının değiştirilmesi ortalama H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarını çok fazla etkilememiş gibi görünmesine rağmen, anot tarafında beslenen hidrojen miktarının da bu değişimi sınırlayabileceği düşünülmektedir. Bu durum daha fazla reaktant beslenmesi durumunda aktif alanın diğer bölgelerinde de H<sub>2</sub>O kütle fraksiyonlarının arttırılabileceği ve hücreden reaksiyonlar sonucu elde edilebilecek akım yoğunluğunun arttırılabileceği anlamını taşımaktadır.



**Şekil 6.29.** Farklı engel konumlarına göre hücrelerin H<sub>2</sub>O ktle dağılımları.

## 6.5. Yakıt Hücrelerinin Deneysel Performansları

Gerçekleştirilen analizler sonucunda en yüksek hücre net güç üretimi sağlayan "bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm" engel formu, hücrenin her bir yatay kanalında "7 adet" engel sayısı, "0.7 mm" engel yüksekliği ve "sadece katot tam plakasında" engel bulunan model belirlenmiştir. Hem analizlerin doğruluğunun test edilmesi hem gerçek koşullarda bipolar plakalara engel yerleştirilmesinin, serpantine kıyasla akım yoğunluğunun değişimini belirlemek için 2 adet tek hücreli yakıt pilleri üretilmiştir. Bir yakıt hücresinin katot plakasında optimize edilmiş özelliklerde engel modeli ile üretilmiş, diğer yakıt hücresi ise her iki plakasında boş (engel bulunmayan) serpantin akış alanına sahip olarak üretilmiştir. Bu şekilde standart serpantin de aynı koşullarda davranışları belirlenmiştir. Deneyler, Fırat Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iki yakıt pilinin de akım/gerilim yoğunluğu (I-V) eğrileri elde edilmiştir. Deneylere başlamadan önce yakıt hücresinin kararlı bir çalışma durumuna ulaştığından emin olmak için US yakıt hücresi konseyi (USFCC) tarafından önerilen aktivasyon süreci izlenmiş ve hücre aktive edilmiştir. Deney koşulları ile ANSYS'deki simülasyon koşulları aynı olması sağlanmıştır (aynı sıcaklık, debi ve nem). Şekil 6.30'da engele sahip katot plakası olan ve standart serpantin yakıt hücrelerinin deneysel I-V eğrisi verilmektedir.



Şekil 6.30. Üretilen yakıt hücrelerinin deneysel ve nümerik akım/gerilim eğrisi.

Şekil 6.30'daki hem nümerik hem de deneysel sonuçlara dikkat edildiğinde akım yoğunluğu-gerilim değerleri birbirleri ile benzer bir değişim trendi göstermiştir. Eğrilerdeki yüksek hücre gerilimi bölgesindeki aktivasyon kayıplarının deneysel ölçümlerde bir miktar düşük çıktığı görülmüştür. Nümerik koşullarda anot ve katottaki reaksiyonların meydana gelmesi için bir aktivasyon eşiğinin aşılması gerekmekte ve bu aktivasyon değeri sabit olarak kabul edilmektedir. Hücredeki elektrokimyasal reaksiyonlar katalizör yüzeyinde gerçekleşmektedir. Deneysel koşullarda bu katalizör yüzeyinin her noktasında aynı olmayan bir katalizör/aktivasyon enerjisi durumu olması nedeniyle bir miktar düşük çıktığı düşünülmektedir. Diğer taraftan ohmik kayıp bölgesinde, deneysel sonuçların daha fazla kaybı olduğu görülmektedir. Ohmik kayıplar genel olarak hücredeki elektron ve protonun hareketini azaltan direnç kayıplarıdır. Katmanlar arasındaki yüzey temas dirençleri, membran, katalizör, GDL, akım toplama ve sıkıştırma plakaları üzerinde elektron akış dirençleri ohmik kayıpların ana nedenleridir. Modelleme yapılırken yüzey temas direnci ve iletkenlikler tanımlanmasına karşın, analizler sırasında sadece aktif alanın modellenmesi toplam direnç seviyesini bir miktar düşürmektedir. Bu sebeple deneysel ölçümlerde ohmik kayıp değerleri, nümerik modellemeye kıyasla yükseldiği düşünülmektedir. Genel olarak hücre karakteristiğinin en net anlaşıldığı alan konsatrasyon kayıplarının olduğu bölge olan düşük hücre gerilim alanıdır. Konsatrasyon kayıpları, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan sıvı suyun bazı kanal ve GDL bölgelerinde birikip, reaktantların katalizör yüzeyine yeteri kadar ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. Nümerik modelde, reaksiyonlar sonucu açığa çıkan su, bir sis bulutu olarak, ideal gaz davranışı gösterdiği ANSYS tarafından ifade edilmektedir. Bu sebeple, nümerik sonuçlar reaksiyonlar sonucu açığa çıkan sıvı suyun potansiyel bölgelerini ifade etmektedir. Diğer taraftan deneysel koşullarda hücre içerisinde sıvı su oluşmakta ve tahliye edilmektedir. Gerçek koşullarda oluşan bu sıvı su kanallarda ve GDL içerisinde bir miktarı bulunarak (özellikle kanal çıkış bölgelerinde), bu bölgedeki reaktantların katalizör yüzeyine ulaşmasını azaltmakta ve akım yoğunluğu değerlerini azalttığı düşünülmektedir.

Katot plakasında engel bulunan yakıt hücresinin akım yoğunluğu değerlerinin standart serpantin yapısındaki yakıt hücresinin akım yoğunluğu değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Hücrelerin en yüksek güç çıkışı sağladığı 0,4V geriliminde hücrelerin karşılaştırılması yapılmıştır. Nümerik sonuçlara göre, katot plakasında engel bulunan yakıt hücresinin akım yoğunluğu 0,4V hücre gerilimde 1,3785 A/cm<sup>2</sup> olarak elde edilirken, engel bulunmayan standart serpantin modelinde 1,2708 A/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. 0,4V hücre gerilimde engel bulunan yakıt hücresinin akım yoğunluğu, serpantine kıyasla %8,47 oranında artış göstermiştir. Deneysel sonuçlara göre, katot plakasında engel bulunan yakıt hücresinin akım yoğunluğu 0,4V hücre gerilimde 1,1707 A/cm<sup>2</sup> olarak elde edilirken, engel bulunmayan standart serpantin modelinde 1,1008 A/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. 0,4V hücre gerilimde engel bulunan yakıt hücresinin akım yoğunluğu, serpantine kıyasla %6,35 oranında artış göstermiştir. Katot plakasında engel bulunan

hücrenin, daha önceki analiz görüntülerindeki gibi katot katalizör yüzeyine ulaşan oksijen molekülü konsantrasyonunu arttırdığı düşünülmektedir. Bu nedenle standart serpantine kıyasla, katalizör yüzeyinde daha geniş bir alanda ve yoğunlukta elektrokimyasal reaksiyonları arttırdığı ve buna bağlı olarak akım yoğunluğu yükseldiği düşünülmektedir. Literatürdeki birçok engel yapısına sahip hücrenin benzer şekilde akım ve güç yoğunluğunun arttığı rapor edilmiştir [41,42,48]. Nümerik olarak analiz edilen yakıt hücrelerinin en yüksek güç çıkış değerleri standart serpantin ve katot plakasında engel bulunan modelde sırasıyla 12,71W ve 13,79W olarak elde edilmiştir. Deneysel olarak test edilmiş yakıt hücrelerinin en yüksek güç çıkış değerleri standart serpantin ve katot plakasında engel bulunan modelde sırasıyla 11,01W ve 11,71W olarak elde edilmiştir. Şekil 6.30'da tespit edilen diğer bir husus ise deneysel ölçümlerin hem standart serpantin hem de katot plakasında engel bulunan hücrelerin akım yoğunluğu değerlerinin nümerik sonuçlara kıyasla daha düşük elde edilmesidir. Nümerik serpantin ile deneysel serpantin sonuçları kıyaslandığında 0,4V hücre geriliminde %13,37 oranında bir azalma görülmüştür. Diğer taraftan engel bulunan hücrenin nümerik sonuçları ile deneysel sonuçları kıyaslandığında 0,4V hücre geriliminde %15,07 oranında bir azalma görülmüştür. Deneysel sonuçların, nümerik sonuçlardan bir miktar düşük elde edilmesi, literatürdeki diğer çalışmalarda [48,141] da görülen bir husustur. Çalışma kapsamında yakıt hücresi modellenirken bazı fiziksel ve kimyasal kabuller yapılmıştır. Bunların bazıları, sabit sıcaklık, debi, nem, katalizör ve membran iletkenlikleri, gözeneklilik, katalizör yığılması, su yönetimi vb. parametrelerdir. Diğer taraftan hücrelerin modellenmesi yapılırken sadece aktif hücre alanı modellenmiş geri kalan alan hesaplama hızının artırılması amacıyla modellenmemiştir. Başka bir deyiş ile ohmik kaybı arttıracak malzemeler hesaplama içerisine dâhil edilmemiştir. Ayrıca, dış ortam ile olan ısı transferi gibi hususlarda detaylı modellenmemiştir. Diğer taraftan deneysel hücrenin montajı sırasında malzeme yapılarının oluşturduğu heterojen yüzey temas dirençleri ve tespit edilmesi zor kılcal reaktant kaçakları deneysel ve nümerik sonuçların bir miktar farklı çıkmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması temel olarak yakıt pili bileşenlerinden BPP'lerin daha yüksek akım yoğunluğu sağlayacak şekilde geliştirilmesini konu almıştır. Bu amaçla, BPP'lerde bulunan akış kanalları üzerine, geometrik şekil, sayı, yükseklik ve konum olarak farklı varyasyonlarda engeller yerleştirilerek, hücrenin akım yoğunluğu ve net güç değerlerinin artırılması hedeflenmiştir. Engel varyasyonları, literatürde ve ticari olarak kabul görmüş tekli serpantin akış alanı tasarımı üzerinde uygulanmıştır. Bu tez çalışması, temel olarak iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada tasarlanan modellerin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) metodu ile analizleri yapılmıştır. Bu aşamada öncelikli olarak kanala yerleştirilecek engellerin geometrik şekilleri üzerinde varyasyonlar yapılarak, yakıt hücresinde en yüksek net gücü sağlayan engelin geometrik şekli belirlenmiştir. Ardından sırasıyla sayı, yükseklik ve konum varyasyonları gerçekleştirilmiştir. CFD metodu ile gerçekleştirilen bu analizler sırasında yakıt hücresinin en yüksek net güç çıkışı sağlayan engel biçimleri belirlenirken aynı zamanda hücredeki reaktant kütle fraksiyonları, basınç ve sıcaklık dağılım görüntüleri de incelenmiştir. Nihai olarak, analizler sonucu hücrede birim alan başına en yüksek net güç sağlayan, geometrik şekil, sayı, yükseklik ve konum olarak optimize edilmiş engellere sahip BPP tasarımı geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasının ikinci aşamasında ise optimize edilmiş engellere sahip BPP ve deneysel olarak karşılaştırmak için standart tekli serpantin tasarımına sahip BPP'ler üretilmiştir. Üretilen BPP'ler, tek hücreli bir yakıt pili yapısı oluşturmak için montaj edilmiştir. Ardından geliştirilmiş BPP akış alanına sahip yakıt pili ile standart serpantin tasarımına sahip yakıt pili aynı koşullarda deneysel olarak test edilmiş ve akım/gerilim (I-V) eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kendi aralarında ve analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Bu tez çalışması sonucunda, yakıt pilleri için birim alandan daha fazla güç üretimi sağlayabilen bir BPP imal edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- BPP'lere engel yerleştirilmesi, hücrenin akım ve güç yoğunluğu değerlerini arttırırken, basınç düşümü değerlerini de arttırmaktadır. Bu durum bazı modellerde hücrenin net güç çıkışını arttırırken, bazı modellerde dezavantaj olup, net güç çıkışını azaltmıştır.
- Engellerin şekil varyasyonları arasında, bir kenar iç bükey bir kenar dış bükey üçgen-5mm modeli en yüksek net güç çıkışı sağladığı görülmüştür. Bu engel şekli, standart serpantine kıyasla hücre net güç çıkışını %4,09 yükseltmiştir.
- Engellerin sayı varyasyonları arasında, 7 adet engel bulunan model en yüksek net güç çıkışı sağladığı görülmüştür. Bu engel sayısı, standart serpantine kıyasla hücre net güç çıkışını %4,66 yükseltmiştir.
- Engellerin yükseklik varyasyonları arasında, 0,7 mm yüksekliğinde engel bulunan model en yüksek net güç çıkışı sağladığı görülmüştür.

- Engellerin konum varyasyonları arasında, tam katot plakasında engel bulunan model en yüksek net güç çıkışı sağladığı görülmüştür.
- Engel varyasyonları sırasında elde edilen I-V eğrileri büyük oranda kütle kayıplarının olduğu düşük voltaj değerlerinde birbirinden farklılık göstermiştir. Aktivasyon kaybının olduğu yüksek voltaj bölgelerinde engeller arasında akım/güç değerleri açısından herhangi bir farklılık göstermemiştir. Ohmik kayıpların olduğu bölgede ise oluşan farklılıklar çok düşük gözlemlenmiştir.
- ANSYS'de gerçekleştirilen analizler sonucu en yüksek net güç çıktısı sağlayan model, standart serpantin modeli ile birlikte imal edilerek, deneysel olarak test edilmiştir.
- Yapılan analizler sonucu, optimize edilmiş engel biçiminde üretilen katot plakasının bulunduğu yakıt hücresi modelin çıkış gücü (0,4V'da), standart serpantin modelinin çıkış gücüne kıyasla %8,47 oranında artmıştır.
- Yapılan deneysel testler sonucunda, optimize edilmiş engel biçiminde üretilen katot plakasının bulunduğu yakıt hücresinin çıkış gücü (0,4V'da), standart serpantin yapısındaki yakıt hücresinin çıkış gücüne kıyasla %6,35 oranında artmıştır.
- Nümerik ve deneysel sonuçların ortaya koyduğu akım yoğunluğu/gerilim eğrileri birbirleri ile benzer bir değişim trendi göstermiştir. Deneysel ölçümlerin, modellemelere kıyasla bir miktar kayıpla elde edildiği tespit edilmiştir.

## 8. ÖNERİLER

Geleceğin enerji teknolojilerinden biri olan yakıt pili teknolojisinin, yüksek güç yoğunluğu potansiyeli, emisyon durumu ve uygulama alanlarının genişliği sebebiyle gelecekte daha fazla insan hayatına gireceği düşünülmektedir. Bu nedenle düşük sıcaklık yakıt pillerinden olan PEM yakıt pillerinin geliştirilmesi ve bu konuda tecrübeli insan kaynaklarının çoğalması gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, PEM yakıt pillerinin daha verimli, birim aktif alandan daha fazla güç üretilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın temel noktası, reaktantların akış alanı içerisinde olabildiğince daha fazla katalizör yüzeyine ulaşmasını sağlamaktır. Bunu başarırken aynı zamanda reaktantların da aktif alan içerisinde homojen dağılımını sağlamak gerekmektedir. Akışı belli noktalarda yoğunlaştırmak hücrenin net gücünü yükseltmesine rağmen, membran ömrü, su oluşumu ve uzun zamanlı hücre performansı konularında detaylı bir bilgi sunmamaktadır. Bu eksikliklerin bilimsel olarak araştırılması ve giderilmesi gerekmektedir. Plakaların tasarımsal olarak geliştirilmesi ve özellikle yeni engel formlarının analiz edilmesi gereken diğer bir husustur. Çalışmanın analiz bölümünde ise farklı parametrelerin deneme yanılma yoluyla daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabileceği düşünülmektedir. Buna ek olarak, engele sahip modellerin mesh yapıları daha homojen ve düzenli bir hale getirilmesi yine gerçeğe yakın sonuçların elde edilmesini kolaylaştıracağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] F.-L. Peng, Y.-K. Qiao, S. Sabri, B. Atazadeh, A. Rajabifard, A collaborative approach for urban underground space development toward sustainable development goals: Critical dimensions and future directions, *Front. Struct. Civ. Eng.* 15 (2021) 20–45. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0716-x>.
- [2] T.N. Veziroğlu, S. Şahin, 21st Century's energy: Hydrogen energy system, *Energy Convers. Manag.* 49 (2008) 1820–1831. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.015>.
- [3] NASA GISS, Data.GISS: GISS Surface Temperature Analysis: Analysis Graphs and Plots, (2016).
- [4] G.D. Watt, A new future for carbohydrate fuel cells, *Renew. Energy.* 72 (2014) 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.025>.
- [5] F.M. Souza, V.S. Pinheiro, T.C. Gentil, L.E.B. Lucchetti, J.C.M. Silva, M. L.M.G. Santos, I. De Oliveira, W.M.C. Dourado, G. Amaral-Labat, S. Okamoto, M.C. Santos, Alkaline direct liquid fuel cells: Advances, challenges and perspectives, *J. Electroanal. Chem.* 922 (2022) 116712. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116712>.
- [6] M.I. Al-Najideen, S.S. Alrwashdeh, Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering- Mu'tah University in Jordan, *Resour. Technol.* 3 (2017) 440–445. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.04.005>.
- [7] G. Abu-Rumman, A.I. Khdaif, S.I. Khdaif, Current status and future investment potential in renewable energy in Jordan: An overview, *Heliyon.* 6 (2020) e03346. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03346>.
- [8] H. Stančin, H. Mikulčić, X. Wang, N. Duić, A review on alternative fuels in future energy system, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 128 (2020) 109927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>.
- [9] S.S. Alrwashdeh, Energy sources assessment in Jordan, *Results Eng.* 13 (2022) 100329. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100329>.
- [10] OICA, 2021 Statistics | [www.oica.net](http://www.oica.net), *Int. Organ. Mot. Veh. Manuf.* (2021).
- [11] Motor vehicle - Wikipedia, (2021).
- [12] B.Q. He, Advances in emission characteristics of diesel engines using different biodiesel fuels, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60 (2016) 570–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.093>.
- [13] S. Kumar, J.H. Cho, J. Park, I. Moon, Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 22 (2013) 46–72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.017>.
- [14] H. Hazar, Investigation of the effects of tripropylene glycol addition to diesel fuel on combustion and exhaust emissions at an isolated diesel engine, *Energy Convers. Manag.* 142 (2017) 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.082>.
- [15] N. Seelam, S.K. Gugulothu, R.V. Reddy, B. Burra, Influence of hexanol/hydrogen additives with diesel fuel from CRDI diesel engine with exhaust gas recirculation technique: A special focus on performance, combustion, gaseous and emission species, *J. Clean. Prod.* 340 (2022) 130854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130854>.
- [16] M.A. Rosen, S. Koohi-Fayegh, The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems, *Energy, Ecol. Environ.* 1 (2016) 10–29. <https://doi.org/10.1007/S40974-016-0005-Z/FIGURES/5>.
- [17] L. de Novellis, A. Sorniotti, P. Gruber, L. Shead, V. Ivanov, K. Hoepfing, Torque vectoring for electric vehicles with individually controlled motors: State-of-the-art and future developments, *World Electr. Veh. J.* 5 (2012) 617–628.
- [18] C.E. Thomas, Fuel cell and battery electric vehicles compared, *Int. J. Hydrogen Energy.* 34 (2009) 6005–6020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.003>.
- [19] P. Ahmadi, S.H. Torabi, H. Afsaneh, Y. Sadegheih, H. Ganjehsarabi, M. Ashjaee, The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell

- vehicles, *Int. J. Hydrogen Energy*. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.165>.
- [20] International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2020*, 2021.
- [21] A. Faghri, Z. Guo, Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48 (2005) 3891–3920. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.014>.
- [22] S. Ahmad, T. Nawaz, A. Ali, M.F. Orhan, A. Samreen, A.M. Kannan, An overview of proton exchange membranes for fuel cells: Materials and manufacturing, *Int. J. Hydrogen Energy*. 47 (2022) 19086–19131. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.099>.
- [23] Y. Song, C. Zhang, C.-Y. Ling, M. Han, R.-Y. Yong, D. Sun, J. Chen, Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 29832–29847. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.231>.
- [24] M. Sauermoser, N. Kizilova, B.G. Pollet, S. Kjelstrup, Flow Field Patterns for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Front. Energy Res.* 8 (2020). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00013>.
- [25] T. V. Reshetenko, G. Bender, K. Bethune, R. Rocheleau, A segmented cell approach for studying the effects of serpentine flow field parameters on PEMFC current distribution, *Electrochim. Acta*. 88 (2013) 571–579. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.10.103>.
- [26] H. Heidary, M.J. Kermani, A.K. Prasad, S.G. Advani, B. Dabir, Numerical modelling of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*. 42 (2017) 2265–2277. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.076>.
- [27] S.T. Thompson, B.D. James, J.M. Huya-Kouadio, C. Houchins, D.A. DeSantis, R. Ahluwalia, A.R. Wilson, G. Kleen, D. Papageorgopoulos, Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook, *J. Power Sources*. 399 (2018) 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.100>.
- [28] J. Wang, H. Wang, Y. Fan, Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization, *Engineering*. 4 (2018) 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.007>.
- [29] T. Wilberforce, Z. El Hassan, E. Ogungbemi, O. Ijaodola, F.N. Khatib, A. Durrant, J. Thompson, A. Baroutaji, A.G. Olabi, A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 111 (2019) 236–260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.081>.
- [30] Q. Liu, F. Lan, C. Zeng, J. Chen, J. Wang, A review of proton exchange membrane fuel cell's bipolar plate design and fabrication process, *J. Power Sources*. 538 (2022) 231543. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231543>.
- [31] L. Fan, Z. Niu, G. Zhang, K. Jiao, Optimization design of the cathode flow channel for proton exchange membrane fuel cells, *Energy Convers. Manag.* 171 (2018) 1813–1821. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.111>.
- [32] K. Lim, N. Vaz, J. Lee, H. Ju, Advantages and disadvantages of various cathode flow field designs for a polymer electrolyte membrane fuel cell, *Int. J. Heat Mass Transf.* 163 (2020) 120497. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120497>.
- [33] T. Wilberforce, Z. El-Hassan, F.N. Khatib, A. Al Makky, A. Baroutaji, J.G. Carton, J. Thompson, A.G. Olabi, Modelling and simulation of Proton Exchange Membrane fuel cell with serpentine bipolar plate using MATLAB, *Int. J. Hydrogen Energy*. 42 (2017) 25639–25662. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.091>.
- [34] H. Hazar, M. Yilmaz, H. Sevinc, The effects of different flow field patterns on polymer electrolyte membrane fuel cell performance, *Energy Convers. Manag.* 248 (2021) 114818. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114818>.
- [35] M. Liu, H. Huang, X. Li, X. Guo, T. Wang, H. Lei, Geometry optimization and performance analysis of a new tapered slope cathode flow field for PEMFC, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 37379–37392. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.022>.
- [36] H. Hazar, M. Yilmaz, H. Sevinc, A comparative analysis of a novel flow field pattern with different channel size configurations, *Fuel*. 319 (2022) 123867. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123867>.

- [37] H.C. Kang, K.M. Jum, Y.J. Sohn, Performance of unit PEM fuel cells with a leaf-vein-simulating flow field-patterned bipolar plate, *Int. J. Hydrogen Energy*. 44 (2019) 24036–24042. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.120>.
- [38] J.E. Park, J. Lim, S. Kim, I. Choi, C.-Y. Ahn, W. Hwang, M.S. Lim, Y.-H. Cho, Y.-E. Sung, Enhancement of mass transport in fuel cells using three-dimensional graphene foam as flow field, *Electrochim. Acta*. 265 (2018) 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.191>.
- [39] F.N. Khatib, T. Wilberforce, J. Thompson, A.G. Olabi, A comparison on the dynamical performance of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with traditional serpentine and an open pore cellular foam material flow channel, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 5984–5998. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.199>.
- [40] D. Natarajan, T. Van Nguyen, A Two-Dimensional, Two-Phase, Multicomponent, Transient Model for the Cathode of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Conventional Gas Distributors, *J. Electrochem. Soc.* 148 (2001) A1324. <https://doi.org/10.1149/1.1415032>.
- [41] P. Dong, G. Xie, M. Ni, The mass transfer characteristics and energy improvement with various partially blocked flow channels in a PEM fuel cell, *Energy*. 206 (2020) 117977. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117977>.
- [42] A. Ghanbarian, M.J. Kermani, Enhancement of PEM fuel cell performance by flow channel indentation, *Energy Convers. Manag.* 110 (2016) 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.036>.
- [43] H. Guo, H. Chen, F. Ye, C.F. Ma, Baffle shape effects on mass transfer and power loss of proton exchange membrane fuel cells with different baffled flow channels, *Int. J. Energy Res.* 43 (2019) 2737–2755. <https://doi.org/10.1002/er.4328>.
- [44] H. Heidary, M.J. Kermani, B. Dabir, Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances, *Energy Convers. Manag.* 124 (2016) 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.043>.
- [45] W. Li, Q. Zhang, C. Wang, X. Yan, S. Shen, G. Xia, F. Zhu, J. Zhang, Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEMFCs, *Appl. Energy*. 195 (2017) 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.008>.
- [46] J. Shen, Z. Tu, S.H. Chan, Enhancement of mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with blockage in the flow channel, *Appl. Therm. Eng.* 149 (2019) 1408–1418. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.138>.
- [47] X. Wang, Y. Qin, S. Wu, X. Shangguan, J. Zhang, Y. Yin, Numerical and experimental investigation of baffle plate arrangement on proton exchange membrane fuel cell performance, *J. Power Sources*. 457 (2020) 228034. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228034>.
- [48] H. Chen, H. Guo, F. Ye, C.F. Ma, Modification of the two-fluid model and experimental study of proton exchange membrane fuel cells with baffled flow channels, *Energy Convers. Manag.* 195 (2019) 972–988. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.071>.
- [49] W.-Z. Li, W.-W. Yang, N. Wang, Y.-H. Jiao, Y. Yang, Z.-G. Qu, Optimization of blocked channel design for a proton exchange membrane fuel cell by coupled genetic algorithm and three-dimensional CFD modeling, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 17759–17770. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.166>.
- [50] E.I. Ortiz-Rivera, A.L. Reyes-Hernandez, R.A. Febo, Understanding the history of fuel cells, in: 2007 IEEE Conf. Hist. Electr. Power, IEEE, 2007: pp. 117–122. <https://doi.org/10.1109/HEP.2007.4510259>.
- [51] J.M. Andújar, F. Segura, Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 2309–2322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.015>.
- [52] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, Comparative study of different fuel cell technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 981–989. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>.
- [53] Fuel Cell Technology | SoCalGas, (n.d.).
- [54] The New Toyota Mirai, (n.d.).

- [55] Powertrekk Charger | Fuel Cell Charger |, (n.d.). <https://www.jebiga.com/power-trekk-charger-fuel-cell-charger-by-myfc/>.
- [56] Hardware equipment - Laboratory for Power Electronics - Institute of robotics, (n.d.).
- [57] J. Larminie, A. Dicks, Efficiency and Open Circuit Voltage, in: *Fuel Cell Syst. Explain.*, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, England, 2013: pp. 25–43. <https://doi.org/10.1002/9781118878330.ch2>.
- [58] F. Barbir, Fuel Cell Basic Chemistry and Thermodynamics, in: *PEM Fuel Cells*, Elsevier, 2013: pp. 17–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387710-9.00002-3>.
- [59] J.-H. Jung, S. Ahmed, Dynamic Model of PEM Fuel Cell Using Real-time Simulation Techniques, *J. Power Electron.* 10 (2010) 739–748. <https://doi.org/10.6113/JPE.2010.10.6.739>.
- [60] O.Z. Sharaf, M.F. Orhan, An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 32 (2014) 810–853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>.
- [61] A. Mehmeti, F. Santoni, M. Della Pietra, S.J. McPhail, Life cycle assessment of molten carbonate fuel cells: State of the art and strategies for the future, *J. Power Sources.* 308 (2016) 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.023>.
- [62] H. Zhang, G. Lin, J. Chen, Performance analysis and multi-objective optimization of a new molten carbonate fuel cell system, *Int. J. Hydrogen Energy.* 36 (2011) 4015–4021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.103>.
- [63] Z. Salameh, Energy Storage, in: *Renew. Energy Syst. Des.*, Elsevier, 2014: pp. 201–298. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374991-8.00004-0>.
- [64] H. Pourrahmani, A. Yavarinasab, M. Siavashi, M. Matian, J. Van herle, Progress in the proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) water/thermal management: From theory to the current challenges and real-time fault diagnosis methods, *Energy Rev.* 1 (2022) 100002. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100002>.
- [65] P. Ahmadi, A. Khoshnevisan, Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods, *Int. J. Hydrogen Energy.* 47 (2022) 26758–26769. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.215>.
- [66] S.M. Haile, Fuel cell materials and components, *Acta Mater.* 51 (2003) 5981–6000. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.08.004>.
- [67] Fuel Cell (02-4) Fuel cell type - Components of a Single Cell, (n.d.).
- [68] L. Liu, X. Li, Z. Liu, S. Zhang, L. Qian, Z. Chen, J. Li, P. Fang, C. He, High-performance fuel cells using Nafion composite membranes with alignment of sulfonated graphene oxides induced by a strong magnetic field, *J. Memb. Sci.* 653 (2022) 120516. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120516>.
- [69] B.H. Oh, A.R. Kim, D.J. Yoo, Profile of extended chemical stability and mechanical integrity and high hydroxide ion conductivity of poly(ether imide) based membranes for anion exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy.* 44 (2019) 4281–4292. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.177>.
- [70] C. Yin, J. Li, Y. Zhou, H. Zhang, P. Fang, C. He, Enhancement in Proton Conductivity and Thermal Stability in Nafion Membranes Induced by Incorporation of Sulfonated Carbon Nanotubes, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 10 (2018) 14026–14035. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b01513>.
- [71] C. Yin, B. Xiong, Q. Liu, J. Li, L. Qian, Y. Zhou, C. He, Lateral-aligned sulfonated carbon-nanotubes/Nafion composite membranes with high proton conductivity and improved mechanical properties, *J. Memb. Sci.* 591 (2019) 117356. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117356>.
- [72] C.W.B. Bezerra, L. Zhang, H. Liu, K. Lee, A.L.B. Marques, E.P. Marques, H. Wang, J. Zhang, A review of heat-treatment effects on activity and stability of PEM fuel cell catalysts for oxygen reduction reaction, *J. Power Sources.* 173 (2007) 891–908. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.028>.
- [73] Y. Yang, X. Li, T. Chu, B. Li, C. Zhang, Property evolution of gas diffusion layer and performance shrink of fuel cell during operation, *Renew. Energy.* 194 (2022) 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.120>.

- [74] Y. Tang, W. Yuan, M. Pan, Z. Wan, Feasibility study of porous copper fiber sintered felt: A novel porous flow field in proton exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*. 35 (2010) 9661–9677. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.101>.
- [75] R.K. Mallick, S.B. Thombre, N.K. Shrivastava, A critical review of the current collector for passive direct methanol fuel cells, *J. Power Sources*. 285 (2015) 510–529. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.089>.
- [76] S. Asghari, M.H. Shahsamandi, M.R. Ashraf Khorasani, Design and manufacturing of end plates of a 5kW PEM fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*. 35 (2010) 9291–9297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.135>.
- [77] M.H. Fili, M. Habibnia, P.G. Tamami, Modeling and experimental study on the sealing gasket of proton exchange membrane fuel cells, *Iran. J. Hydrog. Fuel Cell*. 3 (2016) 213–220. <https://doi.org/10.22104/ijhfc.2017.416>.
- [78] Y.-D. Kuan, J.-L. Lyu, T.-R. Ke, M.-F. Sung, J.-S. Do, Planar current collector design and fabrication for proton exchange membrane fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*. 44 (2019) 10071–10081. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.178>.
- [79] Global Fuel Cell Gas Diffusion Layer (GDL) Market 2019 Industry, (n.d.).
- [80] Considerations for Fuel Cell Design, (n.d.).
- [81] Low-Temperature Bipolar Plates, (n.d.).
- [82] Membrane Electrode Assemblies (MEAs) | Fuel Cells Materials | Nanotechnology Products | NPD, (n.d.).
- [83] M.K. Debe, Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells, *Nature*. 486 (2012) 43–51. <https://doi.org/10.1038/nature11115>.
- [84] Bipolar Plates: Carbon or Metal for PEM Fuel Cells? [Infographic], (n.d.).
- [85] M.M. Barzegari, F.A. Khatir, Study of thickness distribution and dimensional accuracy of stamped metallic bipolar plates, *Int. J. Hydrogen Energy*. 44 (2019) 31360–31371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.225>.
- [86] L. Peng, P. Yi, X. Lai, Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*. 39 (2014) 21127–21153. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.113>.
- [87] S. Pugal Mani, N. Rajendran, Corrosion and interfacial contact resistance behavior of electrochemically nitrated 316L SS bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells, *Energy*. 133 (2017) 1050–1062. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.086>.
- [88] O. Ijaodola, E. Ogungbemi, F.N. Khatib, T. Wilberforce, M. Ramadan, Z. El Hassan, J. Thompson, A.G. Olabi, Evaluating the Effect of Metal Bipolar Plate Coating on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Energies*. 11 (2018) 3203. <https://doi.org/10.3390/en11113203>.
- [89] R.A. Antunes, M.C.L. Oliveira, G. Ett, V. Ett, Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review, *Int. J. Hydrogen Energy*. 35 (2010) 3632–3647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.059>.
- [90] P. Karthikeyan, P. Velmurugan, A.J. George, R. Ram Kumar, R.J. Vasanth, Experimental investigation on scaling and stacking up of proton exchange membrane fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*. 39 (2014) 11186–11195. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.086>.
- [91] T. Wilberforce, O. Ijaodola, E. Ogungbemi, F.N. Khatib, T. Leslie, Z. El-Hassan, J. Thomposon, A.G. Olabi, Technical evaluation of proton exchange membrane (PEM) fuel cell performance – A review of the effects of bipolar plates coating, *Renew. Sustain. Energy Rev*. 113 (2019) 109286. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109286>.
- [92] S. Zhang, H. Xu, Z. Qu, S. Liu, F.K. Talkhoncheg, Bio-inspired flow channel designs for proton exchange membrane fuel cells: A review, *J. Power Sources*. 522 (2022) 231003. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231003>.
- [93] PEMFC Graphite Flow Field Plate, Serpentine - 25 cm<sup>2</sup>, (n.d.).

- [94] F.G. Boyaci San, G. Tekin, A review of thermoplastic composites for bipolar plate applications, *Int. J. Energy Res.* 37 (2013) 283–309. <https://doi.org/10.1002/er.3005>.
- [95] Gallery of Photo Etched & Photo Chemical Machined Precision Metal Parts, (n.d.).
- [96] C. Min, F. Li, X. Gao, K. Wang, Z. Rao, Secondary flow on the performance of PEMFC with blocks in the serpentine flow field, *Int. J. Hydrogen Energy.* 47 (2022) 28945–28955. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.191>.
- [97] D. Qiu, L. Peng, P. Yi, X. Lai, W. Lehnert, Flow channel design for metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells: Experiments, *Energy Convers. Manag.* 174 (2018) 814–823. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.070>.
- [98] Z. Wan, W. Quan, C. Yang, H. Yan, X. Chen, T. Huang, X. Wang, S. Chan, Optimal design of a novel M-like channel in bipolar plates of proton exchange membrane fuel cell based on minimum entropy generation, *Energy Convers. Manag.* 205 (2020) 112386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112386>.
- [99] D. Ouellette, A. Ozden, M. Ercelik, C.O. Colpan, H. Ganjehsarabi, X. Li, F. Hamdullahpur, Assessment of different bio-inspired flow fields for direct methanol fuel cells through 3D modeling and experimental studies, *Int. J. Hydrogen Energy.* 43 (2018) 1152–1170. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.073>.
- [100] A. Ozden, M. Ercelik, D. Ouellette, C.O. Colpan, H. Ganjehsarabi, F. Hamdullahpur, Designing, modeling and performance investigation of bio-inspired flow field based DMFCs, *Int. J. Hydrogen Energy.* 42 (2017) 21546–21558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.007>.
- [101] A. Arvay, J. French, J.-C. Wang, X.-H. Peng, A.M. Kannan, Nature inspired flow field designs for proton exchange membrane fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy.* 38 (2013) 3717–3726. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.149>.
- [102] E. Çelik, İ. Karagöz, Polymer electrolyte membrane fuel cell flow field designs and approaches for performance enhancement, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy.* 234 (2020) 1189–1214. <https://doi.org/10.1177/0957650919893543>.
- [103] L. Rostami, P. Mohamad Gholy Nejad, A. Vatani, A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Energy.* 97 (2016) 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.132>.
- [104] H. Kahraman, M.F. Orhan, Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis & modeling, *Energy Convers. Manag.* 133 (2017) 363–384. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.053>.
- [105] N.J. Cooper, A.D. Santamaria, M.K. Becton, J.W. Park, Investigation of the performance improvement in decreasing aspect ratio interdigitated flow field PEMFCs, *Energy Convers. Manag.* 136 (2017) 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.005>.
- [106] N. Guo, M.C. Leu, U.O. Koçlu, Network based optimization model for pin-type flow field of polymer electrolyte membrane fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy.* 38 (2013) 6750–6761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.066>.
- [107] J. Ramasamy, K. Palaniswamy, T. Kumaresan, M. Chandran, R. Chen, Study of novel flow channels influence on the performance of direct methanol fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy.* 47 (2022) 595–609. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.033>.
- [108] A.P. Manso, F.F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, M. Garmendia Mujika, Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review, *Int. J. Hydrogen Energy.* 37 (2012) 15256–15287. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.076>.
- [109] K. Xiong, W. Wu, S. Wang, L. Zhang, Modeling, design, materials and fabrication of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cell: A review, *Appl. Energy.* 301 (2021) 117443. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117443>.
- [110] J. Wang, Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: A critical review, *Appl. Energy.* 157 (2015) 640–663. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.032>.
- [111] Y. Kerkoub, A. Benzaoui, F. Haddad, Y.K. Ziari, Channel to rib width ratio influence with various

- flow field designs on performance of PEM fuel cell, *Energy Convers. Manag.* 174 (2018) 260–275. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.041>.
- [112] Y. Yin, X. Wang, X. Shangguan, J. Zhang, Y. Qin, Numerical investigation on the characteristics of mass transport and performance of PEMFC with baffle plates installed in the flow channel, *Int. J. Hydrogen Energy*. 43 (2018) 8048–8062. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.037>.
- [113] G. Zhang, Z. Bao, B. Xie, Y. Wang, K. Jiao, Three-dimensional multi-phase simulation of PEM fuel cell considering the full morphology of metal foam flow field, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 2978–2989. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.263>.
- [114] S.S.L. Rao, A. Shaija, S. Jayaraj, Optimization of operating parameters to maximize the current density without flooding at the cathode membrane interface of a PEM fuel cell using Taguchi method and genetic algorithm, *Int. Energy Environ.* 5 (2014) 335–352.
- [115] S. Lee, H. Jeong, B. Ahn, T. Lim, Y. Son, Parametric study of the channel design at the bipolar plate in PEMFC performances, *Int. J. Hydrogen Energy*. 33 (2008) 5691–5696. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.038>.
- [116] S. P.M., J. Jose, L. Abraham, M. K., Numerical investigation of novel flow field configurations for direct methanol fuel cell, *Mater. Today Proc.* 58 (2022) 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.169>.
- [117] S. Giddey, S.P.S. Badwal, D. Fini, A novel design of bipolar interconnect plate for self-air breathing micro fuel cells and degradation issues, *Int. J. Hydrogen Energy*. 37 (2012) 11431–11447. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.103>.
- [118] F. Barreras, A. Lozano, L. Valiño, R. Mustata, C. Marín, Fluid dynamics performance of different bipolar plates. Part I. Velocity and pressure fields, *J. Power Sources*. 175 (2008) 841–850. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.09.107>.
- [119] D. hui Wen, L. zhi Yin, Z. yu Piao, C. da Lu, G. Li, Q. hui Leng, Performance investigation of proton exchange membrane fuel cell with intersectant flow field, *Int. J. Heat Mass Transf.* 121 (2018) 775–787. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.053>.
- [120] M.-Y. Lu, Y.-M. Deng, W.-W. Yang, M. Ye, Y.-H. Jiao, Q. Xu, A novel rotary serpentine flow field with improved electrolyte penetration and species distribution for vanadium redox flow battery, *Electrochim. Acta*. 361 (2020) 137089. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137089>.
- [121] M. Ghasabehi, M. Ashrafi, M. Shams, Performance analysis of an innovative parallel flow field design of proton exchange membrane fuel cells using multiphysics simulation, *Fuel*. 285 (2021) 119194. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119194>.
- [122] T. Monsaf, B.M. Hocine, S. Youcef, M. Abdallah, Unsteady three-dimensional numerical study of mass transfer in PEM fuel cell with spiral flow field, *Int. J. Hydrogen Energy*. 42 (2017) 1237–1251. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.084>.
- [123] J. Owejan, T. Trabold, D. Jacobson, M. Arif, S. Kandlikar, Effects of flow field and diffusion layer properties on water accumulation in a PEM fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*. 32 (2007) 4489–4502. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.044>.
- [124] Y.-C. Park, P. Chippar, S.-K. Kim, S. Lim, D.-H. Jung, H. Ju, D.-H. Peck, Effects of serpentine flow-field designs with different channel and rib widths on the performance of a direct methanol fuel cell, *J. Power Sources*. 205 (2012) 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.055>.
- [125] A. Iranzo, C.H. Arredondo, A.M. Kannan, F. Rosa, Biomimetic flow fields for proton exchange membrane fuel cells: A review of design trends, *Energy*. 190 (2020) 116435. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116435>.
- [126] P. Trogadas, J.I.S. Cho, T.P. Neville, J. Marquis, B. Wu, D.J.L. Brett, M.O. Coppens, A lung-inspired approach to scalable and robust fuel cell design, *Energy Environ. Sci.* 11 (2018) 136–143. <https://doi.org/10.1039/c7ee02161e>.
- [127] S.R. Badduri, G.N. Srinivasulu, S.S. Rao, Influence of bio-inspired flow channel designs on the performance of a PEM fuel cell, *Chinese J. Chem. Eng.* 28 (2020) 824–831. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.07.010>.

- [128] J.P. Kloess, X. Wang, J. Liu, Z. Shi, L. Guessous, Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells, *J. Power Sources*. 188 (2009) 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.11.123>.
- [129] J.G. Carton, A.G. Olabi, Three-dimensional proton exchange membrane fuel cell model: Comparison of double channel and open pore cellular foam flow plates, *Energy*. 136 (2017) 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.010>.
- [130] Y. Awin, N. Dukhan, Novel Flow Field for Proton Exchange Membrane Fuel Cells Made from 72%-Porous Aluminum Foam, *Procedia Comput. Sci.* 158 (2019) 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.039>.
- [131] Y. Wu, J.I.S. Cho, M. Whiteley, L. Rasha, T.P. Neville, R. Ziesche, R. Xu, R. Owen, N. Kulkarni, J. Hack, M. Maier, N. Kardjilov, H. Markötter, I. Manke, F.R. Wang, P.R. Shearing, D.J.L. Brett, Characterization of water management in metal foam flow-field based polymer electrolyte fuel cells using in-operando neutron radiography, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 2195–2205. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.069>.
- [132] S. Huo, N.J. Cooper, T.L. Smith, J.W. Park, K. Jiao, Experimental investigation on PEM fuel cell cold start behavior containing porous metal foam as cathode flow distributor, *Appl. Energy*. 203 (2017) 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.028>.
- [133] Y. Awin, N. Dukhan, Experimental performance assessment of metal-foam flow fields for proton exchange membrane fuel cells, *Appl. Energy*. 252 (2019) 113458. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113458>.
- [134] H. Heidary, M.J. Kermani, S.G. Advani, A.K. Prasad, Experimental investigation of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells, *Int. J. Hydrogen Energy*. 41 (2016) 6885–6893. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.028>.
- [135] A.M. Dafalla, L. Wei, Z. Liao, J. Guo, F. Jiang, Influence of cathode channel blockages on the cold start performance of proton exchange membrane fuel cell: A numerical study, *Energy*. 263 (2023) 125687. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125687>.
- [136] M. Bilgili, M. Bosomoiu, G. Tsotridis, Gas flow field with obstacles for PEM fuel cells at different operating conditions, *Int. J. Hydrogen Energy*. 40 (2015) 2303–2311. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.139>.
- [137] S. Barati, B. Khoshandam, M.M. Ghazi, An investigation of channel blockage effects on hydrogen mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with various geometries and optimization by response surface methodology, *Int. J. Hydrogen Energy*. 43 (2018) 21928–21939. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.032>.
- [138] H. Chen, H. Guo, F. Ye, C.F. Ma, An experimental study of cell performance and pressure drop of proton exchange membrane fuel cells with baffled flow channels, *J. Power Sources*. 472 (2020) 228456. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228456>.
- [139] S.-W. Perng, H.-W. Wu, Effect of sinusoidal-wavy channel of reformer on power of proton exchange membrane fuel cell, *Appl. Therm. Eng.* 162 (2019) 114269. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114269>.
- [140] H. Chen, H. Guo, F. Ye, C.F. Ma, Forchheimer's inertial effect on liquid water removal in proton exchange membrane fuel cells with baffled flow channels, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 2990–3007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.082>.
- [141] S.-W. Perng, H.-W. Wu, Y.-B. Chen, Y.-K. Zeng, Performance enhancement of a high temperature proton exchange membrane fuel cell by bottomed-baffles in bipolar-plate channels, *Appl. Energy*. 255 (2019) 113815. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113815>.
- [142] ANSYS Inc., ANSYS Fluent® Fuel Cell Modules Manual, (2013).
- [143] H. Chen, H. Guo, F. Ye, C.F. Ma, Q. Liao, X. Zhu, Mass transfer in proton exchange membrane fuel cells with baffled flow channels and a porous-blocked baffled flow channel design, *Int. J. Energy Res.* 43 (2019) 2910–2929. <https://doi.org/10.1002/er.4461>.
- [144] X. Liu, H. Guo, F. Ye, C.F. Ma, Water flooding and pressure drop characteristics in flow channels of proton exchange membrane fuel cells, *Electrochim. Acta*. 52 (2007) 3607–3614.

- <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.10.030>.
- [145] F. Barbir, H. Gorgun, X. Wang, Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells, *J. Power Sources*. 141 (2005) 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.08.055>.
- [146] M.Z. Chowdhury, O. Genc, S. Toros, Numerical optimization of channel to land width ratio for PEM fuel cell, *Int. J. Hydrogen Energy*. 43 (2018) 10798–10809. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.149>.
- [147] J.-K. Kuo, T.-H. Yen, C.-K. Chen, Three-dimensional numerical analysis of PEM fuel cells with straight and wave-like gas flow fields channels, *J. Power Sources*. 177 (2008) 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.065>.
- [148] J.-K. Kuo, C.-K. Chen, Evaluating the enhanced performance of a novel wave-like form gas flow channel in the PEMFC using the field synergy principle, *J. Power Sources*. 162 (2006) 1122–1129. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.053>.
- [149] M. Asadzade, A. Shamloo, Design and simulation of a novel bipolar plate based on lung-shaped bio-inspired flow pattern for PEM fuel cell, *Int. J. Energy Res*. 41 (2017) 1730–1739. <https://doi.org/10.1002/er.3741>.
- [150] V. Velisala, G. Naga Srinivasulu, Computational fluid dynamics study of 3-pass serpentine flow field configuration on proton exchange membrane fuel cell performance, *Int. J. Ambient Energy*. 41 (2018) 183–188. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1456959>.
- [151] D. Wen, L. Yin, Z. Piao, C. Lu, G. Li, Q. Leng, Performance investigation of proton exchange membrane fuel cell with intersectant flow field, *Int. J. Heat Mass Transf*. 121 (2018) 775–787. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.053>.
- [152] M.K. Vijayakrishnan, K. Palaniswamy, J. Ramasamy, T. Kumaresan, K. Manoharan, T.K. Raj Rajagopal, T. Maiyalagan, V.R. Jothi, S.-C. Yi, Numerical and experimental investigation on 25 cm<sup>2</sup> and 100 cm<sup>2</sup> PEMFC with novel sinuous flow field for effective water removal and enhanced performance, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 7848–7862. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.205>.
- [153] A. Ghanbarian, M.J. Kermani, J. Scholta, M. Abdollahzadeh, Polymer electrolyte membrane fuel cell flow field design criteria – Application to parallel serpentine flow patterns, *Energy Convers. Manag*. 166 (2018) 281–296. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.018>.

