

**AKIŞ GEOMETRİSİNİN YAKIT PİLİ PERFORMANSINA  
ETKİLERİNİN NUMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Kumru GÜREŞCİ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞ GEOMETRİSİNİN YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİLERİNİN  
DENEYSEL VE NUMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Kumru GÜREŞÇİ  
0009-0003-7008-3737

Prof. Dr. Habib UMUR  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023  
**Her Hakkı Saklıdır**

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**21/08/2023**

**Kumru GÜREŞCİ**

## ÖZET

Doktora Tezi

### AKIŞ GEOMETRİSİNİN YAKIT PİLİ PERFORMANSINA ETKİLERİNİN NUMERİK OLARAK İNCELENMESİ Kumru GÜREŞCİ

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Habib UMUR

Bu çalışmada yakıt pili için bir akış tasarımı oluşturulmuştur. Üç boyutlu, dört kanallı serpantin akış alanlı, ara rezervuarlı ve rezervuarsız olmak üzere oluşturulan model ANSYS Fluent yazılımında analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Ara rezervuarlı dört kanallı serpantin akış alanlı modeli giriş ve çıkış manifolduna yakın ara rezervuarlardan farklı besleme oranları ile debi takviyesi yapılmış ve güç yoğunlukları incelenmiştir.

Ara rezervuarlı dört kanallı serpantin akış alanlı model yüksek güç elde edilen ara besleme oranı ile farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde incelenmiştir.

Çalışma sonucunda çıkış manifolduna yakın olan ara rezervuar beslemesi girişe yakın olan ara rezervuar beslemesine göre güç çıkışının arttığı gözlenmiştir. Ara rezervuarlı dört kanallı serpantin akış alanlı modelin güç yoğunluğu sıcaklık ve basınçla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Pem Yakıt pili, Bipolar tabaka, Hidrojen enerjisi, CFD, Sayısal analiz

**2023, ix + 72 sayfa**

## **ABSTRACT**

PhD Thesis

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF FLOW GEOMETRY ON FUEL  
CELL PERFORMANCE

**Kumru GÜREŞCİ**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Habib UMUR

In this study, a flow design for the fuel cell was created. The model created with a three-dimensional, four-channel serpentine flow field, with and without a reservoir, was analyzed and compared in ANSYS Fluent software.

In the four-channel serpentine flow field model with intermediate reservoirs, flow rate was supplemented with different feed rates from reservoirs close to the inlet and outlet manifolds, and the power densities were examined.

The four-channel serpentine flow field model with intermediate reservoir was examined at different temperature and pressure values with the intermediate feed rate to obtain high power.

As a result of the study, it was observed that the power output of the intermediate reservoir feed close to the outlet manifold increased compared to the intermediate reservoir feed close to the inlet. It has been determined that the power density of the four-channel serpentine flow field model with reservoir increases in direct proportion to temperature and pressure.

**Key words:** Pem fuel cell, Bipolar plate, Hydrogen energy, CFD, Numerical analysis

**2023, ix+ 72 pages**

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın başlangıcından çalışmamın tamamlanmasına kadar oluşan her adımda akademik ve manevi yönden desteğini esirgemeyen, karşılaşılan zorlukta tecrübesiyle yönlendirip çözüme ulaşmamı sağlayan değerli hocam Sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ'e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmam sırasında bilgi ve tavsiyeleriyle yardımcı olan Arş. Gör. Fırat IŞIKLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimimin başından beri yanımda olan Bursa Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü hocalarıma desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Bu çalışma YÖK 100/2000 programı tarafından desteklenmiştir.

Kumru GÜREŞCİ

21/08/2023

## İÇİNDEKİLER

|                                                            | Sayfa |
|------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET.....                                                  | i     |
| ABSTRACT.....                                              | ii    |
| TEŞEKKÜR.....                                              | ii    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....                        | vi    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                       | vii   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                     | ix    |
| 1. GİRİŞ.....                                              | 1     |
| 1.1. Yakıt Pili Çeşitleri.....                             | 1     |
| 1.2. Pem Yakıt Pili Bileşenleri.....                       | 3     |
| 1.2.1. Akım Toplama Plakası.....                           | 3     |
| 1.2.2. Gaz Difüzyon Tabakası.....                          | 3     |
| 1.2.3. Katalizör Tabakası.....                             | 4     |
| 1.2.4. Akım Toplama Plakası.....                           | 4     |
| 1.3. Pem Yakıt Pilinde Su Yönetiminin Önemi.....           | 4     |
| 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....            | 6     |
| 2.1. Literatür Taraması.....                               | 6     |
| 2.2. Pem Yakıt Pilinde Temel Denklemler.....               | 32    |
| 2.2.1. Tür Miktarlarının Hesaplanması.....                 | 32    |
| 2.2.2. Isı Miktarının Hesaplanması.....                    | 34    |
| 2.2.3. Elektrokimyasal Denklemler.....                     | 35    |
| 2.3. Yakıt Pilinde Oluşan Kayıplar.....                    | 36    |
| 2.3.1. Aktivasyon Kayıpları.....                           | 36    |
| 2.3.2. Ohmik kayıplar.....                                 | 36    |
| 2.3.3. Konsantrasyon Kayıpları.....                        | 36    |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM.....                                 | 38    |
| 3.1. PEM Yakıt Pili Matematiksel Model.....                | 38    |
| 3.2. PEM Yakıt Pili Sayısal Analizi.....                   | 40    |
| 3.2.1. PEM Yakıt Pili Geometrisi.....                      | 40    |
| 3.2.2. Sayısal Model Ağ Yapısı.....                        | 42    |
| 3.2.3. Sayısal Modelin Çözüm Aşaması.....                  | 44    |
| 4. BULGULAR.....                                           | 46    |
| 4.1. PEM Serpantin Modeli.....                             | 46    |
| 4.2. Ara Rezervuarlı PEM Serpantin Modeli.....             | 47    |
| 4.3. Ara Beslemeli Model.....                              | 50    |
| 4.3.1. 80-20-0 Ara Beslemeli Model.....                    | 50    |
| 4.3.2. 70-30-0 Ara Beslemeli Model.....                    | 50    |
| 4.3.3. 70-20-10 Ara Beslemeli Model.....                   | 52    |
| 4.3.4. 70-0-30 Ara Beslemeli Model.....                    | 53    |
| 4.3.5. 80-0-20 Ara Beslemeli Model.....                    | 54    |
| 4.3.6. 90-0-10 Ara Beslemeli Model.....                    | 55    |
| 4.3.7. 60-0-40 Ara Beslemeli Model.....                    | 55    |
| 4.3.8. İkinci ara rezervuarların karşılaştırılması.....    | 56    |
| 4.4. Ara Beslemeli Model Sıcaklık ve Basınç Sonuçları..... | 57    |
| 4.4.1. 70-0-30 ara beslemeli model 2 atm 45°C.....         | 57    |
| 4.4.2. 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm 45°C.....         | 58    |
| 4.4.3. 70-0-30 ara beslemeli model 1 atm 70°C.....         | 59    |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.4. 70-0-30 ara beslemeli model 2 atm 70°C.....                      | 59 |
| 4.4.5. 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm 70°C.....                      | 61 |
| 4.5. 70-0-30 Ara Besleme Modeli Sıcaklık ve Basınç Karşılaştırması..... | 62 |
| 5. SONUÇ.....                                                           | 66 |
| KAYNAKLAR .....                                                         | 68 |



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| <b>Simgeler</b> | <b>Açıklama</b>      |
|-----------------|----------------------|
| W               | Watt                 |
| V               | Volt                 |
| A               | Amper                |
| F               | Faraday sabiti       |
| $V_h$           | Hücre voltajı        |
| $P_t$           | Üretilen toplam güç  |
| I               | Akım                 |
| H               | Entalpi              |
| G               | Gibbs serbest enerji |
| S               | Entropi              |
| T               | Reaksiyon sıcaklığı  |
| R               | Evrensel gaz sabiti  |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                       |
|--------------------|---------------------------------------|
| PEM                | Polimer elektrolit membran            |
| PEMFC              | Polimer elektrolit membran yakıt pili |
| DMYP               | Doğrudan metanol yakıt pili           |
| AYP                | Alkali yakıt pili                     |
| FAYP               | Fosforik asit yakıt pili              |
| EKYP               | Erimiş karbon yakıt pili              |
| KOYP               | Katı oksit yakıt pili                 |
| Gdl                | Gaz difüzyon tabakası                 |
| a                  | Anot                                  |
| c                  | Katot                                 |
| hyd                | Yüzey tanımında hidrojen              |
| oxg                | Yüzey tanımında oksijen               |
| CFD                | Hesaplamalı akışkanlar dinamiği       |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                      | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2.1. U şekilli yığın.....                                                                                                                      | 26           |
| Şekil 2.2. Z şekilli yığın.....                                                                                                                      | 26           |
| Şekil 2.3. Farklı manifold genişliğine sahip PEMFC şematik gösterimi.....                                                                            | 28           |
| Şekil 2.4. Birbirine bağlı PEMFCnin geometrik gösterimi.....                                                                                         | 31           |
| Şekil 3.1. PEM modeli 3 boyutlu görünüşü.....                                                                                                        | 41           |
| Şekil 3.2. Ara rezervuarlı model 3 boyutlu görünüşü.....                                                                                             | 38           |
| Şekil 3.3. Sayısal ağ yapısı ve kalitesi.....                                                                                                        | 40           |
| Şekil 3.4. Modelin ağ yapısı görüntüsü.....                                                                                                          | 40           |
| Şekil 3.5. GDL, katalizör ve membran sayısal ağ yapısı görüntüsü.....                                                                                | 40           |
| Şekil 3.6. Çözüm sonunda elde edilen residualer.....                                                                                                 | 41           |
| Şekil 4.1. Serpantin modelinde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.....                                    | 46           |
| Şekil 4.2. Katot gaz akış kanalı boyunca serpantin yakıt pili modelinde basınç konturları (a) Maksimum güç yoğunluğunda (b) 0,3 V gerilimde.....     | 47           |
| Şekil 4.3. Ara rezervuarlı modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.....                                | 47           |
| Şekil 4.4. Katot gaz akış kanalı boyunca ara rezervuar yakıt pili modelinde basınç konturları (a) Maksimum güç yoğunluğunda (b) 0,3 V gerilimde..... | 47           |
| Şekil 4.5. Ara rezervuarlı ve Pem serpantin model akım ve güç yoğunluğu karşılaştırılması.....                                                       | 48           |
| Şekil 4.6. Katot gaz akış kanalı boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri konturları (a) ara rezervuarlı model (b) serpantin model.....                    | 49           |
| Şekil 4.7. Katot gaz akış kanalı boyunca H <sub>2</sub> O kütle kesri konturları (a) serpantin model (b) ara rezervuarlı model.....                  | 49           |
| Şekil 4.8. 80-20-0 ara beslemeli modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.....                          | 50           |
| Şekil 4.9. 70-30-0 ara beslemeli modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.....                          | 51           |
| Şekil 4.10. Katot gaz akış kanalı boyunca H <sub>2</sub> O kütle kesri konturları (a) 0,3 V gerilimde (b) maksimum güç yoğunluğunda.....             | 51           |
| Şekil 4.11. Katot gaz akış kanalı boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri konturları (a) 0,3 V gerilimde (b) maksimum güç yoğunluğunda.....               | 51           |
| Şekil 4.12. 80-20-0 ve 70-30-0 ara besleme modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                        | 52           |
| Şekil 4.13. 70-20-10 ara beslemeli modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.....                        | 53           |
| Şekil 4.14. 70-0-30 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması .....                                                                | 53           |
| Şekil 4.15. Katot gaz akış kanalı boyunca H <sub>2</sub> O kütle kesri konturları (a) 0,3 V gerilimde. (b) maksimum güç yoğunluğunda.....            | 54           |

|             |                                                                                                                                         |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.16. | Katot gaz akış kanalı boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri konturları (a) maksimum güç yoğunluğunda (b) 0,3 V gerilimde.....              | 54 |
| Şekil 4.17. | 80-0-20 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                                | 55 |
| Şekil 4.18. | 90-0-10 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                                | 55 |
| Şekil 4.19. | 60-0-40 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                                | 56 |
| Şekil 4.20. | İkinci ara rezervuar besleme modellerinin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                    | 56 |
| Şekil 4.21. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 2 atm 45°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                     | 57 |
| Şekil 4.22. | (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları.....         | 58 |
| Şekil 4.23. | 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm 45°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                       | 58 |
| Şekil 4.24. | (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları.....         | 59 |
| Şekil 4.25. | 70-0-30 ara beslemeli model 1 atm 70°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                       | 59 |
| Şekil 4.26. | (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları.....         | 60 |
| Şekil 4.27. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 2 atm 70°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                     | 60 |
| Şekil 4.28. | (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları.....         | 61 |
| Şekil 4.29. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 3 atm 70°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.....                                                     | 61 |
| Şekil 4.30. | (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O <sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel kontur dağılımları..... | 62 |
| Şekil 4.31. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 1 atm- sıcaklık karşılaştırması.....                                                                      | 62 |
| Şekil 4.32. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 2 atm- sıcaklık karşılaştırması.....                                                                      | 63 |
| Şekil 4.33. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 3 atm- sıcaklık karşılaştırması.....                                                                      | 63 |
| Şekil 4.34. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 45°C- basınç karşılaştırması.....                                                                         | 64 |
| Şekil 4.35. | 70-0-30 ara beslemeli modelin 70°C- basınç karşılaştırması.....                                                                         | 64 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|              | <b>Sayfa</b>                                                   |
|--------------|----------------------------------------------------------------|
| Çizelge 1.1  | Yakıt pillerinin karşılaştırılması..... 2                      |
| Çizelge 1.2. | Reaksiyonlar..... 3                                            |
| Çizelge 3.1. | Sayısal Model Geometrik Parametreleri..... 41                  |
| Çizelge 3.2. | 2000 iterasyon sonucu yakınsama değerleri ..... 45             |
| Çizelge 3.3. | Sayısal model parametreleri ..... 45                           |
| Çizelge 4.1. | Pem serpantin ve ara rezervuarlı model karşılaştırması..... 49 |
| Çizelge 4.2. | 80-20-0/70-30-0 karşılaştırması..... 52                        |
| Çizelge 4.3. | Membran Protonik Potansiyel Karşılaştırması..... 65            |
| Çizelge 4.4. | O <sub>2</sub> Kütle Kesri Karşılaştırması..... 65             |

## 1. GİRİŞ

Artan nüfus, teknolojik gelişmeler ve bu teknolojik gelişmelere artan talep ihtiyaç duyulan enerji miktarını arttırmaktadır. Enerji yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Yenilenemez enerji kaynaklarının artan enerji ihtiyaçları sebebiyle rezervleri tükenmektedir. Ayrıca çevre kirliliği ve doğaya verdiği zararlar enerji ihtiyacı karşılanırsa dahi ekosistemi olumsuz şekilde etkilemektedir. Artan enerji talebini karşılamak ve doğaya verilen zararı azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek elzemdir.

### 1.1.Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri elde edilen hidrojenin veya saf hidrojenin, oksijen ile reaksiyona girmesiyle enerji üreten cihazlardır.

Yakıt pilleri çevre ve gürültü kirliliğine neden olmamaları, hareketli parça içermemeleri ve fosil yakıtlardan daha yüksek dönüşüm elde edilebilmeleri gibi avantajlara sahiptir.

Geleneksel enerji üretimi sistemlerinde elektrik enerjisi eldesi üç aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada yakıtın yanması sonucunda ısı enerjisi elde edilmektedir. İkinci aşamada üretilen ısı mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Son aşamada ise mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Tüm bu dönüşüm kademeleri enerji kaybına neden olmaktadır. Özellikle ikinci aşamanın verimi oldukça düşüktür, en gelişmiş modern sistemlerde dahi %40'lık bir verim söz konusu olabilmektedir. (Ozeti,2018)

Yakıt pillerinin en yaygın sınıflandırılması yakıt pilinde kullanılan elektrolit tipine göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre 6 farklı yakıt pili türü bulunmaktadır. (Kılıçoğlu,2008)

- Polimer elektrolit membran yakıt pili (PEM)
- Doğrudan metanol yakıt pili (DMYP)
- Alkali yakıt pili (AYP)

- Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
- Erimiş karbon yakıt pili (EKYP)
- Katı oksit yakıt pili (KOYP)

Yakıt pilleri uygulama alanları, elektrolit, çalışma sıcaklığına göre farklılıklar gösterir. Bu farklılıklar Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Yakıt pillerinin karşılaştırılması (Köseler,2009)

| Yakıt Pili | Elektrolit          | Taşıyıcı                      | Katalizör   | Çalışma Sıcaklığı | Yakıt/ Oksitleyici                                                  | Uygulama Alanları                  |
|------------|---------------------|-------------------------------|-------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| PEM        | Polimer Membran     | H <sup>+</sup>                | Pt          | Oda sıc-80        | H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , Hava                               | Ulaşım araç, askeri sist.          |
| DMYP       | Polimer Membran     | H <sup>+</sup>                | Pt-Ru       | Oda sıc-130       | CH <sub>3</sub> OH/ O <sub>2</sub> , Hava                           | Küçük elektrik.araç                |
| AYP        | Potasyum Hidroksit  | OH <sup>-</sup>               | Poroz Nikel | Oda sıc-250       | H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , Hava                               | Uzay araştırmaları                 |
| FAYP       | Sıvı fosforik       | H <sup>+</sup>                | Pt          | 160-220           | Doğalgaz,biyogaz,H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , Hava              | Ticari uyg.                        |
| EKYP       | Alkali karbonatlar  | CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> | Pt          | 620-660           | Doğalgaz,biyogaz,kömür gazı,H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , Hava   | Elektrik santralleri               |
| KOYP       | Erimiş alkali metal | O <sup>-2</sup>               | Raney Ni    | 800-1000          | Doğalgaz ,biyogaz, kömür gazı,H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , Hava | Ticari, sanayi uyg, elektrik sant. |

Yakıt pillerinde gerçekleşen reaksiyonlar Çizelge 1.2.'de verilmiştir.

**Çizelge 1.2.** Reaksiyonlar (Geliş,2019)

| Yakıt Pili | Anot                                                                                                                                | Katot                                        |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| PEM        | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                                                                                                       | $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$      |
| DMYP       | $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$                                                                                      | $6H^+ + 6e^- + O_2 \rightarrow 3H_2O$        |
| AYP        | $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$                                                                                              | $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$     |
| FAYP       | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$                                                                                                       | $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$      |
| EKYP       | $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$<br>$CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$                                       | $1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ |
| KOYP       | $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$<br>$CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$<br>$CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$ | $1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$           |

## 1.2.Pem Yakıt Pili Bileşenleri

Pem yakıt pilinin 4 ana bölümü mevcuttur. Akım toplama plakası, gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve membrandan oluşmaktadır.

### 1.2.1. Akım Toplama Plakası

Yakıt pilinin her iki uç kısmında bulunur. Bir yüzeyinde anot gaz akış kanalları diğer yüzeyinde katot gaz akış kanallarını içerir. İçerdiği gaz akış kanalları sayesinde reaktanları düzgün şekilde dağıtır. Düzgün dağıtılmış reaktanlar sayesinde pil performansı artmaktadır. Gaz akış kanallarının geometrik özellikleri güç üretimi, su yönetimi ve verim açısından önemlidir. Pil hücresinde ısı ve elektrik iletimini sağlamak, reaktanları düzgün dağıtmak, reaktanların karışmasını önlemek, fazla ısıyı ve oluşan suyu uzaklaştırmak gibi görevleri mevcuttur.

### 1.2.2 Gaz Difüzyon Tabakası

Yakıt pilinde gaz akış kanalları ve katalizör arasında bulunan gözenekli bir yapıdır. Geçirgen bir yapıya sahip olduğundan anot ve katot taraflarından gazların geçişini sağlar. Katalizörde oluşan suyu uzaklaştırmak, gaz geçişini sağlamak gibi görevleri mevcuttur.

### **1.2.3. Katalizör Tabakası**

Yakıt pilinde katalizör tabakası gaz difüzyon ve membran arasında bulunur. Anot ve katot katalizör tabakası şeklinde adlandırılır. Anot katalizör tabakasının işlevi hidrojeni proton ve elektronlarına ayırmaktır. Katot katalizör tabakasında hidrojen ve oksijen birleşerek su açığa çıkartır.

### **1.2.4. Membran Tabakası**

Bir yakıt pili hücresinin ortasında yer almaktadır. Anot ve katot bölümünü ikiye ayırır. Anot katalizör ve katot katalizörün arasında yer alır. Özelliği + yüklü iyonları iletmektedir. Pil içerisinde gazların direkt karışmasını önlemektedir. Mekanik dayanımı ve reaksiyonlara karşı direnci gerekmektedir.

## **1.3. Pem Yakıt Pilinde Su Yönetiminin Önemi**

Yakıt hücresi çalışma sırasında katot katalizör tabakasında su ortaya çıkar, bu da gözenekli ortamda ve kanallarda gaz-su akışına yol açar. PEM yakıt pilinin düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle su buharı yoğunlaşmaya neden olabilir. Tahliye edilmeyen su gaz akış kanallarını tıkayabilir. Bu durum katot tarafından daha düşük bir hava akış hızına neden olabilir ve gaz difüzyon ve katalizör tabakalarında reaktan gazın kütle taşınmasını engeller. Bunlar kütle aktarımı nedeniyle voltaj kaybına neden olup PEM yakıt pilinin performans düşmesine sebebiyet verir. Halbuki PEM yakıt pilinin kimyasal yapısı nedeniyle yeterli miktarda hidrojenin zardan geçebilmesini sağlamak amacıyla iyi nemlendirilmesi gerekmektedir.

PEM yakıt pilindeki su miktarı iyonik iletkenlik ile doğru orantılıdır. Bu da ohmik direnci etkileyen önemli faktördür. Bu nedenle membran dehidrasyonu ve su buharı yoğunlaşmasını önlemek açısından PEM yakıt pilinde yeterli miktarda su içeriği tutmak PEM yakıt pilinin performans iyileştirmesi için önemli bir faktördür.

Ancak gerçekte hem anot hem katot tarafındaki suyu dehidrasyon ve yoğunlaşma olmadan yönetmek neredeyse imkansızdır. Çünkü PEM yakıt pili uygulamalarında gaz akış kanallarında su buharı yoğunlaşması kaçınılmazdır.



Son olarak suyun mevcudiyeti yakıt hücresinin uzun süreli kullanımını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle PEM yakıt pili uygulamalarında su yönetimi birçok çalışmalar yapılmış ve performans verimliliği açısından dikkat edilmesi gereken bir kritik bir konu olmuştur.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Literatür Taraması

Pem yakıt pili ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Araştırmada Pem yakıt pili modeli, akış geometrisi, verimi, deneysel ve sayısal yöntemleri incelenmiştir. Elde edilen bilgiler sunulmuştur.

E. Eker ve İ. Taymaz (2012) tarafından yapılan çalışmada farklı kanal genişliklerinin PEM tipi yakıt hücresi performansına etkileri incelenmiştir. Hücre genişliği ve kanal yüksekliği sabit tutulmuştur. Akım yoğunluğu, 25 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip paralel akışlı plakanın tek bir hücresi için üç farklı kanal genişliğinde ölçülmüştür. Hücre genişliği sabit tutularak kanal genişliği arttıkça akım yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir.

A. D. Le ve B. Zhou (2008) tarafından yapılan çalışmada genel bir proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresi modeli; akışkan tipi, ısı transferi, türlerin taşınması, elektrokimyasal reaksiyon ve akım yoğunluğu dağılımını simüle etmek ve özellikle sıvı su etkilerinin PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkilerine odaklanmak amacıyla oluşturulmuş ve incelenmiştir. Model, üç boyutlu ve kararsız bir termo-elektrokimya, çoklu türler ve sıvı hacmi yöntemini kullanarak açık gaz-sıvı arabirimi takibi ile iki fazlı etkileşimi olan kararsız bir modeldir. Membran, gaz difüzyon katmanları (GDL'ler), katalizör katmanları, gaz akış kanalları ve akım toplayıcıları dahil olmak üzere tam bir PEM yakıt pili olarak değerlendirilmiştir. Sıvı suyun serpantin kanalları ile PEM yakıt pili üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, bu genel PEM yakıt pili modelinin pratik mühendislik tasarımlarının optimizasyonu için çok faydalı bir araç olabileceğini göstermiştir.

S. Çelik (2017) tarafından yapılan bu çalışmada PEM yakıt pili için farklı akış geometrilerine sahip akış plakaları imal edilerek farklı basınç değerlerinde performans testleri yapılmıştır. Çalışmada 5 farklı tasarım kullanılmıştır; dairesel üçlü dörtlü serpantin, karesel 4lü serpantin, karesel dörtlü serpantin geniş radiuslu ve karesel paralel akışlı tasarımdır. Akış alanı tasarımları 50 cm<sup>2</sup> aktif alan için test edilmiştir. En iyi

performansı yaklaşık 15 Watt güç sergileyen karesel serpantin akış olmuştur. İkinci en iyi dairesel serpantin akış olmuştur. İki sonuç birbirine yakın olsa da aktif tüm yüzeyin kullanılması açısından karesel tasarım daha iyi sonuç vermiştir.

J. B. Lu ve ark. (2019) tarafından yapılan bu çalışmada tek serpantin kanallı polimer elektrolit membranlı (PEM) yakıt hücresi performansı üzerindeki basınç etkileri araştırılmıştır. Numerik çalışma bir dizi deneyle doğrulanmıştır. PEM yakıt hücresi performansı karşı basınçtaki artışla arttırılmıştır. Simülasyon sonuçları, basınç ve nem arasında önemli bir mekanizma ortaya çıkarmıştır: yüksek bir karşı basınç, katot kanalında yüksek bir membran suyu içeriği ile sonuçlanan yüksek bağıl neme (RH) yol açabildiği gözlemlenmiştir. Bu mekanizmaya dayanarak, basınçlandırma ile arttırılan voltaj 2 kısma ayrılır: reaktanların kısmi basıncı ile arttırılmış voltaj (Nernst gerilimi) ve gelişmiş membran su içeriği ile arttırılmış voltaj. Karşılaştırma, basınçlandırmanın en büyük yararının zarda yeterli suyu tutmak olduğunu göstermiştir. Net güç verimliliğinin analizi de yapılmıştır ve 50 kPa geri basıncının düşük yoğunluklarda ( $1.000 \text{ mA cm}^{-2}$ 'den az) yeterli olduğunu ve yüksek yoğunluklarda ( $1.000 \text{ mA cm}^{-2}$ 'den fazla) 100 kPa geri basınca ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir.

A. Ekiz ve ark. (2011) tarafından bu çalışmada tek hücreli bir polimer elektrolit membranlı yakıt pili Comsol Multiphysics programı kullanılarak iki boyutlu olarak modellenmiştir. Akışa paralel kesitte model oluşturulmuş ve akış kanalına farklı geometrilerde engeller konularak daha fazla yakıtı reaksiyona zorlanması hedeflenmiştir. Bu şekilde ideal performans değerlerine yakın akım ve güç yoğunlukları oluşturulmaya ve kayıplar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Sınır koşulları olarak değişik hız değerleri girilmiştir. Ayrıca çıkış sınır şartları için farklı basınç değerleri verilerek performans etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu; giriş hızının artması, çıkış basıncının artması, katot tarafındaki sınır şartlarına anoda göre daha fazla oksidan beslenmesi ve kanal boyunca bulunan engellerin derinliğinin artması sonrasında yakıt hücresi performansı arttığı görülmüştür.

M. Özdoğan ve ark. (2016) tarafından yapılan bu çalışmada farklı çalışma basınçlarında, kanal genişliğinin ve akım toplama plakası omuz genişliğinin, tek hücreli yakıt hücresinin

performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan modelin doğruluğunun kontrol edilmesi amacıyla, modelden elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hücre boyutlarının etkisinin incelenmesi amacıyla toplam beş farklı hücre geometrisi oluşturulmuş ve üç farklı çalışma basıncı için analizler yapılmıştır. Tüm bulgular değerlendirildiğinde, kanal genişliğinin artmasıyla hidrojenin gaz difüzyon tabakasındaki difüzyonun ve pillerin aktif yüzey alanının artmasından dolayı hücre performansının arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, akım toplama plakası (ATP) omuz genişliğinin artmasıyla, akım direncinin azalmasından ve hücrenin aktif yüzey alanının artmasından dolayı hücre performansı artmaktadır.

M. Bilgili ve M. Sivrioğlu (2015) tarafından yapılan bu çalışmada iki farklı boyuttaki MEÇ'in (Membran Elektrot Çiftinin) kullanıldığı, tek bir hücreden oluşan proton aktaran membran (PEM) yakıt pilinin ANSYS-FLUENT yardımı ile üç boyutlu sayısal analizi yapılmıştır. İki farklı kalınlıktaki MEÇ ile hazırlanan PEM yakıt pilinin sayısal analizi difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve membran kalınlıkları değiştirilerek ve farklı çalışma basıncı koşullarında yapılmıştır. MEÇ-1 ile hazırlanan yakıt pili modelinin çözümünden elde edilen akım yoğunluğu değerleri MEÇ-2 ile hazırlanan duruma göre daha iyi çıkmıştır. Çözüm için, kütle, momentum, enerji, türler ve faz potansiyelinin korunumu dikkate alınmıştır. ANSYS FLUENT PEMFC modülünde yakıt pili içindeki elektrokimyasal eşitlikler, hidrojenin oksidasyonu ve oksijenin indirgenme hızına bağlı olarak çözülmüştür. Hidrojen ve oksijenin kütle kesri dağılımları ile ilgili sonuçlar, ana gaz akış yönünde iki boyutlu olarak sunulmuştur. Ayrıca hidrojenin kütle kesri değişimleri ana akışa dik kesitlerde (giriş, orta ve çıkış) alınan dağılımlarla iki boyutlu olarak incelenmiştir.

D.L. Gutierrez ve ark. (2013) tarafından yapılan bu çalışmada üç boyutlu yakıt hücresi modelleri CFD ile analiz edilmiştir. Önerilen akış alanları, merkez akış girişini yakıt hücresi plakasının çevresine bağlayan radyal olarak tasarlanmış ağaç şeklindeki geometrilerdir. Farklı çatallanma seviyelerine sahip üç akış geometrisi, PEM yakıt hücreleri için akış kanalları olarak incelenmiştir. Yakıt hücreleri performansı polarizasyon ve güç eğrilerinde rapor edilir ve serpantin ve paralel kanallar gibi geleneksel akış desenlerini kullanan yakıt hücrelerinininkiyle karşılaştırılmıştır. Akış

analizinden elde edilen sonuçlar, ağaç şeklindeki akış düzenlerinin, eşit bir akış dağılımının yanı sıra nispeten düşük bir basınç düşüşü sağlayabildiğini göstermiştir. Çatallanma seviyelerinin sayısı arttıkça, pompalama gücünde göz ardı edilebilir bir artış ile yakıt hücresinden daha yüksek güç ve akım yoğunlukları elde etmek için daha geniş bir aktif alanın kullanılabilmesi bulunmuştur.

A. Arvey ve ark. (2013) tarafından yapılan bu çalışmada doğadan ilham alan PEM yakıt pili akış tasarımlarının mevcut durumunu gözden geçirmekte ve bu tasarımları değerlendirmedeki zorlukları incelenmiştir. PEM yakıt pilleri için bu tasarımlar, reaktif gazların su taşması olmadan etkili bir şekilde dağıtılmasıyla çarpıcı performans iyileştirmeleri gösterme potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bir akış alanının optimizasyonu, dengeleme gazı dağıtımı, su yönetimi, elektron taşınması, basınç düşüşü ve üretim kolaylığı gerektirmektedir. Tahminler deneysel bir çalışma tarafından onaylanana kadar dikkatli kullanılması gerekmektedir.

J. P. Kloess ve ark. (2008) tarafından yapılan bu çalışmanın amacı yaprak tasarımı ve akciğer tasarımı olarak iki yeni akış kanalı modeli sunmaktır. Bu biyo-ilham verici tasarımlar, mevcut serpantin ve birbirine bölünmüş desenlerin avantajlarını, doğada bulunan desenlerden ilham alarak birleştirmektedir. İki yeni akış kanalı paterninin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için hem sayısal simülasyon hem de deneysel testler yapılmıştır. Sayısal simülasyondan, yaprak veya akciğer tasarımında girişten çıkışa, mevcut serpantin veya iç içe akış desenlerinden daha düşük bir basınç düşüşü olduğu ve gaz difüzyon katmanına akış difüzyonunun, yeni akış kanalı desenleri için daha üniform olduğu bulunmuştur. 25 cm<sup>2</sup>'lik bir yakıt hücresi ve dört farklı akış kanalı için test edilmiş, bunlar yaprak, akciğer, serpantin ve birbirine kenetlenen. Polarizasyon eğrisi farklı çalışma koşulları altında elde edilmiştir. Aynı çalışma koşullarında yaprak veya akciğer tasarımlı yakıt hücresinin konveksiyonel akış kanalı tasarımından daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Hem yaprak hem de akciğer tasarımı, önceki tasarımlara göre en yüksek güç yoğunluğunda% 30'a varan iyileşmeler gösterdiği bulunmuştur.

V. Mehta ve J. S. Cooper tarafından yapılan bu çalışmada Proton Değişim Membranı (PEM) yakıt hücreleri için tasarım ve üretim alternatifleri çeşitli uygulamalar kapsamında tanımlanmış ve analiz edilmiştir. Spesifik olarak, birçok alternatifin gözden geçirilmesinin ardından, 16 polimer elektrolit membran, 2 tip gaz difüzyon tabakası (GDL), 8 tip anot katalizörü, 4 tip katot katalizörü ve 100'den fazla bipolar plaka tasarımı önerilmektedir. Bu çalışmanın, geniş ölçekli üretim için sermaye yatırımı öncesinde tasarım ve üretim alternatiflerinin çeşitliliği göz önünde bulundurularak malzeme ve süreç seçimini kolaylaştırması amaçlanmıştır.

X. Li ve ark. (2006) tarafından yapılan bu çalışmada bipolar plakalardaki akış kanalları için suyu PEM yakıt hücrelerinden etkili bir şekilde çıkarabilen bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir. Ana tasarım felsefesi, akış kanalı boyunca uygun bir basınç düşüşünün belirlenmesine dayanmaktadır, böylece hücredeki tüm sıvı su, akış kanalındaki gaz akışı tarafından hücreden buharlaştırılmakta ve çıkarılmaktadır. Aynı zamanda, akış kanalındaki gaz akışı, membran elektrolit dehidrasyonunu önlemek için tamamen doymuş halde tutulmaktadır. Örnek akış kanalları, 50, 100, 200, 300 ve 441 cm<sup>2</sup>'lik beş farklı hücre boyutu için tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Benzer hücre performansı, bu beş önemli ölçüde farklı hücre büyüklüğü için ölçülmüştür, bu, hücre işlemi sırasında sıvı su taşması veya membran susuzluğundan kaçınılabileceği takdirde PEM yakıt hücrelerinin ölçeklendirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Anottaki hücreden sıvı su akmadığı ve performans testleri sırasında mevcut tasarımlı hücreler için katot kanalından çıkmadığı ve hücre yapısındaki sıvı su içeriğinin nötron görüntüleme tekniği ile ölçülmediği gözlenmiştir. Bu ölçümler, mevcut tasarım prosedürünün, PEM yakıt hücresi yapısındaki suyu etkili bir şekilde giderebilen akış kanalları sağlayabileceğini göstermektedir.

S. Um ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmada proton değişim membranı yakıt hücrelerini simüle etmek için geçici, çok boyutlu bir model geliştirilmiştir. Model aynı anda elektrokimyasal kinetik, akım dağılımı, hidrodinamik ve çok bileşenli taşımayı açıklamıştır. Akış kanalları, gaz difüzyon elektrotları, katalizör katmanları ve membran bölgesi için geçerli olan tek bir koruma denklemi seti, sonlu hacimli tabanlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniği kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal

model yayınlanmış deneysel verilere karşı iyi bir uyumla onaylanmıştır. Daha sonra, model anot beslemesindeki hidrojen seyreltme etkilerini araştırmak için model incelenmiştir. Hidrojen seyreltme koşulları altında tahmin edilen polarizasyon eğrileri, literatürde bildirilen son deneylerle nitel uyum içinde bulunmuştur. Ayrıntılı iki boyutlu elektrokimyasal ve akış / nakil simülasyonları ayrıca yakıt akışında hidrojen seyreltmesi varlığında, reaksiyon yüzeyinde hidrojenin tükendiğini ve bunun sonucunda önemli miktarda anot kütle nakil polarizasyonu ve dolayısıyla yakıt akımından reaksiyon sahasına hidrojen taşınması gözlemlenmiştir. Son olarak, hücre voltajındaki bir adım değişikliğine hücre akım yoğunluğu tepkisinin geçici bir simülasyonu rapor edilmiştir.

S.W. Cha ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmada yakıt hücresi akış kanalı ölçekleme davranışı, hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) kullanılarak üç farklı akış paterni prototipte (interdigitated-, serpentine ve spiral interdigitated) araştırılmıştır. İnceleme aralığı, makro özellik boyutundan (> 500 m) mikro özellik boyutuna (<100 m) kadar olan akış kanallarını kapsamaktadır. Her akış modeli benzersiz ölçeklendirme davranışı sergilemiştir. Çoğu akış paterninde, en uygun özellik boyutu bir ara kanal boyutunda olduğu gözlemlenmiştir. Son derece küçük akış kanalları, gelişmiş kütle taşımacılığına rağmen performansı optimize etmemektedir. Katot bölmesindeki basınç düşüşü kaybı ve akış hareket yolu, en uygun boyutu belirleyen temel faktörlerdir. Ölçekleme olayları, katot akış kanallarındaki ve gaz difüzyon katmanındaki oksijen dağılımının ayrıntıları ile bağlantılı olarak açıklanmaktadır.

L. You ve H. Liu (2001) tarafından yapılan çalışmada PEM yakıt hücreleri için katottaki akışı ve taşınmayı tanımlamak için birleşik iki fazlı akış karışımı modeli geliştirilmiştir. Gaz difüzörü / katalizör tabakası arayüzündeki sınır koşulu anot, katot katalizör tabakaları ve membran arasındaki akış, nakil, elektriksel potansiyel ve akım yoğunluğunu birleştirmiştir. Bu model tarafından öngörülen yakıt hücresi performansı, deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve makul uyuşmalar elde edilmiştir. Katot gazı difüzörü ve gaz kanalında tipik iki fazlı akış dağılımları sunulmuştur. Membrandan su aktarımını etkileyen ana parametreler de tartışılmıştır. Su ve termal yönetimin iki fazlı akış üzerindeki etkilerini inceleyerek katottaki iki fazlı akış karakteristiklerinin akım

yoğunluğuna, çalışma sıcaklığına, katot ve anot nemlendirme sıcaklıklarına bağlı olduğu bulunmuştur.

K. Jiao ve B. Zhou tarafından yapılan çalışmada (2007) sıvı su taşınması, bir proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresindeki su yonetimi için ana zorluklardan biri olduğu bilinmektedir. Gaz difüzyon tabakası (GDL) ile yakıt hücresi gaz akış kanalları içindeki hava-su akış paternlerinin araştırılması, yakıt hücresi tasarımı ve optimizasyonunda kullanılabilir değerli bilgiler sağlaması öngörölmüştür. Çalışmada ticari bir Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılım paketi FLUENT kullanılarak katalizör tabakası ve PEM yakıt hücresi katodu üzerinde serpantin kanalı ile yenilikçi bir GDL boyunca hava-su akışının sayısal incelemeleri sunulmaktadır. Elektrota (GDL ve katalizör tabakası) farklı statik temas açıları (hidrofilik veya hidrofobik) uygulanmıştır. Sonuçlar, katot elektrotunun farklı ıslanabilirliklerinin sıvı su akış modellerini önemli ölçüde etkileyebileceğini ve böylece PEM yakıt hücrelerinin performansını etkileyebileceğini göstermiştir. Sıvı suyun ayrıntılı akış paternleri gösterilmiş, birkaç gaz akış problemi gözlenmiş ve akış paternleri incelenerek bazı faydalı öneriler verilmiştir.

İ. Taymaz ve M. Benli tarafından yapılan çalışmada (2010) yakıt hücresinin performansı birçok parametreden etkilenmektedir. Bu parametrelerden biri, yakıt hücresi bileşenlerinin mekanik özelliklerini ve boyutlarını değiştiren montaj basıncı olduğu bilinmektedir. Düşük montaj basınçlarında bazı sızıntı ve temas sorunları meydana gelebilirken, yüksek basınçlarda bipolar plakalar (BPP), gaz difüzyon katmanları (GDL), katalizör katmanları ve membranlar gibi yakıt hücresinin bileşenleri hasar görebildiği belirlenmiştir. Bu çalışmada, montaj basıncının tek kanallı PEM yakıt hücresi üzerindeki deformasyon etkisini tahmin etmek için bir sonlu eleman analizi (FEA) modeli geliştirilmiştir. Deforme yakıt hücresi tek kanallı model, proton değişim membranı (PEM) yakıt hücrelerini simüle etmek için geliştirilen üç boyutlu, hesaplama akışkanlar dinamiği (CFD) modeline aktarılmıştır. Bu model kullanılarak, montaj basıncının yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi hesaplanabilir hale gelmektedir. Montaj basıncı arttığında, gaz difüzyon tabakasının (GDL) temas direncinin, gözenekliliğinin ve kalınlığının azaldığı bulunmuştur. Çok fazla montaj basıncı gaz difüzyon tabakasının (GDL) yok olmasına neden olduğu; bu nedenle, optimum montaj basıncı yakıt



hücresinden en yüksek performansı elde etmek için önemli olduğu bulunmuştur. Bu çalışmanın sonuçlarını kullanarak, optimum yakıt hücresi tasarımı ve çalışma koşulu parametreleri buna göre tahmin edilebilir hale gelmektedir.

Y.-G. Yoon ve ark. (2004) tarafından yapılan bu çalışmada bir akış alanı plakasının nervür ve kanalın genişliğinin, bir polimer elektrolit membran yakıt hücresinin (PEMFC) performansı üzerindeki etkileri, akış alanı plakalarının nervür ve kanalının boyutlarını optimize etmek amacıyla incelenmiştir. Performanslar, dört farklı akış alanı plakası kullanılarak tek hücreler üzerinde ölçülmüştür. Akış alanı plakalarının nervür genişliği 0.5 ila 3 mm arasında değiştirilmiştir. Nervür genişliği ne kadar dar olursa, bir hücrenin performansı incelenen aralıkta iyileştiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, iyileşmenin büyüklüğü yüksek akımlarda daha büyük olduğu, bu da daha yüksek kanal alanı bölümünün bir hücrenin yüksek güçte çalışması için faydalı olduğunu göstermiştir. Sonuçlardan, daha iyi hücre performansı için gaz difüzyonunun elektrik iletiminden daha önemli bir faktör olduğu ileri sürülmüştür.

G.H. Güvenlioğlu ve H.G. Stenger tarafından yapılan çalışmada (2005) bir proton değişim membranı yakıt hücresinin ayrıntılı bir kararlı durum izotermal iki boyutlu modeli geliştirilmiştir. Akışkan gözenekli ortam, yük dengesi, elektrokimyasal kinetik ve zardaki titiz bir su dengesi ile birleştirilmiş bu çok bileşenli taşıma modelini çözmek için bir sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Tahmin edilen yakıt hücresi performans eğrileri, yayınlanan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum bulunmuştur. Membranın kompleks su dengesi araştırılmış ve zarın susuz kaldığı çalışma koşulları belirlenmiştir. Kanal genişliği ve bipolar plaka omuz boyutları, gözeneklilik ve giriş akımlarının bağlı neminin yakıt hücresi performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yüksek akım yoğunluklu operasyonlar için daha küçük genişlikli kanalların ve bipolar plaka omuzlarının gerekli olduğu bulunmuştur. Bipolar plaka omzunun altındaki elektrot alanı arttıkça, yakıt hücresi daha yüksek gözeneklilik elektrotlarından daha fazla yararlandığı gözlemlenmiştir. Anot gazı akımının bağlı neminin yakıt hücresi performansı için katot gazı bağlı neminden daha kritik olduğu bulunmuştur.

N. Limjeerajarus ve P. Charoen-amomkitt tarafından yapılan çalışmada  $5 \text{ cm}^2$  PEFC üzerindeki altı farklı akış alanı tasarımındaki dağılımlar üzerine sayısal bir araştırma, farklı akış alanı konfigürasyonlarının ve kanal sayısının etkisini incelemek için ANSYS FLUENT yazılımı aracılığıyla CFD teknikleri kullanılarak sistematik olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, küçük boyutlu bir PEFC için, daha az sayıda kanala sahip akış alanlarının hem daha iyi bir homojenlik hem de hücre performansı sağladığını ortaya koymulmuştur. Kanal sayısı, küçük boyutlu PEFC performansını akış alanı geometrik konfigürasyonlarından çok daha fazla etkilese de daha fazla araştırma, kanal sayısı arttıkça konfigürasyonların etkisinin daha fazla olacağını belirtmiştir. Ek olarak, aynı sayıda kanalla, seri akış alanlarındaki paralel geometrileri daha yüksek reaktan akış hızı sağladığı için hem homojenlik hem de su yönetimi yönlerinde çok kanallı serpantin akış alanlarından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

N. J. Cooper ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada en boy oranının kanal uzunluk / genişlik oranı olduğu, en-boy oranlı akış alanlarının azaltılmasında performans artışının ana nedenini belirlemişlerdir. Parazit pompa kayıplarını hesaba kattıktan sonra, çeşitli en boy oranları altında çalıştırılan, interdigitated bir akış alanına sahip deneysel bir test hücresi, azalan en boy oranıyla artan net güç yoğunluklarını belirlenmiştir. Yerinde nötron radyografisinde, yüksek en boy oranlı akış alanı tasarımlarında, düşük en boy oranlı tasarımlara göre daha fazla su olduğu bulunmuştur. Ayrıca, 1.5 / 2 stokiyometri koşullarında 2/4 stokiyometri koşullarından daha fazla su bulunmuş, ayrıca sıvı suyun performans değişikliklerinin olası bir nedeni olduğunu da gösterilmiştir. Çapraz akış bulunan azalan en boy oranının değişen dağılımından güç farkını belirlemek için kullanılan tek fazlı bir model, daha yüksek genel performans ile sonuçlanmıştır. Deney, artan en boy oranıyla güç yoğunluğunda önemli ölçüde daha büyük kayıplara sahip olduğu gözlemlenmiş, bu da sıvı suyun giderilmesinin çapraz akış dağılımından ziyade net güç yoğunluğundaki iyileşmeye önemli katkıda bulunduğunu gösterilmiştir. PEMFC'lerin tasarımcıları, interdigitated akış alanları için düşük en boy oranı tasarımı kullanmalı veya yüksek en boy oranının gerekli olduğu durumlar için bir su çıkarma mekanizması içermesi gerektiği belirtilmiştir.

S. Shimpalee ve J.W Van Zee (2007) tarafından yapılan çalışmada bir PEMFC'de reaktif tür konsantrasyonundaki dağılımlar, bir PEMFC alanı üzerinde yerel akım yoğunluğu, sıcaklık ve su dağılımlarına neden olduğu belirtilmiştir. Bunlar zarın taşması veya kurutulması gibi etkilere yol açabildiği ve yakıt hücresinin farklı bölgelerinde strese neden olabildiği bulunmuştur. Gazı daha eşit bir şekilde dağıtmak için kanal yolu uzunluğu, genişliği veya yüksekliği dahil olmak üzere akış alanı yapılandırmasının değiştirilmesi bu gerilimleri en aza indirmenin bir yöntemi olarak bilinmektedir. Bu çalışmada farklı kanal / nervür kesit alanlarına sahip serpantin akış alanlarının, hem otomotiv hem de sabit koşullar için performansı ve tür dağılımını nasıl etkilediğini sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca, akış yönünün performans ve dağılımına etkisi de rapor edilmiştir. Sonuç olarak sabit durum için, daha geniş nervür aralığına sahip daha dar kanalın, otomotiv koşulu uygulandığında daha yüksek performans ancak karşıt sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur.

L. Rostami ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada büküm boyutlarının bir PEM (polimer elektrolit membran) yakıt hücresi üzerindeki etkisini incelemek için üç boyutlu bir sayısal model önerilmiş ve uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bükülme boyutu 1 mm'den 1.2 mm'ye yükseldikçe, aşırı potansiyelin önemli ölçüde azaldığını değil, aynı zamanda sıcaklık gradyanının da hafifletildiği gözlemlenmiştir. Bu etkiler karşısında büyük ölçüde elektrolitlerin elektrot yüzeyi üzerinde daha eşit dağılımına bağlı olduğu ve bu da yakıt hücresinin güç yoğunluğunu 0.8 mm kare dirsek boyutuna sahip kanallara kıyasla yaklaşık %1,78 arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, 1.2 mm kare dirsek boyutuna sahip serpantin akış kanallarının, içteki ikincil akışların önlenmesinde başarılı bir şekilde hareket ettiği ve bu nedenle 0.8 mm bükülme boyutuna sahip serpantin akış kanallarına kıyasla basınç düşüşünün yaklaşık %90,6 azaldığı gösterilmiştir.

W. Yuan ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada sunulan model, akım toplayıcıları, akış kanalları, gaz difüzyon katmanları, anot ve katottaki katalizör katmanlarının yanı sıra membrandan oluşan tipik bir dokuz katmanlı FCM olarak belirlenmiştir. Ticari bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılım paketi Fluent, bu tahmini modeli SIMPLE algoritması ile çözmek için kullanılmış ve modelleme sonuçları  $I - V$  ve  $I - P$  eğrilerini içeren polarizasyon eğrileri aracılığıyla gösterilmiştir. Sonuçlar, çalışma

basıncının ve çalışma sıcaklığının artırılmasıyla hücre performansının arttırılabileceğini göstermektedir. Anot nemlendirmesi, hücre performansı üzerinde katot nemlendirmesinden daha önemli etkilere sahiptir ve en iyi performans, hidrojen tamamen nemlendirilirken orta hava bağıl neminde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, hava stokiyometrik oranındaki artışla hücre performansının iyileştiği kanıtlanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, mühendislik uygulamaları için çeşitli öneriler de sunulmaktadır.

M. M. Barzegari ve F.A. Khatir (2019) tarafından yapılan çalışmada amaç, endüstriyel bir gaz akış alanı şemasına göre modellenmiş 100 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip metalik bipolar plakalar (BPP'ler) üretmektir. Bu plakaları üretmek için maliyeti düşürmek ve üretim hızını arttırmak için bir damgalama işlemi uygulanmıştır. 0.1 mm kalınlığında 316L paslanmaz çelik saclar kullanılmıştır. Biçimlendirme kuvvetlerinin kanal doldurma derinliği, kanal genişliği, nervür genişliği, oluşturulan kanalların derinliğindeki homojenlik ve kanalların kalınlık dağılımı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Oluşan bipolar plakanın gerilim ve gerinim dağılımları sonlu elemanlar simülasyonu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, damgalama işleminin istenen boyutlar için tek aşamalı şekillendirme kalıbı ile mükemmel bir bipolar plaka üretme yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, damgalama kuvvetinin optimum seviyeye yükseltilmesi kanalların derinliği üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, damgalama kuvveti artışı kanalların ve nervürlerin genişliğinde bir artış ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir.

T. Wilberforce ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada yakıt hücresi verimliliği, elektrokimyasal kinetik, hücre çalışma sıcaklığı, kütle aktarımı, akış hızları ve hücre yığınındaki membran elektrot düzeneği (MEA) ve bipolar plaka (BP) gibi diğer fiziksel bileşenler gibi operasyonel parametreler de dahil olmak üzere birçok faktör tarafından belirlenmiştir. BP, yığının kütesinin neredeyse %70'ini ve yakıt pili pazarındaki hücre yığınının genel fiyatının % 30'unu oluşturmaktadır. İki kutuplu plaka geometrisi tasarımı reaktif gazların yakıt hücresine giriş ortamı olarak belirlenmiş ve ayrıca reaktif maddenin hücre yığınının aktif yüzeyine kolayca dağıtılması için bir platform görevi görmesi sağlanmıştır. Yığındaki önemli rolü ise PEM yakıt hücresi için su yönetimini, termal ve elektrik iletkenliğini, kütle taşınmasını ve akım yoğunluğu dağılımını belirlemektedir.

Yapılan çalışmada yakıt hücresinin maksimum işlevselliği (dikkate alınan her tasarımın avantajları ve dezavantajları) açısından mevcut bipolar plaka geometrisi tasarımının eleştirel bir değerlendirmesi amaçlanmaktadır. Çalışma, bir hücre yığınının işlevselliğini artırabilen etkili bir bipolar plaka geometrisi tasarımını tanımlayan bazı parametreleri ayrıntılı olarak tartışmaktadır. Ayrıca, çalışma, değişen koşullarda çalışan herhangi bir yakıt hücresi için uygun bir geometri tasarımı seçiminde yakıt hücresi araştırma topluluğuna rehberlik edecektir.

A.C.Türkmen ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada metanol akışına bağlı kanallardaki basınç düşüşü ile doğrudan metanol yakıt hücresinin (DMFC) anot tarafındaki akış kanallarının geometrisi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Akış kanalı olarak paralel tip kanallar kullanılmıştır. Yakıt hücresinin aktif alanı  $55 \text{ cm}^2$ 'dir. Sistem, aktif alana en uygun şekilde yerleştirilmiş, kanal genişlikleri ve kanalların mesafesi sabit tutulan kanallardan oluşmaktadır. Akış kanalı genişliği ve kanallar arasındaki mesafe için 1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm ölçüm kombinasyonları kullanılmıştır. Hazırlanan geometriler tarafından oluşturulan alanın aktif alana oranı (temas alanının yüzdesi) yeni bir parametre olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmanın ana motivasyonu, tasarlanan akış kanallarının geometrik ölçümlerinin, kanal içi basınç düşmesi üzerindeki etkisini istatistiksel yöntemle belirleyebilmektir. Akış kanalı genişlikleri ile kanallar ve basınç arasındaki mesafe arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark belirlenmiştir. Seçilen parametreler arasında, kanal genişliğinin basınç düşüşü üzerindeki etkisi en yüksek bulunmuş, ancak istatistiksel olarak orta derecede bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, kanallar arasındaki mesafe ile basınç düşüşü arasında anlamlı bir ilişki olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

X. Yan ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada yakıt hücrelerinin güç yoğunluğunun, su baskını ve oksijen açlığı olarak bilinen iki önemli sorunla sınırlı olduğu iyi bilinmektedir. Akış alanı yakıt hücrelerindeki kütle taşınması üzerinde kritik bir rol oynadığı için, bu sorunların ele alınması için gelişmiş su yönetimi ve arttırılmış oksijen taşınımı sağlayan bir akış alanı tasarımı arzu edilmektedir. Çalışmada üç boyutlu kanal geometrisine sahip iki tür akış alanı önerilmiş ve geliştirilmiştir. Bir akış alanı, oksijen kaynağını arttırmak için akış kanalı / difüzyon katmanı arayüzünden katalizör katmanına

lokal oksijen konveksiyon akısını indüklemek için dalgalı kanallara sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Diğer, oksijen konsantrasyonunun eşit olmayan dağılımını barındıran yukarı akış bölgesinden aşağı akış bölgesine hem düzlem içi hem de düzlem içi yönlerde artan akış hızıyla sonuçlanan gradyanlı kanal derinliğine sahip dalgalı kanallara sahip olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, 3D kanal geometrisinin, özellikle yüksek akım yoğunluklarında, sayısal bir simülasyonla aydınlatılan geliştirilmiş oksijen taşınmasına ve su giderilmesine atfedilebilecek hücre performansını iyileştirebildiğini açıkça göstermektedir.

L. Khazae ve A. Rava (2016) tarafından yapılan çalışmada ara bağlantı, dikdörtgen kanal gaz akış kanalları, gaz difüzyon elektrotları ve elektrolit katmanı dahil olmak üzere düzlemsel SOFC performansını değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemine dayanan üç boyutlu bir sayısal model geliştirilmiştir. Tek kanallı bir SOFC yakıt hücresi alınmış ve üzerinde elektrokimyasal analiz yapılmıştır. Sonuçlar, diğer araştırma grupları tarafından elde edilen yayınlanmış deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. SOFC yakıt hücresinde, akış kanalının geometrisi, reaktanların TPB bölgesine düzgün bir şekilde dağıtılmasında özel bir öneme sahip ve bu nedenle performans üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada yakıt hücresi kanalının geometrisi dikdörtgen şeklinden üçgen ve yamuk şekillerine değiştirilmiş, böylece her bir hücrenin aktif alanı ve diğer çalışma koşulları aynı olması sağlanmış ve yakıt hücresinin performansları gözlenmiştir. Dikdörtgen kanalın performansı daha iyi olurken, trapez kanalın performansı dikdörtgen kanal tasarımına göre daha zayıf olduğu sonucuna varılmıştır.

Q. Xie ve Y. Huang (2018) tarafından yapılan çalışmada kanal geometrisi, proton değişim membranı yakıt hücresinin (PEMFC) performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. PEMFC'nin kanal geometrisini optimize etmek için, tek bir düz kanallı bir PEMFC'nin 3-D, izotermal olmayan, kararlı durum modeli oluşturulmuştur.

Optimizasyon yöntemi olarak çok amaçlı genetik algoritma kullanılmıştır. İki çelişen hedef, PEMFC'nin güç tüketimi ( $E_{con}$ ) ve çıkış gücü ( $E_{cell}$ ) nesnel işlevler olarak seçilmiştir. Kanal uzunluğu ve genişliği, optimizasyon değişkenleri olarak seçilmiştir. Pareto optimal sınırlarından karar çözümlerini seçmek için TOPSIS, LINMAP ve fuzzy

Bellman-Zadeh gibi üç karar verme yöntemi kullanılmaktadır. Bu üç tür karar çözümü karşılaştırıldıktan sonra, nihai optimal çözüm tespit edilmiştir. Sonuçlar, optimal kanalın daha kısa bir uzunluğa ve daha geniş bir genişliğe sahip olduğunu ve optimal PEMFC'nin daha yüksek enerji verimliliğine ve daha dengeli reaktan dağılımlarına sahip olduğunu göstermektedir. Ek olarak, optimum PEMFC'nin yapısı katot taşkınlarına karşı koruma performansını arttırdığı belirtilmiştir.

S. Barati ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada bir proton değişim membranı yakıt hücresindeki kütle aktarımını analiz etmek için bir 2D matematiksel modelleme geliştirilmiştir. Pim kanatçıkları, gaz difüzyon katmanındaki (GDL) reaktan gaz dağılımını geliştirmek için akış kanalına yerleştirilmiştir. Yüzgeçlerin dikdörtgen ve üçgen şeklinin ve  $4^0$ ,  $6^0$  ve  $8^0$  açılarının reaktan gaz taşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, GDL üzerine artan reaktan yayılımı nedeniyle dikdörtgen kanatçıkların performansının üçgen kanatçıklardan daha iyi olduğu belirtilmiştir. Blokların uzunluğu ve genişliği ve hidrojen gazı hızı dahil üç bağımsız faktörün yanıt üzerindeki etkisi (hidrojen gazının GDL'ye difüzyonu ve anot kanalındaki basınç düşüşü) varyans analizi (ANOVA) kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar blok yüksekliğinin ve hidrojen gazı hızının yanıtları etkileyen en önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Ayrıca, anot kanalında minimum basınç düşüşünü ve maksimum akı manyetik  $H^2$ 'den GDL'ye maksimum akışa ulaşmak için optimal koşulları tahmin etmek için tepki yüzeyi metodolojisi (RSM) yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon işleminin sonucu, 4.22 m / s'lik bir gaz hızının ve yüksekliği ve genişliği 3 mm olan bloğun optimal koşullar olduğunu göstermektedir.

N.J. Cooper ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada akış alanı tasarımı, Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili (PEMFC) sistemlerinde daha yüksek enerji yoğunluğu ve artan kararlılık arayışında önemli bir araştırma konusu olmaya devam ettiği belirtilmiştir. Birçok PEMFC üreticisi, katalizör katmanı reaktan iletimini arttırmak ve aynı zamanda toplam yığın hacmini azaltmak için kanal özellik boyutlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu çalışmada deneysel olarak kanal / arazi genişliği ve kanal derinliği gibi kritik katot bipolar plaka kanal boyutlarının genişliğini (250 mikrometre - 1 mm) ve bunların çeşitli koşullarda hücre performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İki tasarımın nasıl

ölçeklendiğine ışık tutmak için, birbirine kenetlenmiş (konveksiyon baskın) ve paralel (difüzyon baskın) akış alanları incelenmiştir. Ayrıca, sonuçlar, optimum bir konfigürasyon bulmak için pompalama gücünün yanı sıra anahtar difüzyonu ve konvektif uzunluklara göre normalleştirilmiştir. Sonuçlar, net sistem güç yoğunluğunun 1.5 anot ve 2.0 katot stokiyometrisi için yaklaşık 0.4 mm olması için ideal bir hidrolik çap olduğunu göstermektedir. Daha yüksek stokiyometreler, daha yüksek hidrolik çaplarında maksimum net güç yoğunluklarına sahip olma eğilimindedir. İstatistiksel analiz hem ham güç hem de akım yoğunluğunu sınırlayan paralel akış alanları için en önemli parametrenin kanal / arazi genişliği olduğu bulunmuştur. Birbirine bağlı akış alanları için, ham güç ve akım yoğunluğunu sınırlamak için en önemli parametre stokiyometri olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, hücre tasarımcılarına paralel ve birbirine bağlı akış alanının tasarım parametrelerini optimize etmek için hızlı bir rehber olacağı belirtilmiştir.

W.-J. Yang ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada bir polimer elektrolit membran yakıt hücresinin (PEMFC) bipolar plaka kanalı geometrisini optimize etmek için genetik algoritmanın (GA) kullanımı sunulmaktadır. Önceki optimizasyon tekniklerinin aksine, Matlab ve Comsol Multiphysics yazılımı aracılığıyla otomatik bir program geliştirerek sınır ayarı, ağ oluşturma ve her hesap parametresi varyasyonunda sayısal hesaplama dahil olmak üzere zahmetli yakıt hücresi tasarım adımlarından kaçınılmıştır. Matlab ile GA, Comsol Multiphysics'ten elde edilen bir performans endeksi ile mevcut yakıt hücresi tasarımının optimumluğunu otomatik olarak kontrol edilmiştir. Küresel bir optimal değere ulaşılmazsa, yakıt hücresinin yeni geometri seti, daha iyi yakıt hücresi performansı için GA kurallarına göre oluşturulmuştur. Daha sonra yeni küme, güncellenmiş sınır koşulları, eleman ve ağ kuşakları ve sayısal analiz yoluyla hesaplanan yeni performans indeksini almak için Comsol Multiphysics ile hesaplanmıştır. Bu otomatik optimizasyon tekniği sadece çok sayıda hesaplama yapmakla kalmamış, aynı zamanda belirli bir yakıt hücresi geometrisinin küresel optimal sonucunu da elde edilmiştir. Bu nedenle hızlı ve verimli bir optimizasyon süreci sağlanmış ve en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada, iki kanal ve nervür geometrisi düzenlemesi incelenmiştir: biri simetrik anot ve katot kanal düzenlemesi olup, burada kanallar ve kaburgalar birbirine bakmaktadır. Diğeri asimetrik bir düzenlemeye sahip olmakla beraber, burada bir kanal bir kaburgaya bakar ve bunun tersi de geçerli olduğu belirtilmiştir. İlk olarak, iki boyutlu (2D) CFD



modeli, optimizasyon hesaplamasını hızlandırmak ve model doğruluğunu en iyi sonucu elde etmek için kullanılmıştır. Daha sonra, üç boyutlu CFD modeli kullanılmış ve 2D optimizasyon sonucunun validasyonunu desteklemek için aynı geometrilerle deneysel doğrulama yapılmıştır.

J.M. Jackson ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada reaktifleri düzlemsel yakıt hücrelerinde dağıtmak için kullanılan Z tipi gibi paralel kanal konfigürasyonları, diğer kanal tasarımlarına kıyasla daha düşük toplam basınç düşüşü sağladığı belirtilmiştir. Bununla birlikte, doğal karakteristikleri nedeniyle, paralel konfigürasyonlarda akış hatalı dağılımı yaygın olarak gözlenmiş ve reaktiflerin orta kanallarda aç kalmasına yol açtığı görülmüştür. Ek olarak, dallanma t şeklindeki kavşaklarındaki Reynolds sayısına bağlı küçük kayıplar, asimetrik akış homojenliği ve katot ile anot arasında reaktif dengesizliğine neden olabildiği belirtilmiştir. Burada, önceki yöntemlere göre daha iyi ölçeklenebilirliğe sahip olan yakıt hücrelerinin veya yakıt hücresi yığınlarının Z tipi paralel konfigürasyonlarındaki akış mal dağıtımı, asimetri ve parazit basıncını aynı anda azaltmak için evrensel ve basit bir optimizasyon yöntemi sunulmaktadır. Başlıklar arasında geometrik oranlar elde etmek için ayrı bir modelin yönetim denklemleri azaltılmıştır. Bu oranları karşılamak için artan başlık genişlikleri, hesaplama akışkan dinamiği (CFD) simülasyonları tarafından onaylandığı gibi paralel kanal geometrisini değiştirmeden akışın yanlış dağıtılmasını azaltmıştır. Ayrıca, başlıklar boyunca Reynolds sayısının azalması, küçük basınç düşüşlerini ve akış dağılımı asimetrisini azalttığı gözlenmiştir. Süreksiz tasarımın adaptasyonu da dahil olmak üzere optimize edilmiş geometrinin kapladığı alanı azaltmak için çeşitli yöntemler sunulmuştur.

A.E. Khabbazi ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada COMSOL Multiphysics 3.5 kullanılarak, mikrofluidik yakıt hücresinde ortaya çıkmasından bu yana farklı modifikasyonların etkisini belirlemek için farklı mikroakışkan yakıt hücrelerinin 3D sayısal modelleri geliştirilmiştir. Bu modifikasyonlar arasında kanal geometrisi en boy oranı ve elektrot konfigürasyonu, kanaldaki anolit ve katolit arasındaki üçüncü akış (yani, çok akışlı laminer akış) ve periyodik olarak yerleştirilmiş çoklu girişler bulunmaktadır. Kural ile tutarlı olmak için, cihazın çıkış gücü elektrot yüzey alanı tarafından normalleştirilmiş; bununla birlikte, güç yoğunluğu hesaplamaları aynı zamanda cihaz

hacmi tarafından normalleştirme yoluyla da gerçekleştirilmektedir. İkinci yöntemin daha gerçekçi olduğu ve mikro-akışkan yakıt hücresinin tasarlanmasındaki nihai hedefin kompakt fakat güçlü bir cihaz imal etmek olduğu için tasarım açısından daha fazla bilgi sağladığı gösterilmiştir. Son olarak, konik kanallı mikroakışkan yakıt hücresinin yeni bir tasarımı önerilmektedir ve polarizasyon eğrileri vasıtasıyla konik olmayan geometri ile karşılaştırılmaktadır. Bu polarizasyon eğrilerini elde etmek için COMSOL'da atılan adımlar açıkça ve ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Butler Volmer denklemi, elektrotlardaki elektrokimyasal reaksiyonları birleştirmek için uygulanmıştır. COMSOL'daki "İletken Ortam DC" modülü yakıt hücresindeki elektrik alanlarını modellemek için kullanılmıştır. Reaktan türlerinin konsantrasyon dağılımları "Sıkıştırılmaz Navier-Stokes" ve "Konveksiyon ve Difüzyon" modülleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemlerin birlikte çözülmesi, verilen hücre voltajı değerleri için akım yoğunluğunu tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Sonuçlarda, aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon aşırı potansiyellerinden kaynaklanan hücre voltaj kayıpları gösterilmektedir. Hücre voltajının sabit bir değeri (örneğin 0.45 V) için, periyodik olarak çoklu yerleştirilmiş girişlere sahip yakıt hücresinin en yüksek yakıt kullanımına (yani% 62.3) sahip olduğu gösterilmiştir; "Basit kare" geometrisi bu potansiyelde% 13,8 yakıt kullanımını gösterir. Bu nedenle, çok girişli tasarım özellikle yüksek akım gerektiren düşük voltajlı uygulamalar için uygun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada önerilen konik geometrinin sonuçları, kanalın daraltılmasının, genişletilmiş elektrotlara sahip kare kesitli geometriye kıyasla polarizasyon eğrisini arttırdığı gösterilmektedir. Esasen, "Genişletilmiş kare" geometrisinin yakıt kullanımı, kanalı inceltirerek % 15.4'ten % 57.6'ya yükseltilmiştir. Bunun nedeni, karıştırma bölgesi büyüme hızının konik geometride kısıtlanmış olması ve dolayısıyla kanalın üst ve alt duvarlarındaki elektrotların, geçit oluşmadan önce kanalın merkezine doğru daha fazla genişletilebilmesidir.

A. P. Manso ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada proton değişimi membran yakıt hücresi (PEMFC) performansı, sadece çalışma koşulları, hücrenin içindeki taşıma fenomenleri ve elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği dahil olmak üzere birçok faktöre değil, aynı zamanda fiziksel bileşenlerine de -membran elektrot montajı (MEA) ve bipolar plakalar (BP'ler)- bağlı olduğu belirtilmiştir. Farklı birim hücreler arasındaki akış dağılımındaki başarısızlık yakıt hücresi yığın performansını ciddi şekilde etkileyebildiği

belirtilmiştir. Bu nedenle, bu tür olası başarısızlıkların üstesinden gelmek için, son on yıldır daha verimli akış kanallarının tasarımı araştırma camiasında büyük ilgi görmüştür. Bu çalışmada amac, akış kanallarının farklı geometrik parametrelerinin bir PEMFC'nin genel performansı üzerindeki etkisi ile ilgili son yıllarda yapılan en önemli sonuçları gözden geçirmektir.

K.-S. Choi ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada serpantin akış alanının geometrik karakterizasyonu, basınç düşüşü, yoğunlaştırılmış suyun tahliyesi, hücre voltajının en üst düzeye çıkarılması ve akım yoğunluğunun tüm yüzey alanı üzerindeki homojenliği ile ilgili olarak PEMFC'nin performansını arttırmak için çözülmesi gereken kilit konulardan biri olduğu belirtilmiştir. Üç farklı kanal yüksekliği ve genişliği, genişliği 1mm ve 0.34mm yüksekliğinde olan serpantin kanalının taban akış alanı tasarımı her biri sıcaklık, basınç, su içeriği ve yerel akım yoğunluğunun dağılımı hakkında ayrıntılı bir sayısal çalışma ile karşılaştırılmıştır. Kanal yüksekliği taban tasarımından daha fazla arttıkça, toplam basınç düşüşünün azaldığı ve azalmış BOP yüküne ve hem anot hem de katot çıkışında sıvı su birikmesine neden olduğu bulunmuştur. Kanal yüksekliği arttıkça çıkışta anot sıvı suyunun arka difüzyonun neden olduğu birikimi hızlandığı belirlenmiştir. Kanal genişliği taban tasarımından daha fazla genişledikçe, basınç düşüşü azalmış ve sıvı suyun tahliye oranı daha hızlı olduğu belirlenmiştir. Kanal genişliği artışının su uzaklaştırma üzerindeki etkisi kanal yüksekliği artışından daha fazla olduğu gözlenmiştir. MEA'nın dehidrasyonunu ve sıcaklığını ve böylece PEMFC'nin hücre performansını ve ömrünü etkileyebildiği belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, alt kanalları ve by-pass'ları olan verimli bir serpantin akış alanı kanalı geliştirilmesinde uygulanması beklenilmektedir.

S. Lee ve ark. (2008) tarafından yapılan çalışmada polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili (PEMFC) sistemi birçok parçadan oluştuğu ve bipolar plaka aralarındaki anahtar bileşenlerden biri olduğu belirtilmiştir. İki kutuplu plakadaki kanallar, katot tarafında hava ve anot tarafında hidrojenin dağıtıldığı, bu da elektrik kimyasal reaksiyonunun elektrik üretmesi için gerekli olduğu belirtilmiştir. Bipolar plakalar ayrıca soğutma suyunun hücrenin sıcaklığını kontrol etmesi için bir yol olarak da kullanılabilir olduğu belirtilmiştir. Yakıt pili sisteminin performansını etkileyen birkaç tasarım parametresinin

olduğu ve diğerleri sabitken geometrik parametrelerin etkileri dikkate alındığı belirtilmiştir. Ayrıca, bu düz tasarım parametrelerinin basit düz kanal yapılandırmasıyla birim hücrenin performansını nasıl etkilediğini tartişılmıştır. Parametrik alışma ticari Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar tasarımcılara en iyi performansı elde etmek için geometrik tasarım parametreleri arasındaki kombinasyonun en uygun olacağı hakkında fikir vermesi planlanmıştır.

D. Cui ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada anot destekli túbüler katı oksit yakıt hücresi (AST-SOFC) için yakıt kanalı, anot, katot ve elektrolit içeren iki boyutlu bir model, kütle ve yük aktarımı göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Model yaklaşımı kullanılarak, AST-SOFC'nin farklı geometrileri önerilmiş ve simüle edilmiş, tür taşıma fenomenleri ve hücre içindeki akım dağılımı ayrıntılı olarak incelenmiş ve tartişılmıştır. Sonuçlar, mevcut toplayıcıların etkilerinin, daha küçük bir akım toplayıcısına sahip olan daha büyük bir akım toplayıcısına sahip olan AST-SOFC için hücre performansları için daha dikkat çekici olduğu gösterilmiştir. Daha ince anotlu hücrenin, yüksek performansa sahip olması için daha büyük anot akımı toplama alanına ihtiyaı olduğu belirtilmiştir. Hücre daha büyük çapa sahip olsa da, akım daha geniş bir yolun anottan katoda akmasını talep edildiği, böylece daha yüksek performans elde etmek için daha kalın anot desteği talep edildiği belirtilmiştir. Bu hesaplamalar AST-SOFC'yi tasarlamak ve optimize etmek için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

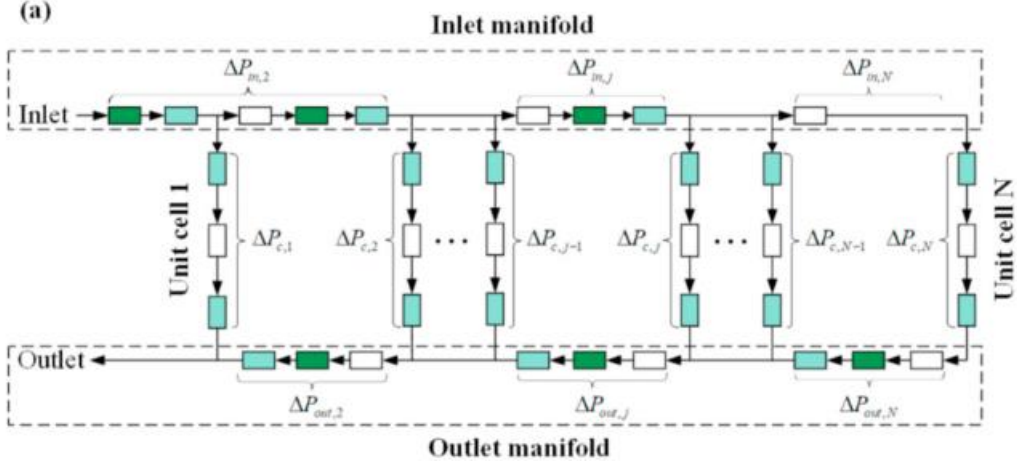
I. Khazae ve M. Ghazikhani (2010) tarafından yapılan çalışmada proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresinin farklı bir geometrisi için eksiksiz bir üç boyutlu ve tek fazlı CFD modeli, bipolar plaka ile gaz difüzyon tabakası arasındaki farklı bağlantıların performanslar, akım yoğunluğu ve gaz konsantrasyonu üzerindeki etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Önerilen model, PEM yakıt hücresinin tüm kısımlarını, akış kanallarını, gaz difüzyon elektrotlarını, katalizör katmanlarını ve membranı içeren bir tam hücre modeli olduğu belirtilmiştir. Birleştirilmiş taşıma ve elektrokimyasal kinetik denklemler tek bir alanda çözölmüş; bu nedenle hücre bileşenleri arasındaki i sınırlarda arayüzey sınır koşulu aranmamıştır. Bu hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu, deneysel olarak araştırılmayan bir PEMFC'de gerçekleşen üç boyutlu kütle, momentum ve tür taşıma olaylarının yanı sıra elektron ve proton transfer sürecini simüle etmek için kullanılan

doğrudan problem çözücü olarak kullanılmıştır. Bu modeli kullanarak tahmin edilen polarizasyon eğrilerinin deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sonuçlar GDL ve bipolar plaka arasındaki bağlantı sayısını arttırarak yakıt hücresinin performansının arttığı belirtilmiştir.

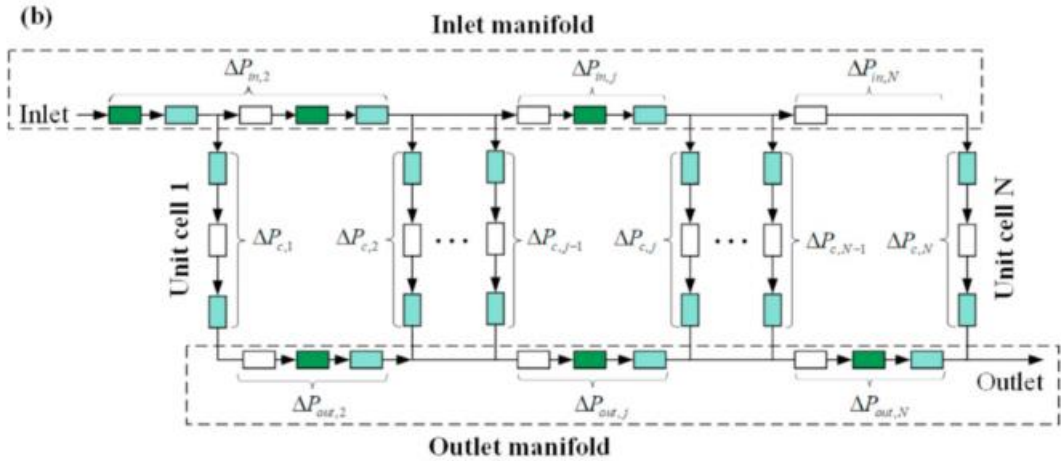
A. Amirfazli ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada manifold ve soğutma akış alanı kanal boyutlarının yığın sıcaklığı tekdüzeliği üzerindeki etkisini araştırmak için yığının deneysel olarak doğrulanmış analitik sayısal modeli kullanılmıştır. Ayrıca, yığının toplam aktif alanını arttırmanın yanı sıra hücreler arasında soğutucu akış hızının daha düzgün bir dağılımını sağlamak amacıyla soğutma manifoldu için bir konsept tasarımı tanıtılmıştır. Çeşitli manifold kesit alanı ve soğutma akış alanı kanal boyutlarına sahip U ve Z yığın konfigürasyonları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, akış alanı kanal boyutunun azaltılmasının yığın sıcaklık homojenliğini artırdığını, buna karşın manifold kesit alanını arttırmanın esasen yığın sıcaklığı homojenliğini arttırmadığını gözlemlenmiştir. Aynı yığın boyutları ve sıcaklık homojenliği ile daha aktif alan elde edilebildiğinden, çalışmada kullanılan tasarım, yakıt pilinin sınırlayıcı alan uygulaması için uygun bir tasarım olabileceği belirlenmiştir. Bununla birlikte, akış yönü (yığın konfigürasyonu), manifold kesit alanının artımlı yönünün seçiminde dikkate alınması gereken kilit konu olacağı belirtilmiştir.

F. Huang ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada akış ağı yöntemini kullanarak akış dağılımını hesaplamak için yerel basınç kayıplarını, basınç geri kazanım olgusunu, elektrokimyasal reaksiyonları ve sıvı suyu aynı anda dikkate alan bir analitik model sunulmuştur. Hem U-şekli hem de Z-şekilli akış konfigürasyon yığını incelenmiştir. Analitik model, modelleme sonuçlarının doğruluğunu sağlamak için üç farklı değişkenle (boyutsuz kütle akış hızları, yığın basınç düşüşü ve manifolddaki basınç dağılımı) eşzamanlı ve nicel olarak doğrulanmıştır. Birim hücrede reaktan tüketiminin ve iki fazlı akışın akış dağılımı üzerindeki etkileri nicel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, hem 200 hücreli U şekli hem de Z şekli yığını için gaz tüketimi ve iki fazlı akış göz ardı edildiğinde akışın orantısız dağılımının olduğundan fazla tahmin edildiğini göstermiştir. Giriş ve çıkış manifoldunun basınç düşüşünü dengelemek, U-şekilli yığın için akış dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Son olarak, çok hücreli PEMFC yığınları için

manifolddaki akış dağılımını iyileştirmek için ilk olarak farklılaştırılmış montaj stratejisi önerilmiştir. Orijinal tasarıma kıyasla, 200 hücreli U-şekilli ve Z-şekilli yığın için iyileştirme oranları sırasıyla %85 ve %25'tir belirtilmiştir.



Şekil 2.1. U şekilli yığın (F. Huang,2020)

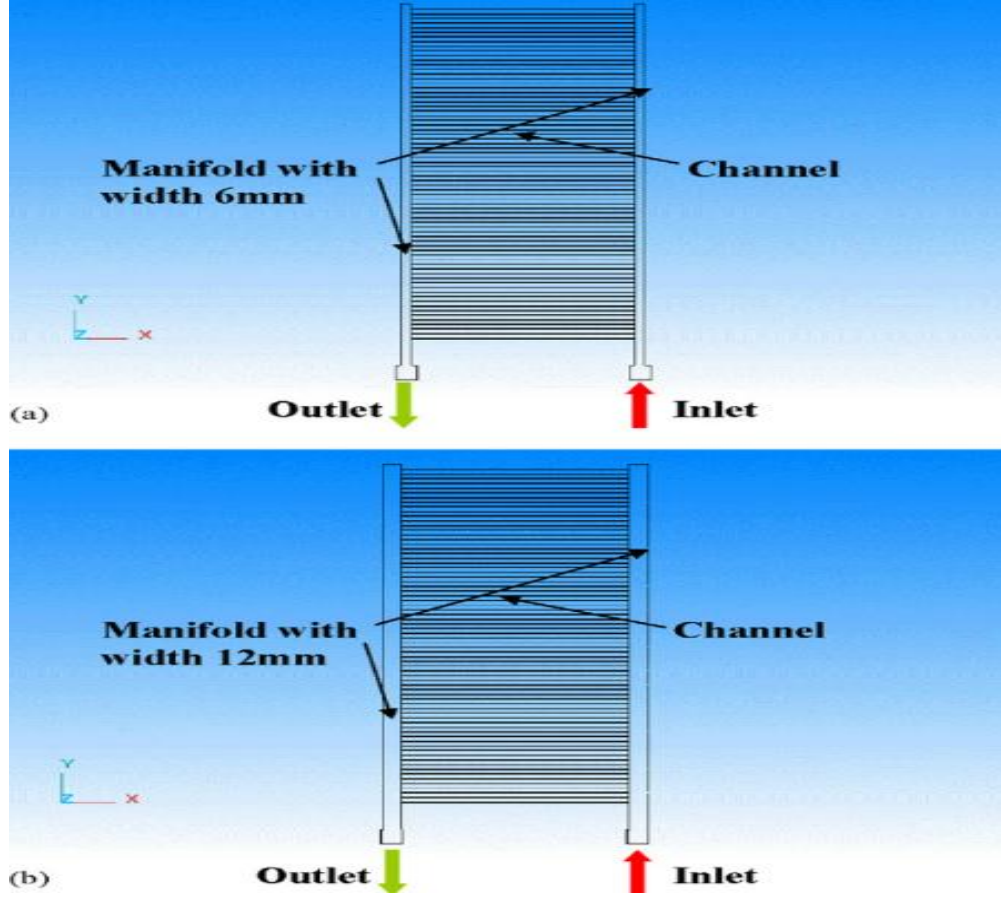


Şekil 2.2. Z şekilli yığın (F. Huang,2020)

A. R. Sangtabi ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, bir PEMFC yığınının manifoldu akış dağılımına su buharı yoğunluğunda etkisi incelenmiştir. Yoğuşma nedeniyle, karışımdaki su buharı konsantrasyonu manifold duvarlarının yakınında azaldığı böylece başlangıç ve son hücreler orta hücrelere göre daha fazla oksijen aldığı görülmüştür. Yoğunlaşan su, manifold duvarlarında küçük damlacıklar oluşturmuş, küçük damlacıklar birleşerek daha büyük damlacıklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. 26 hücre yığınının son hücresine inen büyük damlacıklar, dalgalı yapı oluşumuna yol açtığı

belirlenmiştir. Bu işlem, son hücre boyunca akışın tıkanmasına ve akışın düzensizliğinde önemli bir artışa neden olduğu görülmüştür. Tekdüze olmama endeksi, su giderme işleminde 0,046'dan 0,94'e önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Akış dağılım parametreleri arasındaki bir karşılaştırma, ortalama akış hızından sapmanın ortalama karekök değerinin, kötü dağılımın ciddiyetini belirlemek için tek biçimli olmama indeksinden daha iyi bir kriter olduğunu göstermiştir.

C.H Chen ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, bir yakıt hücresi yığınının manifoldundaki basınç değişimi ve akış dağılımı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımıyla simüle edilmiştir. Kanal akış direncinin neden olduğu basınç düşüşünü değerlendirmek için gözenekli ortamla doldurulmuş 72 hücreden oluşan iki boyutlu yığın modeli oluşturulmuştur. Bu modeli basitleştirmek için, elektrokimyasal reaksiyonlar, ısı ve kütle taşınımı olayları göz ardı edilmiş ve yığınlardaki akış dağılımını araştırmak için hava çalışma akışkanı olarak işlenmiştir. Gözenekli ortamın geçirgenliği, manifold genişliği ve hava besleme hızı gibi tasarım parametreleri, manifolddaki akış dağılımının tekdüzeliğini tahmin etmek için değiştirilmiştir. Akış dağılımının fiziksel mekanizmasını açıklamak için bir momentum dengesi teorisi ve bir basınç düşüşü modeli sunulmuştur. Modelleme sonuçları hem kanal direncinin hem de manifold genişliğinin akış dağılımının tekdüzeliğini artırabileceğini göstermektedir. Ek olarak, daha düşük bir hava besleme hızı, akış dağılımının tek biçimliliğini de artırabildiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, aşırı basınç düşüşü, bir yakıt hücresi yığınının gerçekçi uygulamaları için faydalı olmadığı ve bu nedenle, geliştirilmiş manifold genişliği, akış dağılımı için daha iyi bir çözüm olduğu belirtilmiştir.



**Şekil 2.3.** Farklı manifold genişliğine sahip PEMFC şematik gösterimi (C.H Chen,2007)

L. Chen ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada, gaz difüzyon tabakasında oluşan proton değişim membranlı yakıt hücresinin (PEMFC) katot tarafı için hibrit yapısal model ile üç boyutlu kararsız iki fazlı bir model, sıvı su davranışlarını farklı çalışma ve geometrik koşullar altında ve nicel olarak araştırmak için geliştirilmiştir. Sıvı su dağılımının reaktan taşınımı ve akım yoğunluk dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, sıvı su taşıma süreçleri ve dağılımlarının giriş hava hızı, duvar ıslanabilirliği ve su giriş pozisyonundan önemli ölçüde etkilendiğini ve bunun da yerel reaktant taşınımı üzerinde önemli bir rol oynadığını ve akım yoğunluğunda önemli bozulmalara neden olduğunu göstermiştir. Gaz kanalının üst duvarına yayılan sıvı su filmi, gaz kanalındaki mevcut yoğunluk büyüklüğü, akım yoğunluk dağılımının tekdüzeliği ve gaz kanalındaki basınç düşüşüne ilişkin genel değerlendirmelere dayalı olarak gaz kanalında en çok istenen model olarak tanımlanmıştır. İstenen akış modelinin oluşumunu teşvik etmek için gaz difüzyon tabakası yapısında değişiklik önerilmiştir.



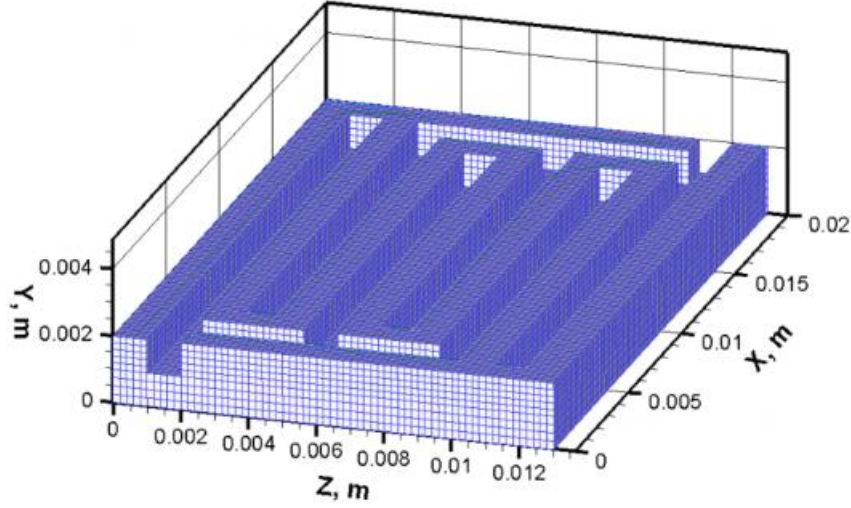
B. Mondal, D. Chatterjee (2015) tarafından yapılan çalışmada, serpantin akış kanalı, kabul edilebilir parazitik yükü olan bir hücrede üretilen suyun etkin ve verimli bir şekilde uzaklaştırılmasını sağladığından, polimer elektrolit membranlı yakıt pili (PEMFC) için en yaygın ve pratik kanal yerleşimlerinden biri olarak kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. PEMFC'de düşük çalışma sıcaklıklarında su buharı yoğunlaşması kolayca başladığı ve sıvı su damlacıklarını akış kanalları içinde biriktiği, böylece kimyasal reaksiyonları etkiler ve yakıt hücresi performansını düşürdüğü ayrıca belirtilmiştir. Yapılan çalışmada geniş bir yüzey özellikleri, giriş hava hızları, damlacık konumları (merkez veya merkez dışı, alt veya üst) için serpantin gaz akış kanalındaki su damlacığı hareketliliğini anlamak için kapsamlı bir üç boyutlu sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Sıvı-gaz arayüzü, sıvı hacmi (VOF) yöntemi ile izlenmiştir. Damlacık taşınımının, yüzey ıslanabilirlik özelliklerinden, giriş hızlarından, ortaya çıkan damlacıkların sayısından ve ilk damlacık konumlarından büyük ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Gaz akış kanallarının tasarımında süper hidrofobik yüzey özelliği her zaman tercih edilmemiştir. Giriş hızı koşullarına, damlacık konumlarına, damlacık sayısına ve yüzey özelliklerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

D. Jiao ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada proton değişim membranlı yakıt pilinin (PEMFC) gaz difüzyon tabakalarında (GDL) buhar/sıvı formunda su taşınması sayısal olarak incelenmiştir. 3B yapılandırılmış gaz difüzyon tabakaları yeniden yapılandırmak için stokastik bir yöntem kullanılmıştır. Ardından buhar yoğunlaşma sürecini simüle etmek için OpenFOAM platformunda onaylanmış bir faz değişim çözücüsü geliştirilmiştir. Gaz difüzyon tabakaları gözeneklilik dağılımını, sıkıştırılmış deformasyonu, kütle akış hızını, yerel sıcaklığı ve buhar yoğunlaşması ve taşıma dinamikleri üzerindeki temas açısı etkilerini analiz etmek için kapsamlı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Buhar/sıvı-su taşıma davranışlarını karşılaştırmak için gradyan gözenekli iki gaz difüzyon tabakaları ve biri TGP-H-060 tipinde yeniden yapılandırılmıştır. Yoğuşma suyunun mekansal dağılımının sıvı su taşıma modellerinden nispeten farklı olduğu bulunmuştur. Sıvı formda su taşınmasının gaz difüzyon tabakaları tasarımına çok daha duyarlı olduğunu, buhar formunda daha uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. Gaz difüzyon tabakaları sıkıştırması nedeniyle, özellikle gaz difüzyon tabakalarının orta katmanlarında buhar/sıvı su taşınması engellenmiş ve buhar

aktarımı sırasında büyük hız ayrımları tespit edilmiştir. Parametrik analizin sonuçları, buhar formunda su taşınmasının su taşkını önlemede daha fazla seçenek sağladığını göstermiştir. Bu çalışma, gaz difüzyon tabakaları tasarımı ve optimizasyonuna daha fazla rehberlik edebilecek gaz difüzyon tabakalarındaki buhar yoğunlaşma süreci ve su taşıma dinamikleri hakkındaki anlayışımızı derinleştirmek için önemli olduğu sunulmuştur.

A. D. Le (2010) tarafından yapılan çalışmada sıvı su taşınımını araştırmak için faz değişimi ve VOF yöntemini birleştirerek, sıvı akışını, ısı ve kütle aktarımını, türlerin taşınmasını, elektrokimyasal reaksiyonu ve akım yoğunluğu dağılımının yanı sıra bir PEMFC'nin gerçek zamanlı çalışmasını sayısal olarak görselleştirmek, simüle etmek ve incelemek için genel, üç boyutlu, kararsız, çok fazlı bir sayısal model geliştirilmiştir. Tek yakıt hücresi ve yakıt hücresi yığını modellenmesi, PEMFC'de sıvı taşınmasının sayısal ve deneysel görselleştirilmesi ve model doğrulama ile ilgili çeşitli konular bu çalışmada incelenmiştir. İlk olarak, proton değişim membranlı yakıt hücresinin (PEMFC) genel bir modelinin geliştirilmesi sunulmuştur. VOF yöntemi ve yakıt hücresi matematiksel modelinin birleştirilmesi, sıvı suyun oluşumunu ve hareketini sıvı hacmi cinsinden gerçekleştirerek PEMFC'lerde sıvı su taşınımını araştırılmıştır. İkinci olarak, birbirine bağlı kanallı tek bir PEMFC, serpantin kanallı tek bir PEMFC ve bir PEMFC yığını olmak üzere üç özel durumda somutlaştırılan genel modelin uygulaması tartışılmıştır. Birbirine bağlı PEMFC durumunda, sayısal sonuçlar, gıdanın yakıt hücresi performansı üzerindeki çeşitli etkilerini göstermektedir. Sıvı suyun varlığı, yakıt hücresinde gaz taşınmasını bloke ederek, yerel akım yoğunluğunun bozulmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bunlar, özellikle su taşınması önemli olduğunda hücre performansını ciddi şekilde etkileyen faktörler olduğu belirtilmiştir. Ek olarak, serpantin PEMFC durumunda, bu sayısal model yaklaşımının olasılığı, kanallardaki ve gözenekli ortamdaki sıvı suyun oluşumunun, hareketinin ve uzaklaştırılmasının gerçek zamanlı bir işlemde sayısal olarak görselleştirilebileceğini gösterilmiştir. Yakıt hücresi yığını durumunda, taşınma olgusunu simüle etmek için yığındaki farklı tek hücrelere sıvı su damlacıkları ekleyerek, sayısal sonuçlar, sıvı damlacıklarının yığındaki her bir hücrenin fiziksel ve taşıma özelliklerini nasıl etkilediğini ve her bir hücrenin performansının yığın performansını nasıl etkilediğini açıklanmıştır. Son olarak, bir PEMFC kanalında sıvı damlacık hareketi üzerinde deneysel bir görselleştirme açıklanmıştır. Şeffaf bir serpantin kanallı yakıt hücresine doğrudan

optik görselleştirme yöntemi kullanılarak, deneysel veriler nicel ve nitel olarak VOF modelinden elde edilen sayısal sonuçlarla iyi bir uyum göstermektedir.



**Şekil 2.4.** Birbirine bağlı PEMFC'nin geometrik gösterimi (A. D. Le,2010)

R. Banerjee (2014) tarafından yapılan çalışmada yakıt hücresinin taşmasına neden olan çalışma koşullarını belirlemek ve teşhis etmek için yerinde yakıt hücresi testleri yapılmıştır. Reaktan kanallarında bulunan sıvı su ile hücre performansı arasında bir ilişki tespit edilmiştir. Hücrenin taşmasını veya zarar kurumasını tahmin etmek için reaktan kanallarındaki basınç düşüşü çarpanını kullanan yeni bir teşhis tekniği kurulmuştur. Reaktan kanallarında bulunan sıvı suyu ölçmek için bir ex-situ çalışması yapılmıştır. Yeni bir parametre, Alan Kapsama Oranı (ACR), sıvı su mevcudiyeti ile reaktant taşınması için bloke edilen reaktan kanalının arayüzey alanını belirlemek için tanımlanmıştır. Değişen sıcaklığın ve giriş bağıl neminin ACR üzerindeki etkisini incelemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. ACR, gaz akış hızları arttıkça akım yoğunluğundaki artışla azalır ve suyu daha verimli bir şekilde uzaklaştırıldığı görülmüştür. Sıcaklıktaki artışla ACR hızla azaldığı görülmüştür. Gazların giriş bağıl nemi, kanaldaki gazların doygunluğunu değiştirir, ancak ACR üzerinde önemli bir etki göstermediği belirtilmiştir. Hızla artan sıcaklığın zarar kurumasına neden olduğu ve hücrenin 55°C'nin altına hızla soğutulmasının hücre taşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. PEM yakıt pilinin çalışma yükünün değiştirilmesinde, bu incelemenin bir parçası olarak ilk kez reaktant kanalındaki basınç düşüşündeki aşma tespit edilmiştir.

Son yıllarda su yönetimini iyileştirmek için önerilen bir yakıt pili modeli ise yakıt kanalları üzerinde ara rezervuarların tasarlanmasıdır (Çelik, E. 2020, Çelik ve Karagöz, 2023). Bu tasarım ile iki amaç hedeflenmiştir. Bunlardan biri yakıt pilinde oluşan aşırı sıvı suyun biriktirilmesi ve vakumlanarak tahliyesinin sağlanması, diğeri ise ara rezervuarlardan da gerektiğinde besleme yapılarak performansın artırılmasıdır (Çelik ve Karagöz, 2021). Bu çalışmanın amacı ara rezervuarlardan beslemenin yakıt pili performansına etkilerinin sayısal incelenmesidir. Bu amaçla klasik dört kanallı serpantin akış modeline iki ara rezervuar eklenmiştir. Ara rezervuar bölgeleri giriş ve çıkış manifolduna eşit uzaklıkta bulunmaktadır. Sayısal çözümün doğrulaması için literatürdeki deneysel veriler (Çelik, E. 2020) kullanılmıştır. Ara rezervuarlı model sonuçları klasik serpantinli modelle karşılaştırılmıştır. Ayrıca ara rezervuar bölgelerinden debi takviyesi yapılarak yakıt piline ara besleme de yapılmış ve pil performansına etkileri de incelenerek en uygun besleme oranları ve besleme noktası belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2.2. PEM Yakıt Pilinde Temel Denklemler

### 2.2.1. Tür Miktarlarının Hesaplanması

Pem yakıt pilinde katot tarafında gerçekleşen reaksiyona ait denklem (2.1)'de belirtilmiştir.



Denkleme göre 1 mol oksijen ile 4 elektron bulunmaktadır. Buna göre yük;

$$Yük = 4xFxO_2 \quad (2.2)$$

Zamana bölünürse

$$O_2 = \frac{I}{4xF} mol/s \quad (2.3)$$

n tane hücre için denklem (2.4) şeklinde yazılır.

$$O_2 = \frac{Ixn}{4xF} mol/s \quad (2.4)$$

Hücre voltajına  $V_h$  olarak tanımlanırsa güç denklemi (2.5) şeklinde yazılır.

$$P_t = V_h \times I \times n \quad (2.5)$$

Denklemden akımı çekersek, akım (2.6) şeklinde ifade edilir.

$$I = \frac{P_t}{V_h \times n} \quad (2.6)$$

n hücre için oksijen miktarını denklem (2.7) şeklinde yazılır.

$$O_2 = \frac{P_t}{4 \times V_h \times F} \text{ mol/s} \quad (2.7)$$

Denklem (2.7) kg/s için düzenlenirse n hücre için kullanılan oksijen miktarının kg/s cinsinden karşılığı elde edilmiş olur.

$$O_2 = \frac{32 \times 10^{-3} \times P_t \text{ kg}}{4 \times V_h \times F \text{ s}} = 8,29 \times 10^{-8} \times \frac{P_t}{V_h} \text{ kg/s} \quad (2.8)$$

Kullanılan oksijen yerine hava ise molekül ağırlığı ve oksijen oranı değiştirilip denklem yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Molekül ağırlığı 28,97 kg/mol ve oksijen oranı %21 olarak değiştirilirse denklem (2.9) halini alır.

$$Hava = \frac{28,97 \times 10^{-3} \times P_t}{0,21 \times 4 \times V_h \times F} = 3,57 \times 10^{-7} \times \frac{P_t}{V_h} \text{ kg/s} \quad (2.9)$$

Hidrojen kullanımı da aynı yöntemle hesaplanmaktadır.  $O_2$  için 4 elektron kullanılırken  $H_2$  için iki elektron kullanılmaktadır.

$$H_2 = \frac{I \times n}{2 \times F} \text{ mol/s} \quad (2.10)$$

Buradan denklem (2.11) halini alır.

$$H_2 = \frac{P_t}{2xV_hxF} \text{ mol/s} \quad (2.11)$$

Hidrojen 2,02 g/mol alınırsa (2.12) denklemi elde edilir.

$$H_2 = \frac{2,02x10^{-3}xP_t}{2xV_hxF} = 1,05x10^{-8}x\frac{P_t}{V_h} \text{ kg/s} \quad (2.12)$$

Üretilen su miktarında ise iki elektron 1 mol su üretmektedir. n hücre için oksijen miktarını hesabındaki formülü kullanırsak (2.13) denklemi elde edilir.

$$H_2O_{\text{üretilen}} = \frac{P_t}{2xV_hxF} \text{ mol/s} \quad (2.13)$$

Molekül ağırlığı  $18,02x10^{-3}$  kg/mol alını düzenlenirse (2.14) şeklinde kg/s olarak bulunur.

$$H_2O_{\text{üretilen}} = 9,34x10^{-8}\frac{P_t}{V_h} \text{ kg/s} \quad (2.14)$$

### 2.2.2. Isı Miktarı Hesaplanması

n hücreye sahip yakıt pilinin ürettiği ısı (2.15) ile hesaplanır.

$$ISt_{\text{üretilen}} = nIx(1,25 - V_h)xW \quad (2.15)$$

Elektriksel güç formunda ise denklem (2.16) şeklindedir.

$$ISt_{\text{üretilen}} = P_t x \left( \frac{1,25}{V_h} - 1 \right) W \quad (2.16)$$

Güç denklemi (2.17) denklemi şeklindedir.

$$P_t = nIxV_h \quad (2.17)$$

Elektriksel iş denklemi (2.18) denklemi şeklindedir.

$$W_{elektrik} = nxFxE \quad (2.18)$$

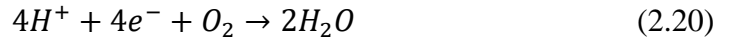
### 2.2.3. Elektrokimyasal Denklemler

PEM yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonlar anot ve katot elektrodu için ayrı ayrı belirtilmiştir.

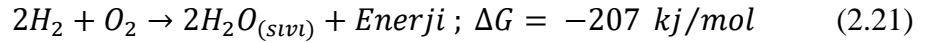
Anot elektrodunda gerçekleşen reaksiyon



Katot elektrodunda gerçekleşen reaksiyon



Yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyon



$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.22)$$

T reaksiyon sıcaklığı,  $\Delta H$  entalpi değişimi,  $\Delta G$  Gibbs enerji değişimi,  $\Delta S$  entropi değişimidir. Yakıt pilinde toplam enerji Gibbs enerji değişimi ile toplam entropi değişimi toplamından oluşmaktadır. Gibbs enerji değişimi elektron geçişi ile yapılan işi ifade ettiğinden denklem şu şekilde yazılabilir.

$$W_e = \Delta G = -nxFxE \quad (2.23)$$

$\Delta G^\circ$  25°C ve 1 atm basınçtaki Gibbs enerji değişimini ifade etmektedir ve (2.24) şeklinde yazılabilir.

$$\Delta G^\circ = -nxFxE^\circ \quad (2.24)$$

Yakıt pili için reaksiyon denklem (2.25)'te belirtilmiştir.



Bu denkleme ait Gibbs enerji değişimi (2.26) halini alır.

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \left( \frac{P_{H_2} x P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.26)$$

Ortaya çıkan bu enerjinin tamamı kayıplar sebebiyle elektrik enerjisine dönüştürülememektedir. Yakıt pilinde oluşan kayıplar aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar ve konsantrasyon kayıplarıdır.

### 2.3. Yakıt Pilinde Oluşan Kayıplar

Pem yakıt pilinde oluşan kayıplar nedeniyle pil performansı olumsuz etkilenip güç düşüőe sebebiyet vermektedir. Bu kayıplar başlıklar altında belirtilmiştir.

#### 2.3.1. Aktivasyon Kayıpları

Yakıt pilinde elektronların hareketi, kimyasal bağların kopması ya da yeni bağ oluşması ile anot ve katotta ortaya çıkar. Anotta hidrojen yükseltgenmesi hızlı iken katotta oksijen indirgenmesi yavaştır. Aktivasyon kayıpları sıcaklığa ve oksijenin kısmi basıncına bağlı olarak değişmektedir. Aktivasyon kayıplarından dolayı gerçekleşen gerilimdeki düşüşte katotta meydana gelen reaksiyon koşulları baskındır.

#### 2.3.2. Ohmik Kayıplar

Elektronların akım toplayıcı plakalara transferi sırasında ortaya çıkmaktadır. Membranın ve elektronların proton transferine karşı koymalarından da kaynaklanır. Ohmik kayıplardan meydana gelen gerilimdeki düşüő akım yoğunluğu ile ilgilidir. Ohmik direnç membranın nemliliğine ve yakıt pili sıcaklığına göre değişmektedir. İyonik direnç membran iletkenliğinin fonksiyonu olarak değişmektedir. Sıcaklık artışı membran iletkenliğini artırır, membran iletkenliği artışı iyonik direnci düşürür dolayısıyla ohmik direnç düşer ve gerilim artar. Yani sıcaklık arttıkça ohmik direnç azalır ve yakıt pilinin performansı artar.



### **2.3.3. Konsantrasyon Kayıpları**

Reaksiyona giren türlerin reaksiyonda tükenmeleri ve buna bağlı olarak ortaya çıkan kayıplardır. Elektrottaki gözeneklerden türlerin yavaş yayılması, anot veya katottaki türlerin elektrotta reaksiyona girmeden geçmesi bu kayıpların sebepleri arasındadır. Yüksek akım yoğunluğu değerlerinde meydana gelen gerilim kaybı konsantrasyon kayıpları sonucu meydana gelmektedir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. PEM Yakıt Pili Matematiksel Model

Yakıt pili hücresi yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren cihazdır. Çözüm sırasında tüm yakıt pili bileşenleri hesaplama alanına dahil edilmektedir. Hidrojen anot tarafından yakıt hücresine akmaktadır. Akış gaz difüzyon tabakası boyunca ayılır ve katalizör tabakasına ulaşır. Burada hidrojen iyonları ve elektronlar oluşur. Hidrojen iyonları membrandan yayılır. Elektronlar ise gaz difüzyon tabakasından akım toplayıcı plakaya ve elektrik yüküne doğru akar. Katot tarafında elektronlar akım toplayıcı ve gaz difüzyon tabakasından girer. Oksijen veya hava katot tarafındaki hücreden gaz difüzyon tabakasını aşarak katalizöre ulaşır. Katalizör katmanında elektronlar hidrojen iyonları ile birleşerek suyu oluşturur. Kısaca anot bölümünde üretilen elektronlar harici bir devre üzerinden katoda giderken protonlar anot meadan katot meaya geçerek bir elektrik devresi oluşturur. Yakıt hücresinde su üç fazda bulunur. Gaz ve sıvı fazlar katı parçalar (membran ve akım toplama plakası) hariç her parçada bulunur. Çözünmüş su fazı ise sadece katalizör katmanı ve membran içinde bulunur. Katot tarafı elektrokimyası suyun çözünmüş fazda olduğunu varsaymaktadır.

Hücre denklemler çözülürken iki potansiyel denklem çözülür. Birincisi katı parçalar boyunca elektron taşınmasını, diğeri ise katalizör ve membrandaki H<sup>+</sup>'nın protonik yani iyonik taşınmasını ifade eder.

$$\nabla(\sigma_k \nabla \phi_k) + R_k = 0 \quad (3.1)$$

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

$\sigma$  = elektriksel iletkenlik (1/ohm-m)

$\phi$  =elektriksel potansiyel (volt)

$R$  = hacimsel transfer akısı (A/m<sup>3</sup>)

Hacimsel transfer akısının genel tanımları aşağıdaki şekilde belirtilir.

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

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

$j(T)$  = referans değişim akım yoğunluğu ( $A/m^2$ )

$\zeta$  = aktif yüze alanı (1/m)

$\gamma$  = korelasyon bağımlılığı

$\alpha_{an}^{an}, \alpha_{cat}^{an}$  = anot elektrotunun anot ve katot transfer katsayıları

$\alpha_{an}^{cat}, \alpha_{cat}^{cat}$  = katot elektrotunun anot ve katot transfer katsayıları

$\eta_{an}, \eta_{cat}$  = anot ve katot yüzey potansiyelleri

F = Faraday sabiti ( $9,65 \times 10^7$  C/kmol)

R = Evrensel gaz sabiti

T = Sıcaklık

Formül Butler- Volmer formülünün genel halidir. Basitleştirilmiş hali Tafel formülü olarak verilmektedir.

$$R_{an} = \zeta_{an} j_{an}(T) \left( \frac{A}{A_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left( \frac{e^{\alpha_{an} F \eta_{an}}}{RT} \right) \quad (3.3)$$

$$R_{cat} = \zeta_{cat} j_{cat}(T) \left( \frac{A}{A_{ref}} \right)^{\gamma_{cat}} \left( \frac{e^{-\alpha_{cat} F \eta_{cat}}}{RT} \right) \quad (3.4)$$

Referans akım yoğunluğu değişimi  $j_{an}(T), j_{cat}(T)$  lokal sıcaklığa bağlı olarak değişir.

$$j_{an}(T) = j_{an}^{ref} e^{-E_{an}/RT(1-\frac{T}{T_{an}^{ref}})} \quad (3.5)$$

$$j_{cat}(T) = j_{cat}^{ref} e^{-E_{cat}/RT(1-\frac{T}{T_{cat}^{ref}})} \quad (3.6)$$

Kinetik için itici güç yerel yüzey aşırı potansiyeli,  $\eta$ , aktivasyon kaybı olarak da bilinir.

Genellikle katı ( $\phi_k$ ) ve membran ( $\phi_{mem}$ ) arasındaki potansiyel fark olarak tanımlanır.

$$\eta_{an} = \phi_k - \phi_{mem} - U_{an}^0 \quad (3.7)$$

$$\eta_{cat} = \phi_k - \phi_{mem} - U_{cat}^0 \quad (3.8)$$

$U_{an}^0$  ve  $U_{cat}^0$  Nernst denklemi kullanılarak çözülür.

$$U_{an}^0 = E_{an}^0 - \frac{\Delta S_{an}}{2F} (T - T^0) - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2}}{P^0} \right) \quad (3.9)$$

$$U_{cat}^0 = E_{cat}^0 + \frac{\Delta S_{cat}}{2F} (T - T^0) - \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{sat} \sqrt{P_{O_2}/P^0}} \right) \quad (3.10)$$

$P_{sat}$  = suyun doyma basıncı

$P_{H_2}, P_{O_2}, P_{H_2O}$  = Türlerin kısmi basıncı

$T^0, P^0$  = Standart hal sıcaklık, basınç

$E_{an}^0, E_{cat}^0$  = tersinir potansiyel

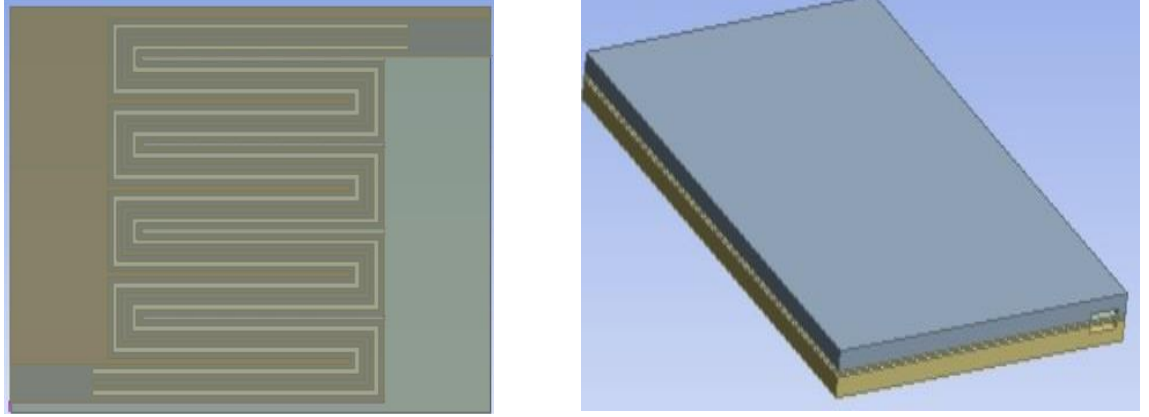
$\Delta S_{an}, \Delta S_{cat}$  = Reaksiyon entropileri

### 3.2. PEM Yakıt Pili Sayısal Analizi

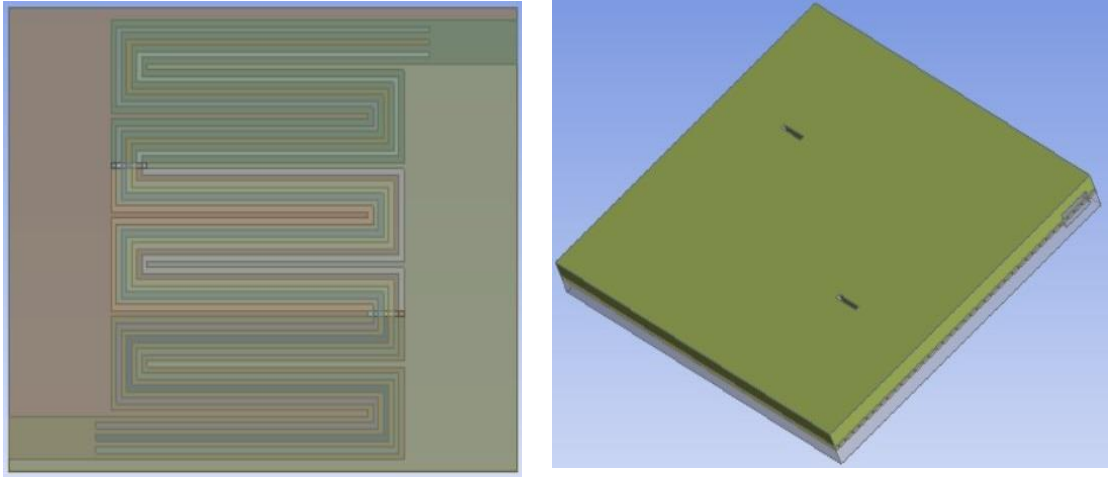
Bu çalışmada 4 serpantin akış kanallı PEM modeli ve ara rezervuarlı olmak üzere iki farklı model dizaynı kullanılmıştır. Geometrik özellikler iki modelde de aynı olup ara rezervuarlı modelde rezervuar eklenmiştir. Analizler ANSYS Fluent PEMFC modülünde yapılmıştır.

#### 3.2.1. PEM Yakıt Pili Geometrisi

PEM modeli ANSYS Design Moduler'da oluşturulmuştur



**Şekil.3.1.** PEM serpantin modeli 3 boyutlu görünüşü



**Şekil 3.2.**Ara rezervuarlı modeli 3 boyutlu görünüşü

**Çizelge 3.1.** Sayısal Model Geometrik Parametreleri (Çelik 2020)

| Geometrik Parametreler | PEM Modeli         |
|------------------------|--------------------|
| Gaz Akış Kanalları     | 1 mm               |
| Gaz Difüzyon Tabakası  | 410 $\mu\text{m}$  |
| Katalizör Tabakası     | 10 $\mu\text{m}$   |
| Membran                | 27.5 $\mu\text{m}$ |
| Akım Toplayıcı Plaka   | 3 mm               |
| Ara Rezervuar          | 3 mm               |

Model tamamlandıktan sonra gerekli hacim tanımlamaları ve türleri belirlenmiştir. Belirlenen hacimler, anot-katot akım toplama plakası, anot-katot akış kanalları, anot-katot gaz difüzyon tabakaları, anot-katot katalizör tabakaları ve membrandan oluşmaktadır. Akım toplama ve membran tabakaları PEMFC modülünde solid olarak, akış kanalları, gaz difüzyon tabakaları ve katalizörler fluid olarak tanımlanmaktadır.

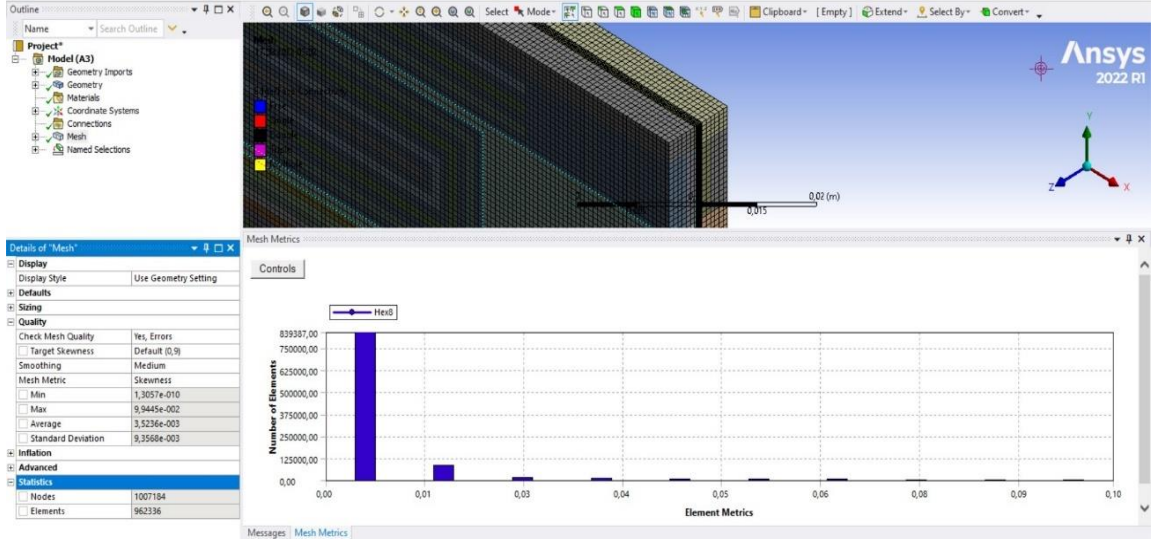
Tanımlanan yüzeyler ise;

- Anot akış kanalı giriş: mass-flow-inlet-a
- Katot akış kanalı giriş: mass-flow-inlet-c
- Anot akış kanalı çıkış: outlet-a
- Katot akış kanalı çıkış: outlet-c
- Anot akım toplama plakası terminal: terminal-a
- Katot akım toplama plakası terminal: terminal-c
- Anot akış kanalı-anot akım toplama plakası arası yüzey: wall-hyd
- Katot akış kanalı-katot akım toplama plakası arası yüzey: wall-oxg
- Anot gaz difüzyon tabakası: gdl-a
- Katot gaz difüzyon tabakası: gdl-c

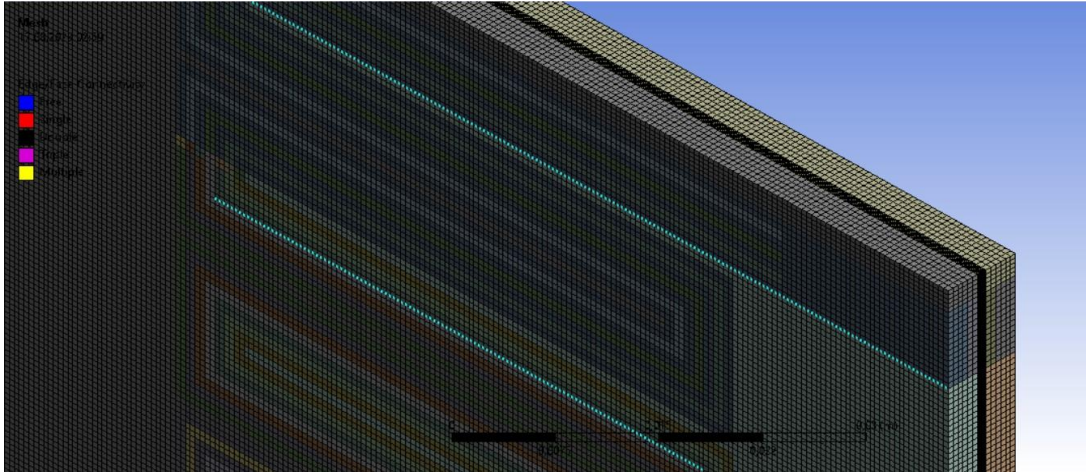
Gerekli tanımlamalar yapıldıktan sonra tüm geometri 'Form New Part' kısmından tek parça olarak birleştirilmiş, mesh kısmına geçilmiştir.

### **3.2.2. Sayısal Model Ağ Yapısı**

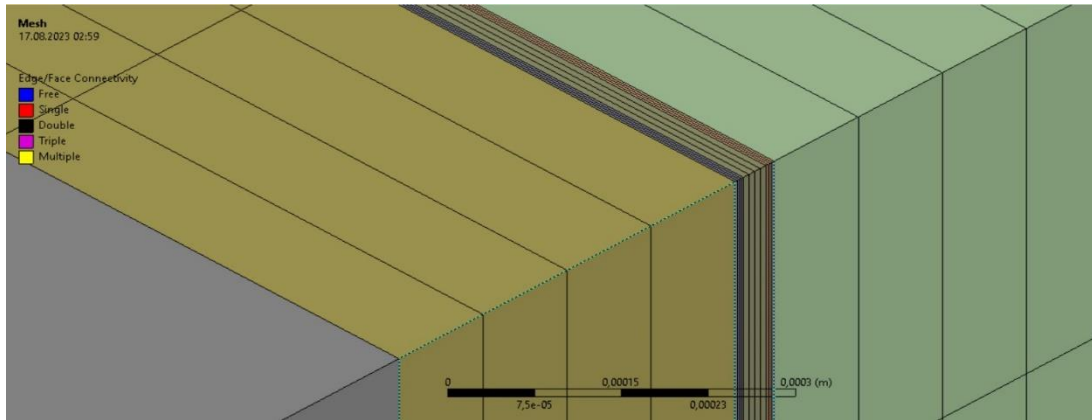
ANSYS Design Moduler'da tamamlanan geometrinin bir sonraki aşamada sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur. Sayısal ağ oluşturulurken öncelikle minimum, maksimum uzunluklar belirlenmiş, ortak bir payda bulunup ona göre optimizasyon yapılmıştır. Ağ kalitesini arttırmak için kanal ve ara rezervuar bölgeleri tüm model için bölünmüştür. GDL, katalizör ve membran tabakaları 4 parçaya bölünmüştür. Toplam 1007184 nodes, 962336 elements elde edilmiştir. Skewness değeri ortalaması  $3,5236e-3$  olarak gözükmektedir. Ağ sayısı ve kalitesi Şekil 3.2.' de gösterilmektedir.



Şekil.3.2. Sayısal ağ yapısı ve kalitesi



Şekil.3.3. Modelin ağ yapısı görüntüsü

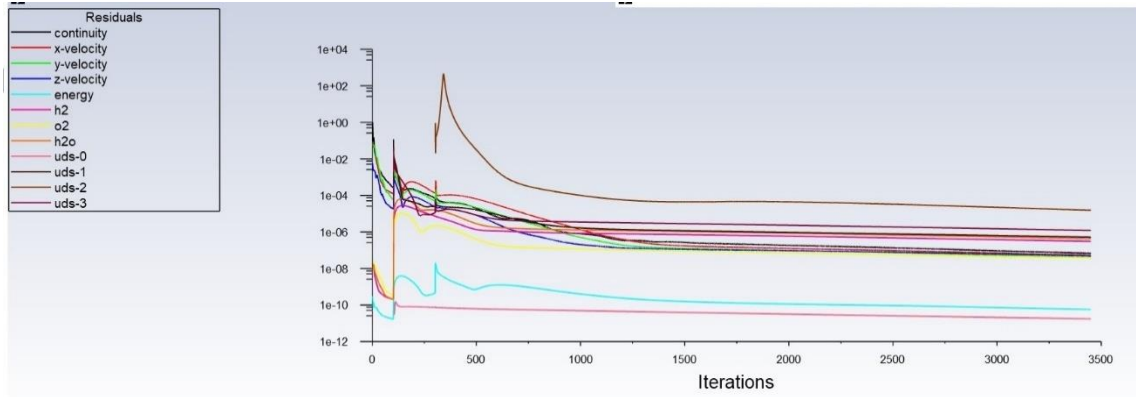


Şekil 3.4. GDL, katalizör ve membran sayısal ağ yapısı görüntüsü

Ağ yapısı oluşturulurken eleman boyutu 5mm, 2,5 mm, 1mm, 0.5 mm ve 0,2 mm olarak değiştirilip denenmiştir. Her eleman boyutu ile ağ yapısı oluşturulup çözüm aşamasına geçilmiştir. Optimum ağ yapısı seçilirken çözüm hata aralığı, çözüm süresi ve sistem zorlanmaması gibi faktörler göz önünde tutulmuştur. 0,5 mm eleman boyutu hata oranı ve çözüm süresi bazında en uygun ağ yapısı olarak belirlenmiştir.

### 3.2.3. Sayısal Modelin Çözüm Aşaması

Sayısal analiz ANSYS Fluent programı PEMFC modülü ile çözülmüştür. PEMFC modülüne arayüze define/models/addon-module komutuyla ulaşılabileceği gibi Solution içerisinde Physics/ Models/ More sekmesinden de ulaşılabılır. Modülde enerji, süreklilik, momentum denklemleri ve türler çözülmektedir. Gerekli sınır şartları programa tanımlanmıştır. Basınç- hız için SIMPLE algoritması seçilmiştir. Analiz yakınsaması kolaylaşması açısından Solution Controls/ Advanced solutionda tüm döngüler F-Cycle, stabilizasyon yöntemi BCGSTAB olarak değiştirilmiştir. Çözüm sonrasında elde edilen residualler şeklindeki gibidir.



Şekil 3.5. Çözüm sonunda elde edilen residualler

Çözüm için gerekli iterasyon sayısı belirlenirken süreklilik, hız, enerji, türler ve potansiyel denklemlerin yakınsaması ve hata oranları göz önünde tutulmuştur. Yakınsama kriterleri olarak analiz programı süreklilik, hız, türler ve potansiyeller için  $10^{-3}$ , enerji için  $10^{-6}$  kriterini kullanmaktadır. Çözüm sırasında iterasyon sayısı verilip yakınsama kriterleri ve akım yoğunluğu farkı izlenmiştir. 2000 iterasyondan sonra iterasyonlar arası akım yoğunluğu değeri  $0,000012 \text{ A/cm}^2$  değiştiği görülmüştür. 2000. iterasyon için yakınsama kriterleri ise çizelgede verilmiştir.



**Çizelge 3.2.** 2000 iterasyon sonucu yakınsama değerleri

|                  |            |
|------------------|------------|
| Süreklilik       | 3,0755e-07 |
| X-hız            | 1.8600e-06 |
| Y-hız            | 6.0217e-07 |
| Z-hız            | 1.6449e-07 |
| Enerji           | 8.4609e-10 |
| H <sub>2</sub>   | 4.1188e-08 |
| O <sub>2</sub>   | 3.7216e-06 |
| H <sub>2</sub> O | 4.8607e-08 |
| UDS0             | 1.6940e-08 |
| UDS1             | 6.4145e-06 |
| UDS2             | 1.9452e-05 |
| UDS3             | 8.5680e-07 |

Sayısal analiz için gerekli parametreler Çizelge 3.3. de belirtilmiştir.

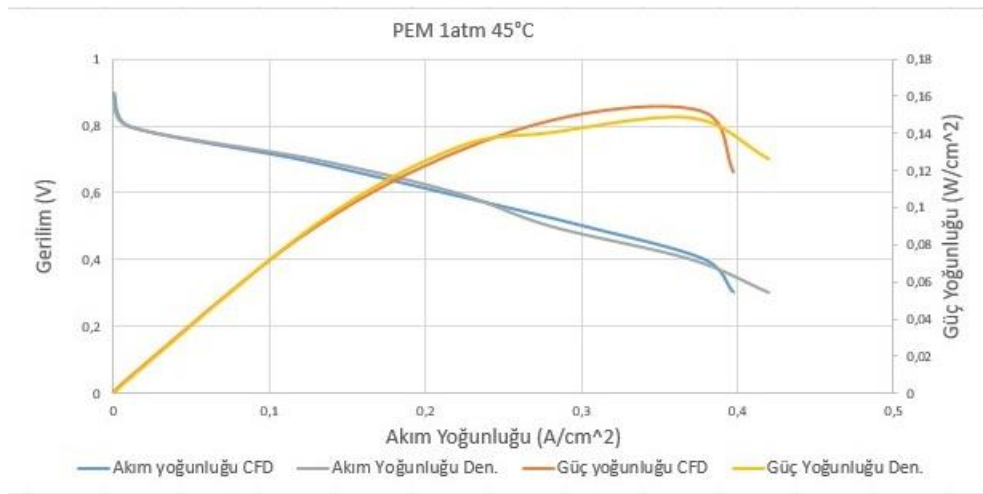
**Çizelge 3.3.** Sayısal model parametreleri (Çelik 2020)

| Parametre               | Anot  | Katot | Birim               |
|-------------------------|-------|-------|---------------------|
| Referans Akım Yoğunluğu | 10000 | 20    | A/m <sup>2</sup>    |
| Referans Konsantrasyon  | 1     | 1     | Kmol/m <sup>3</sup> |
| Konsantrasyon Katsayısı | 0,5   | 1     |                     |
| Değişim Katsayısı (a)   | 1     | 1     |                     |
| Değişim Katsayısı (b)   | 1     | 1     |                     |
| Açık Devre Gerilimi     |       | 0,98  | Volt                |
| Toplam Sızıntı Akımı    |       | 0     | Amper               |

## 4. BULGULAR

### 4.1. PEM Serpantin Modeli

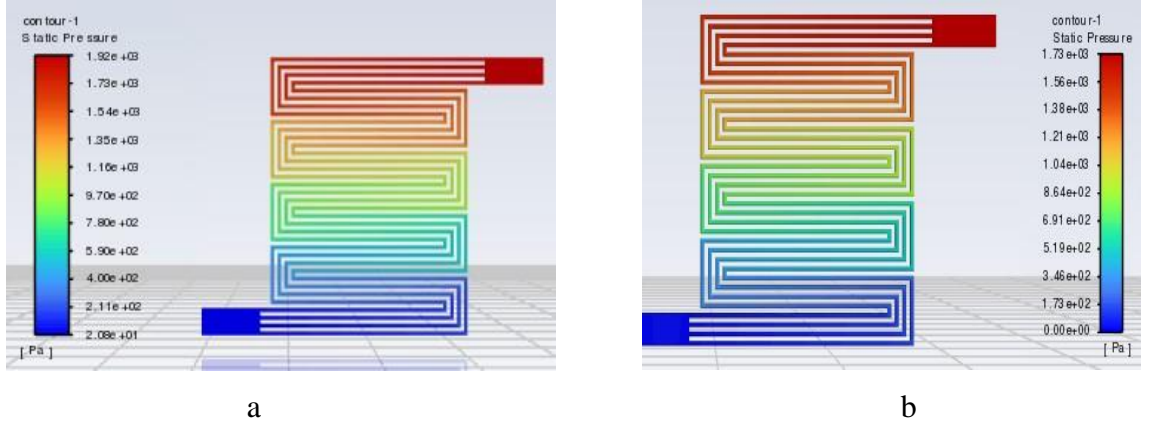
Çalışmada model doğrulaması için analiz sonuçları önceden çalışılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma koşulları Çizelge 3.2.'de belirtilmiştir. Sınır şartı olarak 1 atm basınç, 45°sıcaklık alınmış, katot terminaline 0,9-0,8-0,7-0,6-0,5-0,4 ve 0,3V olarak değiştirilmiş, akım ve güç yoğunluğu eğrileri elde edilmiştir.



**Şekil 4.1.** Serpantin modelinde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.

En yüksek güç yoğunluğu 0,4 V gerilim değeri için elde edilmiştir. Sonuçlar yüksek gerilim değerlerinde uyumlu bulunmuş, düşük gerilim değerlerinde ohmik kayıplar ve konsantrasyon kayıpları arttığından %7 oranında bir fark görülmektedir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,378 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 1,15 W/cm<sup>2</sup> de bulunmuştur.

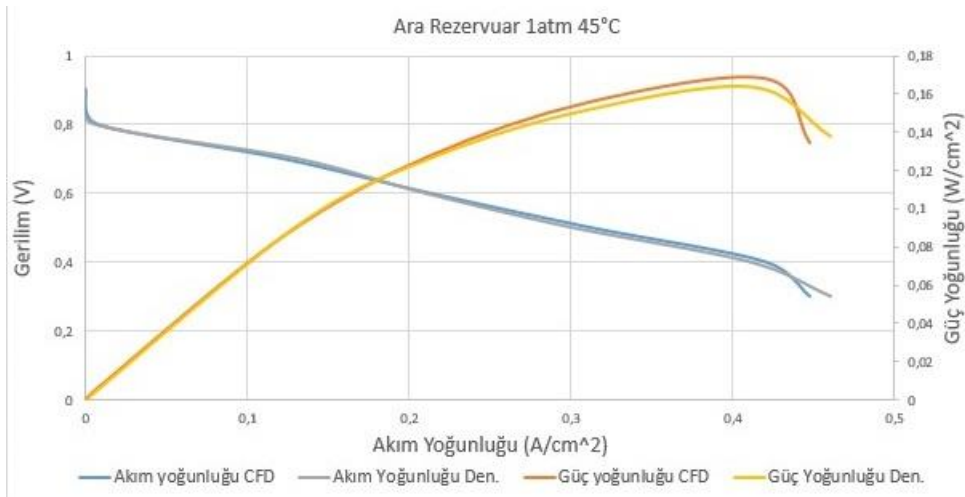
Pil maksimum güç yoğunluğu elde edilen gerilim ile 0.3 V gerilimdeki basınç farkı incelendiğinde 0.3 V gerilimdeki çıkışa yakın bölge ile giriş arasındaki fark maksimum güç yoğunluğu alınan değerden fazla olduğu görülmüştür. Akım yoğunluğu arttıkça pil içerisinde oluşan su miktarı da arttığından gaz akış kanalları içerisinde biriken su yoğunluğu da artmıştır. Yüksek akım yoğunluğunda basınç değeri yüksektir.



**Şekil 4.2.** Katot gaz akış kanalı boyunca serpantin yakıt pili modelinde basınç konturları (a) Maksimum güç yoğunluğunda (b) 0,3 V gerilimde.

#### 4.2. Ara Rezervuarlı PEM Serpantin Modeli

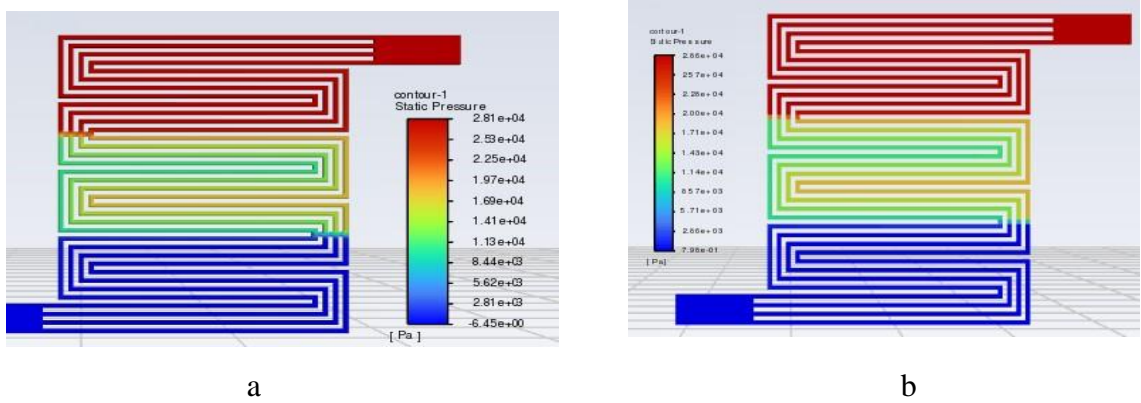
Kanal içerisinde akış süresinde reaktanlar kullanılmaktadır. Kanal içerisindeki kayıplar nedeniyle de basınç farkları ortaya çıkmaktadır. Bu basınç ve konsantrasyon kayıplarını önlemek amacıyla ara rezervuarlı model incelenmiştir. Analiz 1 atm basınç ve 45°C sıcaklık altında aynı sınır koşulları kullanılarak yapılmış ve önceden gerçekleştirilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analiz ve deney sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.3’ de gösterilmiştir.



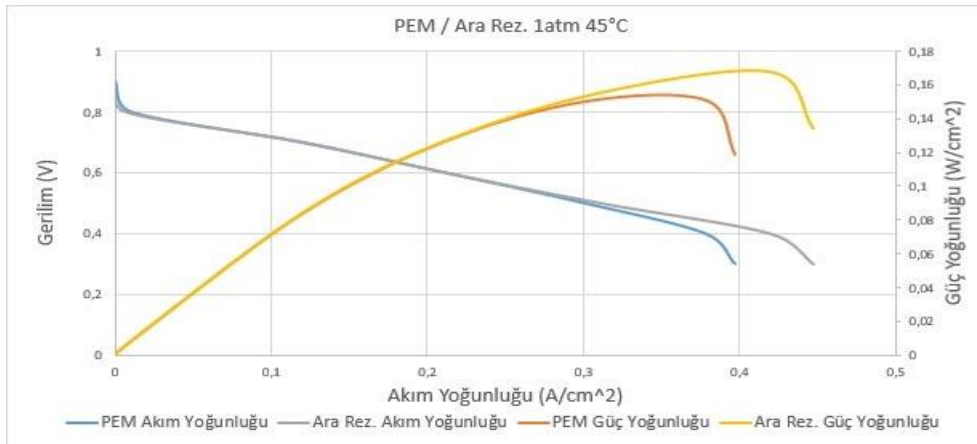
**Şekil 4.3.** Ara rezervuarlı modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.

Ara rezervuarlı modelde en yüksek güç yoğunluğu 0.4 V gerilim değerinde 0,168 W/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Deneysel sonuçlarla uyumlu olup ihmal edilecek bir fark bulunmaktadır. PEM modeli ile ara rezervuarlı model Şekil 4.3. te karşılaştırılmıştır. Ara rezervuarlı modelde güç yoğunluğu 0,168 W/cm<sup>2</sup> iken PEM modelinde 0,151 W/cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda ara rezervuarlı modelden PEM modeline göre %9 oranında daha yüksek güç elde edilmiştir. Aynı gerilim değerinde daha yüksek güç elde edilmesi pil içerisindeki su yönetiminde ara rezervuarlı modelin daha iyi olduğunu göstermektedir.

Pil maksimum güç yoğunluğu elde edilen gerilim ile 0.3 V gerilimdeki basınç farkı incelendiğinde 0.3 V gerilimdeki çıkışa yakın bölge ile giriş arasındaki fark maksimum güç yoğunluğu alınan değerden fazla olduğu görülmüştür. Konsantrasyon kayıpları bu durumun sebepleri arasındadır.



**Şekil 4.4.** Katot gaz akış kanalı boyunca ara rezervuar yakıt pili modelinde basınç konturları (a) Maksimum güç yoğunluğunda (b) 0,3 V gerilimde.

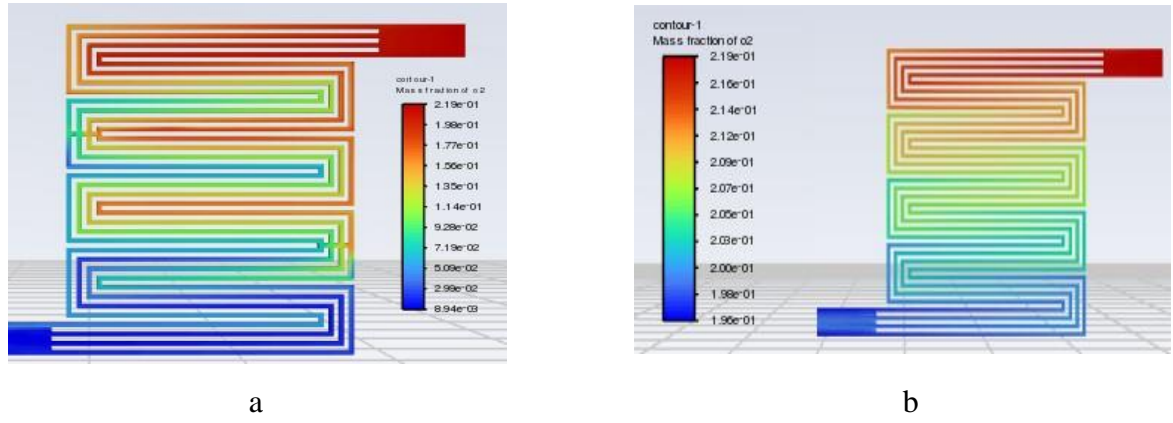


**Şekil 4.5.** Ara rezervuarlı ve Pem serpantin model akım ve güç yoğunluğu karşılaştırılması

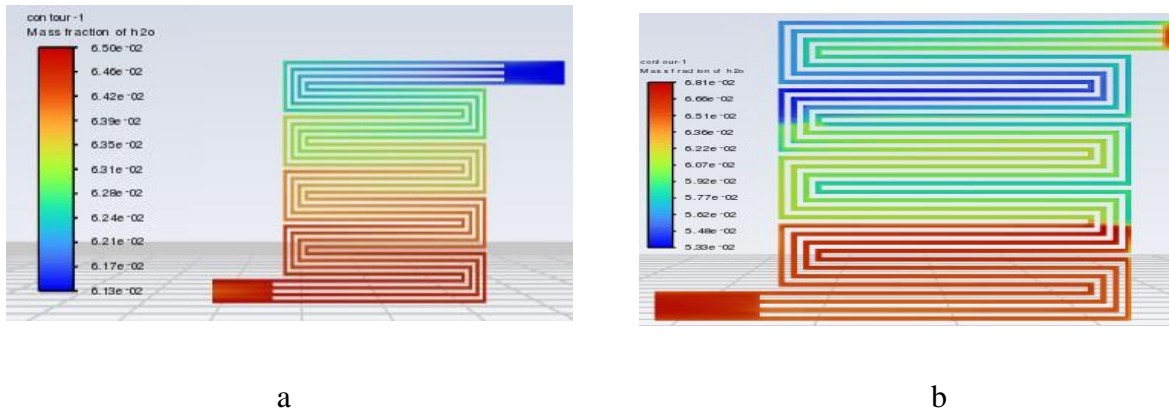
**Çizelge 4.1.** Pem serpantin ve ara rezervuarlı model karşılaştırması

|               | Gerilim<br>(V) | Ort.<br>yoğunluğu<br>O <sub>2</sub> | Ort.<br>yoğunluğu<br>H <sub>2</sub> O | GDL Sıvı su<br>aktivitesi |
|---------------|----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| PEM model     | 0,4            | 0,172                               | 0,277                                 | 0,99                      |
| Ara rezervuar | 0,4            | 0,205                               | 0,199                                 | 0,92                      |

Çizelge 4.1.'de görüldüğü üzere ara rezervuarlı modelde ortalama O<sub>2</sub> yoğunluğu artmış, H<sub>2</sub>O yoğunluğu azalmıştır. GDL sıvı su aktivitesindeki düşüşte ara rezervuarlı modelin su yönetiminde daha olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.



**Şekil 4.6.** Katot gaz akış kanalı boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri konturları (a) ara rezervuarlı model (b) serpantin model



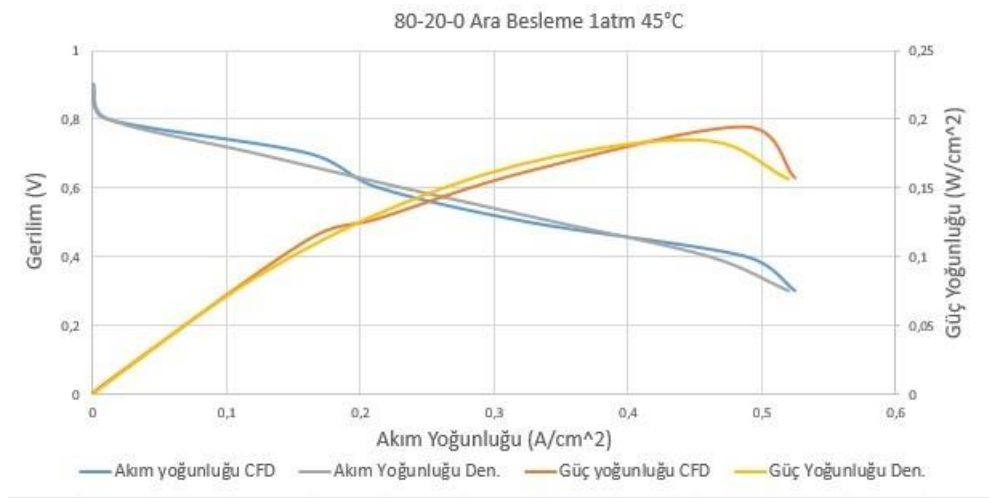
**Şekil 4.7.** Katot gaz akış kanalı boyunca H<sub>2</sub>O kütle kesri konturları (a) serpantin model (b) ara rezervuarlı model

### 4.3. Ara Beslemeli Model

Yakıt pili içerisindeki reaktan yetersizliği ve kanal içerisinde biriken su kütlesi birikmesi ilde güç düşmelerine neden olmaktadır. Ara besleme modelinde bu sorunun önüne geçmek amaçlı besleme noktaları oluşturulmuştur. Bu sayede reaktanlar sadece giriş noktasından değil ara rezervuar girişinden de pile girebileceğinden reaktan dağıtılması yapılmıştır. Anot ve katot plakaları için ara rezervuarlardan simetrik besleme yapılmıştır.

#### 4.3.1. 80-20-0 Ara Beslemeli Model

Bu modelde giriş kütle debisinin %80'i girişten kalan %20'si girişe en yakın olan rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,4V gerilim 0,487 A/cm<sup>2</sup>' de 0,195 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal analiz arasında %7'lik bir fark bulunmaktadır. Ayrıca 80-20-0 ara besleme modelini ve ara rezervuarlı model arasında yaklaşık %6,22'lik artış bulunmaktadır. Ara beslemeli model ara rezervuarlı modele göre güç yoğunluğunda artış sağlamıştır. Ara beslemeli model reaktan dağıtımını ve su tahliyesi için daha alternatif bir yöntemdir.

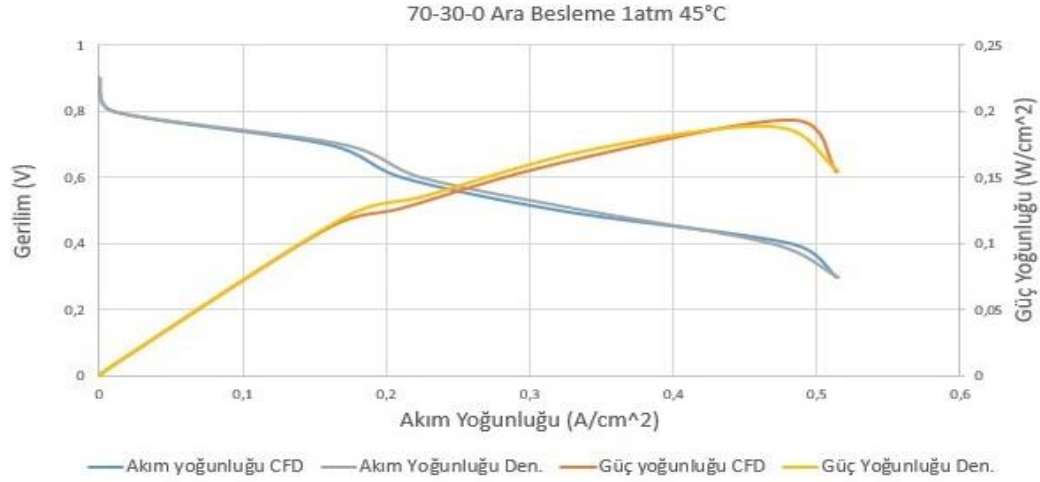


**Şekil 4.8.** 80-20-0 ara beslemeli modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.

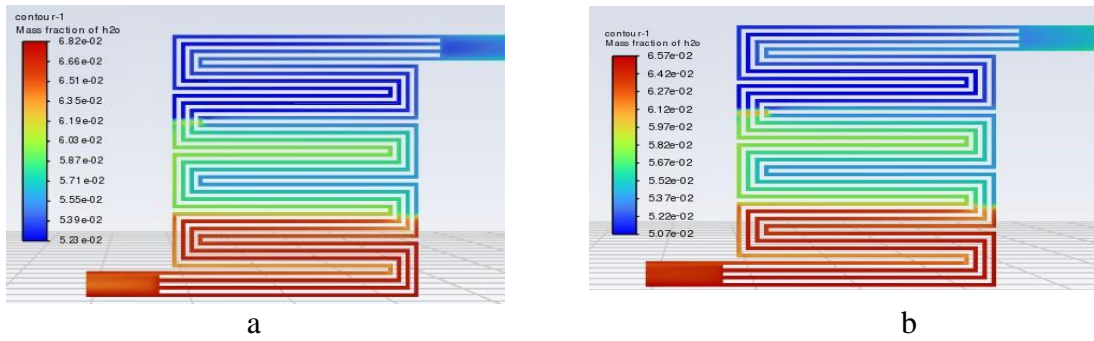
#### 4.3.2. 70-30-0 Ara Beslemeli Model

Bu modelde giriş kütle debisinin %70'i girişten kalan %30'si girişe en yakın olan rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,4V gerilim 0,483 A/cm<sup>2</sup>' de 0,193 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal analiz arasında

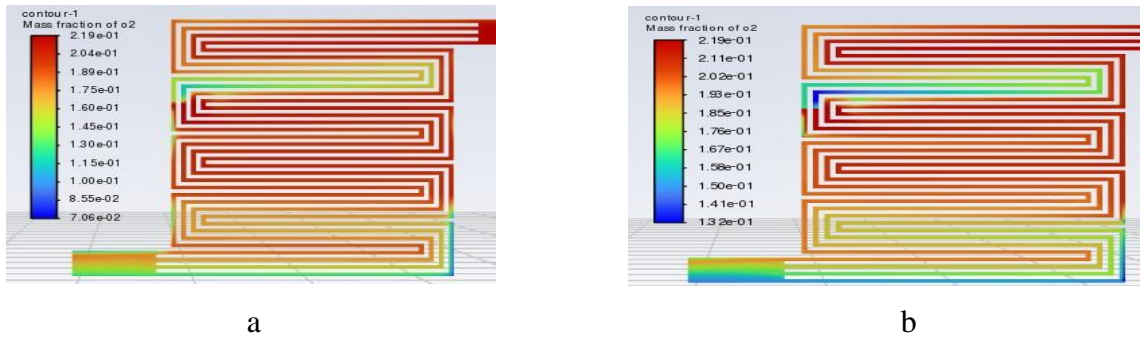
%4,1'lik fark bulunmaktadır. Deneysel ve analiz sonucunda 80-20-0 ve 70-30-0 ara besleme modeli arasında  $0,002 \text{ W/cm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



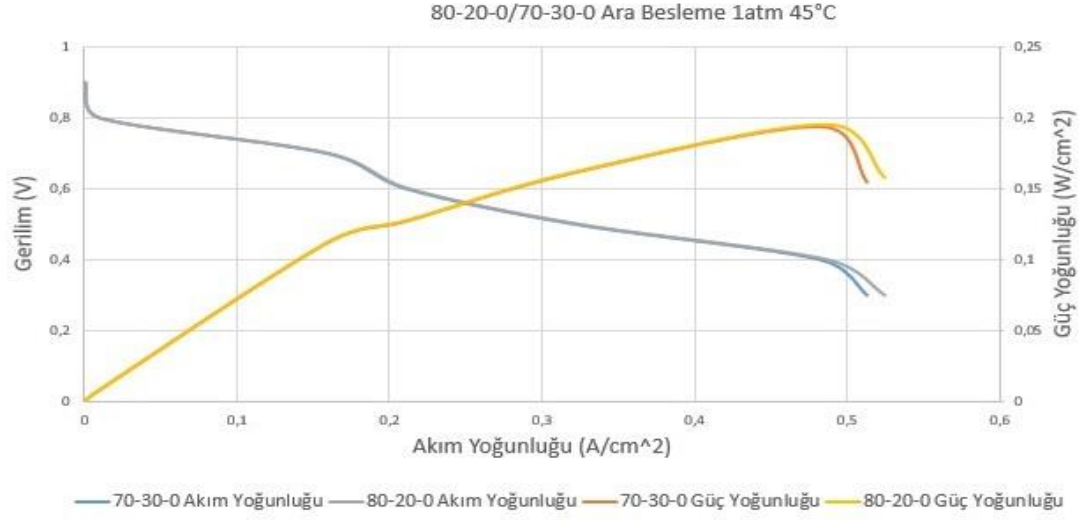
**Şekil 4.9.** 70-30-0 ara beslemeli modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.



**Şekil 4.10.** Katot gaz akış kanalı boyunca  $\text{H}_2\text{O}$  kütle kesri konturları (a) 0,3 V gerilimde (b) maksimum güç yoğunluğunda



**Şekil 4.11.** Katot gaz akış kanalı boyunca  $\text{O}_2$  kütle kesri konturları (a) 0,3 V gerilimde (b) maksimum güç yoğunluğunda.



**Şekil 4.12.** 80-20-0 ve 70-30-0 ara besleme modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması

80-20-0 ve 70-30-0 ara beslemeli model arasında güç bakımından çok fark olmasa da su yönetimi açısından 70-30-0 modeli daha elverişli olduğu görülmüştür.

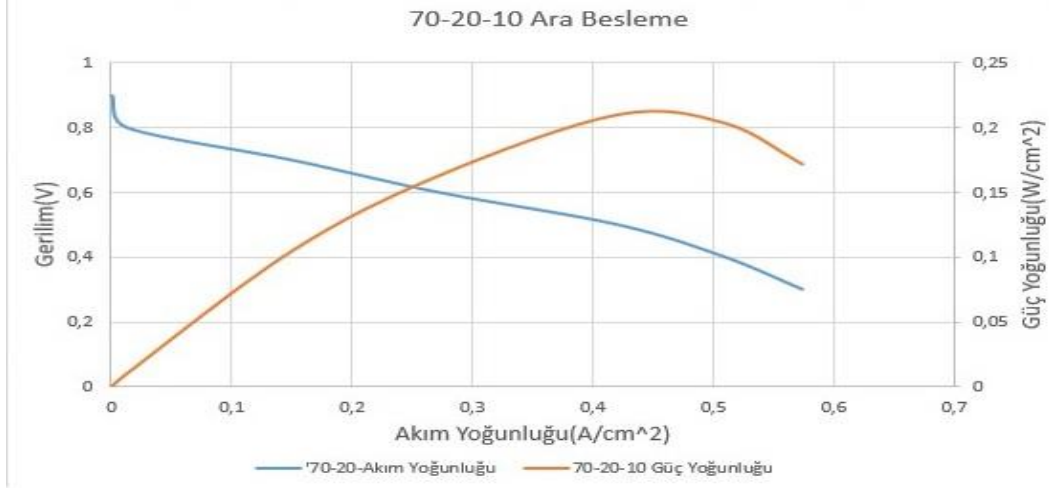
**Çizelge 4.2.** 80-20-0/70-30-0 karşılaştırması

|         | Gerilim (V) | Ort. O <sub>2</sub> yoğunluğu | Ort. H <sub>2</sub> O yoğunluğu | GDL Sıvı su aktivitesi |
|---------|-------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 80-20-0 | 0,4         | 0,220                         | 0,326                           | 0,223                  |
| 70-30-0 | 0,4         | 0,219                         | 0,326                           | 0,220                  |

### 4.3.3. 70-20-10 Ara Beslemeli Model

Bu modelde giriş kütle debisinin %70'i girişten, %20'si girişe en yakın olan rezervuardan ve kalan %10 debi çıkışa yakın olan ara rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,421 A/cm<sup>2</sup>' de 0,211 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal analiz arasında %1'lik fark bulunmaktadır.



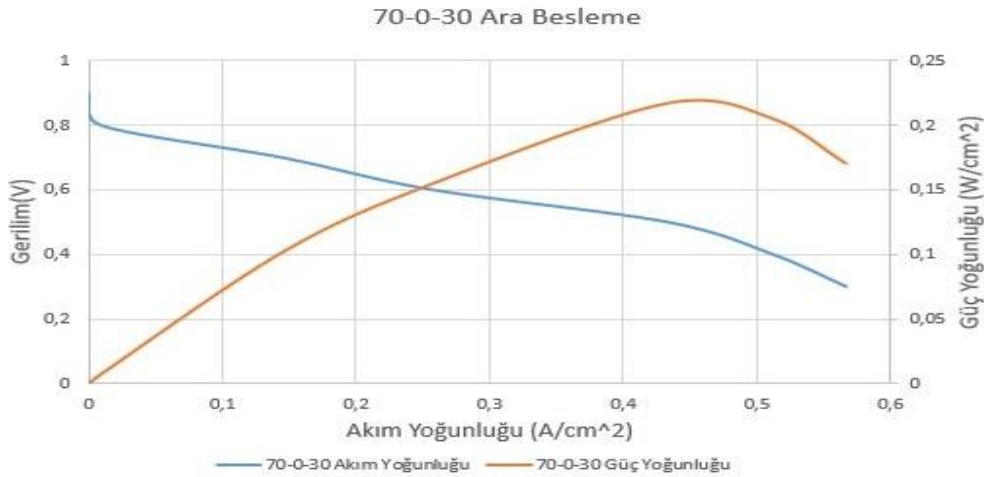


**Şekil 4.13.** 70-20-10 ara beslemeli modelde elde edilen CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarla (Çelik,2020) karşılaştırması.

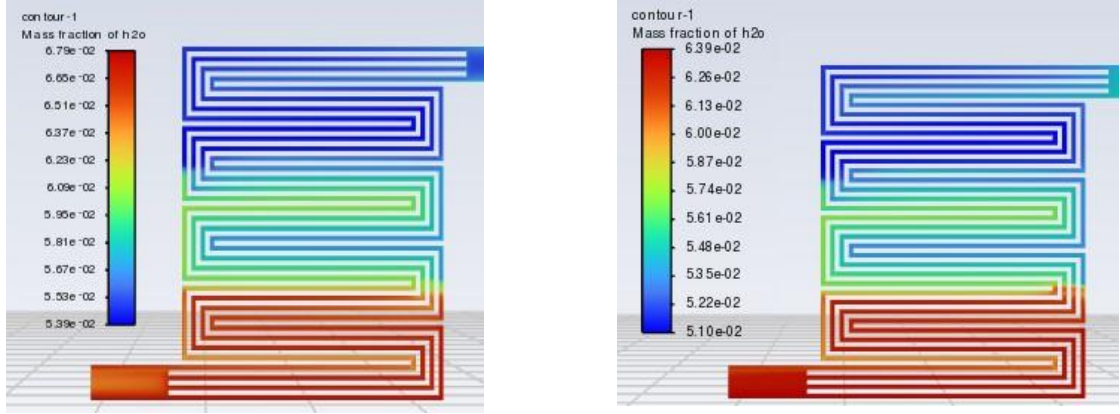
Güç değerleri ve su yönetimi baz alındığında 70-30-0 modelinin 80-20-0 ve 70-20-10 modeline göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

#### 4.3.4. 70-0-30 Ara Beslemeli Model

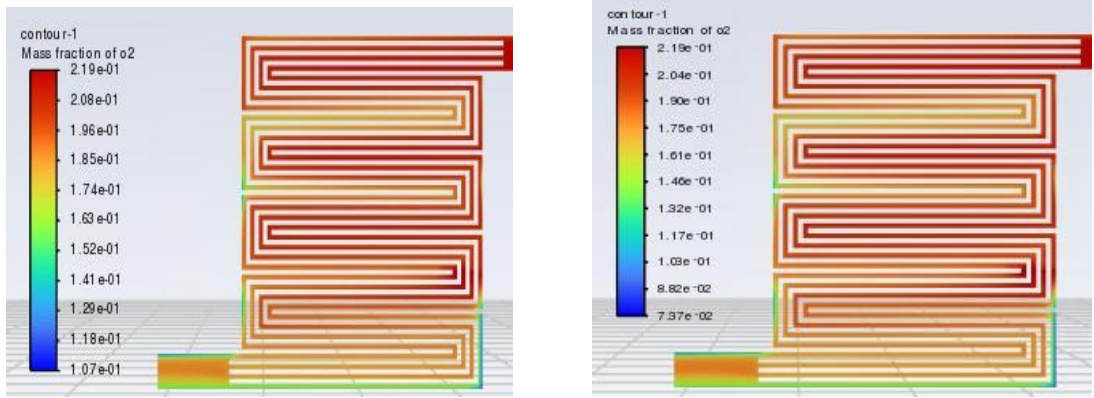
Bu modelde giriş kütle debisinin %70'i girişten, %30'u çıkışa yakın olan rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,433 A/cm<sup>2</sup>' de 0,216 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.14.** 70-0-30 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması



**Şekil 4.15.** Katot gaz akış kanalı boyunca H<sub>2</sub>O kütle kesri konturları (a) 0,3 V gerilimde. (b) maksimum güç yoğunluğunda.



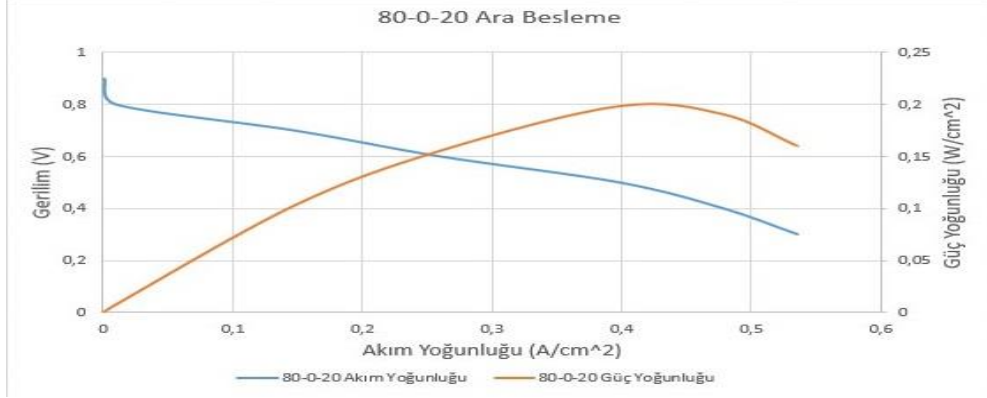
a

b

**Şekil 4.16.** Katot gaz akış kanalı boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri konturları (a) maksimum güç yoğunluğunda (b) 0,3 V gerilimde.

#### 4.3.5. 80-0-20 Ara Beslemeli Model

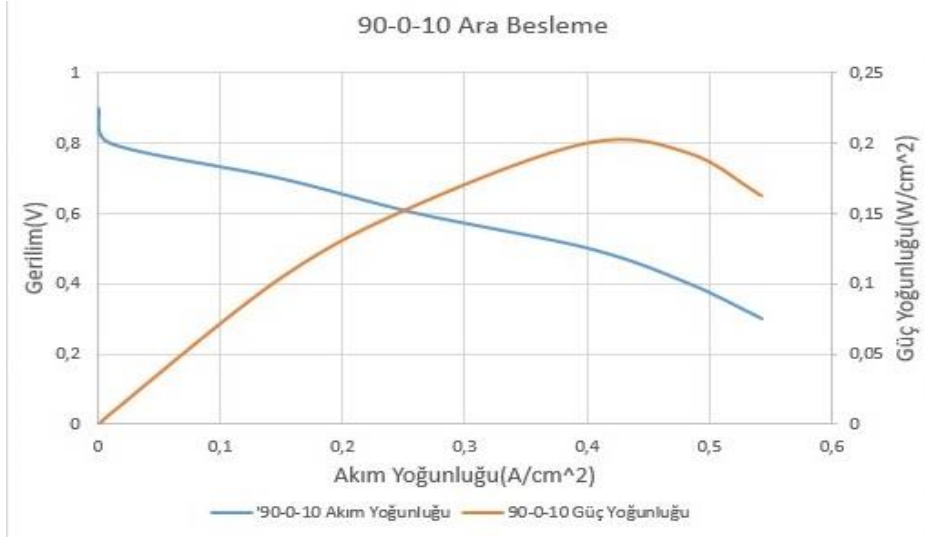
Bu modelde giriş kütle debisinin %80'i girişten, %20'si çıkışa yakın olan rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,398 A/cm<sup>2</sup>' de 0,199 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.17. 80-0-20 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması

#### 4.3.6. 90-0-10 Ara Beslemeli Model

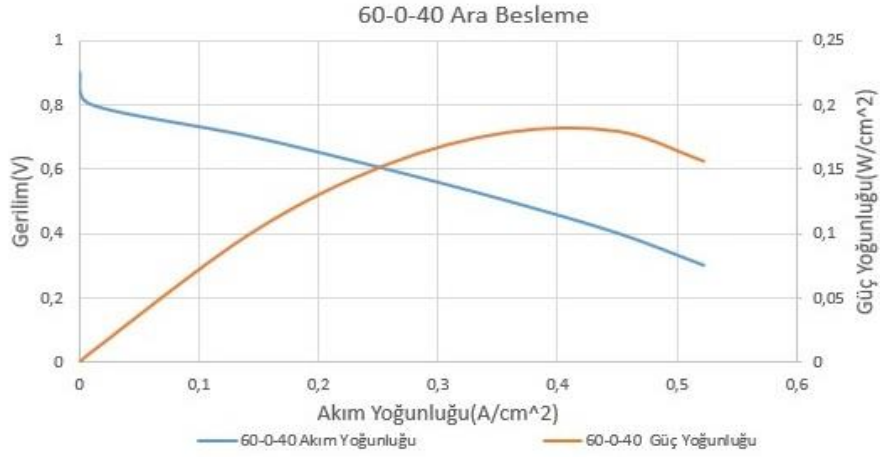
Bu modelde giriş kütle debisinin %90'ı girişten, %10'u çıkışa yakın olan rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,401 A/cm<sup>2</sup>' de 0,201 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.18. 90-0-10 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması

#### 4.3.7. 60-0-40 Ara Beslemeli Model

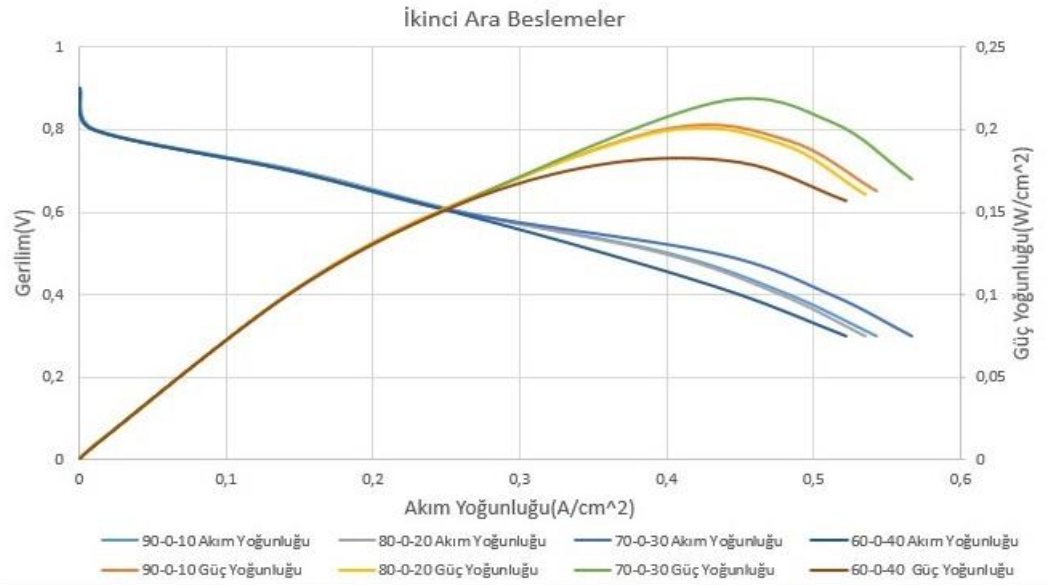
Bu modelde giriş kütle debisinin %60'ı girişten, %40'u çıkışa yakın olan rezervuardan verilmiştir. Analiz sonucunda en yüksek güç yoğunluğu 0,450 A/cm<sup>2</sup>' de 0,180 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.19.** 60-0-40 ara beslemeli modelin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması

#### 4.3.8. İkinci ara rezervuarların karşılaştırılması

İkinci ara rezervuar beslemelerinde güç yoğunlukları sırasıyla 70-0-30, 90-0-10, 80-0-20 ve 60-0-40 modellerinde 0,216, 0,201, 0,199 ve 0,180 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 70-0-30 modelinde görülmüştür. 70-0-30 modelinde 90-0-10 modeline göre %7.46, 80-0-20 modeline göre %8.54, 60-0-40 modeline göre %20 daha yüksek güç elde edilmiştir.



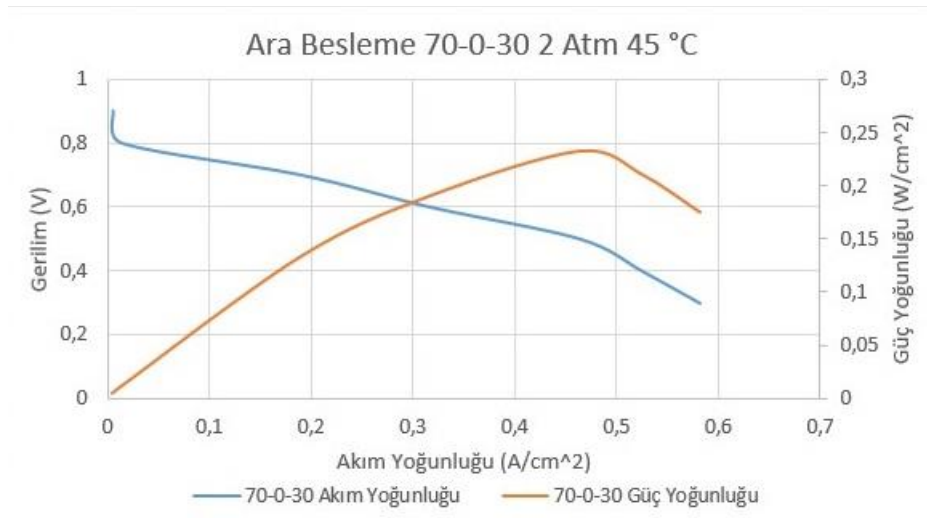
**Şekil 4.20.** İkinci ara rezervuar besleme modellerinin akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması

#### 4.4. Ara Beslemeli Model Sıcaklık ve Basınç Sonuçları

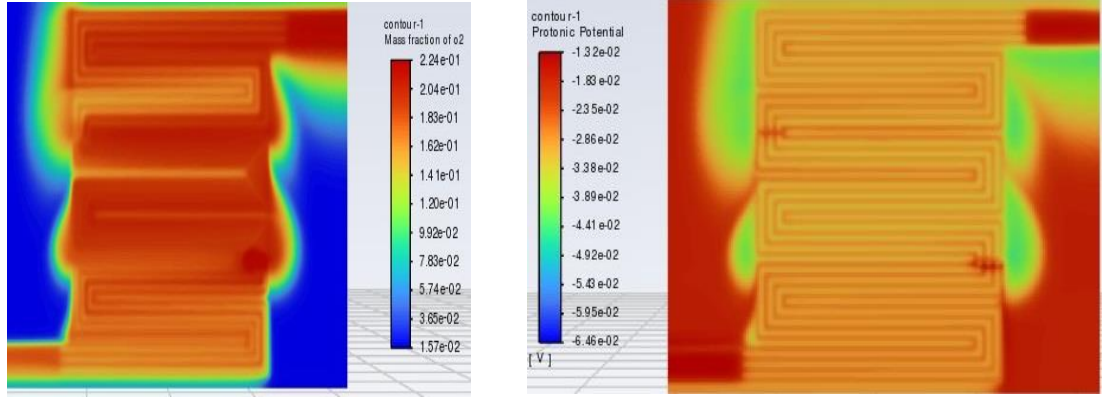
Yapılan çalışmada Pem serpantin, ara rezervuarlı ve ara beslemeli modellerin sonuçlarına göre en yüksek güç yoğunluğu 70-0-30 ara beslemeli modelde elde edilmiştir. Bu sebeple 70-0-30 modeli 1 atm-2 atm-3 atm basınç ile 45°C ve 70°C sıcaklık değerindeki değişimi incelenmiştir. Katot akım toplama plakası ile gaz difüzyon tabakası arasında bulunan gaz akış tabakası boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri ve membran tabakası membran proton içerikleri de belirtilmiştir.

##### 4.4.1. 70-0-30 ara beslemeli model 2 atm 45°C

Bu modelde 70-0-30 ara beslemeli model 2 atm basınç ve 45°C sıcaklıkta incelenmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 0.464 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 0.2321 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.



Şekil.4.21. 70-0-30 ara beslemeli modelin 2 atm 45°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması.



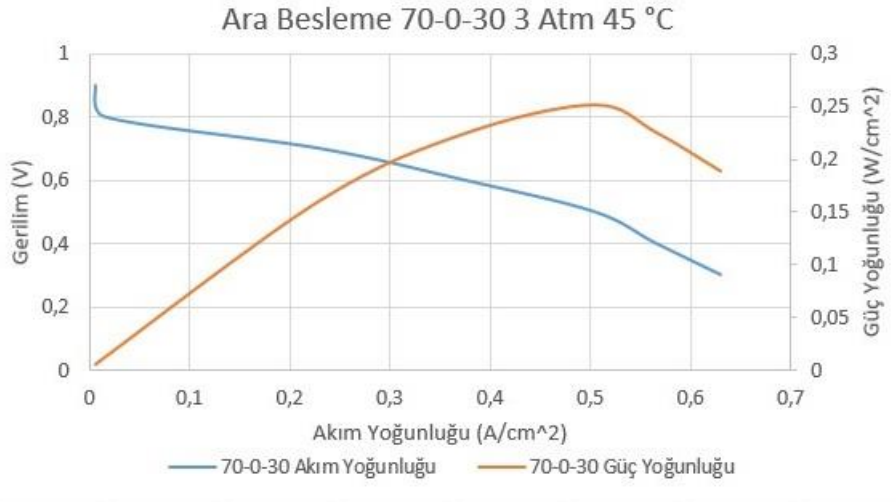
a

b

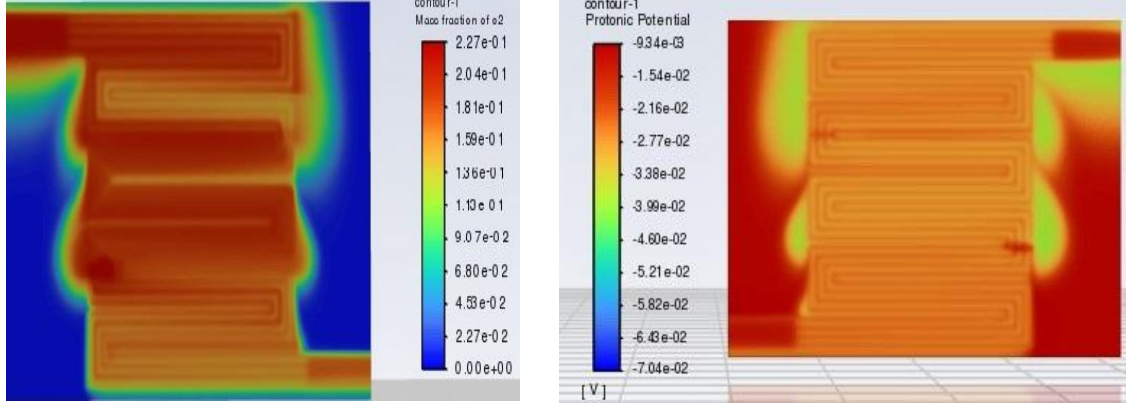
Şekil 4.22. (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları

#### 4.4.2. 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm 45°C

Bu modelde 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm basınç ve 45°C sıcaklıkta incelenmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 0.503 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 0.252 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.



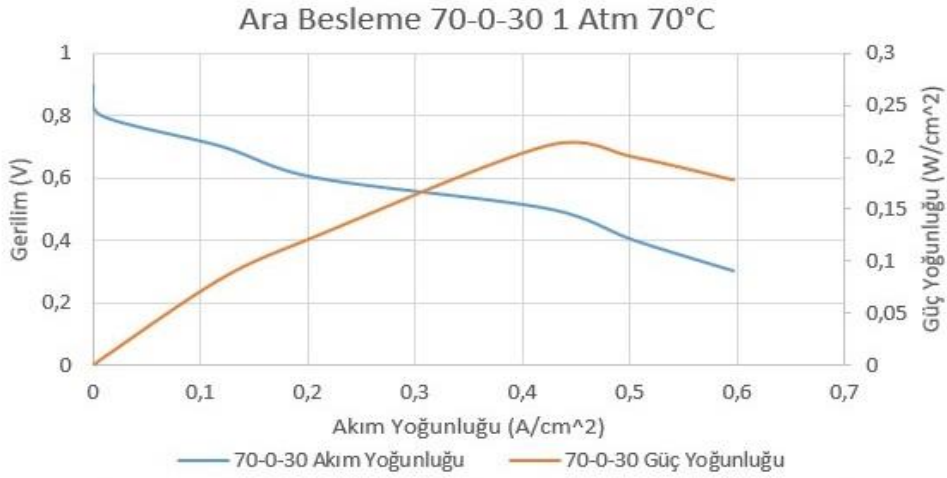
Şekil.4.23. 70-0-30 3 atm 45°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması



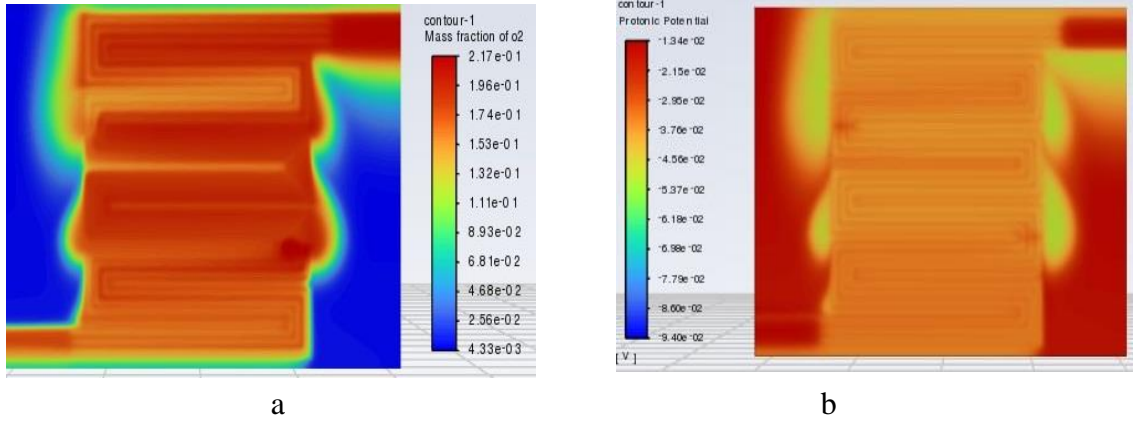
Şekil 4.24. (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları

#### 4.4.3. 70-0-30 ara beslemeli model 1 atm 70°C

Bu modelde 70-0-30 ara beslemeli model 1 atm basınç ve 70°C sıcaklıkta incelenmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 0.424 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 0.212 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.



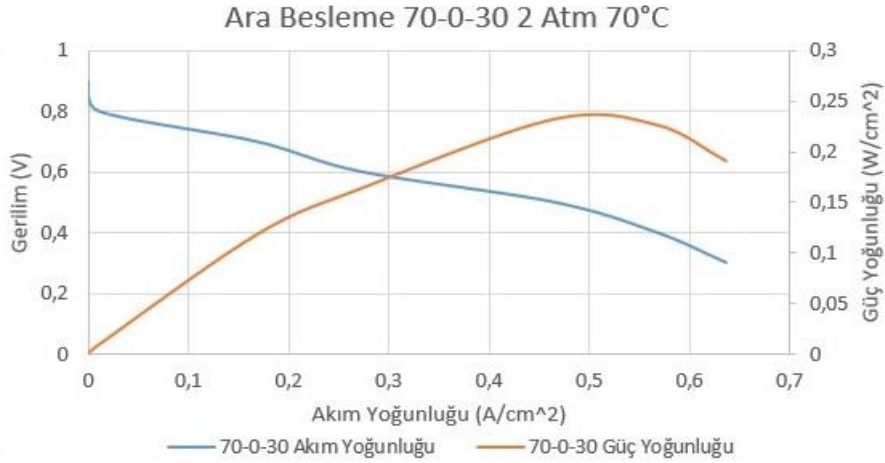
Şekil.4.25. 70-0-30 1 atm 70°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması



**Şekil 4.26.** (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları

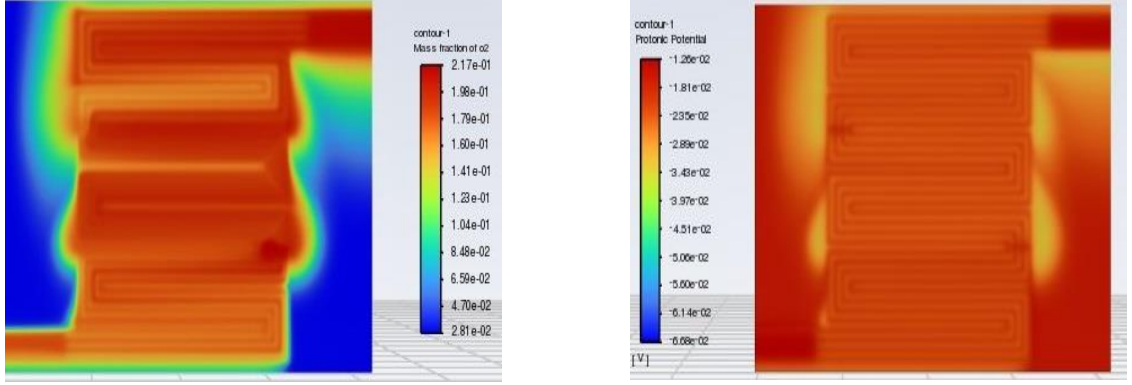
#### 4.4.4. 70-0-30 ara beslemeli model 2 atm 70°C

Bu modelde 70-0-30 ara beslemeli model 2 atm basınç ve 70°C sıcaklıkta incelenmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 0.464 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 0.232 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.



**Şekil.4.27.** 70-0-30 ara beslemeli modelin 2 atm 70°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması





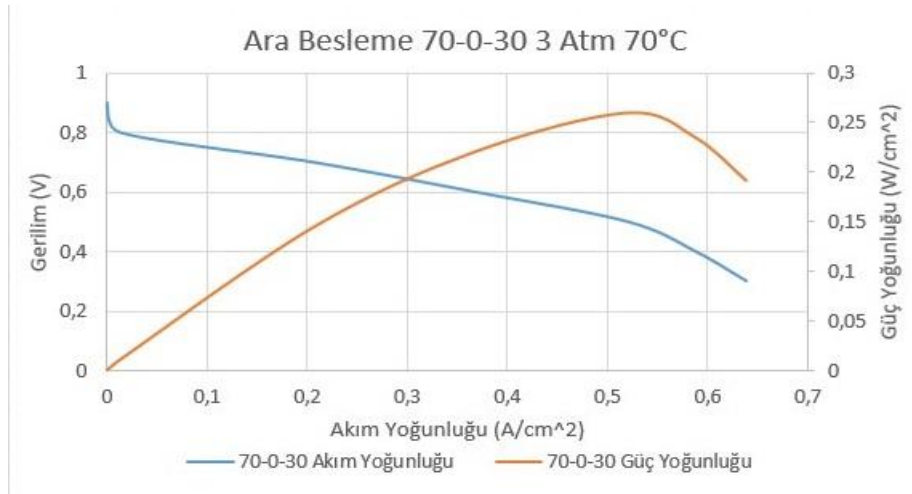
a

b

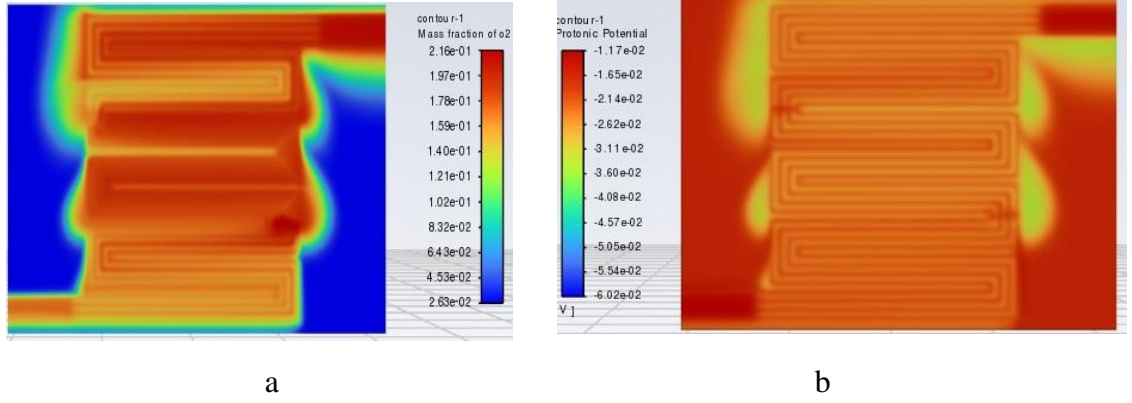
**Şekil 4.28.** (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel konturları

#### 4.4.5. 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm 70°C

Bu modelde 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm basınç ve 70°C sıcaklıkta incelenmiştir. En yüksek güç yoğunluğu 0.52 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 0.26 W/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir.



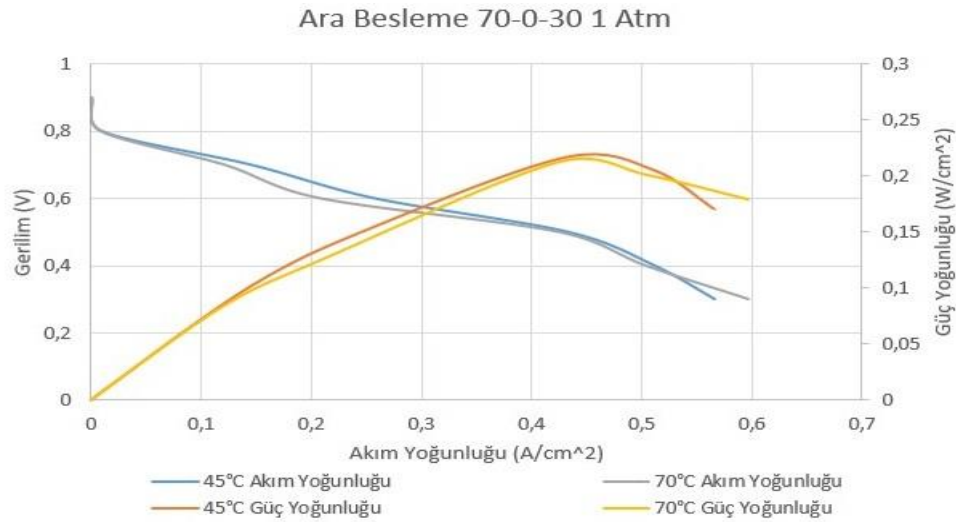
**Şekil.4.29.** 70-0-30 ara beslemeli modelin 3 atm 70°C akım ve güç yoğunluğu karşılaştırması



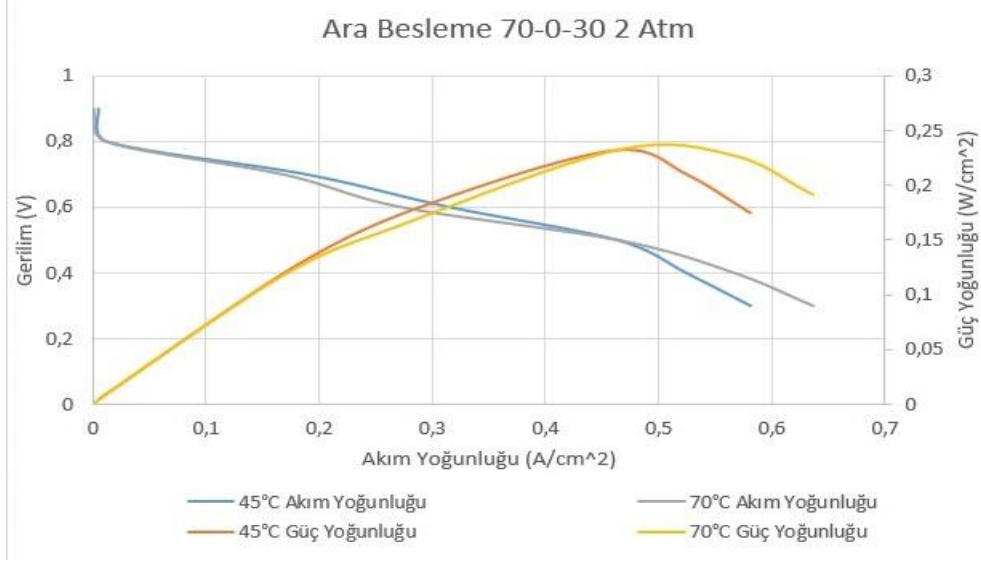
Şekil 4.30. (a) Katot gaz akış tabakası boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri (b) membran tabakası membran protonik potansiyel kontur dağılımları

#### 4.5. 70-0-30 Ara Besleme Modeli Sıcaklık ve Basınç Karşılaştırması

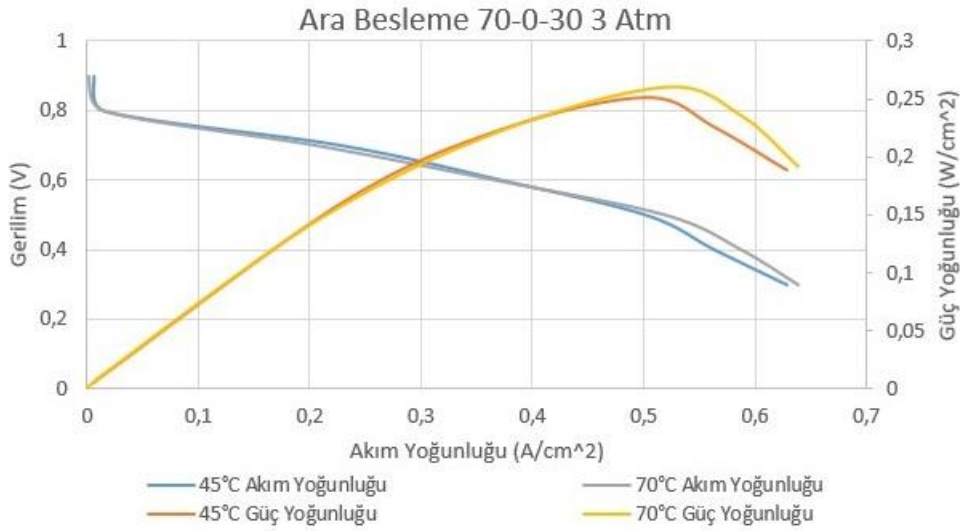
Çalışmada aynı sıcaklık ve basınç değerleri alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Basınç değerleri sabit tutulup sıcaklık değişimi incelendiğinde sıcaklıkla birlikte güç artışı gözlenmiştir. Normal şartlarda sıcaklık artışıyla birlikte gücün azalması beklenirken yakıt pilinde sıcaklık artışı ile birlikte membran geçirgenliği arttığından güç üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlenmiştir.



Şekil.4.31. 70-0-30 ara beslemeli modelin 1 atm- sıcaklık karşılaştırması

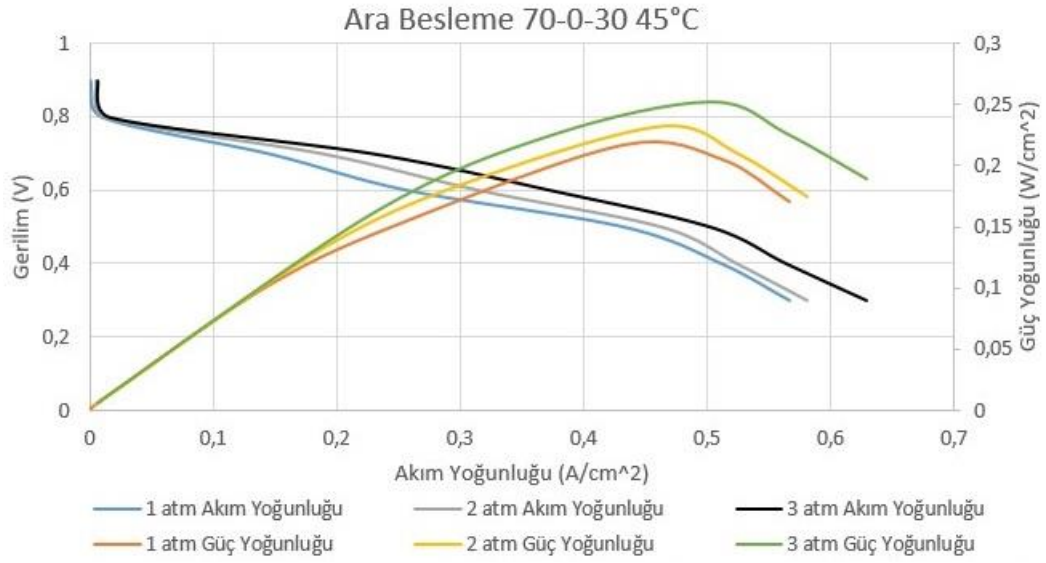


**Şekil.4.32.** 70-0-30 ara beslemeli modelin 2 atm- sıcaklık karşılaştırması

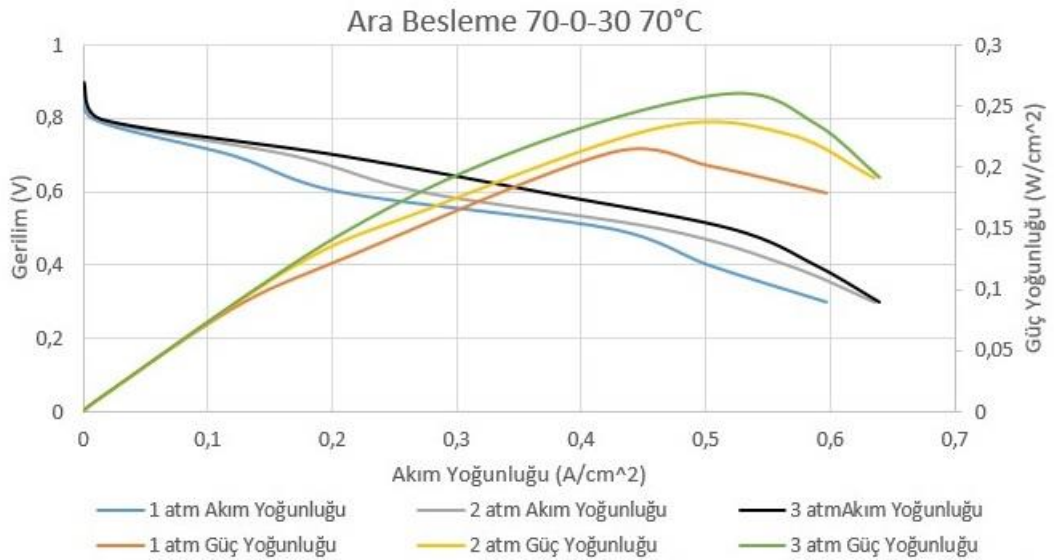


**Şekil.4.33.** 70-0-30 ara beslemeli modelin 3 atm- sıcaklık karşılaştırması

Sabit sıcaklıkta 1 ve 2 atm çalışma basıncı şartında ise yüksek gerilim değerlerinde güç yoğunluğu azalmış, düşük gerilim değerlerinde ise artış gözlenmiştir. 3 atm çalışma basıncında ise güç yoğunluğu artışı daha yüksek gerilim değerlerinde gerçekleşmiştir.



**Şekil.4.34.** 70-0-30 ara beslemeli modelin 45°C- basınç karşılaştırması



**Şekil.4.35.** 70-0-30 ara beslemeli modelin 70°C- basınç karşılaştırması

Sıcaklık artışı elektronik cihazlarda istenilen bir durum değildir. Lakin yakıt pilinde bu durum tam tersi olarak karşımıza çıkmaktadır. Membran protonik potansiyel iyonik dirençle doğru orantılıdır. Sıcaklık artışı ile iyonik direnç azalmakta ve güç yoğunluğu artmaktadır. Membran protonik potansiyel değeri düştükçe elde edilen güç yoğunluğu değeri artmaktadır. Maksimum güç yoğunluğundaki membran protonik potansiyel değerleri Çizelge 4.3.'te, katot gaz akış kanalı boyunca O<sub>2</sub> kütle kesri karşılaştırması ise Çizelge 4.4'te belirtilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Membran Protonik Potansiyel Karşılaştırması

| Membran Protonik Potansiyel | 1 atm  | 2 atm  | 3 atm  |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| 45°C                        | 0,0359 | 0,0349 | 0,0338 |
| 70°C                        | 0,0463 | 0,0335 | 0,0305 |

**Çizelge 4.4.** O<sub>2</sub> Kütle Kesri Karşılaştırması

| O <sub>2</sub> Kütle Kesri | 1 atm | 2 atm | 3 atm |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| 45°C                       | 0.145 | 0.134 | 0.126 |
| 70°C                       | 0.148 | 0.132 | 0.125 |

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmada Pem serpantin, ara rezervuarlı ve ara beslemeli modeller kullanılmış, aynı şartlarında çalıştırılmış ve karşılaştırılmıştır.

Pem serpantin ve ara rezervuarlı model için ara rezervuarlı modelde Pem serpantin modele göre daha yüksek güç elde edilmiştir. Ara rezervuarlı modelde ortalama su yoğunluğu düştüğü gözlenmiştir. Bu da ara rezervuarlı modelin su yönetimi açısından daha elverişli bir model olduğu göstermektedir.

Ara beslemeli modellerde ise 80-20-0 ve 70-30-0 ara besleme şekilleri uygulanmıştır. Giriş kütle debisinin %80'i ve %70'i girişlerden, kalan %20 ve %30'luk kısım girişe yakın ara besleme noktasından verilmiştir. Güç yoğunlukları açısından 70-30-0 ara besleme modeli 80-20-0 ara besleme modelinden %3.6 daha fazla bulunmuştur. Su yönetimi açısından 70-30-0 modeli 80-20-0 modelinden %1,36 daha fazla performansa sahiptir.

İki ara beslemede ise 70-20-10 ara besleme modeli uygulanmıştır. 70-30-0 modeli ile kıyaslandığında 70-20-10 modelinden 70-30-0 modeline göre %9.33 daha fazla güç yoğunluğu elde edilmiştir.

İkinci ara besleme modellerinde ise 90-0-10, 80-0-20, 70-0-30 ve 60-0-40 modelleri uygulanmıştır. Modeller arasındaki güç yoğunluğu sıralaması 0,201 W/cm<sup>2</sup>, 0,199 W/cm<sup>2</sup>, 0,216 ve 0,180 W/cm<sup>2</sup> şeklindedir. En yüksek güç yoğunluğunun elde edildiği 70-0-30 modelinden 70-20-10 modeline göre %4 daha fazla güç yoğunluğu elde edilmiştir.

70-0-30 modeli farklı sıcaklık ve basınçlarda çalıştırılmış ve en yüksek güç yoğunluğu alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre en yüksek güç yoğunluğu 70-0-30 ara beslemeli model 3 atm çalışma basıncı 70°C olarak görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre aynı sıcaklık değerinde çalışma basıncı arttırıldığında güç yoğunluğu artışı gözlenmiştir. Aynı basınç değerlerinde ise 1 atm çalışma basıncında düşük sıcaklığın pilden alınan g yoğunluğunda olumlu etkisi görülmüştür. 2 ve 3 atm çalışma basıncında sıcaklıkla birlikte güç yoğunluğu da artmıştır.

Membran protonik potansiyel ve O<sub>2</sub> kütle kesri oranlarını da g artışına göre azalma göstermiştir.

## KAYNAKLAR

Arvay,A.,French,J.,Wang,J.-C.,Peng,X.-H.,Kannan,A.M.2013.Nature inspired flow field designs for proton exchange membrane fuel cell. International journal of hydrogen energy,38:3717-3726.

Amirfazli.A., Asghari. S., Sarraf.M., An investigation into the effect of manifold geometry on uniformity of temperature distribution in a PEMFC stack. Energy 2018;145:141-151.

Barati,S.,Khoshandam,B.,Ghazi,M.M.2018. An investigation of channel blockage effects on hydrogen mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with various geometries and optimization by response surface methodology. International Journal of Hydrogen Energy.43:21928-21939

Banerjee. R. Liquid Water Transport in the Reactant Channels of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. 2014.

Barzegari,M.M.,Khatir,F.A.2019. Study of thickness distribution and dimensional accuracy of stamped metallic bipolar plates.International Journal of Hydrogen Energy.44:31360-31371

Bilgili,M.,Sivrioğlu,M.2016.Pem yakıt pilinin değişik membran elektrot çifti kalınlıklarında ve farklı çalışma basıncı koşullarında üç boyutlu sayısal analizi. Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der.,31:51-63

Cha,S.W.,Hayre,R.O.,Saito,Y.,Prinz,F.B.2004. The scaling behavior of flow patterns: a model investigation. Journal of Power Sources.134:57-71

Chen. C-H.,Jung.S-P.,Yen.S.C. Flow distribution in the manifold of PEM fuel cell stack. Journal of Power Sources 2007; 173:249–263

Chen.L., Cao.T-F.,Li.Z-H.,He.Y-L.,Tao.W-Q. Numerical investigation of liquid water distribution in the cathode side of proton exchange membrane fuel cell and its effects on cell performance. international Journal of Hydrogen Energy 2012; 37:9155-9170

Choi,K.-S.,Kim,H.-M.,Moon,S.-M.2010. Numerical studies on the geometrical characterization of serpentine flow-field for efficient PEMFC. International Journal of Hydrogen Energy.36:1613-1627

Cooper,N.J.,Smith,T.,Santamaria,A.D.,Park,J.W.2016. Experimental optimization of parallel and interdigitated PEMFC flow-field channel geometry. International Journal of Hydrogen Energy.41:1213-1223

Cooper,N.J.,Santamaria,A.D.,Becton,M.K.,Park,J.W.2017. Investigation of the performance improvement in decreasing aspect ratio interdigitated flow field PEMFCs. Energy Conversion and Management.136:307-3617



Cui,D.,Tu,B.,Cheng,M.2015. Effects of cell geometries on performance of tubular solid oxide fuel cell.Journal of Power Sources.297:419-426

Çelik,S.2018.Akış kanalı tasarımının pem yakıt pili performansına etkilerinin incelenmesi.Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,7:407-416

Celik,E. (2020).Pem yakıt hücrelerinde su ve ısı yönetimine yönelik biyo esinlenmeli kanal tasarımı ve optimizasyonu [Doktora tezi, Bursa Uludag Üniversitesi].Acık Erisim@BUU. <http://hdl.handle.net/11452/15327>

Celik, E., Karagoz, I.(2023). Investigation of the effects of intermediate reservoirs and intermediate feedings applications on the performance of proton exchange membrane fuel cells, Fuel, Volume 339, 126975. ISSN 0016-2361, doi:10.1016/j.fuel.2022.126975.

Eker,E.,Taymaz.İ.2013. Akış kanalı genişliğinin pem tipi yakıt hücresi performansına etkisinin İncelenmesi.SAÜ Fen.Bil.Der.,17:195-200

Ekiz,A.,Camcı,T.,Türkmen,İ.,Sankır,M.,Uslu,S.,Baker,D.K.,Ağar,E.2011.Pem tipi yakıt pilleri için çift kutuplu akış plakalarının modellenmesi.Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der.,26:591-605

Gelis,K.(2019).Farklı akış alanı tasarımlarının yakıt pili performansına etkisinin deneysel ve sayısal incelenmesi(Tez No.556752).[Doktora tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi].UlusalTezMerkezi.[https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?i d=YV94wDswE\\_cQvIjCr9kYA&no=GMj0VJqjvGhegH6GI3CaFA](https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?i d=YV94wDswE_cQvIjCr9kYA&no=GMj0VJqjvGhegH6GI3CaFA)

Gutierrez,D.L.,Guerrero,A.H.,Alvarado,B.R.,Raya,I.P.,Ordaz,A.A.2013.Performance analysis of proton exchange membrane fuel cell using tree-shaped designs for flow distribution.International journal of hydrogen energy,38:14750-14763

Guvelioglu,G.H.,Stenger,H.G.2005. Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources.147:95-106

Huang. F., Qiu. D., Xu.Z., Peng.L.,Lail.X. Analysis and improvement of flow distribution in manifold for proton exchange membrane fuel cell stacks. Energy 2021;226:120427

Jackson,J.M.,Hupert,M.L.,Soper,S.A.2014. Discrete geometry optimization for reducing flow non-uniformity, asymmetry, and parasitic minor loss pressure drops in Z-type configurations of fuel cells.Journal of Power Sources.269:274-283

Jiao.D.,Jiao.K.,Du.Q. Numerical investigations of vapor condensation and water transport in gas diffusion layers of PEMFC. International Journal of Heat and Mass Transfer 2021;177:121543

Jiao,K.,Zhou,B.2007. Effects of electrode wettabilities on liquid water behaviours in PEM fuel cell cathode. Journal of Power Sources.175:106-119

Karagöz İ., Çelik E., Ara rezervuarlara, çok noktalı beslemeye ve ikincil boşaltma kanallarına sahip yakıt hücresi, Patent Tescil No: TR 2021 004685 B, 2022

- Khabbazi,A.E.,Richards,A.J.,Hoorfar,M.2010. Numerical study of the effect of the channel and electrode geometry on the performance of microfluidic fuel cells. *Journal of Power Sources*.195:8141-8151
- Khazaee,L.,Rava,A.2016. Numerical simulation of the performance of solid oxide fuel cell with different flow channel geometries. *Energy*.119:235-244
- Khazaee,I.,Ghazikhani,M.2010. Performance improvement of proton exchange membrane fuel cell by using annular shaped geometry. *Journal of Power Sources*.196:2661-2668
- Kılıçoğlu, A. E. 2008. Pem Yakıt Pilinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Modellenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- Kloess,J.P.,Wang,X.,Liu,J.,Shi,Z.,Guessous,L.2009.Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells.*Journal of power sources*.188:132-140
- Köseler, S. 2009. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi Membran Elektrolit Bileşkesinin Optimizasyonu.Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
- Le,A.D.,Zhou.B.2008. A general model of proton exchange membrane fuel cell.*Journal of power sources*,182:197-222
- Le.A.D., Numerical and experimental studies on transport phenomena of proton exchange membrane fuel cells. 2010. ISBN: 978-0-494-71664-9
- Lee,S.,Jeong,H.,Ahn,B.,Lim,T.,Son,Y.2008. Parametric study of the channel design at the bipolar plate in PEMFC performances. *International Journal of Hydrogen Energy*.33:5691-5696
- Li,X.,Sabir,I.,Park,J.2007.A flow channel design procedure for pem fuel cells with effective water removal. *Journal of power sources*.163:933-942
- Limjeerajarus,N.,Charoen-amornkitt,P.2015. Effect of different flow field designs and number of channels on performance of a small PEFC. *Hydrogen Energy*.40:7144-7158
- Lu,J.B.,Wei,G.H.,Zhu,F.J.,Yan,X.H.,Zhang,J.L.2019.Pressure effect on the pemfc performance.*Fuel Cells*.19:211-220
- Manso,A.P.,Marzo,F.F.,Barranco,J.,Garikano,X.,Mujika,M.G.2012. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review. *International Journal of Hydrogen Energy*.37:15256-15287
- Mehta,V.,Cooper,J.S.2003.Review and analysis of pem fuel cell design and manufacturing. *Journal of power sources*.114:32-53

Mondal. B., Chattarjee.D. Numerical Investigation of the Water Droplet Transport in a PEM Fuel Cell with Serpentine Flow Channel. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 2016; 9:3:1057-1071

Ozeti,K.(2018,August,12).Yakıtpilinedir.Mühendisbeyinler.<https://www.muhendisbeyinler.net/yakit-pili-nedir/>

Özdoğan,M.,Namlı,L.,Durmuş,A.2016.Pem yakıt hücrelerinde geometrik boyutların hücre performansı üzerine etkilerinin sayısal incelenmesi.MAKÜ FEBED,7:116-124

Rostami,L.,Nejad,P.M.G.,Vatani,A.2016. A numerical investigation of serpentine flow channel with different bend sizes in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energy*.97:400-410

Sangtabi. A.R., Kianifar. A., Alizadeh. E. Effect of water vapor condensation on the flow distribution in a PEM fuel cell stack. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2020; 151:191471

Shimpalee,S.,Van Zee,J.W.2006. Numerical studies on rib&channel dimension of flow-field on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*.32:842-856

Taymaz,I.,Benli,M.2010. Numerical study of assembly pressure effect on the performance of proton exchange membrane fuel cell.*Energy*.35:2134-2140

Turkmen,A.C.,Celik,C.,Esen,H.2019. The statistical relationship between flow channel geometry and pressure drop in a direct methanol fuel cell with parallel channels. *International Journal of Hydrogen Energy*.44:18939-18950

Um,S.,Wang,C.-Y.,Chen,K.S.2000. Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*.147:4485-4493

Xie,Q.,Huang,Y.2018.Multi-objective Optimization of Channel Geometry for A Proton Exchange Membrane Fuel Cell.*Energy Procedia*.152:889-894

Wilberforce,T.,ElHassan,Z.,Ogungbemi,E.,Ijaodola,O.,Khatib,F.N.,Durrant,A.,Thompson,J.,Baroutaji,A.,Olabi,A.G. 2019.A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.111:236-260

Yan,X.,Guan,C.,Zhang,Y.,Jiang,K.,Wei,G.,Cheng,X.,Shen,S.,Zhang,J.2019. Flow field design with 3D geometry for proton exchange membrane fuel cells. *Applied Thermal Engineering*.147:1107-1114

Yang,W.-J.,Wang,H.-Y.,Lee,D.-H.,Kim,Y.-B.2015. Channel geometry optimization of a polymer electrolyte membrane fuel cell using genetic algorithm.*Applied Energy*.146:1-10

You,L.,Liu,H.2001.A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.45:2277-2287

Yoon,Y.-G.,Lee,W.-Y.,Park,G.-G.,Yang,T-H.,Kim,C.-S.2004. Effects of channel configurations of flow field plates on the performance of a PEMFC.*Electrochimica Acta*.50:709-712

Yuan,W.,Tang,Y.,Pan,M.,Li,Z.,Tang,B.2009. Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance. *Renewable Energy*.35:656-666