

**BALIK SOLUNGAÇLARINDAN ESİNLENEREK
GELİŞTİRİLEN PEM YAKIT PİLİ AKIŞ
ALANI PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Adem DÜZENLİ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BALIK SOLUNGAÇLARINDAN ESİNLENEREK GELİŞTİRİLEN PEM YAKIT PİLİ
AKIŞ ALANI PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Adem DÜZENLİ
0009-0003-9966-3938

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Adem DÜZENLİ tarafından hazırlanan “BALIK SOLUNGAÇLARINDAN ESİNLENEREK GELİŞTİRİLEN PEM YAKIT PİLİ AKIŞ ALANI PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

- | | | | |
|---------------|---|--|------|
| Başkan | : | Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ 0000-0002-7442-2746 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Prof. Dr. Ali SÜRMEŒ 0000-0002-1045-6779 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |
| Üye | : | Doç. Dr. Osman TURAN 0000-0003-3421-2020 Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı | İmza |

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
.././.....

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.

07/07/2023

Adem DÜZENLİ

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı
Tarih

Öğrencinin Adı-Soyadı
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BALIK SOLUNGAÇLARINDAN ESİNLENEREK GELİŞTİRİLEN PEM YAKIT PİLİ AKIŞ ALANI PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Adem DÜZENLİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Yakıt pilleri bir dizi elektrokimyasal tepkimeler sonucunda hidrojenin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde önemli rol oynar. Özellikle Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt pilleri; düşük sıcaklıkta çalışabilme, hızlı devreye girme, yüksek güç yoğunluğu gibi özellikleriyle enerji, ulaşım ve uzay gibi alanlarda ön olana çıkmaktadır. Buna karşın PEM yakıt pilleri; çalışma verimliliğini arttırmak amacıyla çeşitli akış alan tasarımları üzerinde çalışmalar hem deneysel hem de sayısal olarak sürdürülmektedir. Bu tez kapsamında, literatürde çalışılmış olan akış alanı tasarımlarından farklı olarak bir bio benzeşim modeli olan balık solungaç akış alanı incelenerek bu akış alanına sahip olan bir yakıt pilinin performansını incelemek amaçlanmıştır.

Bu tez kapsamında gaz değişim kapasitesi yüksek olan balık solungaçlarından esinlenerek yeni bir akış alanı tasarımı geliştirilmesi daha yüksek performansa sahip yakıt pili geliştirileceği sonucuna varılmıştır. Basınç, sıcaklık ve farklı çalışma debilerinde performans değerlendirme analizleri üç farklı basınç, üç farklı sıcaklık ve iki farklı debi oranında gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar polarizasyon eğrileri ile çeşitli kombinasyonlarla yorumlanmıştır.

Çalışma sonunda %50-50 besleme düzeninde maksimum güç yoğunluğu hemen hemen aynı olsa da sınırlayıcı güç yoğunlukları arasındaki fark artmıştır. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere düşük akım yoğunluklarında pilin %50-50 oranında çalıştırılması verimli bir kullanım sağlamaya müsait görünmekteyken, akım yoğunluğunun yükseldiği durumlarda %70-30 besleme oranına doğru geçiş yapılabileceği bir pil işletim stratejisi olarak analizler sonucunda ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt pili, Yakıt pili modellemesi, Yakıt pili performansı, HAD, Balık solungaç akış alanı
2023, x + 82 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

NUMERICAL INVESTIGATION OF PEM FUEL CELL FLOW FIELD PERFORMANCE INSPIRED FROM FISH GILL

Adem DÜZENLİ

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

Supervisor: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Fuel cells play an important role in the conversion of hydrogen into electrical energy as a result of electrochemical reactions. Especially Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cells; It comes to the fore in fields such as energy, transportation and space with its features such as low temperature operation, fast switching on, and high power density. On the other hand, PEM fuel cells; In order to increase the working efficiency, studies on various flow field designs are carried out both experimentally and numerically. In this thesis, it is aimed to examine the performance of a fuel cell with this flow field by examining the fish gill flow field, which is a biosimilarity model, different from the flow field designs studied in the literature.

Within the scope of this thesis, it was concluded that a new flow field design, inspired by fish gills with high gas exchange capacity, will be developed and a higher performance fuel cell will be developed. Performance evaluation analyzes at pressure, temperature and different operating flow rates were carried out at three different pressures, three different temperatures and two different flow rates, and the results were interpreted with various combinations of polarization curves.

At the end of the study, although the maximum power density was almost the same in the 50-50% supply order, the difference between the limiting power densities increased. As it is understood from the results, while 50-50% operation of the battery at low current densities seems suitable to provide efficient use, it has emerged as a result of the analysis as a battery operating strategy that it can be switched towards 70-30% supply ratio in cases where the current density increases.

Key words: PEM fuel cell, Fuel cell modelling, Fuel cell performance, CFD, Fish gill flow area
2023, x + 82 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve lisans hayatım boyunca vermiş olduğu destekler ile beni yönlendiren, iş hayatımda sonuca giden yollarda vermiş olduğu tavsiyeler ile çözüme götüreren ve yürütücüsü olduğu TÜBİTAK projesinde bana çalışma olanağı sunan, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Gerek akademik çalışmalarım sırasında gerek iş hayatımda bilgi ve tavsiyeleriyle beni destekleyen, bana yol gösteren Arş. Gör. Erman ÇELİK' e teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anne ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Lise yıllarımdaki mesleki stajımda karşılaştığım ve daha sonra beraber çalışma fırsatı bulduğum Hasan KAPLAN ve ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı 118M485 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Adem DÜZENLİ
07/07/2023

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|--|--------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | v |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI | 3 |
| 2.1. Yakıt Pilleri..... | 3 |
| 2.1.1. Yakıt pillerinin tarihçesi | 3 |
| 2.1.2. Yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları..... | 5 |
| 2.1.3. Yakıt pili çeşitleri..... | 6 |
| 2.2. PEM Yakıt Pilleri..... | 12 |
| 2.2.1. PEM yakıt pili çalışma prensibi | 12 |
| 2.2.2. PEM yakıt pili parçaları | 14 |
| 2.2.3. PEM yakıt pili uygulama alanları | 19 |
| 2.3. Kaynak Araştırması | 21 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM | 29 |
| 3.1. Yakıt Pillerinde Temel Denklemler | 29 |
| 3.1.1. Gerilim kayıpları | 31 |
| 3.1.2. Polarizasyon eğrisi | 32 |
| 3.1.3. Yakıt hücresi verimliliği | 33 |
| 3.1.4. PEM yakıt pilleri korunum denklemleri | 34 |
| 3.2. Tasarlanan PEM Yakıt Pili | 40 |
| 3.3. PEM Yakıt Hücresi Sayısal Analizi..... | 43 |
| 3.3.1. Pem yakıt pili geometri oluşturma | 43 |
| 3.3.2. Ağ yapısı ve sınır şartlarını oluşturma | 46 |
| 3.3.3. Eleman sayısından bağımsızlık..... | 49 |
| 3.3.4. Çözüm prosedürü | 52 |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA..... | 56 |
| 4.1. %70-30 Sıcaklık-Performans İlişkisi | 56 |
| 4.2. %50-50 Sıcaklık-Performans İlişkisi | 61 |
| 4.3. %70-30 İşletme Basıncı-Performans İlişkisi | 65 |
| 4.4. %50-50 İşletme Basıncı-Performans İlişkisi | 70 |
| 4.5. Debi-Pil Sıcaklığı Performans İlişkisi | 74 |
| 5. SONUÇ | 77 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| Simgeler | Açıklama |
|----------------|---|
| H | Entalpi |
| S | Entropi |
| G | Gibbs serbest enerjisi |
| n | Elektron sayısı |
| F | Faraday sabiti |
| V | Hücre potansiyeli |
| η | Verim |
| ρ | Akışkan yoğunluğu |
| \vec{u} | Akışkanın hız vektörü |
| S_m | Kaynak terimi |
| M | Molar kütle |
| i | Akım yoğunluğu |
| P | Statik basınç |
| \vec{g} | Yer çekimi ivmesi |
| \vec{F} | Dış kuvvetler |
| $\bar{\tau}$ | Gerilme tensörü |
| μ | Dinamik viskozite |
| I | Birim tensörü |
| S_u | Kaynak terimi |
| K | Geçirgenlik |
| ε | Gözeneklilik |
| k_{eff} | Etkin ısı iletim katsayısı |
| k_t | Türbülans ısı iletkenliği |
| \vec{J}_j | Difüzyon akısı |
| S_h | Kaynak terimi |
| $R_{an,kat}$ | Anot ve katot katalizör tabakalarının hacimsel transfer akımı |
| Y_j | Kütle kesri |
| T_{ref} | Referans sıcaklık |
| σ_{sol} | Katı faz iletkenliği |
| ϕ_{sol} | Katı faz potansiyeli |
| $S_{\phi,sol}$ | Katı faz potansiyeli için kaynak terimi |
| σ_{mem} | Membran iletkenliği |
| ϕ_{mem} | Membran potansiyeli |
| $S_{\phi,mem}$ | Membran potansiyeli için kaynak terimi |
| j^{ref} | Referans akım yoğunluğu |
| γ | Konsantrasyon üssü |
| α | Transfer katsayısı |
| V_{oc} | Pilde oluşan elektriksel potansiyel |
| C_j | Molar konsantrasyon |
| D_j^{eff} | Düzeltilmiş difüzyon sabiti |
| r | Katalizör yüzey alanının hacme oranı |

| | |
|----------------------|---|
| $y_{j,yüzey}$ | Tepkime yüzeyindeki kütle oran |
| $y_{j,merkez}$ | Hücre merkezindeki kütle oran |
| D_j^0 | Referans sıcaklık ve basınçtaki (P_0, T_0) kütle difüzyon katsayısı |
| P_0 | Referans basınç |
| T_0 | Referans sıcaklık |
| γ^P, γ^t | Denklemlerin sabitleri |
| r_s | Gözenek blokaj üssü |
| λ | Su içeriği |
| β, ω | Model sabitleri |
| M_{mem} | Membranın eşdeğer ağırlığı |
| D_1 | Membrandaki su difüzyonu |
| a | Su aktivitesi |
| P_{wv} | Su buhar basıncı |
| P_{sat} | Doyma basıncı |
| t | Zaman |

Kısaltmalar

Açıklama

| | |
|-------|--|
| PEMFC | Polimer elektrolit membran yakıt pilleri |
| PEM | Polimer elektrolit membran |
| HAD | Hesaplamalı akışkanlar dinamiği |
| CFD | Hesaplamalı akışkanlar dinamiği |
| GDL | Gaz difüzyon tabakaları |
| UDF | Kullanıcı tanımlı fonksiyonlar |
| PNM | Gözenek ağ yapısı |
| AYP | Alkali yakıt pilleri |
| DMYP | Direkt metanol yakıt pilleri |
| FAYP | Fosforik asit yakıt pilleri |
| EKYP | Erimiş karbonat yakıt pilleri |
| KOYP | Katı oksit yakıt pilleri |
| MEA | Membran elektrot birlikteliği |
| an | anot |
| kat | katot |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 2. 1. İlk yakıt hücresi..... | 3 |
| Şekil 2. 2. Alkali yakıt pili (Aydın, 2007) | 8 |
| Şekil 2. 3. Fosforik asit yakıt pili (Aydın, 2007) | 10 |
| Şekil 2. 4. Erimiş karbonat yakıt pili (Aydın, 2007)..... | 11 |
| Şekil 2. 5. Katı oksit yakıt pili (Aydın, 2007)..... | 12 |
| Şekil 2. 6. PEM yakıt pili (Aydın, 2007) | 13 |
| Şekil 3. 1. Gerilim kayıpları (Özdemir, 2012)..... | 32 |
| Şekil 3. 2. Polarizasyon Eğrisi | 33 |
| Şekil 3. 3. Balık solungaç iç yapısı ve oksijen değişim mekanizması | 40 |
| Şekil 3. 4. Balık solungaç modelinin akış kanallarına uygulanması..... | 41 |
| Şekil 3. 5. Solungaç tipi akış alanı ön görünüş | 42 |
| Şekil 3. 6. Solungaç tipi akış alanı perspektif görünüş | 42 |
| Şekil 3. 7. PEM yakıt hücresi fiziksel modeli | 44 |
| Şekil 3. 8. Solungaç tipi akış alanı anot tarafı..... | 44 |
| Şekil 3. 9. Solungaç tipi akış alanı katot tarafı..... | 45 |
| Şekil 3. 10. Solungaç tipi akış alanı perspektif ve kesit görünüşü..... | 45 |
| Şekil 3. 11. Çözüm alanı bloklamış solungaç tipi yakıt pili sayısal modeli..... | 47 |
| Şekil 3. 12. Solungaç tipi akış alanı sayısal çözüm ağ yapısı | 47 |
| Şekil 3. 13. Solungaç tipi akış alanı membran, KT anot ve katot ağ yapısı..... | 48 |
| Şekil 3. 14. Ağ yapısında eleman kalitesi çarpıklık | 49 |
| Şekil 3. 15. Ağ yapısında eleman kalitesi ortagonel kalite | 49 |
| Şekil 3. 16. İterasyon sayısına bağlı olarak hata ve değerlerin değişimi (Çelik 2020) | 53 |
| Şekil 4. 1. Yakıt pili polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması..... | 56 |
| Şekil 4. 2. %70-30 1 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu | 57 |
| Şekil 4. 3. %70-30 2 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu | 58 |
| Şekil 4. 4. %70-30 3 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu | 59 |
| Şekil 4. 5. 70°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot..... | 60 |
| Şekil 4. 6. 45°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot..... | 60 |
| Şekil 4. 7. 20°C gaz akış kanallarında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot..... | 61 |
| Şekil 4. 8. %50-50 1 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu | 62 |
| Şekil 4. 9. %50-50 2 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu | 63 |
| Şekil 4. 10. %50-50 3 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu | 63 |
| Şekil 4. 11. 70°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot..... | 64 |
| Şekil 4. 12. 45°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot..... | 64 |
| Şekil 4. 13. 20°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot..... | 65 |
| Şekil 4. 14. %70-30 20°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri..... | 66 |
| Şekil 4. 15. %70-30 45°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri..... | 67 |
| Şekil 4. 16. %70-30 70°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri..... | 68 |
| Şekil 4. 17. 1 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot | 68 |
| Şekil 4. 18. 2 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot | 69 |
| Şekil 4. 19. 3 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot | 69 |
| Şekil 4. 20. 1 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen | 70 |
| Şekil 4. 21. 1 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen | 70 |
| Şekil 4. 22. %50-50 20°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri..... | 71 |
| Şekil 4. 23. %50-50 45°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri..... | 71 |
| Şekil 4. 24. %50-50 70°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri..... | 72 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Şekil 4. 25. | 1 atm basınçda gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot | 72 |
| Şekil 4. 26. | 2 atm basınçda gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot | 73 |
| Şekil 4. 27. | 3 atm basınçda gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot | 73 |
| Şekil 4. 28. | 1 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen | 74 |
| Şekil 4. 29. | 2 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen | 74 |
| Şekil 4. 30. | 1 atm basınç altında performans değerlendirmesi | 75 |
| Şekil 4. 31. | 2 atm basınç altında performans değerlendirmesi | 75 |
| Şekil 4. 32. | 3 atm basınç altında performans değerlendirmesi | 76 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Çizelge 2. 1. Yakıt pili türleri (Özdal, 2018) | 7 |
| Çizelge 2. 2. PEM yakıt pili uygulama alanları | 20 |
| Çizelge 3. 1. Geometrik boyutlar | 46 |
| Çizelge 3. 2. Ağ Eleman sayısına karşılık akım ve değerlerinin değişimi..... | 50 |
| Çizelge 3. 3. Elektrokimyasal parametreler | 54 |
| Çizelge 3. 4. Çalışma şartları A) %50-%50 B) %70-%30 | 55 |

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel ısınmayı kontrol altında tutmak için sera gazı emisyonlarının azaltılması en acil hedeftir. Avrupa iklim politikasına göre bu, birkaç ara adım ve emisyon hedefleriyle 2050 yılına kadar enerji sektörünün tamamen karbondan arındırılması anlamına geliyor (European Commission, 2019; European Parliament, 2019). Gelecekteki emisyon mevzuatını yerine getirmek için binek araçlarını elektrikleştirmek için güçlü bir eğilim olsa da, uzun mesafeli taşımacılık, arazi uygulamaları ve hava ve gemi trafiği gibi diğer mobilite sektörleri için teknik çözümler kolay değildir (Bethoux, 2020). Mevcut akü çözümlerinin ağırlığı ve hacmi ile birlikte yüksek miktarda depolanmış enerji gereksinimi, alternatifler üzerinde araştırma yapılmasını gerektirmektedir.

Birçok Avrupa Birliği ülkesi, güneş ve rüzgar santrallerinden gelen fazla enerjileri depolamak ve dağıtmak için önemli bir çözüm olarak sürdürülebilir hidrojen üretiminden bahsetmektedir. Su-gaz reaksiyonuna dayalı proseslerin yanı sıra, enerji kaynağı CO₂ içermeyen kaynaklar tarafından karşılandığı sürece, suyun elektrolizi "yeşil" hidrojenin en sürdürülebilir üretim yolu olarak kabul edilir. Hidrojen, bir yandan, elektrik şebekesini stabilize etmek için ve diğer yandan mobil uygulamalarda hareket etmek için bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

Hidrojenin kimyasal enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi, içten yanmalı motorlar veya yakıt hücresi/elektrik motoru bileşikleriyle gerçekleştirilebilir. Hangi teknolojinin galip geleceği tartışması devam ederken, yakıt hücresi çözümünün dönüşüm verimliliği ve yerel kirletici emisyonları açısından tartışılmaz avantajları var. Bu nedenle, yüksek enerji talepleri olan mobil uygulamalar için umut verici bir konsept olarak kabul edilir. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücreleri (PEMFC'ler), yüksek güç yoğunlukları, yüksek verimlilikleri ve düşük çalışma sıcaklıkları nedeniyle özellikle uygundur. Anotta hidrojeni ve katotta havadan oksijen tüketirler ve kimyasal enerjiyi elektrik gücü çıkışına dönüştürürler. Güç üretiminden sonra ortaya çıkan yan ürün sadece saf sudur.

Konu üzerinde çalışmaya başlayan araştırmacılar çeşitli yakıt pili tasarımları üzerinde çalışmaya başladılar. Yaygın olarak araştırılan akış alanı modelleri, serpantin, çoklu

serpantin, paralel, parmaklar arası, pim tipi, entegre, spiral tip, paralel serpantin ve ağ tipi akış alanlarıdır (Taccani & Zuliani, 2011; J. Wang, 2015). Her tasarımın, PEMFC performansı üzerinde kendi etkisini uygulayan kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Çeşitli akış alanı tasarımlarının etkisini araştırmak için PEMFC'nin performansı üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Jeon ve ark. 2008; L. Wang & Liu, 2004). Araştırmacılar, yaprak damarları ve insan akciğer kan damarı sistemi gibi doğal olarak esinlenen akış alanlarının PEM yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkisini incelemeye başladılar. Sebep olarak ise biyolojik dallanma sistemlerinde dağıtılan besinler optimum bir dzenlemeye sahiptir ve verimlidirler. Bu tasarımların seğılmesinin ana nedeni, üniform reaktan dağılımı ve daha iyi su yönetimi sunmasıdır.

Literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak ve günümüzdeki teknolojik gelişmeler değerlendirilerek bu çalışmada bir biyo benzeşim çalışmasına yer verilmesine karar verilmiştir. Geliştirilirken yeni modelde çalışma prensibi göz önüne alınarak biyo benzeşim kökeni olarak balık solungaçlarında sudaki oksijenin solungaç lamelleri arasından geçerken kana ve kandaki karbondioksitin suya geçiş mekanizmasından esinlenilmiştir ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak çözüme kavuşturulmuştur. Tasarımı gerçekteştirilen akış alanının çalışma prensibi Bölüm 3.2'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu biyo benzeşim yöntemi ile tasarımı gerçekteştirilmiş olan bir yakıt hücresinin farklı çalışma koşulları altında (sıcaklık, basınç, debi vb.) ve yakıt pilinden beklenen farklı güç çıktıları altında pilin davranışının sayısal yöntemler kullanılarak belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yeni nesil bir akış alanının farklı koşullar altındaki dinamik karakteristiği çıkarılarak bir havacılık, uzay, otomotiv vb. uygulamalarında güç sistemi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

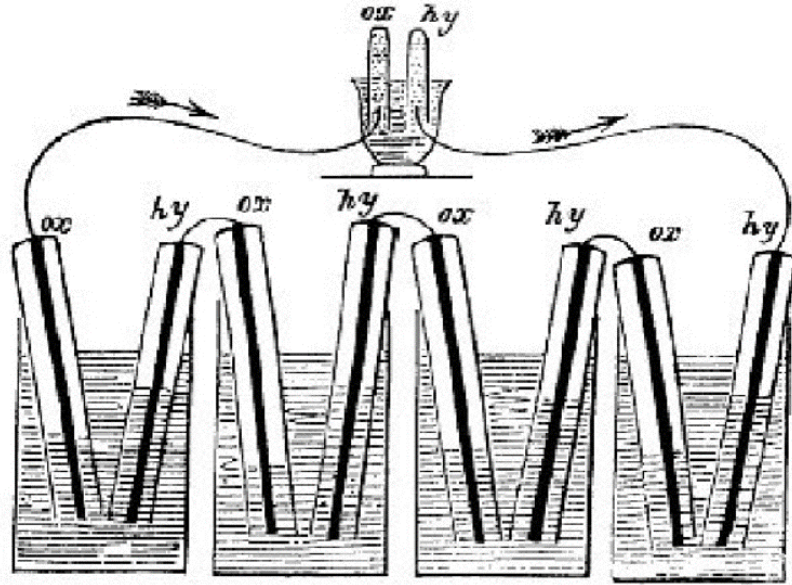
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri kimyasal olarak gerçekleşen bir reaksiyonun ürünü neticesinde elektrik üretebilen cihazlardır. Elektrik üretimi esnasında yanma gerçekleşmez bu sebeple zehirli gaz gibi atıklar ortaya çıkmaz. Enerji üretimi yakıtı yakmak yerine oksijen ile elektrokimyasal reaksiyona girerek gerçekleşir. Normal bir pil gibi çalışmasının yanı sıra oksijen tedarik edildiği sürece devamlı olarak güç üretiminde bulunulabilir.

2.1.1. Yakıt pillerinin tarihçesi

Gazlı yakıt hücresi fikri, "yakıt hücresinin babası" olarak tanınan Gallerli bir yargıç, mucit ve fizikçi olan Sir William Grove'a kadar götürebilir. 1838'de yapmış olduğu bir yakıt hücresi çizimi Şekil 2. 1'de görülebilir. 1839'da Grove, elektrik üreterek doğru katalizörle ters yönde gerçekleştirilebileceğini keşfetti. 1842'de Grove, "gazlı volta pili" adını verdiği 50 hücreli yakıt pili geliştirdi. Bununla birlikte, Grove'un keşfinden sonra yaklaşık bir asır boyunca, yakıt pili pratikte herhangi bir ilerleme kaydetmedi ve yalnızca bilimsel bir merak olarak kaldı.



Şekil 2. 1. İlk yakıt hücresi

1937'de bir İngiliz olan Francis T. Bacon, pratik yakıt hücreleri üzerinde çalışmaya başladı. 1950'lerin sonunda 5 kW kapasiteli 40 hücreli bir yakıt pili geliştirdi ve bir kaynak makinesine, dairesel testereye ve forklifte güç verebildi (Barbir, 2005).

PEM yakıt hücresi, General Electric'te (GE) 1960'ların başında Thomas Grubb ve Leonard Niedrach'ın çalışmasıyla icat edildi. Başlangıçta katı elektrolitler olarak sülfonatlı polistiren membranlar kullanıldı, ancak kısa süre sonra 1966'da bunların yerini Nafion® membranlar aldı. Nafion membranın performans ve dayanıklılık açısından üstün olduğu kanıtlandı ve bugün hala kullanılan en popüler membrandır.

1950 ve 1970 yılları arasında PEM yakıt hücresi teknolojisi, ana amacı Apollo için ekipman ve prosedürleri test etmek olan NASA'nın Gemini Programının bir parçası olarak hizmet etti. Görevde kullanılmak üzere GE'nin PEM yakıt hücreleri seçildi, ancak en eski model PB2 hücresi, iç hücre kontaminasyonu ve zardan oksijen sızıntısı dahil olmak üzere defalarca teknik zorluklar yaşattı. Gemini I ila IV bunun yerine pillerle uçtu. PB2'nin arızaları ve düşük performansı nedeniyle yeni bir model olan P3 tasarlandı. PEMFC'leri kullanan ilk görev Gemini V idi. Ancak Apollo programında ve uzay mekiğinde bunların yerini alkalın yakıt hücreleri aldı. Bu, PEM yakıt hücrelerinin gelişimini on yıl geciktirdi (Smithsonian Enstitüsü, 2008; Wikipedia, 2023).

Yakıt hücresi sistemleri, yüksek maliyetleri nedeniyle uzay görevleri ve diğer özel uygulamalarla sınırlıydı. 1980'lerin sonu ve 1990'ların başına kadar, Ballard Power Systems (1979'da kuruldu) tarafından yapılan araştırma, PEMFC'lere olan ilginin yeniden canlanmasına ve yakıt hücrelerinin geliştirilmesine yol açtığından, yakıt hücreleri daha geniş uygulamalar için gerçek bir seçenek haline geldi. 1983 yılında Ballard, PEM yakıt hücrelerini geliştirmeye başladı ve bir çok prototip sistemler geliştirdiler (J. Zhang, 2008).

Son yıllarda bir çok otomobil üreticisi, arge firmaları, devlet kuruluşları hidrojen ve yakıt pili araştırmalarını ivmelendirmişlerdir. Bu anlamda dünyamızın kaynaklarını verimli ve tasarruflu bir şekilde kullanabilmek için bu araştırma ve geliştirme faaliyetleri önem arz etmektedir. Bu sebeple gelecekte günlük hayat içerisinde sıkça kullandığımız taşımacılık gibi alanlarda yaygınlaşacaktır (Mançuhan, 2006).

2.1.2. Yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları

Yakıt pillerinin potansiyeli yüksek olmak ile beraber diğer enerji sistemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır (Cavusoğlu, 2006; Song, 2002; Yıldızbilir, 2006).

Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

Yüksek enerji dönüşüm verimliliği: Yakıt hücresi bir diğer enerji sistemlerine göre çok daha yüksek verimle çalışır. Termik sistemlerde elektrik üretiminde verimlilik yaklaşık olarak %35-40'ı geçmez iken yakıt pili enerji sistemlerinde %70 gibi yüksek bir oranda verimli çalışmaktadır.

Düşük düzeyde kirlenici emisyon salınımı: Yakıt hücresinde meydana gelen emisyon miktarı diğer yakıtlara göre ihmal edilebilir düzeydedir. Yan ürün olarak sadece su oluşur. Karbon monoksit (CO), nitrojen oksit (NOx) gibi yakıt hücrelerinde yanmamış hidrokarbonlar veya diğer kirleniciler oluşmaz, oksitleyici nitrojen oksitler hava kullanımında önemsiz de olsa hidrokarbonlar kullanıldığında çok az miktarda karbondioksit (CO₂) üretilir. Günümüzde çevre kirliliği ve insan sağlığına yönelik birçok yasal düzenleme kısıtlamalar varken diğer teknolojiler maliyeti çok fazla artırıyor. Bu sistem diğerlerinden daha çevre dostu olduğu için paha biçilemez.

Çok düşük gürültü: Yakıt hücreleri herhangi bir hareketli parça içermez. Çalışırken gürültü kirliliğine neden olmaz.

Elektrokimyasal reaksiyon kolaylığı: Kimyasal enerji yakıt pilleri vasıtası ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Yakıt için herhangi bir konvertöre veya yakma ünitesine gerek yoktur.

Yakıt türü: Yakıt hücrelerinde hidrojen, metanol ve doğalgaz gibi birden fazla yakıt kullanmak mümkündür.

Modülerlik: Yakıt hücreleri istenilen yere konulabilir ve istenilen kapasitede güç üretilir ve opsiyonel olarak taşınabilir.

Isı geri kazanımı: Yakıt hücrelerinde reaksiyon sonucu yan ürün olarak üretilen ısı, geri kazanılır ve bu ısı buhar santrallerinde kullanılabilir.

Boyut esnekliği: Yakıt hücreleri istenilen boyut ve kapasitede üretilir. Boyutları cep telefonlarında ya da yüksek kapasiteli santrallerde kullanılabilecek kadar küçük veya büyük olabilmektedir. Yakıt pillerinin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

Maliyet: Platin (Pt), Rutenyum (Ru) gibi metallerin kullanıldığı yakıt pilleri, diğer enerji dönüştürme sistemlerine göre daha pahalıdır. Ayrıca bazı yakıt hücrelerinde membran ve yüksek sıcaklık gerektiren teknolojiler üretebilmek için yüksek teknoloji kullanılması, dayanıklı malzeme kullanılması şartı da maliyeti artıran diğer bir nedendir.

Yakıt: Yakıt hücrelerinde yakıt olarak en iyi verim hidrojenden elde edilir. Ancak hidrojen çok yaygın bir yakıt değildir ve depolama koşulları zordur.

Sıcaklık: Bazı yakıt pillerinde istenilen verim ancak yüksek sıcaklıklarda elde edilebilir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklar, pil verimliliğini azaltan bir dizi soruna neden olur.

2.1.3. Yakıt pili çeşitleri

Yakıt pillerinde çeşitli sınıflandırmalar mevcuttur. Yakıt pili bünyesinde kullanılan en yaygın sınıflandırma çeşidi kullanılmış olan elektrolitin cinsine göre yapılan sınıflandırmadır.

Uygulamalarda en çok karşılaşılan yakıt pili türleri için elektrolit malzemesi, çalışma sıcaklığı, elektriksel verimi ve yakıt/oksitleyici türü Çizelge 2. 1’de verilmiştir (Özdal, 2018).

Çizelge 2. 1. Yakıt pili türleri (Özdal, 2018)

| Yakıt Pili | Elektrolit | Çalışma Sıcaklığı | Elektriksel Verim | Yakıt/Oksitleyici |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Alkali | Potasyum hidroksit çözeltisi | Oda sıcaklığı-250°C | %60-70 | H ₂ /O ₂ |
| PEM | Proton iletken elektrolit membran | Oda sıcaklığı-80°C | %40 | 60% H ₂ /O ₂ , hava |
| Direkt Metanol | Polimer iletken membran | Oda sıcaklığı-130°C | %20-30 | CH ₃ OH/O ₂ , hava |
| Fosforik Asit | Sıvı fosforik asit | 160-220°C | %55 | Doğalgaz, biyogaz, H ₂ /O ₂ , hava |
| Erimiş Karbonat | Alkali karbonatlar | 620-660°C | %65 | Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava |
| Katı oksit | Erimiş alkali metal karışımı | 800-1000°C | %60-65 | Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H ₂ /O ₂ , hava |

Yakıt pili çeşitleri aşağıda açıklanmıştır. Bu tez kapsamında PEM yakıt pilleri Bölüm 2.2’de ayrıntılı olarak anlatılmış, bu sebeple bu bölümde incelenmemiştir.

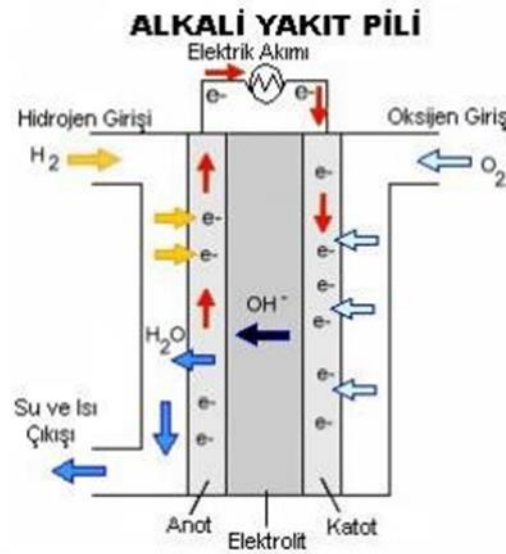
Alkali Yakıt Pilleri (AYP)

Alkalin yakıt hücreleri, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından en farklı vurgulanan yakıt hücrelerinden biridir. Alkalin yakıt hücresi eskiden Bacon yakıt hücresi olarak adlandırılıyordu. Elektrolit olarak kullanılan bu pil tipinde potasyum hidroksit (KOH) sinterlenmiş çift gözenekli anot olarak nikel metal, katot olarak ise lityum zed nikel oksit kullanılmaktadır. PEM yakıt hücrelerinde olduğu gibi çalışma sıcaklığı

ortalama 75°C -100°C arasındadır. Araçlarda kullanıldığında %60 oranında verim gösterir. Alkalın potasyum hidroksit (KOH) pahalı olduğu için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Üretim ve kullanımda da bazı zorluklar vardır. Bu zorluklar:

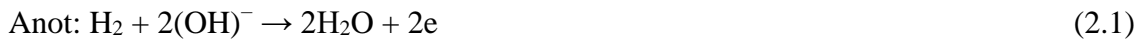
- Anotta nikel metali, katotta gümüş metali kullanılır. Bu katalizörler ile güç üretimi çok düşüktür.
- Potasyum hidroksit (KOH) elektrolit mobil sirkülasyonu nedeniyle ve Karbon dioksit (CO₂) emilimi uygulamalarında pratik değildir. Başka bir deyişle, CO₂ olan karbondioksit (CO₂) karşı çok hassastır, elektrolit içindeki alkaliyi tüketir ve kimyasal reaksiyon sırasında hidroksit iyonu, havadaki (CO₂) çıkarmak için bir ayırma sistemine konsantrasyonu düşürür.

Aşındırıcı elektrolit kullanılması da bir dezavantajdır sebep olarak ise kullanım ömrünün kısa olmasıdır. Bu yüzden ticari uygulamalar için çok uygundur ve nadir olduğu için ulaşım ve uzay araçlarında kullanılır. Alkali yakıt pilleri çalışma prensibi Şekil 2. 2'de verilmiştir.



Şekil 2. 2. Alkali yakıt pili (Aydın, 2007)

Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Direkt Metanol Yakıt Pilleri (DMYP)

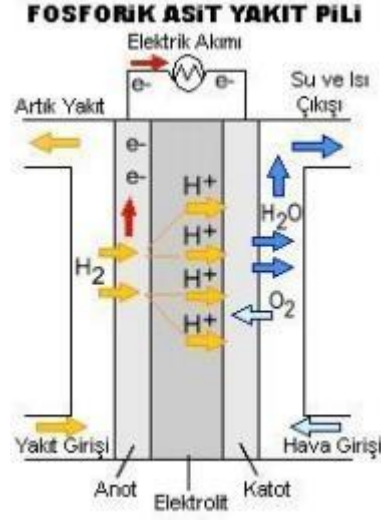
Direkt metanol yakıt hücresi 50-120°C arasındaki sıcaklıklarda çalışır. Özellikleri ve çalışması prensip olarak proton değişim membranlı yakıt piline benzer. Proton değişim membranlı yakıt pilinden farklı yönü, yakıt olarak saf hidrojen yerine metanol kullanılarak hidrojen elde edilebilmesidir. Hidrojen doğrudan metanolden elde edilir, ilave bir hidrojen geri kazanım ünitesine gerek yoktur. Elektrolit olarak polimer membran kullanılmaktadır. Çalışma sırasında yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)

Fosforik asit yakıt pilleri, elektrolit olarak fosforik asit kullanılmasından dolayı bu ismi almıştır. Elektrolit olarak sıvı fosforik asit çözeltisi kullanılırken, genellikle platin katalizör kullanılır. Çoğunlukla sabit elektrik üretiminde kullanılırlar ve 220 - 230°C 'ye kadar çalışabilirler. Anoda verilen yakıt proton ve elektronlara ayrılır ve pozitif yüklü hidrojen iyonları katoda geçer. Elektronlar harici bir elektrik devresinden dolaştırılır. Tamamlayıp buradan katoda geri dönerek elektrik enerjisi üretirler. Ayrıca oksijen, hidrojen iyonları ve elektronlar yan ürünler olarak suyu oluşturur.

Katalizör olarak sadece platin kullanılabilir. Çünkü fosforik asit kararlı bir asittir ve reaksiyona girer. Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP) karbon monoksit gazının 200°C'deki avantajları fosforik asidin suyun kaynama noktasına etkisidir ve bu sıcaklıkta çalışma yeteneğine sahiptir. FAYP'lerin verimi %40-50 arasında olmasına rağmen verim %80'e kadar çıkabiliyorsa atık ısı kombine ısı-güç sisteminde kullanılmaktadır (Bıyıkoğlu, 2003). Fosforik asit yakıt pili çalışma prensibi Şekil 2. 3'de verilmiştir (Aydın, 2007).



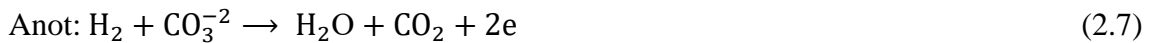
Şekil 2. 3. Fosforik asit yakıt pili (Aydın, 2007)

Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



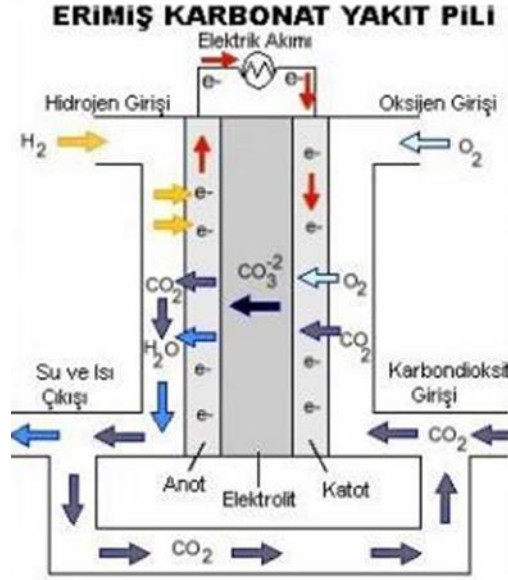
Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit; lityum, sodyum ve potasyum karbonatların birbiri ile birleşiminden oluşur. Günümüzde daha fazla yakıt olarak doğal gazın kullanıldığı, özellikle enerji santrallerinde, endüstriyel ve askeri uygulamalarda, Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC) tercih edilmektedir. Erimiş karbonatlı yakıt hücresi 600-700°C arasındaki sıcaklıklarda çalışır. Bu nedenle yüksek çalışma sıcaklıklarından, katalizör asil metallere gerek yoktur. Bu yakıt pillerinin verimleri normal şartlarda %60'a ulaşırken, kojenere uygulamalarda bu verim %80'lere kadar çıkabilmektedir. Erimiş karbonat yakıt pilinin avantajları, sıcaklık yakıt pillerine göre düşük, yüksek verimlilik ve yakıt kullanımında büyük esneklik sağlamasıdır. Dezavantajı, yüksek işin, sıcaklığın sistem dayanıklılığı ve bileşen ömrü üzerindeki olumsuz etkisi olmasıdır. Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:





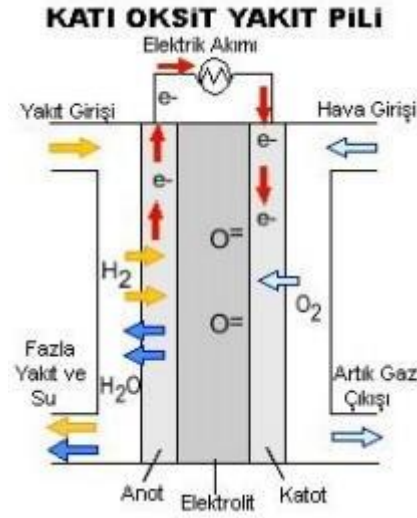
Erimiş karbonat yakıt pili çalışma prensibi Şekil 2. 4'de verilmiştir (Aydın, 2007).



Şekil 2. 4. Erimiş karbonat yakıt pili (Aydın, 2007)

Katı Oksit Yakıt Pilleri (KOYP)

Katı oksit yakıt hücreleri bir iyonik iletken oksit elektrolit varlığında yakıt ve yakıt hücreleridir. Oksidanın elektrokimyasal reaksiyonu sonucu elektrik üreten enerji dönüştürme cihazlarıdır. 1000°C ve altındaki çalışma sıcaklıklarında Katı Oksit Yakıt Pilleri iyi iyonik, iletken ve düşük elektronik iletken özelliklere sahip yoğun bir elektrolit içerir. Katot ve anot elektrot yapıları gözeneklidir ve elektronik iletkenlik gösterir. Çalışma prensibi Şekil 2. 5'te verilmiştir.



Şekil 2. 5. Katı oksit yakıt pili (Aydın, 2007)



2.2. PEM Yakıt Pilleri

2.2.1. PEM yakıt pili çalışma prensibi

Proton değişim membranlı yakıt hücresi (PEMFC), tasarım ve çalışma özellikleri açısından en uygun yakıt hücresidir. PEMFC'ler, 1960'lı yılların başında General Electric tarafından Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) için geliştirilmiştir. İki gözenekli elektrot arasındaki PEMFC iyonu değişimi için katı bir polimer elektrolit kullanılır. Bu elektrotlar protonlar için mükemmel iletkenler ve elektronlar için yalıtkanlardır. Yakıt hücresindeki elektrolit işlevi için ince bir polimer membran kullanılır.

Mikro düzeyde kalınlığa sahip olan zar, proton geçirgen bir yapıya sahiptir ve diğer yakıt hücrelerinden daha fazla güç yoğunluğu nedeniyle düşük hacme ve düşük ağırlığa sahiptir. Bu özelliği, proton değişim membranlı yakıt hücresinin (PEMFC) ulaşım alanındaki en büyük avantajıdır. PEMFC çalışma sıcaklığı pil 100°C'nin altında ve genellikle 60-80°C aralığındadır. Bu sayede düşük çalışma sıcaklığı, bu teknolojiyi nakliye ve ticari uygulamalar için uygun hale getirir.

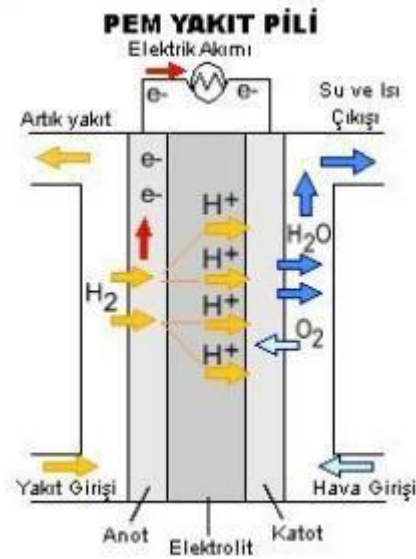
Proton değişim membranlı yakıt hücresinin (PEMFC) en büyük dezavantajları, düşük işletme verimliliği ve katalizör olarak soy metallerin kullanım maliyetinin yüksek olmasıdır.

Karbon monoksit'e karşı aşırı duyarlılıkları bir diğer önemli dezavantaj. Ayrıca yakıtta bulunabilecek karbondioksitin ayrılmasını da gerekmektedir.

Bu durum ek işlemlere ve maliyette daha fazla artışa neden olur. Bu soruna karşı yapılan bazı tasarımlar karbon monoksit'e karşı çok düşük hassasiyete sahiptir. Bu nedenle Rutenyum katalizörleri kullanılır. Yerleşim yerlerinin elektrik ve sıcak su ihtiyacını karşılamak üzere PEM yakıt hücreli güç kaynakları geliştirilmektedir. PEM yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Reaksiyonun gerçekleştirilmesi açısından söz konusu membran içerdiği hidrojen iyonlarını (protonlar iletilmelidir, çünkü elektronları iletirse "kısa devre" durumu ortaya çıkar) iletmelidir. Bu durumda membranın herhangi bir gazın diğer tarafa geçmesine izin vermemesi gerekir. Ayrıca anodun söz konusu membran oksitleyici ortamı ile katotta oluşan indirgeyici ortama dayanıklı olması gerekir.



Şekil 2. 6. PEM yakıt pili (Aydın, 2007)

Şekil 2. 6'da gösterildiği gibi protonlar proton geçirgen membran yoluyla katoda ulaşırken anoda gönderilen hidrojenden elektron ayrılması; elektronlar ayrı bir devredir, onun yardımıyla katoda ulaşır. Katoda gönderilen hava/oksijen, gelen proton ve elektronlar arasında meydana gelen reaksiyon, devreyi tamamlar ve reaksiyon sonucunda bu su açığa çıkar. Katı bir zardan oluşan bu pillerdeki zarın yakıt iyonu geçirgenliği, yani performansı büyük ölçüde meydana gelen nem ile ilgilidir. Bu nedenle membran belirli bir nem seviyesinde tutulmalıdır. Bu amaca ulaşmak için, sistem genellikle hidrojen ve hava bir nem ünitesi aracılığıyla gönderilir. Bu nem seviyesi, sistemin su yönetimini kontrol etmeyi sağlar. Bu nemi sisteme sağlamak için bir ünite dahil edilmelidir. Membran hasarı durumunda performansta önemli düşüş olacaktır. Bu nedenle yakıt hücreli nemlendirmenin etkileri üzerine birçok çalışma bulunmaktadır.

2.2.2. PEM yakıt pili parçaları

Proton değişim membranlı yakıt hücresinin üç temel yapıdan oluştuğu ve bu yapıların önemli rol oynadığı görülmektedir. Bu yapılar polimer yapılı bir elektrolitten (membran) oluşur, elektrolitin her iki yanında bulunan elektrotlardan (anot ve katot) katalizör tabakası, gaz difüzyon tabakası, gaz kanalları ve bir bipolar plakadan oluşur. PEM yakıt pili parçalarının çalışma esnasında belirli özelliklere ve rollere sahip olması gerekir.

Membran

PEM yakıt pillerindeki membranın ana işlevi, protonları anottan katoda taşımaktır; membran polimerleri, protonların taşınmasını kolaylaştıran sülfonik gruplara sahiptir. Diğer işlevleri ise iki gazın karışmasını önleyen ve aktif katalizörler, yüksek sıcaklıklar veya sıcaklık dalgalanmaları, güçlü oksitleyiciler ve reaktif radikaller dahil olmak üzere zorlu koşullara dayanan yakıt ve oksitleyiciyi ayrı tutmayı içerir. Bu nedenle, ideal polimer mükemmel proton iletkenliğine, kimyasal ve termal kararlılığa, dayanıklılığa, esnekliğe, düşük gaz geçirgenliğine, düşük su direncine, düşük maliyete ve iyi bulunabilirliğe sahip olmalıdır (Panchenko, 2004).

PEM yakıt hücrelerinde kullanım için farklı tipte membranlar test edilmiştir. Membranlar genellikle sülfonik gruplar gibi iyonları içerecek şekilde modifiye edilmiş polimerlerdir. Bu hidrofilik iyonik parçalar, zar boyunca proton taşınmasına izin vermenin anahtarıdır.

Polimer yapısının modifiye edilmesinin sebebi ise membran ömrünü iyileştirmek ve membran bozulmasını yavaşlatmak içindir (Kadirov ve ark., 2005).

GE'den Grubb ve Niedrach tarafından imal edilen ilk membranlar yapılarından dolayı kolayca hidrolize olmuşlardır ve zayıf yönleriyle ön plana çıktılar. Bunları kısmen sülfonatlanmış polistiren omurgaya sahip membranlar izlemiştir. Performans açısından yeterli değildiler ve 60 °C'de yalnızca 200 saatlik bir ömüre sahiptiler. Yeterli fiziksel dayanıklılığa sahip olan ilk membranlar American Machine Foundry tarafından üretilen “D” membranlardır. “D” membranları 60 °C'de 500 saat ömre ulaşmış ve yakıt hücrelerinde yedi Gemini uzay görevinde yardımcı güç kaynağı olarak kullanılmıştır (LaConti ve ark., 2003).

Günümüzde en yaygın kullanılan membranlardan biri, DuPont şirketi tarafından oluşturulan bir polimer olan Nafion'dur (Kadirov ve ark., 2005). Teflona benzeyen Nafion yapısı, Nafion' a oksitleyici veya indirgeyici koşullarda uzun süreli stabilite sağlar (Panchenko, 2004). Membran suyu emdiğinde, iyonik alanlar şişer ve kritik bir su içeriğinin üzerinde proton ileten kanallar oluşturur. İletkenlik, su içeriği ile bir noktaya kadar artar. Su içeriği daha da arttıkça, proton konsantrasyonu azalır ve iletkenlik azalır. Nafion 120'nin 60.000 çalışma saatine (43 °C–82 °C) ulaşmıştır (LaConti et al., 2003).

Genel olarak, PEMFC'nin ömrünü belirleyen membranın ömrüdür. Daha ince membranlar, performans verimliliğini ve proton iletkenliğini artırmalarına rağmen, daha düşük fiziksel güce ve daha yüksek gaz geçirgenliğine sahiptir, bu durum bozulmayı hızlandıran daha fazla gaz geçişine izin verir. H₂/hava PEMFC testine göre Nafion 112, 10.000 saatin biraz üzerinde bir ömre ulaşmıştır (LaConti et al., 2003). Katı polimerik elektrolitik membran teknolojisi, elektrokimyasal olarak kararlı olan en ince filmi gerektirir. 50 mikrondan daha ince olan polimerik katı hal yakıt hücresi zarları, yakıt hücresi çalışması sırasında nadiren mekanik olarak çalışmaktadır. Membran kalınlığı azaldığında, arayüzey etkileri gibi yapı dinamikleri ve membranların stabilitesi önemli duruma gelmektedir (Perahia, 2000).

Katalizör Tabakası

Oksijen indirgeme reaksiyonu ile aynı katalizörü kullanan hidrojen indirgeme reaksiyonu arasında büyük bir fark olmasına rağmen, platin hem anot hem de katot için en iyi katalizör olarak kabul edilmiştir. Pek çok araştırmacı, özellikle oksijen indirgeme reaksiyonu için uygun katalizör malzemeleri geliştirmeye yönelik büyük çaba sarf etmiştir ve platin şimdiye kadar hala en iyi seçenektir. Bu nedenle, birçok PEMFC'de anot ve katotta aynı katalizör kullanılır.

Genellikle platin katalizörü, karbon tozu olarak bilinen bir destekçi görevi gören biraz daha büyük parçacıkların yüzeyinde küçük parçacıklar halinde oluşturulur. Bu şekilde platin yüksek oranda bölünür ve yayılır. Böylece yüzey alanının çok büyük bir kısmı reaktanla temas halinde olur, bu da güç artışıyla birlikte katalizör yükünün büyük ölçüde azalmasına neden olur. PEM yakıt hücresi gelişiminin ilk günlerinde katalizör 28 mg/cm² platin oranında kullanıldı. Son yıllarda güç artışı ile kullanım 0.2 mg/cm² civarına düşürülmüştür.

Membran elektrot birlikteliği (MEA) hazırlığını yapabilmek için iki yöntem vardır. İlk yöntemde katalizör direkt membran üzerine uygulanır ve gaz difüzyon tabakalarıyla membran preslenebilir. İkinci yöntemde ise ayrı ayrı katalizör gaz difüzyon tabakasına uygulanır ve membran sonradan bu iki tabaka arasına sıkıştırılarak preslenir(Saygılı, 2013).

Gaz Difüzyon Tabakası

Gaz Difüzyon Tabakası, PEMFC'lerde kritik bileşenlerdir. Akış alanları ve akım toplayıcılarla birlikte GDL'ler (veya destek katmanları), PEM yakıt hücresinin çalışmasından yüksek performans elde etmek için tasarlanmıştır. Ancak GDL'ler, membran ve katalizör tabakasının ayrılmaz bir parçası olabilir veya olmayabilir (Larminie & Dicks, 2003).

GDL'nin ana işlevi gazı dağıtmaktır. Gözenekli yapısı sayesinde her bir reaktan gazın MEA üzerindeki katalizöre etkili difüzyonunu kolaylaştırır. GDL ayrıca karbon destekli katalizör ile çift kutuplu plaka veya diğer akım toplayıcılar arasındaki elektriksel bir

bağlantıdır. Ek olarak GDL, ürün suyunu elektrolit yüzeyinden uzaklaştırdığı için yakıt hücresindeki suyun yönetilmesine de yardımcı olur (US Department of Energy).

GDL genellikle, karbon kağıdı veya karbon bezi gibi, yaklaşık 0,2 ila 0,5 mm kalınlığında ve çift katmanlı bir yapıya sahip karbon bazlı gözenekli bir alt tabakadan yapılır. Akış alanı ve akış kanallarındaki giriş gazı ile temas halinde olan GDL'nin ilk katmanı, bir akım toplayıcı, katalizör katmanı için fiziksel bir destek ve elastik bir bileşen olarak hizmet eden makro gözenekli bir karbon altyapıdır. Elastik bileşen, yakıt hücresinin yakın bir temas kurmak için gereken sıkıyı kaldırmayı kaldırabilmesi için gereklidir. Katalizör tabakası ile temas halinde olan GDL'nin ikinci tabakası, karbon siyahı tozu ve bir miktar hidrofobik maddeden oluşan katalizör tabakası ile daha ince bir mikro gözenekli tabakadır (Williams, Begg, Bonville, Kunz, & Fenton, 2004).

Gaz reaktanlarını katalizör katmanlarına etkili bir şekilde taşımak, düşük elektronik direnç sahip olmak, iyi elektronik teması artıran bir yüzeye sahip olmak ve her uygulama için uygun hidrofobikliğe sahip olmak için ideal bir GDL gereklidir. Özellikle, yakıt hücresi nispeten yüksek bir akım yoğunluğunda çalıştırıldığında en yüksek güç çıkışı için, daha yüksek bir gaz besleme akışı gereklidir, bu da reaktan gazları katalizör yüzeylerine yüksek bir oranda etkili bir şekilde taşımak için ideal GDL'yi gerektirir (Williams et al., 2004).

Bipolar Plaka (Akım Toplayıcı Plaka)

Yakıt hücresi yığınının bileşenleri arasında, çift kutuplu plaka en maliyetli ve problemli olanlardan biri olarak kabul edilir. Maliyet kısıtlamalarını karşılamanın yanı sıra, iki kutuplu plakalar bir dizi başka özelliğe sahip olmalıdır. Uygun, düşük maliyetli çift kutuplu plaka malzemelerinin araştırılması, PEMFC yığını geliştirmede önemli bir endişe kaynağıdır (Yuan ve ark., 2005)

Çift kutuplu plaka, çok işlevli bir bileşendir. Birincil işlevi, akış kanalları aracılığıyla gaz difüzyon elektrotlarına (GDE'ler) reaktant gazlar sağlamaktır. Reaktan taşınmasının etkinliği kısmen akış alanı tasarımı sanatına bağlıdır (Cooper, 2005), bu nedenle iki kutuplu plaka için alternatif bir isim akış alanı plakasıdır. Bipolar plakalar, tek tek hücreler arasında elektrik bağlantıları sağlamalıdır. Katotta üretilen suyu etkili bir şekilde

uzaklaştırmak zorundadırlar (Davies, Adcock, Turpin, & Rowen, 2000). Bipolar plakalar ayrıca gazlara karşı nispeten geçirimsiz olmalı, yığın montajına dayanacak kadar güçlü olmalı ve kolayca seri üretilmelidir. Nakliye uygulamaları için, düşük ağırlık ve düşük hacim esastır (Busick & Wilson, 2000). Çift kutuplu plakalar, çalışma koşullarında oluşan asitli su ($\text{pH} \approx 5$) ile sürekli temas halinde çalıştığından, yüksek kimyasal kararlılık ve korozyon direnci gereklidir. Korozyon sırasında oluşan oksitler yalnızca göç edip katalizörü zehirlenmekle kalmaz, aynı zamanda plakaların elektrik direncini artırabilir ve bu nedenle yakıt hücresi performansının düşmesine neden olabilir. Ek olarak, çift kutuplu levha malzemesi 80°C veya daha yüksek bir sıcaklığa, yüksek nem ve bir elektrik potansiyeline dayanabilmelidir (Heinzel ve ark., 2004). Özetlemek gerekirse, PEMFC çift kutuplu plaka teknik tasarım kriterleri veya ana kısıtlamalar aşağıdaki gibidir:

1. Düşük maliyet (< 2 \$/plaka)
2. Gaz akışı kolaylığı
3. Yüksek elektrik iletkenliği ($> 100 \text{ Scm}^{-1}$)
4. Gazlara karşı düşük geçirimsizlik
5. Yüksek üretilebilirlik
6. Makul güç
7. Düşük ağırlık
8. Düşük hacim
9. Yüksek kimyasal kararlılık ve korozyon direnci ($< 16 \mu\text{Acm}^{-2}$)
10. Düşük termal direnç

Potansiyel iki kutuplu plaka malzemeleri tüm bu gereksinimleri karşılamalı ve uzun vadede ucuz olmalı ve seri üretim amacıyla kolayca bulunabilmelidir (Borup & Vanderborgh, 1995).

Genel olarak grafit, yakıt hücreli çift kutuplu plakalar için mükemmel bir malzemedir, ancak hem malzeme maliyeti hem de işleme maliyeti, büyük ölçekli üretim için çok yüksektir. Grafit plakalar, PEM yakıt hücresi uygulamaları için en etkili malzeme olarak görülmesine de, metal plakalara kıyasla kaplamasız üstün korozyon direnci nedeniyle uzay uygulamaları için tercih edilmektedir. Artık kompozitlere ve metallere daha fazla ilgi gösteriliyor. Yakıt hücresi ticarileştirmesi için en umut verici olanın grafit polimer

kompozitler ve kaplamalı metalik malzemeler olduđu sonucuna varılmıřtır. Karbon polimer kompozitler ve sac metal, potansiyel olarak dűřűk maliyetli malzemelerdir ve űzellikle seri űretim için uygundur űnkű akıř alanları dođrudan karbon polimer kompozitlere kalıplanabilir ve yerleřik bir seri űretim sűrecinde ince sac levhalar plakalara damgalanabilir. Bununla birlikte, tatmin edici iki kutuplu plaka malzemeleri elde etmek için hala çok fazla çalıřma yapılması gerekiyor. Optimum bir çift kutuplu plaka, yalnızca yukarıdaki űzellik gereksinimlerini karřılamamalı, aynı zamanda űretim sűreci de kolay ve ucuz olmalıdır. Çift kutuplu plakaların akıř alanı tasarımı sanatı, yakıt hűcrelerinin performansı için bir bařka űnemli űzelliktir. Potansiyel malzemelerin kaderi nihai olarak tűm bu faktűrler tarafından belirlenecektir (Yuan et al., 2005).

2.2.3. PEM yakıt pili uygulama alanları

PEM yakıt hűcreleri, bir watt'ın kűçük bir kısmından yűzlerce kilovata kadar gű űretebildiđinden, sabit gűten her boyuttaki araca ve cep telefonlarına kadar hemen hemen her uygulamada kullanılabilirler. Çeřitli gű seviyelerine sahip PEM yakıt hűcrelerinin uygulama alanları izelge 2. 2'de listelenmiřtir.

Çizelge 2. 2. PEM yakıt pili uygulama alanları

| Güç seviyesi | Uygulama alanları |
|--------------|---|
| > 1 MW | Yerel dağıtımli elektrik santrali |
| 100 kW–1 MW | Askeri gemiler, denizaltılar ve otobüsler gibi büyük ulaşım araçları; küçük taşınabilir elektrik santrali; küçük sabit elektrik santrali |
| 10 kW–100 kW | Otomobil ve orta boy otobüs gibi ulaşım araçları; orta boy iletişim istasyonu için yedek güç; küçük elektrik santrali |
| 1 kW–10 kW | Motosiklet, ticari araç, araba, yat gibi ulaşım araçları; saha çalışması için kullanılan çeşitli taşınabilir güç cihazları, su altı platformu; yedek güç; kesintisiz güç, konut güç sistemi |
| 100 W–1 kW | Bisiklet, scooter ve tekerlekli sandalye gibi basit sürüş araçları; sırt çantası gücü; sergi veya demo için güç; Küçük hizmetler, terminaller ve bilgisayarlar için UPS |
| 10 W–100 W | Acil durumda çalışan güç kaynağı ve askeri teçhizat gibi taşınabilir güç; pil değişimleri; aydınlatma; sinyal ışığı gücü |
| < 10 W | Küçük taşınabilir güç aygıtı; cep telefonu |

Askeri ve uzay uçuşu kullanımının yanı sıra, daha az uzmanlaşmış yakıt hücresi uygulamaları dört ana gruba ayrılabilir: ulaşım, sabit güç, yedek güç ve taşınabilir güç. PEM yakıt hücreleri, çeşitli güç seviyelerinin mevcudiyeti nedeniyle tüm bu uygulamalar için idealdir. Otomobiller, otobüsler, ticari araçlar, scooterlar ve bisikletler gibi ulaşım uygulamaları şimdiden geniş çapta uygulama gösterilmiştir. Sabit güç uygulamaları, güç kaynağında muazzam esneklik sunan bireysel bir ev, bina veya topluluk düzeyinde olabilir. Ayrıca yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlu jeneratörlere (gürültü, yakıt, güvenilirlik ve bakım hususları nedeniyle) veya pillere (ağırlık, ömür ve bakım hususları nedeniyle) kıyasla yedek güç jeneratörleri olarak çekicidir. Ve taşınabilir güç jeneratörleri olarak küçük yakıt hücreleri, geleneksel pillere göre çeşitli avantajlar sunar (Barbir, 2005).

2.3. Kaynak Araştırması

Literatürde araştırma yapıldığında yakıt pilleri ile alakalı çok sayıda araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile ilgili çalışmalar görülmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde akış alanı tasarımı, biyo benzeşimden faydalanarak akış alanı tasarımı, çalışma parametrelerinin etkileri ve performans ölçümleri gibi konularda çalışmalar yoğunlaşmıştır. Gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda analitik yöntemlerin yanı sıra hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümleri ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Deneyleerin zaman açısından uzun olması ve deney sistemlerinin kurulumu maliyet açısından pahalı olması nedeniyle çeşitli paket programlar kullanılarak sayısal analiz çalışmaları araştırmalar için uygun bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde tez çalışmasına referans olabilecek yayınlar incelenmiş ve özetleri aşağıda sunulmuştur.

Dawes ve ark. (2009) üç boyutlu bir PEM yakıt hücresi modeli geliştirmişlerdir ve su taşmasının hücre performans parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada su taşmasının gaz difüzyonu üzerindeki etkilerini karakterize etmek için, gözenekli yakıt hücresi elektrotlarının kıvrımlılığını ve bağıl su doygunluğunu açıklayan etkili yayılma modelleri, perkolasyon teorisinden türetilmiştir ve tek fazlı bir akış iskeleti içinde CFD modeliyle birleştirilmiştir. Oluşturulmuş olan model sonlu hacim metodu ile çözülmüştür. GDL geçirgenliği, giriş nemi ve reaktanların difüzyonunun reaktan/ürün konsantrasyonu ve hücre akımı yoğunlukları gibi çeşitli hücre performansı parametreleri üzerindeki etkilerini karakterize etmek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. GDL geçirgenliğinin, gaz akışının difüzyon ağırlıklı yapısından dolayı akım yoğunlukları üzerinde çok az etkisinin olduğu veya hiç etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, perkolasyon teorisine dayalı etkili difüzyon modelinin dahil edilmesiyle; yayınlanmış deneysel gözlemlere çok benzeyen hücre performansında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir.

Iranzo ve ark. (2014) özellikle hücre içindeki sıvı su birikiminin dağılımı üzerinde sayısal ve nötron görüntüleme tekniği kullanarak deneysel araştırmalar gerçekleştirmişler. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, çok fazlı akış modeli ele alındığında, nötron radyografilerinde açıkça gözlemlenen ancak CFD sonuçlarında olmayan, kanallarda biriken sıvı suyu yeniden üretememiştir.

D'Adamo ve ark. (2021) yakıt pili sisteminin geniş ölçekte benimsenmesi, mevcut teknolojiyi mevcut durumunun ötesine taşımak için hem çok boyutlu modellerin hem de özel test tekniklerinin birlikte kullanılmasını gerektirdiğini gösteren çalışmalarda bulunmuştur. Detaylı olarak incelendiğinde, çok fazlı/çoklu fizik modelleme için en yaygın yaklaşımlar, difüzyon katmanları, membran ve katalizör katmanları için yönetim denklemlerinde sınır şartları ve doğru malzeme karakterizasyonu sonrasında hücre operasyonunu doğru bir şekilde karakterize etmek için test uygulamalarını gösteren gelişmiş teşhis teknikleri incelenmiştir.

Ma ve ark. (2021) gaz difüzyon katmanı fiziksel değişim özelliklerinin su yönetimi ve proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin performansı üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırmak için üç boyutlu çok fazlı bir model geliştirilmiştir. Araştırma temel olarak, farklı çalışma basıncı ve anot giriş nemi altında düzlem boyunca homojen olmayan gözeneklilik dağılımının etkisine odaklanmaktadır. Yapılan çalışmada ise varılan sonuçlar ise düzlem yönündeki gaz difüzyon tabakası gözenekliliği dağılımı, sıvı su dağılımını değiştirmiştir, bu da katot gaz difüzyon tabakasında sıvı su doygunluğunun yaklaşık lineer artış yerine bazı tepe noktalarına sahip olmasına neden olmuştur. Ayrıca, katot katalizör tabakasına yakın bölgedeki yüksek gözenekliliğin, katot katalizör tabakasında yüksek sıvı su doygunluğuna neden olma olasılığı daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Membran su içeriği ve membrandan geçen su akışı da etkilenir ve bu da sonuçta yakıt hücrelerinin performansını etkilemektedir. Yüksek çalışma basıncının yüksek performansa ve membranda düşük su içeriğine sebep olduğu görülmüştür ve homojen olmayan gözeneklilik ve ıslanabilirlik dağılımı sıvı su buharlaşmasına ve membranın su tutmasını sağlamıştır. Sıfır katot girişi bağıl nemi altında anot girişi bağıl nemi etkisi için, membran su içeriği anot bağıl nemi arttıkça artar ve oksijen giriş bölgesinde zarın dehidrasyonu daha kolay olmuştur. Gaz difüzyon tabakasındaki ıslanabilirlik dağılımı, sıvı su doygunluğunu ve membran su içeriğini değiştiren su yönetimini de etkiler.

Wilberforce ve ark. (2017) yakıt hücrelerinin akış plakalarının tasarımlarını incelemişlerdir ve akış alanındaki basınç düşüşünü azaltmaya yardımcı olmak için CFD yardımı ile akış oranını değiştirerek bir takım analizler gerçekleştirmişlerdir. Yapmış olduğu çalışmalarda 5 cm x 5 cm kare akış alanı kullanmıştır ve buradan yola çıkarak

farklı akış alanı analizlerini gerçekleştirmiştir. Serpantin kanal akış alanından daha iyi bir performans elde etmek ve aynı zamanda paralel baypas kanallarının genel olarak daha düşük basınç düşüşü sağlamak için hem serpantin hem de paralel akış kanallarının bir kombinasyonu tasarlanmıştır. Benzetim sonuçlarından baypas kanallı modifiye serpantin tasarımlarının geleneksel serpantin tasarıma göre 50 kat daha düşük basınç düşüşü sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, modifiye edilmiş paralel akış kanalı, geleneksel paralel kanala göre genel olarak %90'lık bir azalma ile 12 m/s'de çok düşük bir basınç düşüşü elde etmişlerdir. Bununla birlikte, yeni labirent akış plakası tasarımı, değiştirilmiş pin kanalıyla karşılaştırıldığında, 12 m/s'de yaklaşık %40 yüksek basınç düşüşüne sahip olmuştur. İlgili tasarımlar incelendiğinde aralarında en düşük basınç düşüşüne sahip olan tasarım ise paralel akış kanalına sahip olan tasarımdır.

Carcadea ve ark. (2021) 7, 11 ve 14 serpantin kanallı PEM yakıt pili hücresinin kanal genişliği ve alanı değiştirilerek performansını sayısal olarak incelemiştir. Simülasyonlarda kanal genişliği azaldıkça yani serpantin sayısı arttıkça, özellikle konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu yüksek akım yoğunluklarında performansın arttığını göstermiştir. Bu durum ise GDL ile CL arasındaki temas yüzeyinin artması ile ilişkilendirilmiştir. Devam eden çalışmalarda 14 serpantin kanallı yakıt pili için, kanal derinliği 0,8 mm'den 0,25 mm'ye düştükçe akım yoğunluğu yaklaşık %7'ye kadar artmıştır. Kanalın derinliğinin azalması kanallardaki taşınım ile akışı artırarak fazla sıvı suyun atılmasını kolaylaştırmıştır. Ayrıca hava akış hızı arttıkça, yakıt hücresi performansı artmıştır ve bunun nedeni artan oksijen besleme oranı ve artan fazla su giderme oranıdır.

Velisala ve ark. (2022) yılında gerçekleştirdikleri çalışmada proton değişim membranlı yakıt hücresi performansını, düz serpantin akış alanını dik açı dönüştürmüş serpantin akış alanı olarak modellemiştir. Burada, membrandaki basınç düşüşünü, reaktanların dağılımını (H_2 ve O_2), sıvı su aktivitesini, akım akı yoğunluğunu ve su içeriğini analiz etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarından, PEMFC' nin literatür verilerini geleneksel serpantin akış alanıyla doğrulamak için polarizasyon eğrisi çizdirmişlerdir. Simüle edilmiş polarizasyon eğrisinin literatür verileriyle karşılaştırılması ile modifiye edilmiş serpantin akış alanı performansının, daha iyi su dışlaması ve reaktanların üniform paylaşımı sunduğu için

geleneksel serpantin akış alanından daha iyi olduğunu ortaya koydu. Bu çalışmadan, akış alanı modelinin yakıt hücresinin işleyişini etkilediği ve PEM yakıt hücresinin akış alanı için bir model seçerken azami özen gösterilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Rostami ve ark, (2022) serpantin ve paralel kanalların yakıt pili performansında etkilerini incelemek için V-oluklu kanallar üzerinde simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki basınç ve hız dağılımlarının V-oluklu tasarımında diğer durumlara kıyasla daha ünitardır. V-oluklu kanallar içindeki sıvı su azaldığında, katot elektrot yüzeyinde daha fazla oksijen girişi olmuştur. Bu, elektrokimyasal reaksiyon hızının, akım yoğunluğunun ve hücre verimliliğinin artmasına neden olur. V-oluklu kanalları kullanmanın katot tarafındaki ortalama akım akı yoğunluğunu serpantin ve paralel kanallara kıyasla sırasıyla yaklaşık %41,5 ve %21,88 artırdığı bulunmuştur. Ayrıca polarizasyon eğrisinin sonuçları, serpantin ve paralel kanallara kıyasla V-oluklu tasarımda sırasıyla %2,19 ve %2,5'lik bir artış göstermiştir.

Ozdemira & Taymaz (2021) blokajın hücre performansı üzerindeki etkilerini gözlemek için CFD aracı kullanılarak bloke gaz akış alanına sahip PEM yakıt hücresinin üç boyutlu, tek fazlı hesaplamalı akışkan dinamiği modeli geliştirilmişlerdir. Bu nedenle, PEMFC'ye iki farklı akış alanı (dikdörtgen ve yarı silindirik form) üzerinde çalışmışlardır. Geleneksel gaz akışı alanına kıyasla hücre performansı üzerindeki blokaj etkisini araştırmak için her yeni model için polarizasyon eğrileri oluşturmuşlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada sıcaklıklar 323 ila 343 K arasındadır ve yeterli nemlendirme durumunda sıcaklık artışı ile etkin performans elde edilmişlerdir. Membranın aşırı ısınması nedeniyle sıcaklık aşırı yüksek olmaması sonucuna varılmıştır. Güç yoğunluğundaki en yüksek değer, sıcaklık 343 K ve hücre potansiyeli 0,55 V olduğunda 0,85171 W/cm² olarak elde etmişlerdir. Katot tarafındaki gaz difüzyon katmanı gözenekliliği, 0.1'lik adımlarla 0.2 ila 0.5 arasında değiştirerek yaptıkları çalışmada ise gözeneklilik arttıkça hücre performansı iyileşmiştir. Güç yoğunluğu, çalışma sıcaklığı 343 K ve gözeneklilik değeri 0,5 olduğunda 0,80063 W/cm²'lik bir tepe noktasına ulaşmıştır. Özellikle, katot tarafı GDL gözenekliliğinin PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisinin 0,80 V ve daha yüksek voltajlarda önemli ölçüde kısıtlandığını görülmüştür. Basıncı 200'den 500 kPa'a arttırdıkça akım yoğunluğu değerlerinin arttığı saptanmıştır. Sonuç olarak, dikdörtgen ve yarı silindirik blokaj

desenler kanaldaki gaz akış hızını arttırmıştır ve dolayısıyla kanal merkezinden proton değişim membranlı yakıt hücresindeki katalizör katmanına etkili kütle taşınımını geliştirdiği görülmüştür. Düz bir PEMFC ile karşılaştırıldığında, dikdörtgen gaz akış alanının ve yarı silindirik gaz akış alanının sırasıyla akım yoğunluğunun yaklaşık %49,3 ve %49,9'unu iyileştirdiği kaydedilmiştir.

Valentín-Reyes ve ark. (2022) CFD simülasyonları ile aktif alanı 50 cm² olan yaprak damarlarına dayalı iç içe akış kanalları tasarlamışlardır. Farklı O₂ –H₂O karışımları kullanılarak bir PEMFC' nin katoduna uygulanan çalışma koşullarını karakterize etmek için deneysel ve CFD simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Akış hızları 3 ila 5 m/s arasında değişirken, nem ve sıcaklık sırasıyla %80 ila %100 ve 323–343 K arasındaydı. Gerçekleştirilen çalışmada iç içe akış kanalları, $2,43 \times 10^{-7}$ ila 0,98 m/s hız aralığında GDL' deki konvektif taşımayı geleneksel serpantin dizilerine (~10 –12 m/s) göre arttırdığı görülmüştür. Araştırılan giriş hızlarında, 3-5 m/s'de, birbirine geçmiş kanallarda hafif bir basınç düşüşü (100-400 Pa) gözlemlendi. Tasarlanmış olan akış alanı, akış kanallarından katalitik tabakaya hız dağılımını iyileştirerek homojen hız dağılımı sağlamıştır ve yakıt hücresindeki difüzyon ve konvektif taşımayı iyi yönde etkilemiştir. Kütle ve akım yoğunluğu dağılımları, reaktant yakıt hücresinin katodik bölmesinin çıkışına yaklaştıkça sırasıyla O₂ konsantrasyonunda ve akım yoğunluğunda bir azalma görülmüştür.

Celik & Karagoz (2022) dört geçişli serpantin akış alanı bulunan yakıt pili hücresinin performansını katot tarafında nemlendirme olmadan çeşitli hücre çalışma sıcaklıkları ve reaktan geri basınçları için deneysel olarak incelenmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada özel bir ölçüm kullanmadan tafel eğimi, limit akım yoğunluğu ve gerilim kayıp tipleri ile hücrenin su kaybı veya taşma durumunun belirlendiği gösterilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde, nemlendirilmemiş katodlu bir yakıt pilinde, işletme basınçlarının aşılması durumunda, hafif taşma olarak adlandırılan taşmanın yüksek hücre sıcaklığında bile görülmesinin mümkün olduğunu görülmüştür. Yakıt pili çalışma sıcaklığı 45 C'nin üzerinde olduğunda ve basınç arttırıldığında daha yüksek güç elde edilmiştir. Bununla birlikte, artan çalışma sıcaklığı ile düşük basınçta, performansta önemli bir artış ile karşılaşılmemiştir. Neden olarak ise düşük akım yoğunluklarında,

yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkıldığında daha az su üretildiği için membran nem tutma özelliğini kaybetmektedir.

Cai ve ark. (2020) mürekkep balıklarının yüzgeçlerinden esinlenerek dalga benzeri bir yapı tasarlanmış ve yakıt hücrelerinin kanalına uygulanmıştır. Tasarlanmış olan kanal tasarımı yakıt hücrelerinin akım yoğunluğu ve basınç düşüşü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Temel düz kanallı ve geleneksel dalga benzeri kanallı yakıt hücreleriyle karşılaştırıldığında sonuçlar, dalga benzeri kanallı yakıt hücresinin yüksek verimliliğe ve düşük akış direncine sahip olduğunu ve bunun da daha iyi kapsamlı performans elde edebildiğini göstermiştir.

Badduri ve ark. (2020) akciğer ve yaprak kanalı tasarımlı çift kutuplu plakalar gibi biyo-esinli alan akış alanı tasarımlarının bir PEMFC'nin performansı üzerindeki etkisi, çeşitli çalışma koşullarında deneysel olarak incelenmiştir. En iyi performansın 0,3 MPa basınç, 75 °C çalışma sıcaklığı ve %100 bağıl nemde elde edildiği görülmüştür. PEMFC'nin biyo-esinlenmiş kanallarla deneysel sonuçları, geleneksel üçlü serpantin akış alanının deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İncelenen farklı akış kanalı tasarımları arasında güç yoğunluğu açısından yaprak kanalı tasarımının en iyi çıktığı görülmüştür. Ayrıca, yaprak kanalı tasarımının deneysel sonuçları, iç içe geçmiş yaprak kanalı tasarımlarıyla karşılaştırılmıştır. iç içe geçmiş yaprak kanalı tasarımlarına sahip PEMFC'nin, birbirine geçmemiş yaprak kanalı tasarımlarına göre %6,72 daha fazla güç yoğunluğu ürettiği bulunmuştur. Parazitik kayıplar dikkate alındıktan sonra, iç içe geçmiş yaprak kanalı tasarımlarına sahip yakıt hücresi, iç içe geçmiş yaprak kanalı tasarımlarına sahip yakıt hücresinden %5,58 daha fazla net güç yoğunluğu üretmiştir.

Zhang ve ark (2022) günümüze kadar doğadan esinlenerek tasarlanan (yaprak, akciğer, ağaç ve diğer şekiller) yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsetmiştir. Ayrıca incelenen tasarımların güçlü yönleri, zayıflıkları, fırsatları ve kötü yönleri hakkında detaylı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen detaylı değerlendirmenin ardından çeşitli biyo-esinli akış kanalı tasarımlarının avantaj ve dezavantajları olmasına rağmen, PEMFC'lerin genel performansını belirli bir seviyeye kadar geliştirebileceği, ayrıca reaktan dağılımını daha düzgün hale getirebilir, yakıt kullanım oranını

iyileştirebilir, yakıt hücresinin drenaj kapasitesini artırabilir, düşük basınç düşüşleri üretebilir ve güç yoğunluğunu iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak özetlendiğinde çalışmalarda paralel, serpantin, iç içe kanallı akış alanları ve türevleri kullanılarak performans karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun yanında yakıt pillerinin işletme parametrelerinin değiştirilerek polarizasyon eğrilerinin ele alındığı görülmüştür. Bazı araştırmacılar ise biyo benzeşim modelleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir ve gelecekte biyo benzeşim modellerinin geliştirilmesi ve kullanılması gerekliliğini savunmuşlardır.

Bu anlamda bu tez çalışmasında gaz değişim kapasitesi yüksek olan balık solungaçlarından esinlenerek yeni bir akış alanı tasarımı geliştirilmesinin daha yüksek performanslı yakıt pilleri elde edilmesinde fayda sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Balık solungaç modelinde diğer tasarlanmış olan yakıt pili gaz akış kanallarındaki gibi dallanma sayısının artması ve kanal genişliğinin daralması ile pil performansına pozitif yönde katkıda bulunmaktadır. Öte yandan, paralel akış alanı gibi akış yolu boyunca basınç kaybının çok fazla olmadığı geleneksel akış alanına dallanmalar eklenmesi, basınç kaybını azaltmak için etkili bir yöntem olmamaktadır. Sonuç olarak kanallara dallanma ilavesinin etkili olduğu durum aktif yüzey üzerinde reaktant dağılımını daha aktif şekilde sağlamaya uygun bir yaklaşım olmaktadır. Bu nedenle temel olarak balık solungaç modelinin kullanımında bu tasarım kriterleri etkili olmuştur. İki ucu da açık olan bir kanal tipine haiz orta hatta farklı reaktant akış hızları elde edilmesi ve bu sayede kenar kanallar ile orta hat arasında basınç farkı oluşturulması amaçlanmıştır. Kanallar arasındaki basınç farkının varlığı GDL tabakasındaki konveksiyonel hareketleri artıracığı için alt katmanlardan su tahliyesi kolaylaşmış olacak ve reaktan dağıtımını daha verimli hale getirilecektir. Bu biyo benzeşim yöntemi ile özellikle serpantin akış alanında rastlanan çıkış manifolduna yakın bölümde yaşanan konsantrasyon kaybı probleminin giderilmesi ve omuz altı gaz difüzyon mekanizmasının güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Toplam kanallarının bağlı olduğu toplayıcı ve serpantin kanal aynı çıkış manifolduna bağlanmaktadır. Yüksek ve düşük reaktant konsantrasyonuna sahip kanal sıraları kullanılarak omuz altı reaktant akışları sağlanmak istenmiştir. Ayrıca kanalların sıralamaları solungaçlarda olduğu gibi ardışık dizilimli bir yüksek bir düşük

konsantrasyon bölgeleri tesis etmektedir ki bu tasarım yaklaşımına daha önce gerçekleştirilmiş olan akış alanı tasarımlarında karşılaşılmamıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yakıt Pillerinde Temel Denklemler

Bir PEM yakıt hücresi, iki elektrot arasına sıkıştırılmış bir elektrolitten oluşur. İki elektrotun yüzeylerinde iki elektrokimyasal reaksiyon gerçekleşir. Üzerinden hidrojen gazının geçtiği anotta hidrojen oksidasyon reaksiyonu oluşur. Üzerinden oksijen veya havanın geçtiği katotta oksijen indirgeme reaksiyonu meydana gelir. İki elektrot reaksiyonu aşağıdaki gibidir:

Anot Reaksiyonu:



Anot potansiyeline karşılık gelen $E_a^0 = 0,00 \text{ V}$ (standart koşullar altında) standart hidrojen elektrodu.

Katot reaksiyonu:



Standart hidrojen elektroduna karşı (standart koşullar altında) bir katot potansiyeli $E_c^0 = 1,229 \text{ V}$ 'ye karşılık gelir. Bu nedenle, yakıt hücresinin genel reaksiyonu,



1.229 V olarak hesaplanan denge standardı elektromotor kuvveti ile.

Sıvı suyun meydana gelmesi için gerekli olan reaksiyon entalpisi $\Delta H = -286 \text{ kJ mol}^{-1}$ 'dir (25°C'de).

Yakıt pillerinde elektriğe çevrilebilen reaksiyon entalpisine Gibbs serbest enerjisi denir. Fakat entalpinin tamamı elektrik enerjisine çevrilemeyeceği için entropi (ΔS) oluşumu muhtemeldir (Barbir, 2005).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.4)$$

25°C’de ΔH , ΔG , ΔS değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi

| Oksitlenme reaksiyonu | ΔH (kJ mol ⁻¹) | ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹) | ΔG (kJ mol ⁻¹) |
|--|------------------------------------|--|------------------------------------|
| H ₂ +1/2O ₂ → H ₂ O (1) | -286,02 | -0,1613 | -237,34 |
| H ₂ +1/2O ₂ → H ₂ O (g) | -241,98 | -0,0444 | -228,74 |

Yakıt hücresi teorik potansiyeli;

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (3.5)$$

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237,340 \text{ Jmol}^{-1}}{2 * 96,485 \text{ Asmol}^{-1}} = 1,23 \text{ V} \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.5’de ΔG Gibbs serbest enerjisi, n elektron sayısı (her hidrojen molekülü için 2’dir) ve F Faraday sabitini anlamına gelmektedir. Teorik anlamda 25°C’de bir yakıt hücresinin potansiyeli 1,23 V olarak kabul edilir.

Enerji dönüşüm cihazlarının verimliliği faydalı enerji çıkışı ve girişinin arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Bu olay yakıt hücrelerinde faydalı enerji çıkışı üretilebilen elektrik enerjisidir ve enerji girişi ise hidrojenin üst ısıl değeri olarak kabul edilir (Barbir, 2005).

Eğer yakıt hücresi tüm Gibbs serbest enerjisini elektrik enerjisine çevirseydi sahip olabileceği maksimum teorik verim;

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = 83\% \quad (3.7)$$

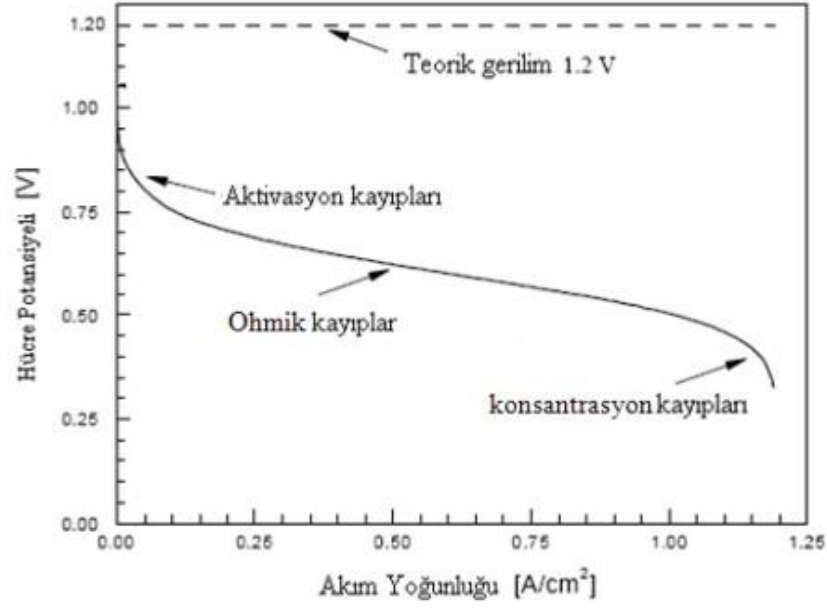
Teorik verimi hesaplamada hidrojenin alt ısıl değeri referans alınırsa yakıt hücresi teorik verimi;

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H_{LHV}} = \frac{228,74}{241,98} = 94,5\% \text{ 'dir} \quad (3.8)$$

Hesaplanmış olan verimlerinin yanı sıra yakıt pillerinde çalışma esnasında çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar gerilim kayıpları olarak adlandırılmaktadır ve detaylı olarak alt başlıkta incelenmiştir.

3.1.1. Gerilim kayıpları

Yakıt hücresi voltaj kayıpları üç kategoriye ayrılır: aktivasyon kaybı (aktivasyon polarizasyonu), ohmik kayıp (ohmik polarizasyon) ve konsantrasyon kaybı (konsantrasyon polarizasyonu). Kayıpların her birinin neden olduğu voltaj düşüşlerinin grafikleri Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Düşük akım yoğunluklarında (aktivasyon polarizasyon bölgesi), hücre potansiyeli keskin bir şekilde düşer ve bu kayıpların çoğu, oksijen indirgeme reaksiyonunun yavaş hareket eden kinetiğinden kaynaklanır (Barbir, 2005). Ara akım yoğunluklarında (ohmik polarizasyon bölgesi), ohmik direncin neden olduğu voltaj kaybı önemli hale gelir ve esas olarak elektrolit içindeki iyonların akışına ve elektrot boyunca elektronların akışına karşı dirençten kaynaklanır (Hirschenhofer ve ark., 1998). Bu bölgede, hücre potansiyeli akım yoğunluğuyla neredeyse lineer olarak azalırken, aktivasyon aşırı potansiyeli nispeten sabit bir değere ulaşır (Barbir, 2005). Yüksek akım yoğunluklarında (konsantrasyon polarizasyon bölgesi), reaktan gazın GDL'lerin gözenek yapısı ve elektrokatalizör katmanları boyunca taşıma limiti nedeniyle kütle taşıma etkileri baskındır ve hücre performansı büyük ölçüde düşer (Ju & Wang, 2004).



Şekil 3. 1. Gerilim kayıpları (Özdemir, 2012)

Tek bir hücrenin çıkış voltajı, E_{cell} , aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

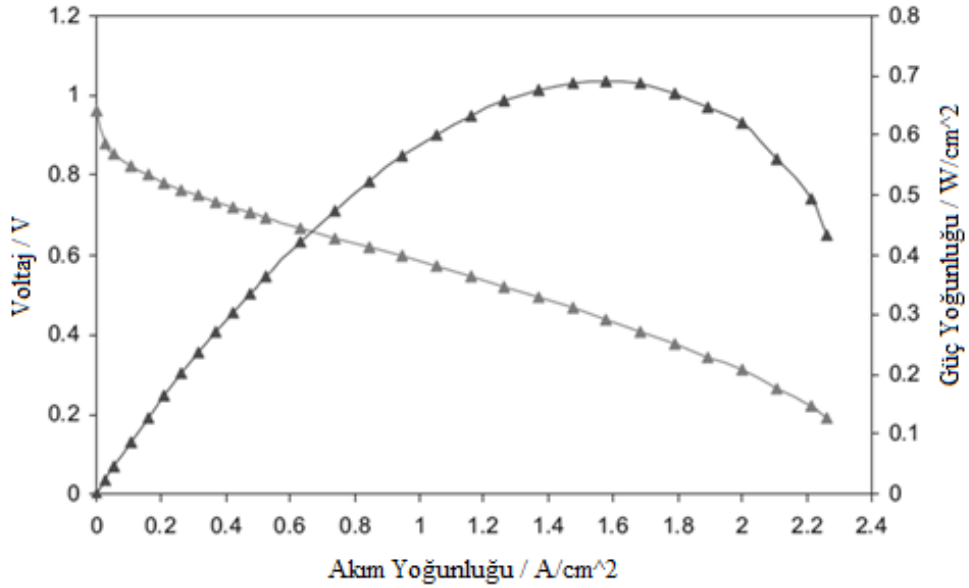
$$E_{cell} = E_{OCV} - \Delta E_{act} + \Delta E_{ohmic} - \Delta E_{con} \quad (3.9)$$

burada E_{cell} , belirli bir çalışma koşulu için voltajdır, E_{OCV} , yakıt hücresini OCV'yi temsil eder, ΔE_{act} , anot ve katodun aktivasyonu ile ilişkili voltaj düşüşüdür, ΔE_{ohmic} , protonların ve elektronların iletimi ile ilişkili ohmik voltaj düşüşüdür, ve ΔE_{con} , oksijen ve hidrojen konsantrasyonundaki azalmadan kaynaklanan voltaj düşüşüdür.

3.1.2. Polarizasyon eğrisi

Bir polarizasyon eğrisi olarak bilinen bir dizi sabit çalışma koşulu altında akım yoğunluğuna karşı hücre potansiyelinin bir grafiği, yakıt hücrelerinin (hem tek hücreler hem de yığınlar) performansını karakterize etmek için standart elektrokimyasal tekniktir (Li, 2006). Çalışma koşullarında hücre veya yığındaki performans kayıpları hakkında bilgi verir. Kararlı durum polarizasyon eğrisi, akımı hücre potansiyelinin bir fonksiyonu olarak kaydederek veya hücre akımı değiştiğinde hücre potansiyelini kaydederek elde edilebilir. Kararlı olmayan bir polarizasyon eğrisi, hızlı bir akım taraması (Lim & Haas, 2006) kullanılarak elde edilebilir. Polarizasyon eğrileri ölçülerek, reaktan gazların bileşiminin, akış hızının, sıcaklığının ve bağıl neminin hücre performansı üzerindeki

etkileri gibi belirli parametreler karakterize edilebilir ve sistematik olarak karşılaştırılabilir. Örnek bir polarizasyon eğrisi Şekil 3.2 'de gösterilmektedir. Sıklıkla, polarizasyon eğrileri, Şekil 3.2 'de de görüldüğü gibi, eğrinin her noktasında potansiyel ile akım yoğunluğu çarpılarak güç yoğunluğuna karşı akım yoğunluğu grafiklerine dönüştürülür.



Şekil 3. 2. Polarizasyon Eğrisi

Polarizasyon eğrileri, bir bütün olarak hücrenin veya yığının performansı hakkında bilgi sağlar. Belirli çalışma koşulları altında genel performansın yararlı göstergeleri olsalar da, hücre içindeki tek tek bileşenlerin performansı hakkında fazla bilgi üretmezler. Bir yakıt hücresinin normal çalışması sırasında elde edilemezler ve önemli ölçüde zaman alırlar. Ayrıca, farklı mekanizmaları ayırt etmekte başarısız olurlar; örneğin, bir yakıt hücresi içindeki taşma ve kuruma, tek bir polarizasyon eğrisinde ayırt edilemez. Ayrıca yakıt hücresinde ve yığında meydana gelen zamana bağlı süreçleri çözemezler. İkinci amaç için akım kesintisi, elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri ve diğer elektrokimyasal yaklaşımlar tercih edilir.

3.1.3. Yakıt hücresi verimliliği

Yakıt hücrelerinin verimi üretilen elektrik miktarı ve sistemin tükettiği hidrojenin kıyaslanması ile saptanır ve aynı birimde olmalıdırlar (watt veya kilowatt gibi).

$$H = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} \quad (3.10)$$

Üretilen elektriği hesaplarırken akım (amper) ve gerilimin (volt) çarpılır.

$$W_{el} = I * V \quad (3.11)$$

Faraday kanununa göre tüketilen hidrojenin miktarı (mol/s^{-1}) üretilen akım ile orantılıdır.

$$N_{H_2} = \frac{I}{nF} \quad (3.12)$$

Tüketilen hidrojenin enerji değeri (watt);

$$W_{H_2} = \Delta H \frac{I}{nF} \quad (3.13)$$

$\Delta H/nF$ birim analizinde volt boyutunda olduğu için $\Delta H = 286 \text{ kJ/mol}$ için $1,482 \text{ V}$ a karşılık gelir. Eşitlik 3.10 ve 3.13 bir araya getirildiğinde yakıt hücresi verimi hücre potansiyeli ile doğru orandadır (Barbir, 2005).

$$H = \frac{V}{1,482} \quad (3.13)$$

3.1.4. PEM yakıt pilleri korunum denklemleri

Kütlenin Korunumu Denklemi

Kartezyen koordinatlarda kütlenin korunumu denkleminin en genel hali Eşitlik 3.14'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m \quad (3.14)$$

Eşitlikte S_m reaktant tüketimi ve ürün oluşumu için kaynak terimi göstermektedir.

Yakıt hücresinde anot tabakasında hidrojen tüketimi, katot tabakasında ise oksijen tüketimi için kaynak terimleri modellenir.

$$S_{H_2} = -\frac{M_{H_2}}{2F} i_a \quad (3.15)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{O_2}}{4F} i_c \quad (3.16)$$

$$S_{H_2O} = -\frac{M_{H_2O}}{2F} i_c \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.15, 3.16 ve 3.17’de M molar kütle (kg kmol⁻¹), F Faraday sabitini (C mol⁻¹) ve i akım yoğunluğunu (A m⁻³) ifade eder.

Momentumun Korunumu Denklemi

Yakıt pillerinde hız ve basınç hesaplamalarının yapılabilmesi için momentum korunumu denkleminde faydalanılır. Kartezyen koordinatlarında denklem genel hali Eşitlik 3.18’de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.18)$$

Eşitlikte ρ yoğunluk (kg/m³), \vec{u} akışkanın hız vektörü (m/s), P statik basınç (Pa), \vec{g} yer çekimi ivmesi (m/s²), \vec{F} dış kuvvetler (N/m³) ve $\vec{\tau}$ gerilme tensörüdür. \vec{F} ayrıca diğer modele bağlı kaynak terimlerini içerir.

Gerilme tensörünü;

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{u} I \right] \quad (3.19)$$

Bu eşitlikte μ dinamik viskoziteyi, I birim tensörü ifade eder. Eşitliğin sağındaki ikinci terim ise hacim genişlemesinin etkisidir.

Modeldeki kaynak terimleri eşitlik 3.18’deki \vec{F} içerir. Kaynak terim gözenekli yapılarda hesaplanır fakat gaz kanalları ve bipolar plakalarda sıfırdır. Bu terim Eşitlik 3.19 yardımı ile hesaplanır.

$$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon \vec{u} \quad (3.19)$$

Eşitlikte K gözenekli ortamın geçirgenliği ve ε gözenekliliği ifade etmektedir.

Enerjinin Korunumu Denklemi

Enerji korunum denklemi genel hali Eşitlik 3.20’te verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{u}(\rho E + P)) = \nabla \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \vec{u}) \right] + S_h \quad (3.20)$$

Katalizör tabakalardaki enerji kaynak terimi (S_h) Eşitlik 3.21’deki gibi tanımlanmıştır.

$$S_h = I^2 R_{ohm} + h_{reaksiyon} - \eta R_{an,kat} \quad (3.21)$$

Eşitlikteki E terimi;

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (3.22)$$

Eşitlikte h, entalpiyi sembolize etmektedir ve ideal gaz için;

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (3.23)$$

Sıkıştırılmaz akışkanlar için entalpi değerleri ise;

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{P}{\rho} \quad (3.24)$$

Y_j terimi j türünün kütle kesrini göstermektedir. H_j terimi ise j türünün entalpisini göstermektedir ve sıcaklığa bağlı olarak tanımlı;

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (3.25)$$

Burada T_{ref} , referans sıcaklığıdır.

Elektrokimyasal Denklemler

Elektrokimyasal çözümler katalizör tabakalarında meydana gelir.

Elektron taşınımı Eşitlik 3.26'da matematiksel olarak tanımlanmıştır.

$$\nabla(\sigma_{sol}\nabla\phi_{sol}) + S_{\phi,sol} = 0 \quad (3.26)$$

Hidrojen iyonlarının transferi ise Eşitlik 3.27'da tanımlanmıştır.

$$\nabla(\sigma_{mem}\nabla\phi_{mem}) + S_{\phi,mem} = 0 \quad (3.27)$$

Eşitlik 3.26 ve Eşitlik 3.27'da geçen kaynak terimleri yalnızca katalizör tabakalarda tanımlıdır.

Kaynak terimleri hacimsel transfer akım yoğunluğu olarak da tanımlanırlar, akım yoğunluğunu veren Bulter-Volmer denkleminin genişletilmiş hali Eşitlik 3.28 ve Eşitlik 3.29'de verilmiştir.

$$R_{an} = j_{an}^{ref} \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} (e^{\alpha_{an}F\eta_{an}/RT} - e^{-\alpha_{kat}F\eta_{an}/RT}) \quad (3.28)$$

$$R_{kat} = j_{kat}^{ref} \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{kat}} (-e^{\alpha_{an}F\eta_{kat}/RT} + e^{-\alpha_{kat}F\eta_{kat}/RT}) \quad (3.29)$$

Aşırı gerilim miktarı katı ve membran potansiyelindeki farktan, Eşitlik 3.32 ve Eşitlik 3.33'dan hesaplanabilir.

$$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem} \quad (3.32)$$

$$\eta_{kat} = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{oc} \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.33'daki V_{oc} pilde oluşan elektriksel potansiyel (açık devre voltajı) olarak tanımlanır.

Türlerin Korunumu Denklemi

Yakıt pilinde tüm akışkanların gaz fazında olduğu kabul edilerek pildeki gazların dağılımı Eşitlik 3.34 ile bulunur.

$$\nabla(\vec{u}C_j) = \nabla(D_j^{eff}\nabla C_j) + S_j \quad (3.34)$$

Eşitlikte C_j j türüne ait molar konsantrasyon ve D_j^{eff} j türünün düzeltilmiş difüzyon sabitidir (m^2/s), D_j^{eff} Eşitlik 3.35 ile bulunur.

$$D_j^{eff} = D_j \varepsilon^{1,5} \quad (3.35)$$

Tür eşitlikleri için hacimsel kaynak terimleri Eşitlik 3.36, Eşitlik 3.37 ve Eşitlik 3.38'de tanımlanmıştır.

$$S_j = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} R_{an}, \text{ Hidrojen için} \quad (3.36)$$

$$S_j = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} R_{kat}, \text{ Oksijen için} \quad (3.37)$$

$$S_j = \frac{M_{w,H_2O}}{2F} R_{kat}, \text{ Su buharı için} \quad (3.38)$$

Eşitlik 3.28 ve 3.29'da tanımlanan tür konsantrasyonları, yüzey değerleridir. Tepkimelerde reaksiyona giren herhangi bir türün difüzyon akısı Eşitlik 3.39'de verildiği gibi o türün oluşum hızı ile dengelenir.

$$\frac{\rho D_j}{\delta} (y_{j,yüzey} - y_{j,merkez}) r = -\frac{M_{w,j}}{nF} R_{an,kat} \quad (3.39)$$

Tepkime yüzeyleri ve yakıt hücresi merkezi arasındaki ortalama uzaklık (m) Eşitlik 3.40'te tanımlanmıştır.

$$\delta = \frac{1}{r} \quad (3.40)$$

Özellikler

Gazların Tür Difüzyonu;

Gaz fazı tür difüzyon katsayısı Eşitlik 3.41 yardımıyla elde edilir.

$$D_j = \varepsilon^{1,5} (1 - s)^{r_s} D_j^0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\gamma_P} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\gamma_t} \quad (3.41)$$

Membranın Elektriksel Faz İletkenliği;

Membran elektriksel faz iletkenliği Eşitlik 3.45 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\sigma_{mem} = \beta \varepsilon (0,514\lambda - 0,326) \omega e^{1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.42)$$

Eşitlikte λ su içeriği, ε gözeneklilik ve β , ω model sabitleri olarak tanımlanır. Ozmotik Sürüklenme Katsayısı;

Ozmotik sürüklenme katsayısı Eşitlik 3.43 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha_d = 2,5 \frac{\lambda}{22} \quad (3.43)$$

Geri Difüzyon Akısı;

Geri difüzyon akısı Eşitlik 3.44'de verilmiştir.

$$J_{\omega}^{diff} = - \frac{\rho_{mem}}{M_{mem}} M_{H_2O} D_1 \nabla \lambda \quad (3.44)$$

Eşitlikte ρ_{mem} membranın yoğunluğu (kg/m^3), M_{mem} membranın eşdeğer ağırlığı ve D_1 membrandaki su difüzyonunu sembolize etmektedir.

Membran su difüzyonu Eşitlik 3.45 yardımıyla hesaplanır.

$$D_1 = f(\lambda) e^{2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.45)$$

Su içeriği (λ) Eşitlik 3.46 ya da Eşitlik 3.57'den yararlanılarak hesaplanır.

$$\lambda = 0,043 + 17,18a - 39,85a^2 + 36a^3 a < 1 \quad (3.46)$$

$$\lambda = 14 + 1,4(a - 1)a > 1 \quad (3.47)$$

Eşitliklerdeki a su aktivitesidir ve Eşitlik 3.48'deki şekilde tanımlanır.

$$A = \left(\frac{P_{wv}}{P_{sat}} \right) + 2s \quad (3.48)$$

Eşitlik 3.48'deki P_{wv} su buhar basıncıdır ve buhar molar kesri ile lokal basıncına bağlı olarak Eşitlik 3.49'den yararlanılarak hesaplanır.

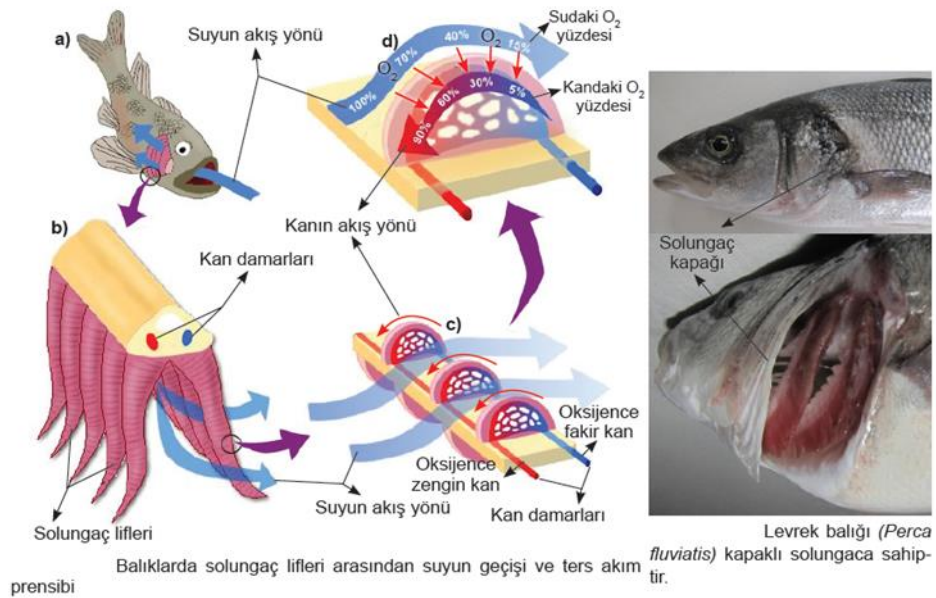
$$P_{wv} = x_{H_2O}P \quad (3.49)$$

Eşitlik 3.48'deki P_{sat} doyma basıncıdır ve atmosfer basıncı cinsinden hesabı Eşitlik 3.50'te verilmiştir.

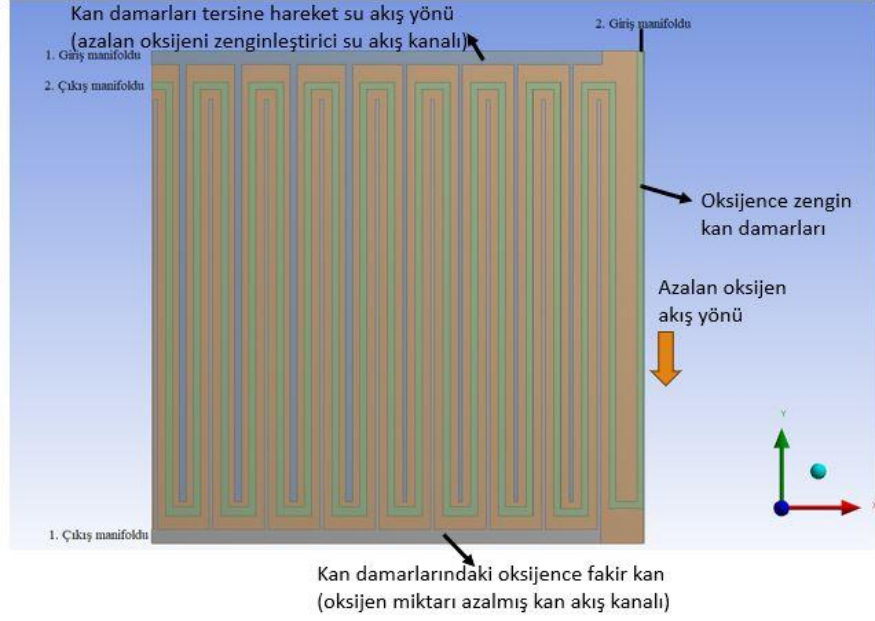
$$\log(P_{sat}) = -2,1794 + 0,02953(T - 273,17) - 9,1837 \times 10^{-5}(T - 273,17)^2 + 1,4454 \times 10^{-7}(T - 273,17)^3 \quad (3.50)$$

3.2. Tasarlanan PEM Yakıt Pili

Yakıt hücreleri ile ilgili literatürde yapılan taramalarda çeşitli deneyler, analitik hesaplama yöntemleri ve HAD çözümleri ile yakıt hücrelerinin verimliliği, dayanımı, güvenilirliğini ve yönetimini geliştirmek için araştırmalar sürdürülmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında Şekil 3. 3 ve Şekil 3. 4' de biyo benzeşim kökeni olarak balık solungaçlarında sudaki oksijenin solungaç lamelleri arasından geçerken kana ve kandaki karbondioksitin suya geçiş mekanizmasından esinlenilmiştir.



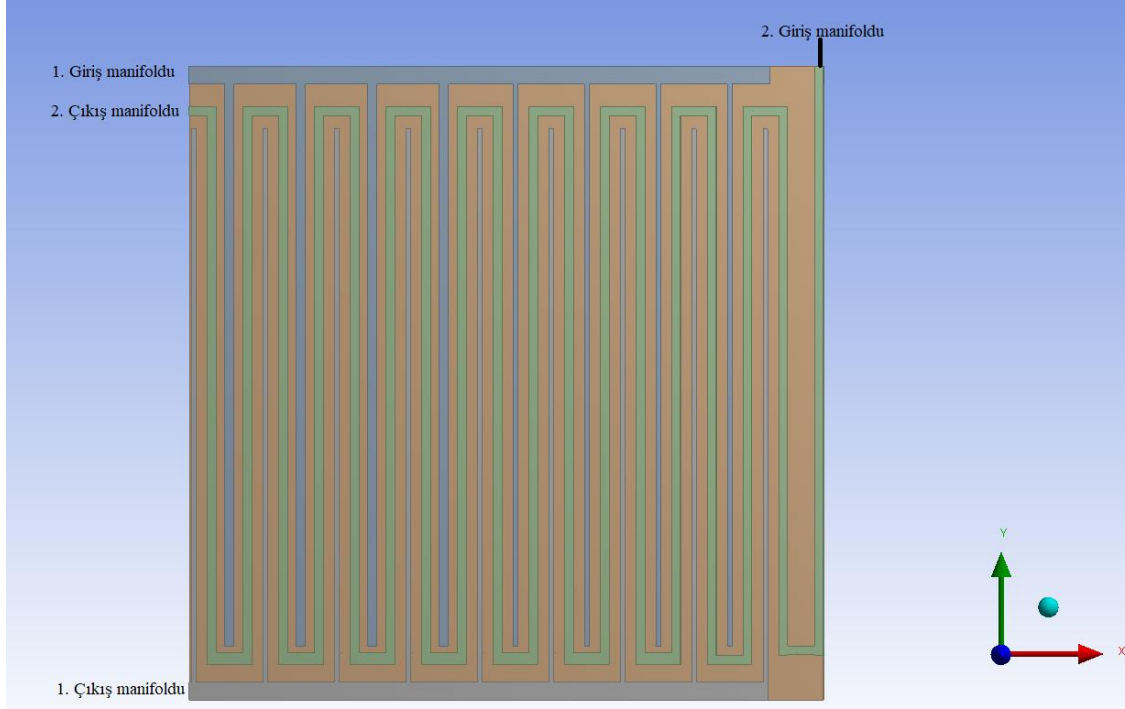
Şekil 3. 3. Balık solungacı iç yapısı ve oksijen değişim mekanizması



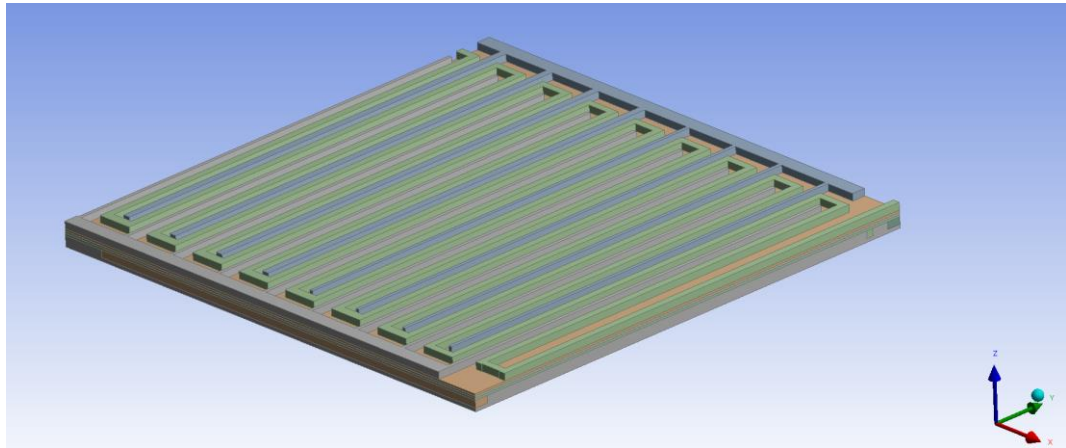
Şekil 3. 4. Balık solungaç modelinin akış kanallarına uygulanması

Balık solungaçları içinde kan damarları bulunan çok sayıda lamelden oluşmaktadır. Solungaç hareketleri neticesinde su, lameller arasından kan akış yönüne zıt yönde akmaya zorlanmakta ve suda konsantrasyonu yüksek olan oksijen kana geçerken; kanda konsantrasyonu yüksek olan karbondioksit suya geçmektedir. Solungacı oluşturan her bir lamel katmanın arasında bir katman su bulunmaktadır. Akış alanı temel olarak iki adet giriş manifoldu ve iki adet çıkış manifolduna sahiptir. Akış alanı Şekil 3. 5’de mavi renkli olarak gösterilen bir serpantin akış düzenine ait bölümden ve serpantin kanallar arasında yerleştirilmiş tahliye (yeşil renkli) ve ikincil besleme (mavi renkli) kanallarından oluşmaktadır. Şekil 3. 6’de perspektif görünüşü verilmiştir. Böylece solungaç yapısında olduğu gibi bir sıra yüksek madde konsantrasyonlu ve bir sıra düşük madde konsantrasyonlu segmentler oluşturulmuştur. İkincil besleme kanalları; bir ucundan giriş manifoldundan beslenen nispeten daha geniş bir dağıtıcı kanala bağlı ve diğer ucu kapalı iki serpantin kanal arasında serpantin kanallara paralel olarak uzanan farklı kesitlerdeki kanal sıralarıdır. Kanal kesitlerinin farklı olması reaktant ihtiyacının düzeyine bağlı olarak belirlenmiştir. Özellikle serpantin akış alanında giriş manifolduna yakın bölgede konsantrasyon kaybı yaşanmamaktadır. Bu nedenle bu bölgede ikincil besleme ihtiyacı düşük olduğu için ikincil besleme kanallarının kesiti serpantin kanal kesitinin $\frac{1}{4}$ ‘ü kadar planlanmıştır. Çıkış manifolduna yaklaşıldığı bölümde ikincil besleme kanal kesiti

serpantin bölümdeki kanal kesitiyle aynı ölçüde planlanmıştır. Çıkışa yakın bölgede reaktant basınç kayıpları ve tüketimine bağlı konsantrasyon kayıplarını dengelemek için daha geniş ikincil kanal kesitleri kullanılmıştır.



Şekil 3. 5. Solungaç tipi akış alanı ön görünüş



Şekil 3. 6. Solungaç tipi akış alanı perspektif görünüş

Şekil 3. 4' de balık solungaçlarının yakıt piline uyarlanması anlatılmıştır. İkinci giriş manifoldundan ikinci çıkış manifolduna kadar olan kısım solungaçlarının kan damarlarını

temsil etmektedir. Yakıt pilinde bu durum anot tarafında hidrojen, katot tarafında oksijen reaktantlarının akış kanalları olmaktadır. Kan damarlarında azalan oksijeni dengelemek amacı ile solungaçlar etrafında hareket eden oksijence zengin tersine su akışı ise birinci giriş manifoldundan giriş yaparak yeşil renkli olan akış kanallarındaki oksijen miktarının artmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum ise yakıt pilinde akış kanallarındaki hidrojen ve oksijenin artması demektir. Akış kanalları bu anlamda solungaç lifleri gibi çalışmaktadır. Solungaçlarda kalmış olan oksijende fakir kan ise birinci çıkış manifoldunun akış kanalları yardımı (oksijence fakir kan damarı) ile kan değişim mekanizması çalışmaktadır.

3.3. PEM Yakıt Hücresi Sayısal Analizi

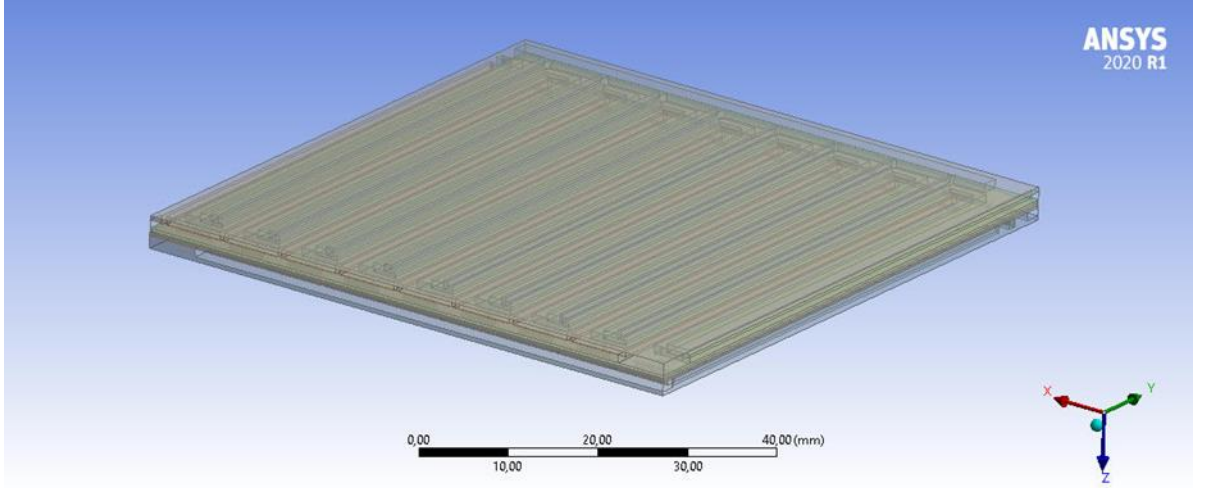
Gerçekleştirilen tez çalışmasında balık solungaçlarından esinlenerek tasarımı yapılan PEM yakıt hücresi, HAD yöntemi kullanılarak çok fazlı analizler çözdürülmüştür. Gerçekleştirilmiş olan analizler sürekli halde yapılmıştır.

PEM yakıt hücresinin çalışma performansını değerlendirebilmek için debi, sıcaklık ve basınç parametreleri değiştirilerek performans değerlendirilmesinde kullanılan polarizasyon eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan eğriler çeşitli kombinasyonlar yapılarak karşılaştırılmış genel performans ve verimli kullanılabileceği değerler saptanmıştır.

PEM yakıt pilinin tasarımı bir katı modelleme programı olan ‘Ansys Design Modeler’ yardımıyla oluşturulmuştur. Gerçek bir PEM yakıt pili göz önüne alınarak tam bir PEM yakıt pili tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım gerçekleştirildikten sonra sayısal çözüm için uygun hale getirme işlemleri ‘Ansys Mesh’ ile eleman ağ örme işleme yapılmıştır ardından sınır koşulları belirlenip ve tanımlanmış ardından çözücü ayarları yapılarak FLUENT yazılımı ile çözüm gerçekleştirilmiştir.

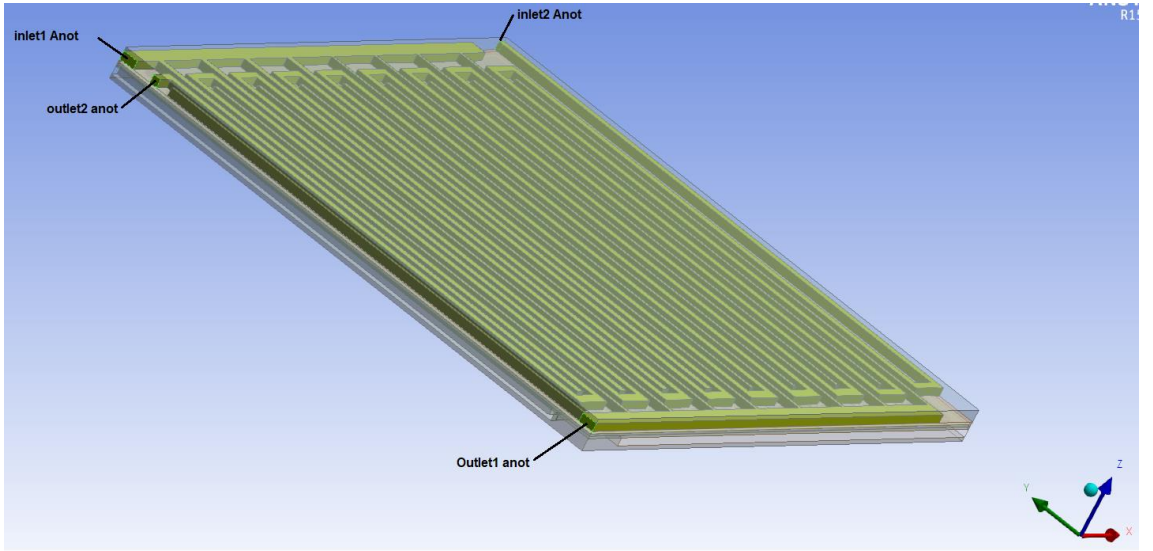
3.3.1. Pem yakıt pili geometri oluşturma

Şekil 3. 7’de ‘Ansys Design Modeler’ ile tasarımı yapılmış olan yakıt pili gösterilmiştir.

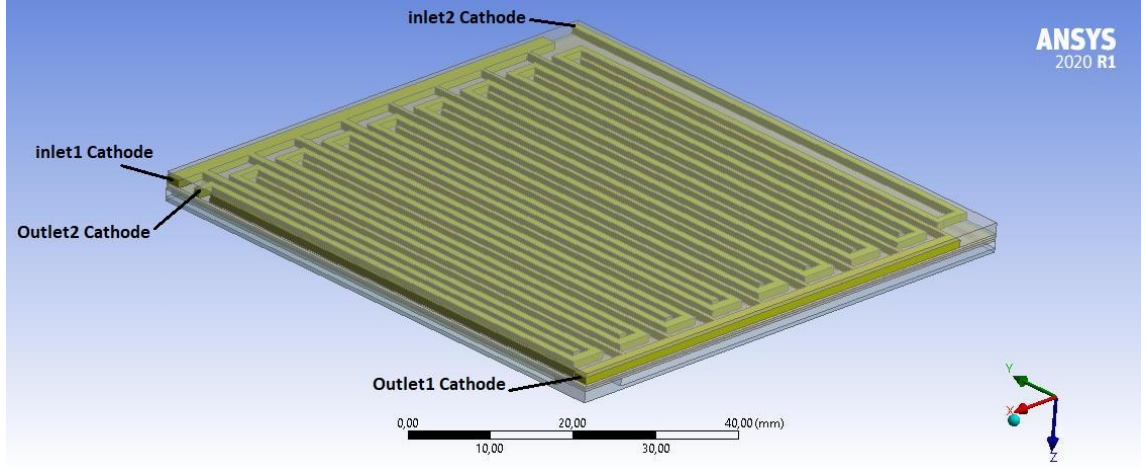


Şekil 3. 7. PEM yakıt hücresi fiziksel modeli

Akış alanı temel olarak iki adet giriş manifoldu ve iki adet çıkış manifolduna sahiptir ve sırasıyla Şekil 3. 8 ve Şekil 3. 9 'de gösterilmiştir.

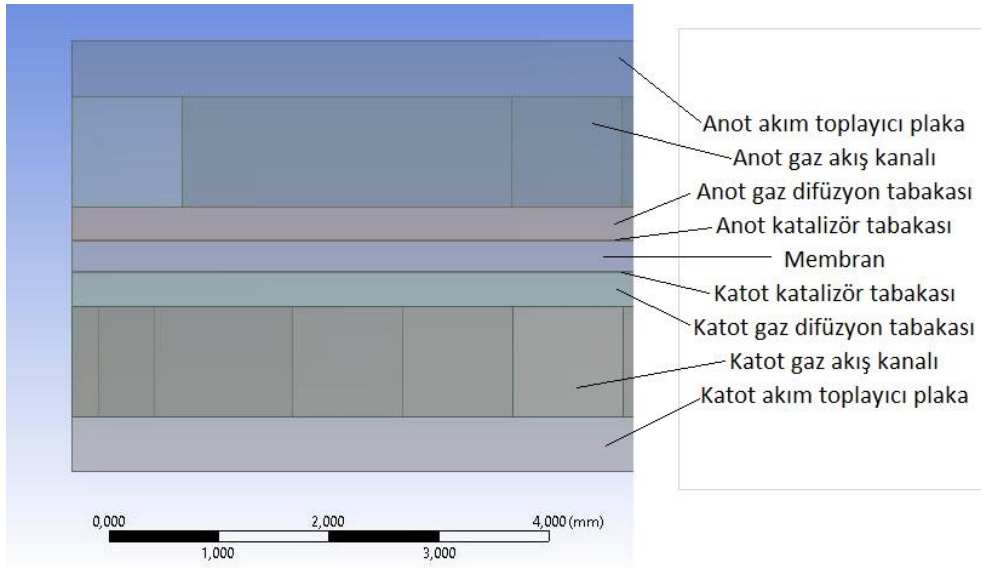


Şekil 3. 8. Solungaç tipi akış alanı anot tarafı



Şekil 3. 9. Solungaç tipi akış alanı katot tarafı

Oluşturulan yakıt pili modeli iki akım toplayıcı plaka, iki gaz kanalı, iki gaz difüzyon tabakaları, iki katalizör tabakaları ve bir membran olmak üzere toplam dokuz hacim bölgesinden oluşmaktadır. Modelin ön kesit görünümü ve bileşenleri Şekil 3. 10'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 10. Solungaç tipi akış alanı perspektif ve kesit görünüşü

Akım toplayıcı plakalar hariç membran, katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları ve gaz akış kanalları akışkan (fluid) olarak modellenmiştir. Akım toplayıcı plaka ise katı (solid) olarak modellenmiştir. Çizelge 3. 1' de yakıt pili hücresinin geometrik detaylarına yer verilmiştir.

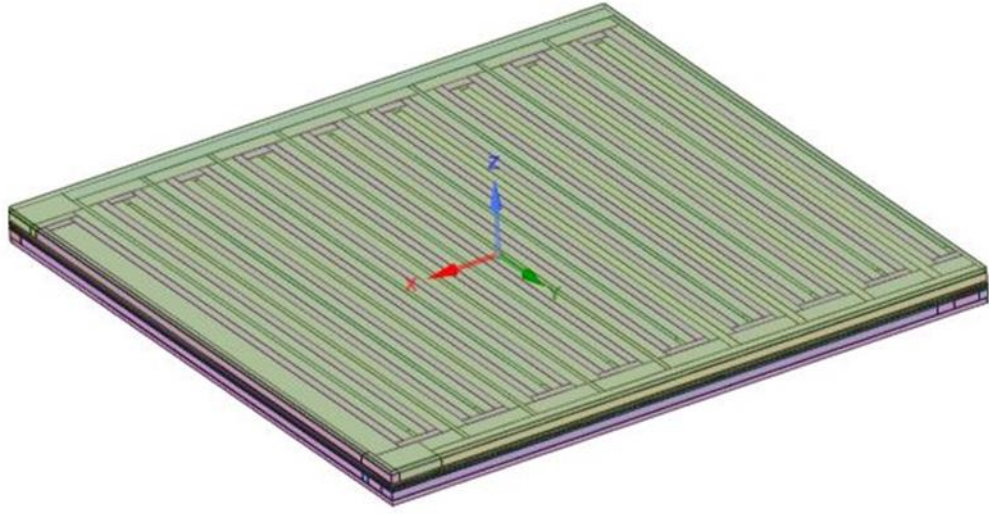
Çizelge 3. 1. Geometrik boyutlar

| Parça Adı | Yükseklik (mm) | Genişlik (mm) | Uzunluk (mm) |
|-------------------------|----------------|---------------|--------------|
| Gaz Akış Kanalları | 1 | 1 | 4465 |
| Gaz Difüzyon Tabakaları | 0,3 | 71 | 71 |
| Katalizör Tabakaları | 0,01 | 71 | 71 |
| Membran | 0,2794 | 71 | 71 |
| Akım Toplayıcı Plaka | 0,5 | 71 | 71 |

3.3.2. Ağ yapısı ve sınır şartlarını oluşturma

Yakıt pili ağ yapısı ‘Ansys mesh’ yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ansys mesh ile ağ yapısı oluşturmak için önce geometri hazırlanması gerekmektedir. Bunun için tasarımda sadeleştirmeler yapmak önem taşımaktadır. Öncelikle PEM yakıt pilinin tasarım aşamasında ilgili kısımlarının adlandırılması yapılmalıdır. Bu ileride her bir kısmın tanımlanması için faydalı olacaktır. Daha sonra hacim bölgeleri oluşturulur.

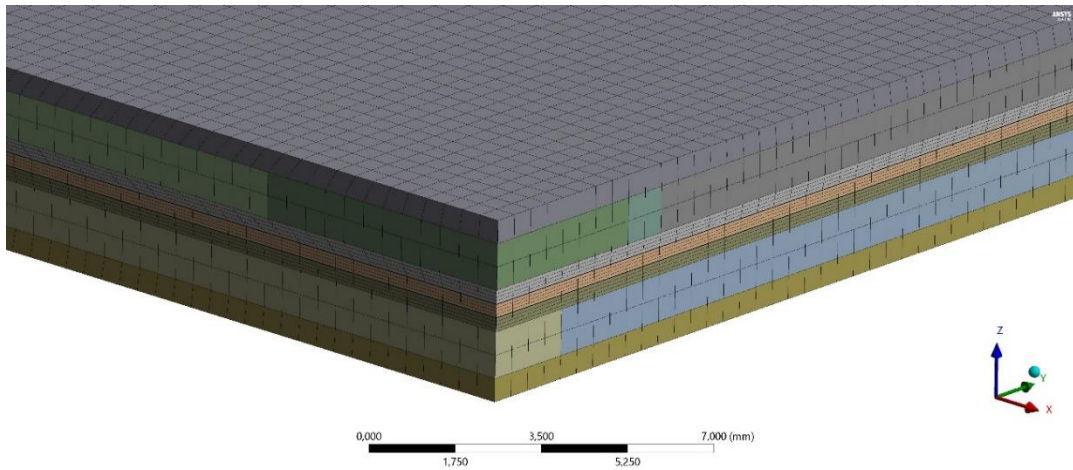
Ağ yapısı oluşturmak için bloklama işlemi yapılmıştır. Bloklama işlemi sayısal modeli oluşturmak için gerekli bir adımdır. Bu adımda üç boyutlu model ağ yapısının çözüm için daha hızlı ve doğruluğu daha yüksek ağ elde edebilmek için dikkatli ve hassas bir şekilde yürütülmelidir. Bu noktada optimum bloklama işlemi yaparak model için uygun çözüm ağı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3. 11’ de bloklama işleminin ardından oluşan yakıt pili görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 11. Çözüm alanı bloklamış solungaç tipi yakıt pili sayısal modeli

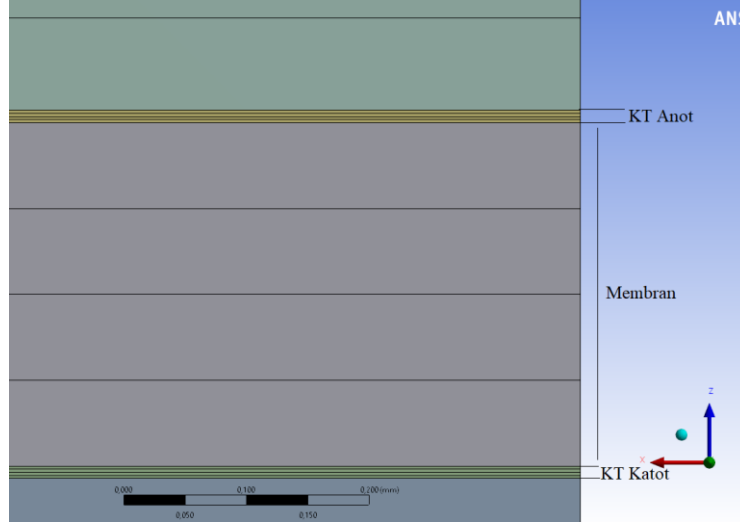
Bloklar oluşturulduktan sonra uygun çözüm ağı oluşturma çalışmalarına başlanmıştır. Model içerisindeki her bloğun kenarı belirli aralıklarda ayrılarak uygun ağ yapısına ulaşılmıştır. Ağ yapısı oluşturur iken kenar uzunluklarının çözüm için doğru ve hızlı bir aralıkta bulunması gerektiği göz önüne alınmalıdır.

Çözüm alanı daha doğru ve hızlı çözüm için altı yüzlü elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur ve çözüm ağında 542828 eleman bulunmaktadır. Elde edilmiş ağ yapısı Şekil 3. 12 deki gibidir.



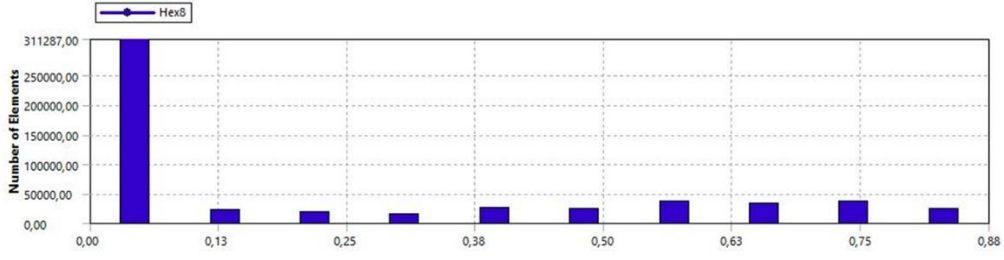
Şekil 3. 12. Solungaç tipi akış alanı sayısal çözüm ağ yapısı

Eleman sayısı belirlenir iken ve çözümde yüksek öneme sahip olan GDT anot, GDT katot, KT anot, KT katot ve membran tabakaları normal doğrultusunda en az 4 parça olacak şekilde Şekil 3. 13' de gösterildiği gibi ayrılmıştır. BPP anot ve katot tabakaları ise 0.5 mm eleman büyüklüğünde ağ yapısı oluşturulmuştur.

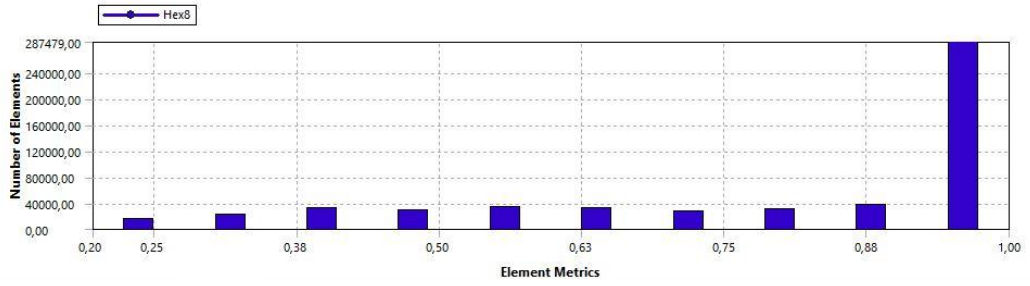


Şekil 3. 13. Solungaç tipi akış alanı membran, KT anot ve katot ağ yapısı

Belirlenen kalite parametrelerinden çarpıklık oranının 0.98 üzerinde olmaması tavsiye edilmektedir. Şekil 3. 14'de maksimum çarpıklık oranının 0.85 olduğu gözlenmiştir. Çözüm elamanlarını çoğunun ise 0 ile 0.13 arasında yoğunlaştığı görülmüştür. Diğer kalite parametrelerinden ortagonal kalitenin ise 0.3 değerinin altında olmaması önerilmektedir. Oluşturulan ağ yapısının yaklaşık 20000 elemanının Şekil 3. 15'de gösterildiği gibi 0.3 değerinin altında kaldığı gözlenmiştir. Model daha dikkatli incelendiğinde çeşitli ölçüsel farklılıkların bir araya getirilmemesinden ötürü belirlenen kalite değerinin altına inildiği saptanmıştır. Tüm model içerisinde öngörülen kalite miktarının altında yaklaşık %4 orana orana sahip olan elemanların çözüm için uygun olduğu saptanmıştır.



Şekil 3. 14. Ağ yapısında eleman kalitesi çarpıklık



Şekil 3. 15. Ağ yapısında eleman kalitesi ortagonel kalite

Ağ yapısı oluşturulan model için öncelikli olarak tanımlanması gereken sınır koşulları anot ve katot gaz akış kanallarının giriş kısmı için basınç çıkış kısımları için kütleli debi tanımlanması gereklidir. Sonrasında anot ve katot terminallerinin tanımlanmalarının gerçekleştirilmesi işlemi yapılır. Bu tanımlama işlemi gerçekleştirildikten sonra anot terminaline elektrik potansiyeli değeri sıfır olarak, katot terminaline ise sabit hücre potansiyel değeri tanımlanır.

Anot ve katot akış kanallarının giriş ve çıkış yüzeyleri haricindeki tüm yakıt pili parçalarının dış yüzeyleri duvar sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Bu işlemlere ek olarak membran-katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları-katalizör tabakaları ve gaz difüzyon tabakaları-gaz akış kanallarının temas halinde olan yüzeylerine gözenekli tabaka geçiş sınır şartı tanımlanmıştır.

3.3.3. Eleman sayısından bağımsızlık

Bir yakıt pilinin sayısal çözümü, modeli oluşturan akış hacimlerinin elemanlara bölünerek; oluşturulan her bir elemanlar üzerindeki node üzerine atanan matematiksel denklemlerin, oluşan ağ yapısı ile iteratif olarak çözülür. Ağ yapısında oluşturulan

elemanların boyutu, şekli ve sayısının belirlenmesi; modeli uygun şekilde temsil eden ağ yapısı, işlemlerin hesaplama süresi ve sonuç doğruluğu için verilen kısıtların altında belirlenmektedir. Eleman boyutunun küçük olması, sayısal modeli aslına daha uygun şekilde temsil ederken çözüm süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle eleman boyutu seçimi çözüm için süre ve çözüm kalitesi açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada hacimsel elemanlara bölünerek ağ yapısı oluşturulmuş modelin eleman sayıları ve hata değerleri Çizelge 3. 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2. Ağ Eleman sayısına karşılık akım ve değerlerinin değişimi

| | Eleman Sayısı | Akım Değeri (A) | Reaktant Hataları | | |
|---------|---------------|-----------------|-------------------|----------------|------------------|
| | | | H ₂ | O ₂ | H ₂ O |
| model 4 | 835200 | 0,7013 | 1,226E-05 | 3,224E-05 | 2,300E-05 |
| model 3 | 542828 | 0,7202 | 9,022E-06 | 1,210E-06 | 7,731E-06 |
| model 2 | 355264 | 0,7281 | 7,098E-06 | 3,492E-05 | 2,596E-05 |
| model 1 | 305292 | 0,7367 | 7,197E-06 | 2,205E-05 | 1,477E-05 |

Çizelge 3. 2’de eleman sayılarına karşılık gelen akım değeri ve hata değerleri karşılaştırıldığında model 3 olarak adlandırılan modelin çözüm için uygun en düşük hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple çözüm için model 3 ağ yapısı kullanılmıştır.

Roache (1998) HAD yöntemiyle çözülecek olan problemlerin ağ yapısının doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla “Eleman Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index)” olarak dilimize çevirebileceğimiz yöntem geliştirmiştir. Yöntem eleman büyüklüklerinin değiştirilerek farklı ağ yapıları ile elde edilen sonuçlarının , hangi ağ yapısı ile doğruluğunun ölçülmesi işlemidir. Bu işlem sonunda hangi ağ yapısı ile beraber çözüm yapılacağına karar verilir. İşlem sonunda ağ GCI değerleri %2 den küçük ise ağ yapısının eleman sayısından bağımsızlaşarak çözüm sunduğu kabul edilir. Bu adımlardan sonra Asimptotik yakınsama aralığı hesaplanır. Asimptotik yakınsama aralığı ağ yapısının ve çözümlerin verimliliği ile alakalı bir durumdur ve sonuç bire yakın olduğunda bu aralıkta olduğu kabul edilir.

Çizelge 3. 2 de yer alan eleman sayılarının arasındaki oranlar sırasıyla model 4-3 için $r_{43} = 0.835/0.542 = 1.54$ ve model 3-2 için $r_{32} = 0.542/0.355 = 1.52$ dir. Ortalama ise 1.53 dür.

Doğru ağ yapısının kullanıldığından emin olmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan yöntem olan GCI kullanılarak tablodaki değerlerle bir tahmin yapılmıştır. Bu tahmin için önce yakınsama mertebesi (p) şu şekilde hesaplanmıştır:

$$p = \frac{\ln\left(\frac{f_4 - f_3}{f_3 - f_2}\right)}{\ln r} = \frac{\ln\left(\frac{0.7013 - 0.7202}{0.7202 - 0.7281}\right)}{\ln 1.53} = 2.05 \quad (3.51)$$

Çizelge 3. 2'de tahmin değeri fonksiyonu olarak alınan akım değerinin net değerinin tahmini şu şekilde hesaplanmıştır:

$$f_{net} \approx f_2 - \frac{f_3 - f_2}{r_{32}^p - 1} = 0.7281 - \frac{0.7202 - 0.7281}{1.52^{2.05} - 1} \approx 0.7339 \quad (3.52)$$

f_{net} değeri %0.19 $\left(\frac{f_2 - f_{net}}{f_2} \times 100\right)$ bu çalışmada kullanılan değerden farklıdır. Ağ yapıları arasındaki GCI değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$GCI_{32} = F_s \frac{\frac{f_3 - f_2}{f_2}}{r_{32}^p - 1} = 1.25 \frac{\frac{0.7202 - 0.7281}{0.7281}}{1.52^{2.05} - 1} = -0.0099 = 0.99\% \quad (3.53)$$

$$GCI_{43} = F_s \frac{\frac{f_4 - f_3}{f_2}}{r_{43}^p - 1} = 1.25 \frac{\frac{0.7013 - 0.7202}{0.7281}}{1.54^{2.05} - 1} = -0.0227 = 2.27\% \quad (3.54)$$

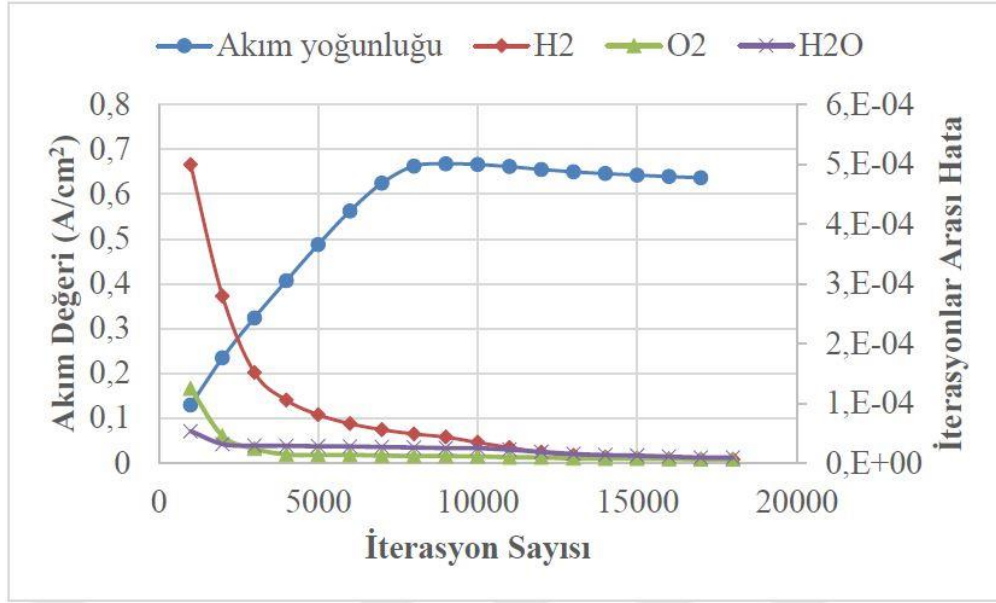
GCI_{32} %0.99 eleman sayısından bağımsızlaştığı görülmektedir. p'yi tahmin etmek için üç ağ yapısı kullanıldığından, bir güvenlik faktörü $F_s=1.25$ kullanılır. Bulunan değerlerin asimptotik yakınsama aralığında olduğunu kontrol edersek:

$$\frac{GCI_{43}}{r^p GCI_{32}} = \frac{-0.0227}{1.53^{2.05} \cdot (-0.0099)} = 0.958 \approx 0.96 \quad (3.55)$$

3.3.4. Çözüm prosedürü

Ağ yapısı ve sınır şartları tanımlanmış olan yakıt pili modeli ANSYS 2020 R1/FLUENT ticari yazılımı ile çözülmüştür. FLUENT yazılımı birçok alanda kullanılabilecek akış, türbülans, ısı ve kütle transferi ve reaksiyon gibi modellemelerde kullanılabilen HAD yazılımıdır. Bu modellemeleri içerisinde barındırdığı süreklilik, momentum ve enerji korunum denklemlerini iteratif yollar ile çözer. Yazılım içerisinde tanımlı gerekli modellemeleri çözümlenebilmek için özel olarak geliştirilmiş çözümleniciler bulunmaktadır ve bu çözümlenicilerin aktifleştirebilmesi için komut satırına ilgili kodun yazılması gereklidir. PEM yakıt hücresi modülü aktif edebilmek için komut satırına (define/models/addon-module) komutu yazılarak aktifleştirme işlemi yapılır. FLUENT yazılımı denklemlerin çözümünde sayısal bir yöntem olan sonlu hacimler metodunu kullanarak çözüme gitmektedir. İçerisinde çözüm için çeşitli algoritmalar bulunan yazılım basınç-hız eşleşmesi için SIMPLE algoritmasının kullanımını uygundur.

Çözüm için iterasyon sayısının belirlenmesinde Çelik (2020) gerçekleştirdiği çalışmalarda 15000 iterasyon sonunda elde edilen değerlerin hata değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu saptamıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen analizlerde iterasyon sayısı 15000 olarak belirlenmiştir. Yapmış olduğu çalışma ile ilgili görsel Şekil 3. 16'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 16. İterasyon sayısına bağlı olarak hata ve değerlerin değişimi (Çelik 2020)

Yakıt pili çalışma şartları ve elektrokimyasal çözümler için gerekli olan parametreler Çizelge 3. 3 ve Çizelge 3. 4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 3. Elektrokimyasal parametreler

| Parametre | İlgili Bölüm | | Birim |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Anot | Katot | |
| Referans Akım Yoğunluğu | 10000 | 20 | A/m ² |
| Rerans konsantrasyon | 1 | 1 | kmol/m ³ |
| Konsantrasyon Katsayısı | 0.5 | 1 | |
| Değişim Katsayısı (a) | 1 | 1 | |
| Değişim Katsayısı (b) | 1 | 1 | |
| Açık Devre Gerilimi | 0.98 | | Volt |
| Toplan Sızıntı Akımı | 0 | | Amper |
| Çok Faz Parametreleri | | | |
| GDT için gözenek tıkama | 2.5 | | |
| Transfer yükü için gözenek tıkama | 2.5 | | |
| Bağıl Geçirgenlik için Katsayı | 3 | | |
| KT Parametreleri | | | |
| Gözeneklilik | 0.5 | 0.5 | |
| Viskoz Direnç | 1·10 ¹² | 1·10 ¹² | 1/m ² |
| Yüzey/Hacim Oranı | 200000 | 200000 | 1/m |
| Membran Parametreleri | | | |
| Eşdeğer Ağırlık | 1100 | | kg/mol |
| Proton İletkenliği Katsayısı | 1 | | |
| Proton İletkenliği Üssü | 1 | | |
| GDT Parametreleri | | | |
| Gözeneklilik | 0.5 | 0.5 | |
| Viskoz Direnç | 1·10 ¹² | 1·10 ¹² | 1/m ² |

Tasarımı gerçekleştirilmiş olan yakıt pilinde hem anot hem katot tarafında iki giriş ve iki çıkış bulunmaktadır. Çizelge 3. 4'de sınır şartları belirtilmiştir. Kütleli debi açısından iki farklı oranda analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk durumda anot ve katot taraflarında iki giriş için toplam debi %50-%50 olarak paylaştırılmıştır. İkinci gerçekleşen senaryoda ise toplam debi miktarı giriş 1 için %70 , giriş 2 için %30 oranında paylaşılacak şekilde hem anot hem katot tarafında sınır şartları verilmiştir. Çalışmalar boyunca 20,45,70 °C sıcaklıklarında ve 1,2 ve 3 atm işletme basınçlarında hedeflenen çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

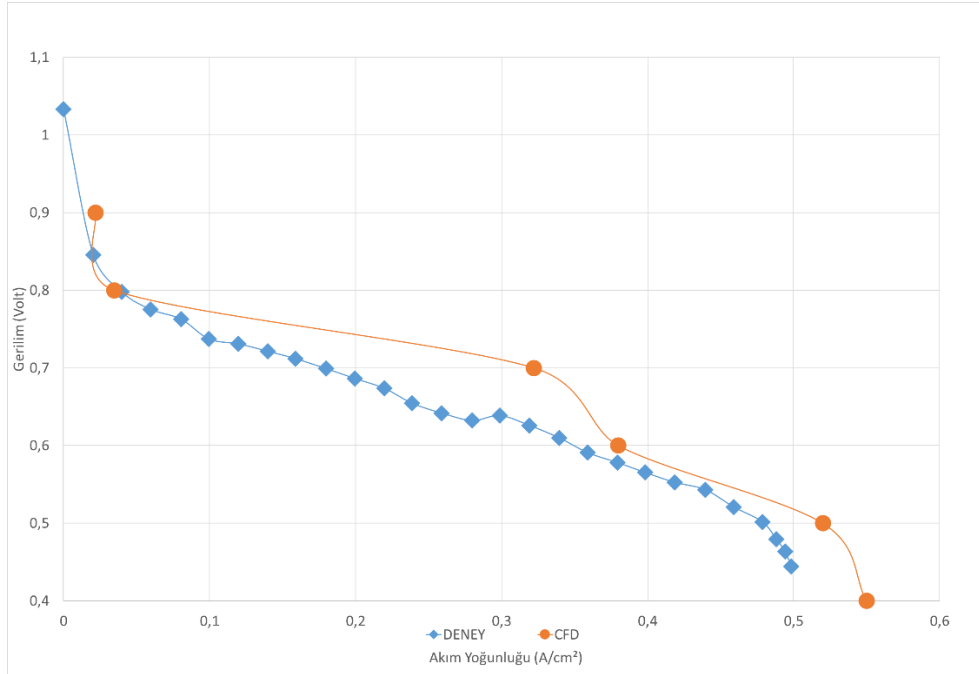
Çizelge 3. 4. Çalışma şartları **A)** %50-%50 **B)** %70-%30

| Anode İlet1 | |
|----------------------|------------|
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.00049752 |
| % H ₂ | 0,5 |
| % H ₂ O | 0,5 |
| Anode İlet2 | |
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.00049752 |
| % H ₂ | 0,5 |
| % H ₂ O | 0,5 |
| Cathode İlet1 | |
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.0004935 |
| % O ₂ | 0,21 |
| % H ₂ O | 0,4 |
| Cathode İlet2 | |
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.0004935 |
| % O ₂ | 0,21 |
| % H ₂ O | 0,4 |
| A | |

| Anode İlet1 | |
|----------------------|-------------|
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.000696528 |
| % H ₂ | 0,5 |
| % H ₂ O | 0,5 |
| Anode İlet2 | |
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.000298512 |
| % H ₂ | 0,5 |
| % H ₂ O | 0,5 |
| Cathode İlet1 | |
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.0006909 |
| % O ₂ | 0,21 |
| % H ₂ O | 0,4 |
| Cathode İlet2 | |
| Kütleli debi (kg/sn) | 0.0002961 |
| % O ₂ | 0,21 |
| % H ₂ O | 0,4 |
| B | |

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Geliştirilen modeli doğrulamak amacıyla aynı alana sahip olan paralel PEM yakıt pili sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 4. 1’de gösterildiği gibi Salva ve ark. (2016) elde ettikleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve özellikle ohmik kayıp bölgesi ve konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu bölgelerde sapmalar meydana gelmiştir. Deneysel sonuçlar 60 °C çalışma sıcaklığında, 1 bar çalışma basıncında tamamen nemlendirilmiş reaktantlar kullanılarak yapılmıştır. Deneysel sonuçları ile analiz sonuçları arasındaki uyumluluk nispeten dengelidir. CFD sonuçlarının deneysel sonuçlarından baskın çıktığı bölgelerde ise balık solungaç modelinin avantajları görülmektedir.

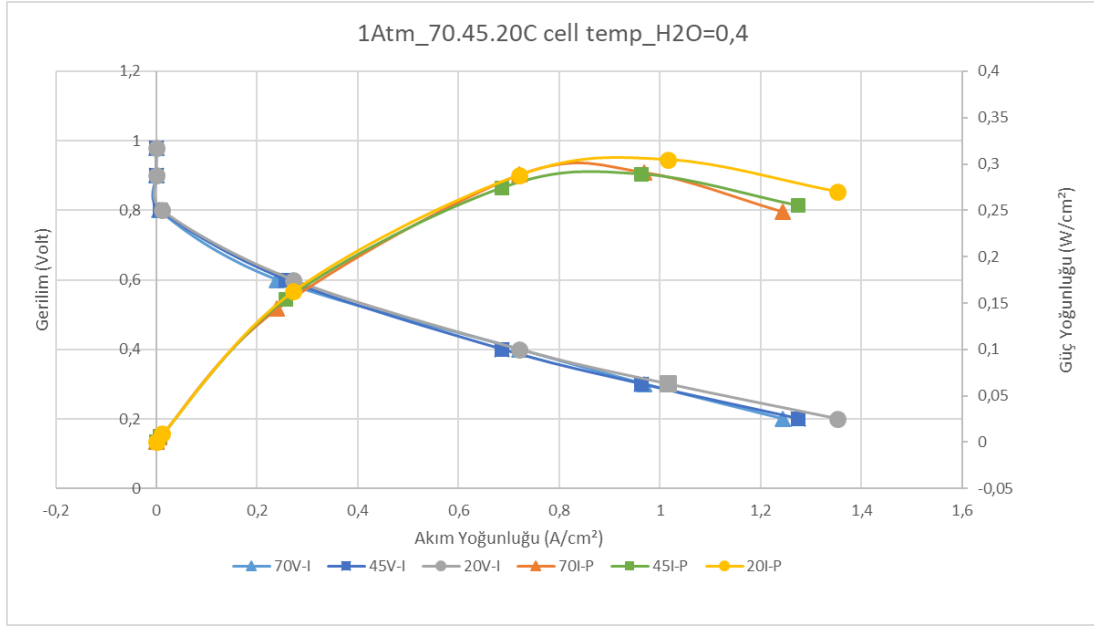


Şekil 4. 1. Yakıt pili polarizasyon eğrilerinin karşılaştırılması

4.1. %70-30 Sıcaklık-Performans İlişkisi

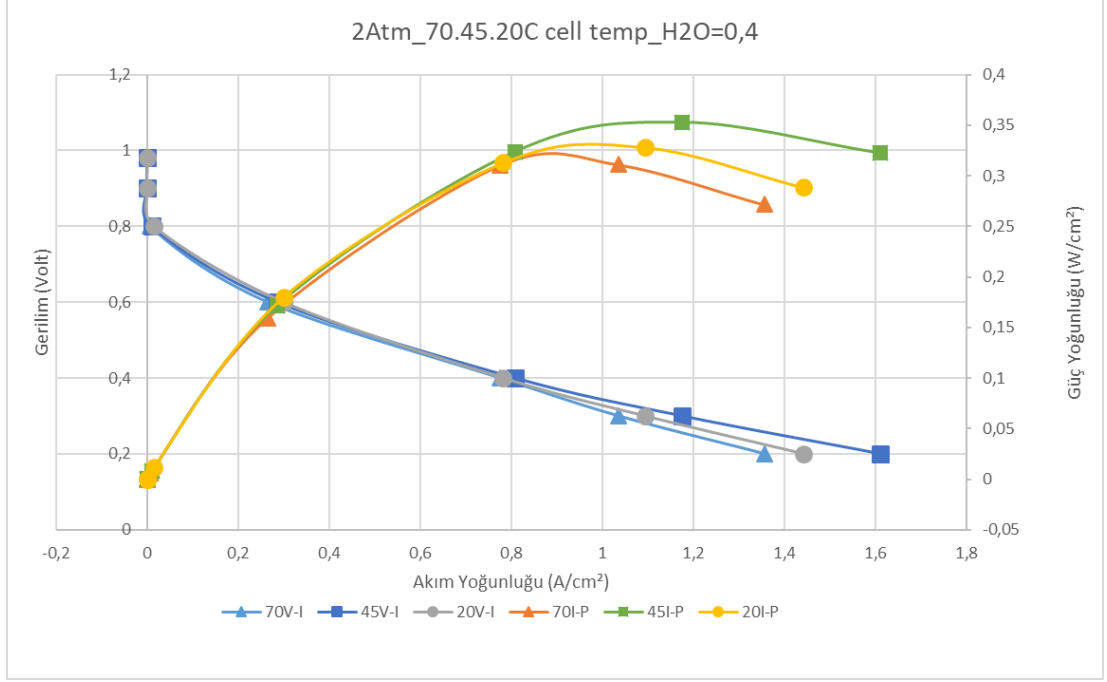
Sıcaklığın performans üzerindeki etkileri 20, 45 ve 70 °C pil çalışma sıcaklıkları için her bir çalışma basıncında basınç sabit tutularak sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Şekil 4. 2’de 1 atm basınç değerinde maksimum güç yoğunluğu 20 °C pil sıcaklığında görülürken 1,016 A/cm² akım yoğunluğunda 0,304 W/cm² olarak ölçülmüştür. Şekil 4. 3’de 2 atm basınç değerinde maksimum güç yoğunluğu 45°C pil sıcaklığında görülürken 1,175 A/cm² akım yoğunluğunda 0,352 W/cm² olarak gözlenmiştir. Şekil 4. 4’de 3 atm basınç

değerinde ise maksimum güç yoğunluğu yine 45 °C pil sıcaklığında görülürken 1,142 A/cm² akım yoğunluğunda 0,342 W/cm² olarak gözlenmiştir. Maksimum güç yoğunlukları karşılaştırıldığında en düşük güç yoğunluğu 20 °C pil sıcaklığında 1 atm basınç altında, maksimum güç yoğunluğu ise 45 °C pil sıcaklığında 2 atm basınç altında maksimum güç yoğunluğu elde edildiği tespit edilmiştir.



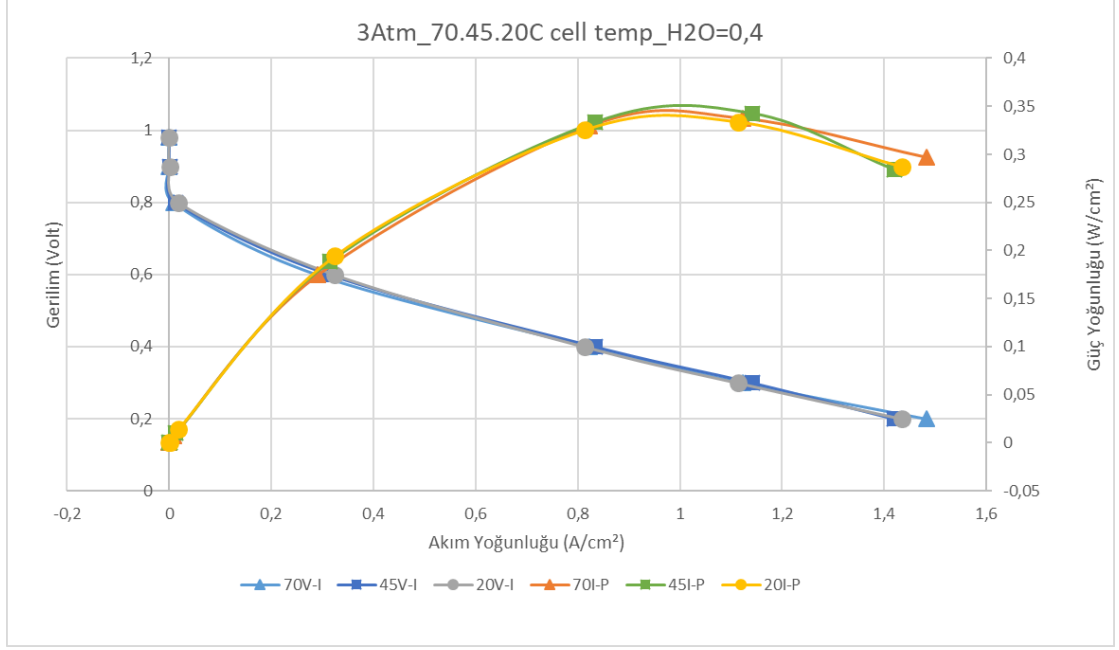
Şekil 4. 2. %70-30 1 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu

Akım-gerilim eğrisi 0,1 ile 0,3 A/cm² aralığındaki akım yoğunluğunda 70 °C pil çalışma sıcaklığında elde edilen gerilim değeri 45 °C pil çalışma sıcaklığında elde edilen gerilim değerlerinden düşük olduğu görülmüştür. Ohmik kayıpların baskın olduğu bölgede gözlenen bu durum 70 °C çalıştırılan pilin membranının kurumaya başladığını işaret eder. Akım yoğunluğu arttıkça 45 ve 70 °C ohmik kayıpların neredeyse eşitlendiği görülmektedir. 20 °C çalışma sıcaklığında ohmik kayıplar diğer çalışma sıcaklıklarına göre daha iyi durumdadır. Bu durum yakıt pillerinde düşük çalışma sıcaklıklarında membran nem oranını koruduğu için iletkenliğini muhafaza ettiğinin göstergesidir. 0,9 ile 1,3 A/cm² akım yoğunluğunda ise 70 °C konsantrasyon kayıpları meydana gelmektedir. Bu durum reaktantların elektrolit üzerinde elektro kimyasal reaksiyonlar ile hızlı şekilde tüketilmesi nedeni ile ortaya çıkar. Özellikle akım yoğunluğu arttığı zaman bu düşüş keskinleşebilir.



Şekil 4. 3. %70-30 2 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu

20 °C çalıştırılan yakıt pili ohmik kayıpları düşük akım yoğunluklarından 0,6 A/cm² aralığında diğer çalışma sıcaklıklarına göre daha düşük ve eşit düzeyde olduğu görülmektedir. 70 °C çalışma sıcaklığında ise akım yoğunluğu arttıkça aktivasyon ve ohmik kayıplar artmaktadır. Basıncın artması ile birlikte yoğunlaşma miktarı artarak membran nemlendirmesine katkı sağlamakta olup özellikle 45°C için ohmik direncin düşmesi sağlanmıştır.



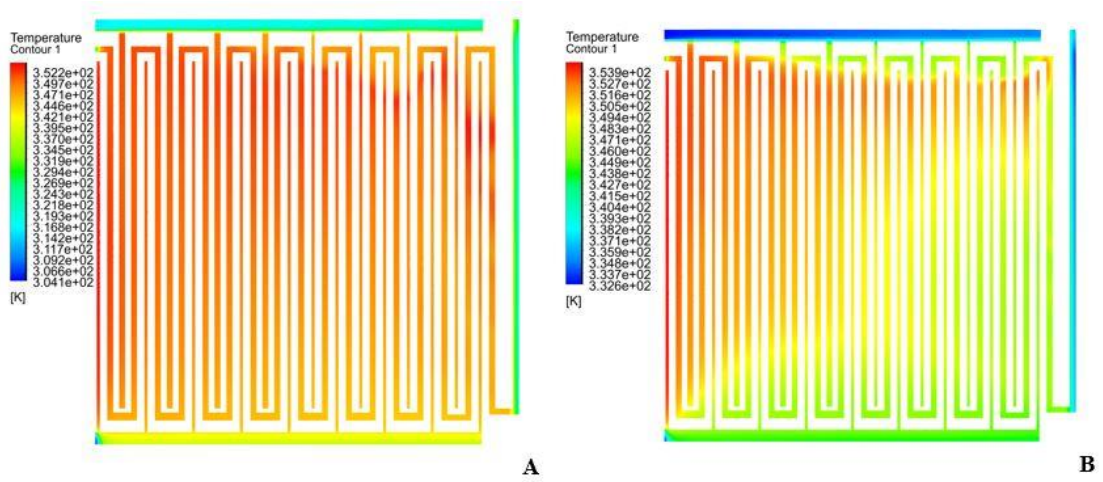
Şekil 4. 4. %70-30 3 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu

3 atm çalışma basıncında analizleri gerçekleştirilen yakıt pilinde yüksek akım yoğunluklarına kadar neredeyse birbirlerini izler seviyede kayıplar ile devam etmişlerdir. Fakat 1,2 A/cm² akım yoğunluğu ve sonrasında 20 ve 45 °C çalışma sıcaklığında çalıştırılan yakıt pili konsantrasyon kayıpları meydana gelmektedir.

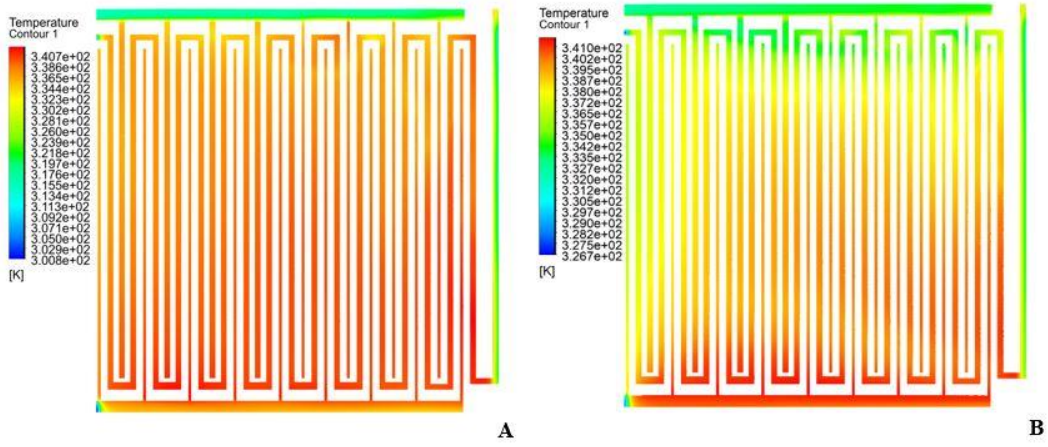
%70-30 besleme düzeninde bir ucu giriş manifolduna bağlı olan ve diğer ucu kapalı olan kanal bölümüne yüksek miktarda reaktant girişi olmasına karşın giriş ve çıkış bölümleri olan serpantin şeklindeki orta hatta çok daha düşük bir debi verilmektedir. Bu durum orta hat ve bir ucu kapalı kenar hat arasında yüksek konsantrasyon farkları oluşturarak omuz altı konveksiyon mekanizmasını hızlandırmaktadır. Omuz altı konveksiyon belli bir ölçüye kadar reaktantların gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakası içindeki yayılımını desteklese de; fazlaşmış hali membran dehidrasyonu ve reaktantların kullanılmadan bypass edilmesine yol açmaktadır. Basıncın artması ile birlikte yoğuşma miktarı artarak membran nemlendirmesine katkı sağladığı görülmüştür.

%70-30 debi paylaşımlı giriş sınır koşulu verilen balık solungaç akış alanında sıcaklık dağılımı 70, 45 ve 20°C incelenmiştir. Sıcaklık dağılımları anot ve katot tarafındaki gaz akış kanallarının (GCL) orta yüzeylerinden (anot z = 0,95 mm ve katot z = -0,95 mm) elde edilmiştir.

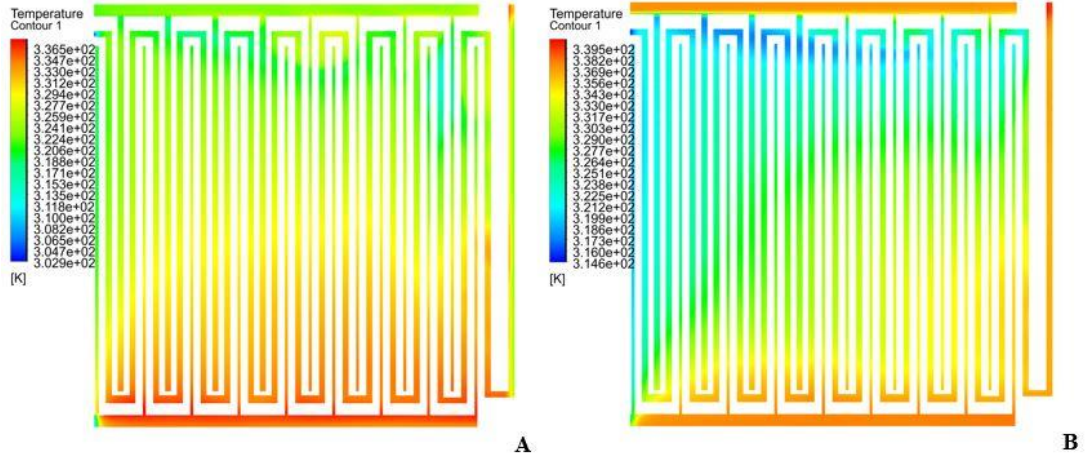
Gaz giriş sıcaklıkları anot ve katot tarafında 343,15 K basınç ise 1 atm olarak tanımlanmış, pil çalışma sıcaklığı değiştirilerek yakıt hücresinde kanallar boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri gözlenmiştir.



Şekil 4. 5.70°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot



Şekil 4. 6. 45°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot

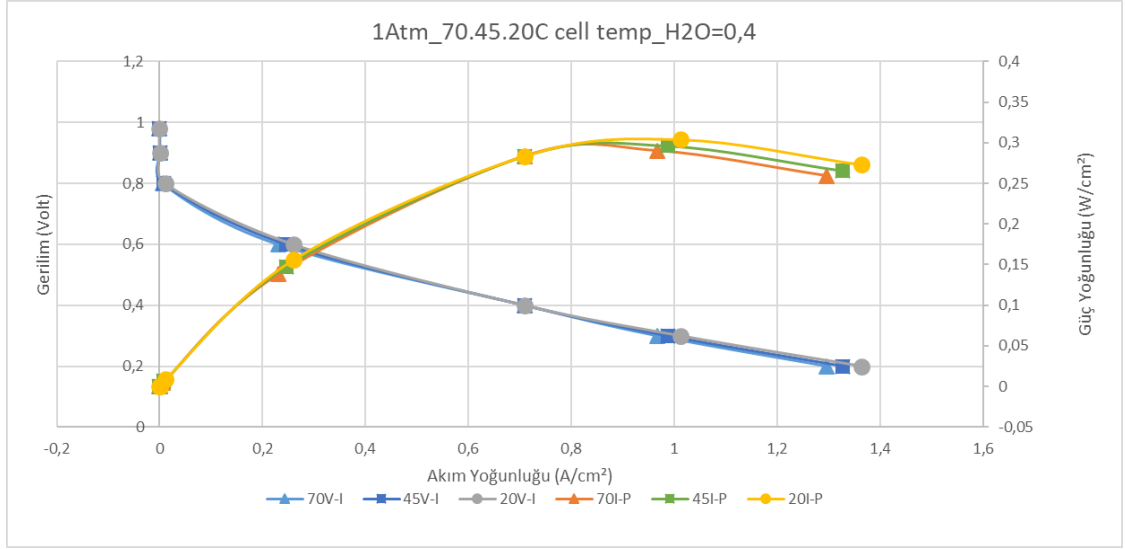


Şekil 4. 7. 20°C gaz akış kanallarında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot

Şekil 4. 5, Şekil 4. 6 ve Şekil 4. 7 üç farklı türdeki çalışma sıcaklıkları incelendiğinde çalışma sıcaklığı düşürüldükçe çalışma sıcaklığının etkisi gaz akış kanallarına yansımıştır. Çalışma sıcaklığı azaldıkça gaz akış kanallarında sıcaklığın azaldığı ve sıcaklık dağılımının uniform bir şekilde olduğu gözlenmiştir.

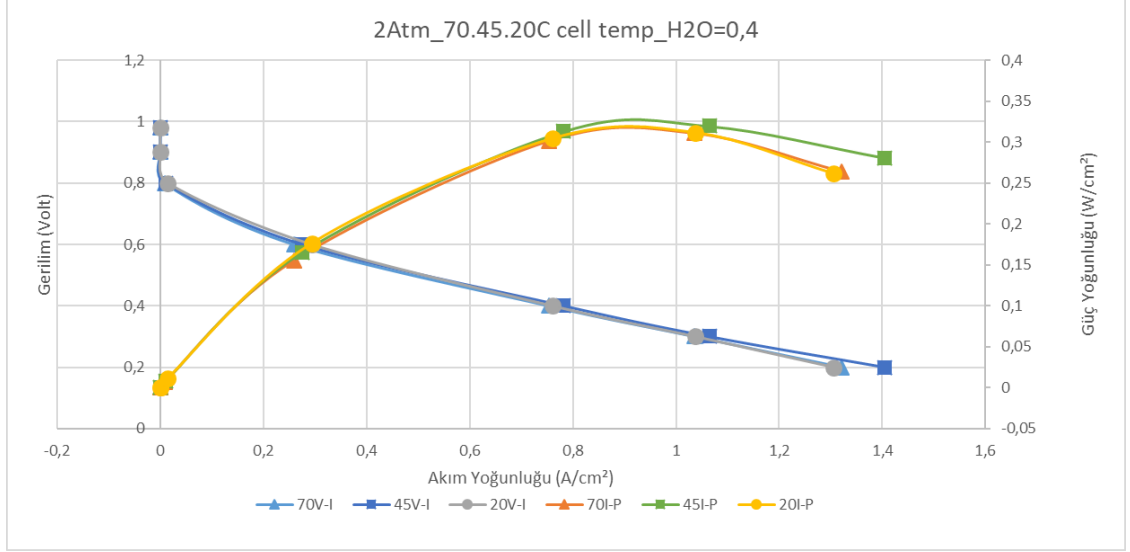
4.2. %50-50 Sıcaklık-Performans İlişkisi

%50-50 debi paylaşımlı giriş sınır koşulu verilen balık solungaç akış alanında sıcaklığın performans üzerine etkileri %70-30 debi paylaşımı yapılmış olan model ile aynı şartlar altında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4. 8’de 1 atm çalışma basınç değerinde maksimum güç yoğunluğu 20 °C pil çalışma sıcaklığında görülürken 1,012 A/cm² akım yoğunluğunda 0,303 W/cm² olarak ölçülmüştür. Şekil 4. 9’da 2 atm çalışma basınç değerinde maksimum güç yoğunluğu 45 °C pil çalışma sıcaklığında görülürken 1,064 A/cm² akım yoğunluğunda 0,319 W/cm² olarak gözlenmiştir. Şekil 4. 10’de 3 atm çalışma basınç değerinde ise maksimum güç yoğunluğu yine 70 °C pil çalışma sıcaklığında görülürken 1,264 A/cm² akım yoğunluğunda 0,379 W/cm² olarak gözlenmiştir. Güç yoğunluğu açısından en düşük gelen değer 20°C pil çalışma sıcaklığında 1 atm basınç altında, maksimum güç yoğunluğu ise 70°C pil çalışma sıcaklığında 3 atm basınç çalışma altında maksimum güç yoğunluğu elde edildiği tespit edilmiştir.



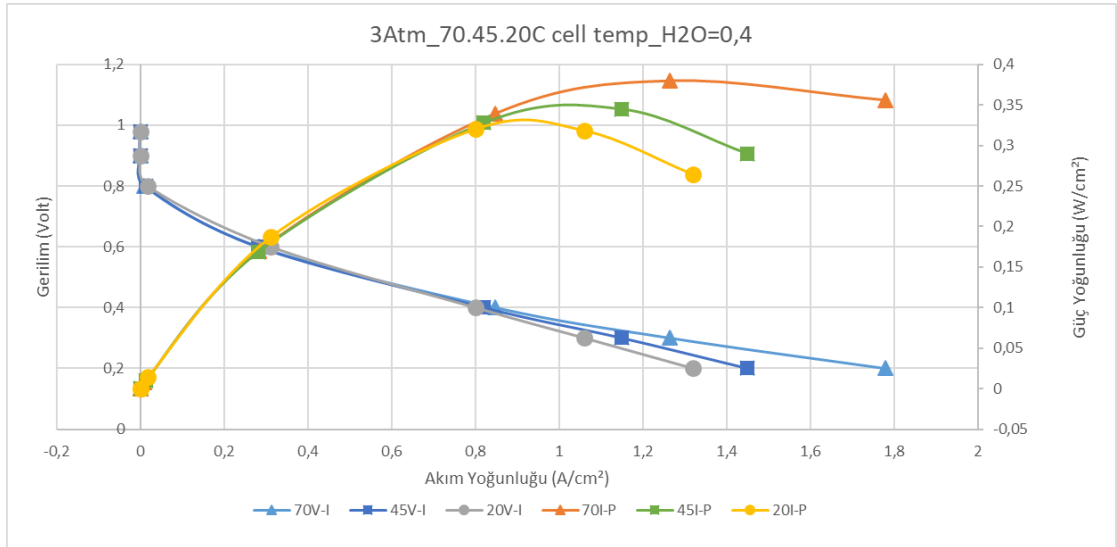
Şekil 4. 8. %50-50 1 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu

Akım-gerilim eğrisinin 0,1 ile 0,3 A/cm² arasındaki akım yoğunluğu bölümü incelendiğinde %70-30 debi paylaşımlı modeldeki gibi 70 °C pil çalışma sıcaklığında elde edilen gerilim değerinin 45 °C pil çalışma sıcaklığı ile elde edilen değerden düşük olduğu görülmüştür. Bu durum daha önce açıklandığı gibi ohmik kayıpların belirgin olduğu bölgedir ve membrandaki etkileri aynıdır. Akım yoğunluğu arttıkça her çalışma sıcaklığında ohmik kayıpların neredeyse eşitlendiği görülmektedir. 20 °C çalışma sıcaklığında ohmik kayıplar diğer çalışma sıcaklıklarına göre daha iyi durumdadır ve aynı durum %70-30 debi paylaşımlı modelde de görülmüştür. Bu durum yakıt pillerinde düşük çalışma sıcaklıklarında membran nem oranını koruduğu için iletkenliğini muhafaza ettiğinin göstergesidir. 0,9 ile 1,3 A/cm² akım yoğunluğunda ise 70 ve 45 °C konsantrasyon kayıpları meydana gelmektedir ve sebepleri Bölüm 4.1’de açıklanmıştır.



Şekil 4. 9. %50-50 2 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu

2 atm çalışma basıncında analizleri gerçekleştirilen yakıt pilinde tüm sıcaklıklarda çalıştırılan yakıt pili ohmik kayıpları düşük akım yoğunluklarından yüksek akım yoğunluklarına kadar neredeyse aynı miktardadır.



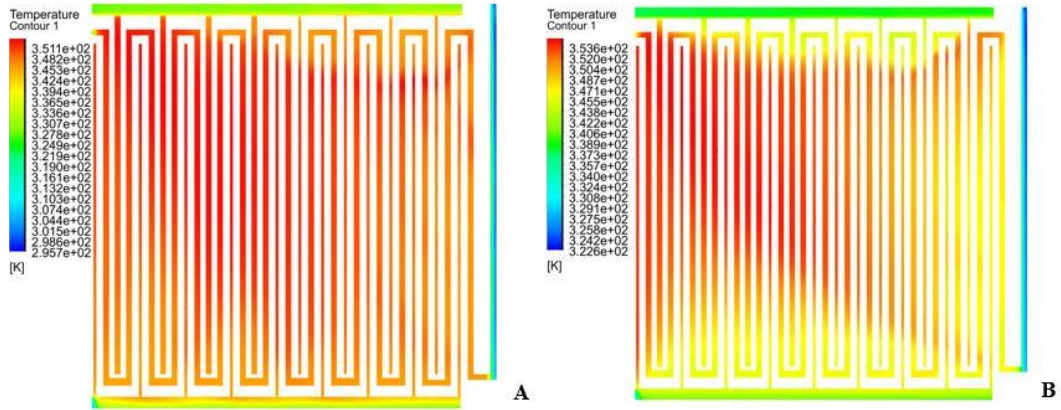
Şekil 4. 10. %50-50 3 atm gerilim-akım ve güç -akım yoğunluğu

3 atm çalışma basıncında analizleri gerçekleştirilen yakıt pilinde 70 °C çalışma sıcaklığında başlangıçta ohmik kayıplar diğer çalışma sıcaklıklarına göre daha etkili olmuştur. Akım yoğunluğunun artması ile beraber bu çalışma basıncında 70 °C

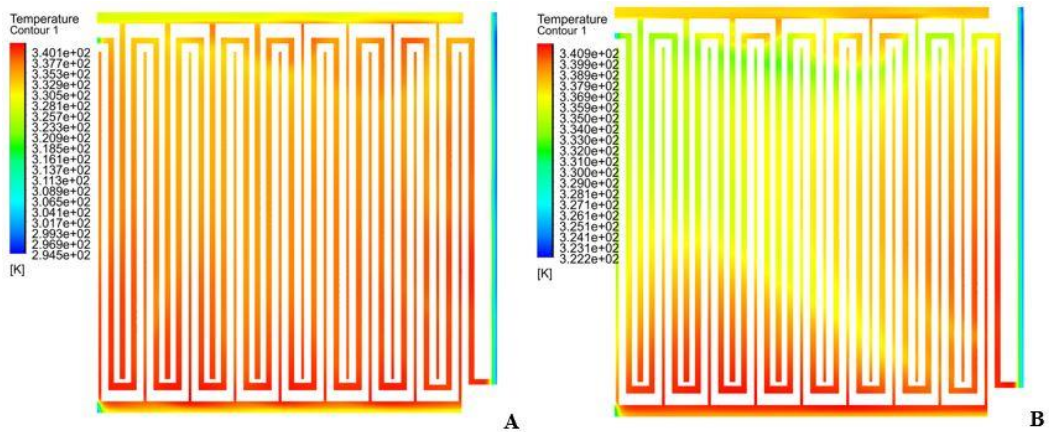
çalıştırılan yakıt pili diğer sıcaklıkta çalışmaları gerçekleştirilen yakıt pillerine göre daha az kayıp vermiştir.

%50-50 debi paylaşımlı giriş sınır koşulu verilen balık solungaç akış alanında sıcaklık dağılımı 70, 45 ve 20°C incelenmiştir. Sıcaklık dağılımları anot ve katot tarafındaki gaz akış kanallarının orta yüzeylerinden (anot $z = 0,95$ mm ve katot $z = -0,95$ mm) elde edilmiştir.

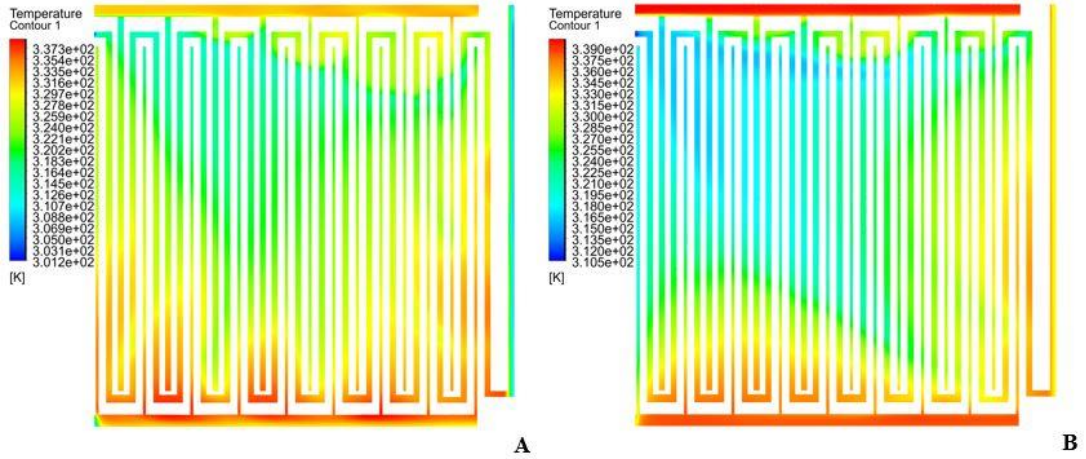
Gaz giriş sıcaklıkları anot ve katot tarafında 343,15 K basınç ise 1 atm olarak tanımlanmış, pil çalışma sıcaklığı değiştirilerek yakıt hücresinde kanallar boyunca meydana gelen sıcaklık değişimleri gözlenmiştir.



Şekil 4. 11. 70°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot



Şekil 4. 12. 45°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı A) Anot B) Katot

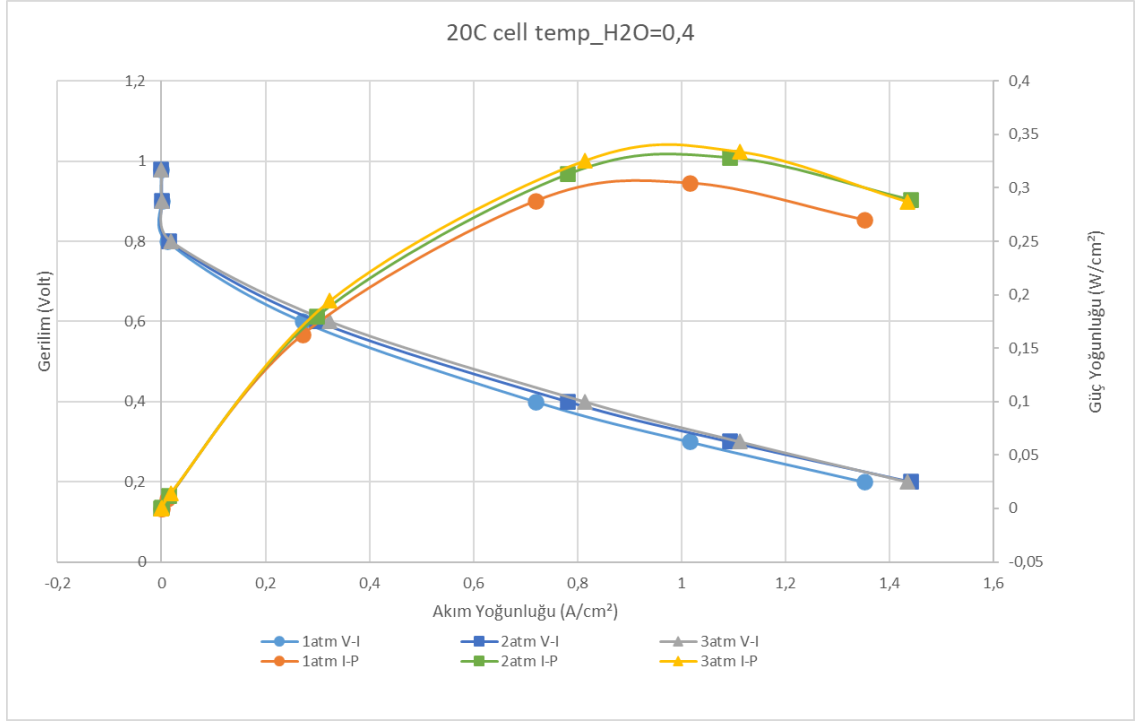


Şekil 4. 13. 20°C çalışma sıcaklığında sıcaklık dağılımı **A) Anot B) Katot**

Şekil 4. 11, Şekil 4. 12 ve Şekil 4. 13 üç farklı türdeki çalışma sıcaklıkları incelendiğinde çalışma sıcaklığı düşürüldükçe çalışma sıcaklığının etkisi gaz akış kanallarına yansımıştır. Çalışma sıcaklığı azaldıkça gaz akış kanallarında sıcaklığın azaldığı ve sıcaklık dağılımının uniform bir şekilde olduğu gözlenmiştir.

4.3. %70-30 İşletme Basıncı-Performans İlişkisi

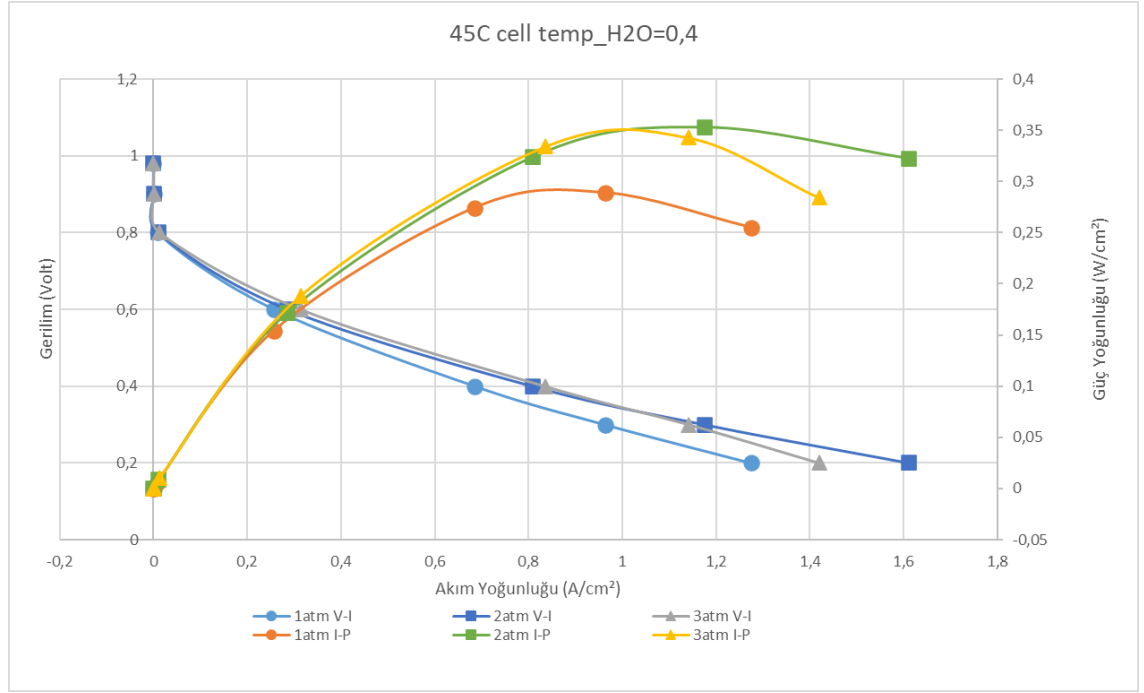
Balık solungaç akış alanında yakıt pili performans ve çalışma basıncı ilişkisinin belirlenebilmesi için 1, 2 ve 3 atm çalışma basıncında analizler yapılmıştır. 20 °C sabit pil çalışma sıcaklığında farklı basınçlardaki performans eğrileri Şekil 4. 14'de gösterilmiştir. Sabit sıcaklık altında basınç 1'den 2 atm çalışma basıncına yükseltildiğinde güç yoğunluğu %7.61 artış olmuştur. Diğer yandan basınç 1'den 3 atm çalışma basıncına yükseltildiğinde ise; güç yoğunluğu %9.53 artış yaşanmıştır. Performanstaki bu artış Nernst eşitliği ile açıklanabilir.



Şekil 4.14. %70-30 20°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri

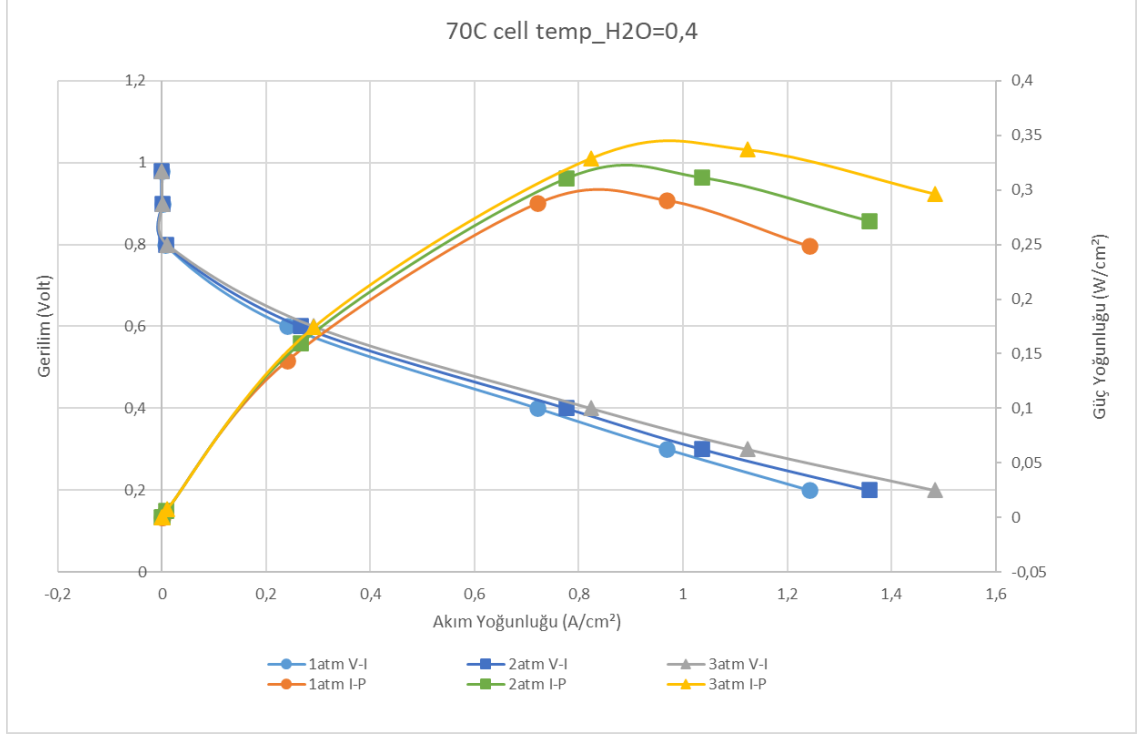
45°C sabit pil çalışma sıcaklığı ile yapılan analizlerde pil performansının basınç ile değişimi Şekil 4. 15’de verilmiştir. Basınç 1 atm’ den 2 atm yükseltildiğinde güç yoğunluğunda %22 artış kaydedilmiştir. Basınç 1 atm’ den 3 atm ye çıkartıldığında ise güç yoğunluğundaki artış miktarı %18,6 olmuştur. 45°C pil sıcaklığında farklı çalışma basınçlarında yapılan analizlerde ise Nernst eşitliği ile açıklayabileceğimiz performans artışı belirgin olmaktadır. Ohmik kayıpların baskın olduğu 0,1-1 A/cm² aralığı basıncın artışı ile gerilim kayıpları azalmaktadır. Çalışma basıncının yükselmesi ile doyma sıcaklığını yükselmesine sebep olmaktadır ve bu nedenle membran nem içeriğini korumaktadır. Akım yoğunluğunun 1 A/cm² üzerinde olan bölgede yani konsantrasyon kayıplarının etkili olduğu bölgede sonuçlar ele incelendiğinde, 2 atm çalışma basıncında kayıplar en az sevide iken, 3 atm çalışma basıncında konsantrasyon kayıplarının beklenenin aksine arttığı görülmüştür. Yüksek akım yoğunluklarında yakıt pili hücresi içinde üretilen su miktarı artmaktadır. Öte yandan artan basınçla birlikte su buharının doyma sıcaklığı azalmaktadır. Sözü geçen bu iki faktörün bileşik etkisi olarak hücre içindeki yoğuşma miktarı artmaktadır. Ancak ohmik kayıplar bölgesinde 3 atm işletme basıncındaki kaybın 2 atm işletme basıncına göre daha düşük gözlenirken konsantrasyon kayıpları bölgesinde basınç artışı ile birlikte düşüş yaşanması katalizör tabakası üzerinde

gerçekleşen düşük seviye su akıntısı olarak açıklanabilir. Bu su akıntı şekli henüz gaz difüzyon tabakası ve kanal içine sirayet etmemiş ve katalizör parçacıkları üzerinde oluşan ilk su damlacığı çekirdekleri şeklinde tanımlanabilir. Oluşan su damlacıkları reaktif gazların katalizör parçacıklarına temasını engelleyerek katalizör toplam yüzey alanını daraltmasına yol açmakta ve konsantrasyon kaybı şeklinde kendini göstermektedir.



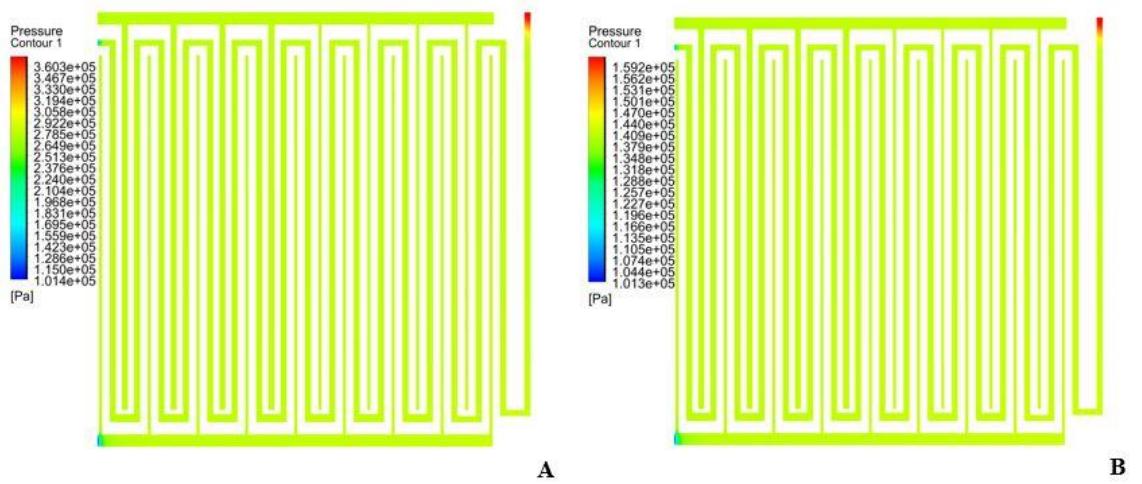
Şekil 4. 15. %70-30 45°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri

70°C pil sıcaklığında farklı çalışma basınçlarında yapılan analizlere ait performans eğrileri Şekil 4. 16'da verilmiştir. Buna göre basınç 1 atm' den 2 atm basınca yükseltildiğinde güç yoğunluğu %4,3 artış göstermiştir. Basınç 3 atm' ye yükseltildiğinde ise güç yoğunluğu %15,92 artış göstermiştir. 1, 2 ve 3 atm basınçlarındaki güç yoğunluğu eğrileri arasındaki değişimler ayırt edilmektedir. 70 °C' lik işletme sıcaklığında basınç artışı ile birlikte yoğuşma miktarının artması sonucu yüksek sıcaklıklarda görülen kuruma etkilerinin azalarak ohmik kayıp bölgesinde iyileşme gözlenmiştir. Bunun yanında sıcaklığın yeterince yüksek olması 45°C' de görülen hafif düzey katalizör akıntısının önüne geçilmesini sağlamıştır.

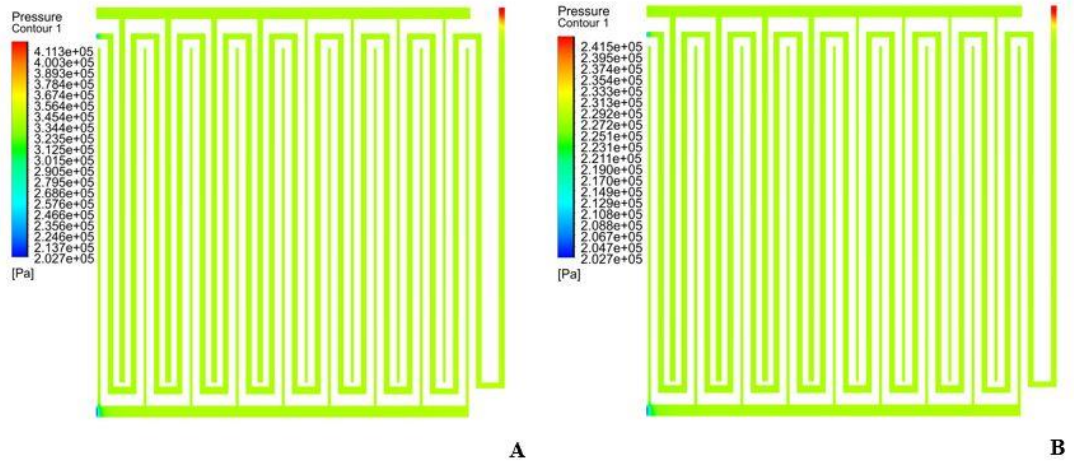


Şekil 4. 16. %70-30 70°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri

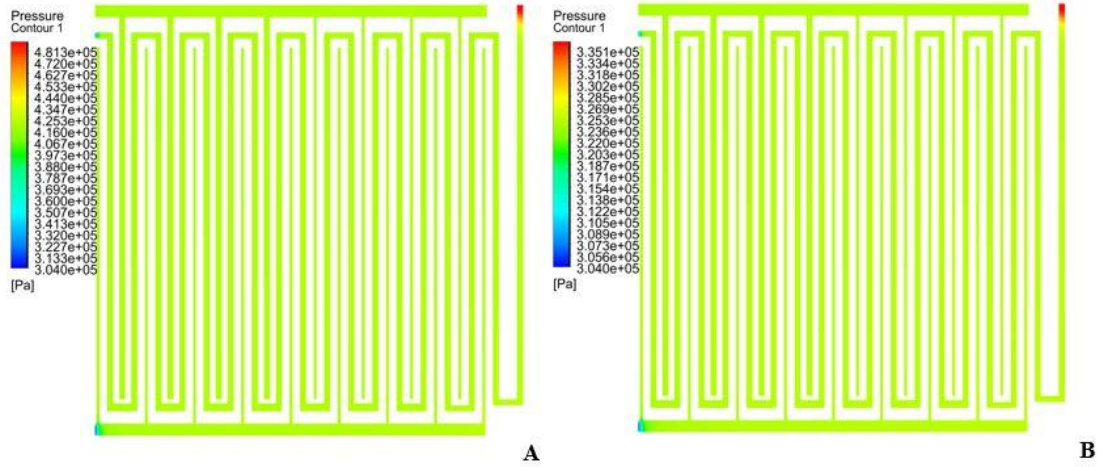
Şekil 4. 25, Şekil 4. 26 ve Şekil 4. 27’de anot ve katot akış kanalları belirgin bir basınç düşüşü görünmektedir. Ardından basınç dağılımı homojen bir şekilde ilerlemiş ve gaz akış kanallarından çıkışını tamamlamıştır.



Şekil 4. 17. 1 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot

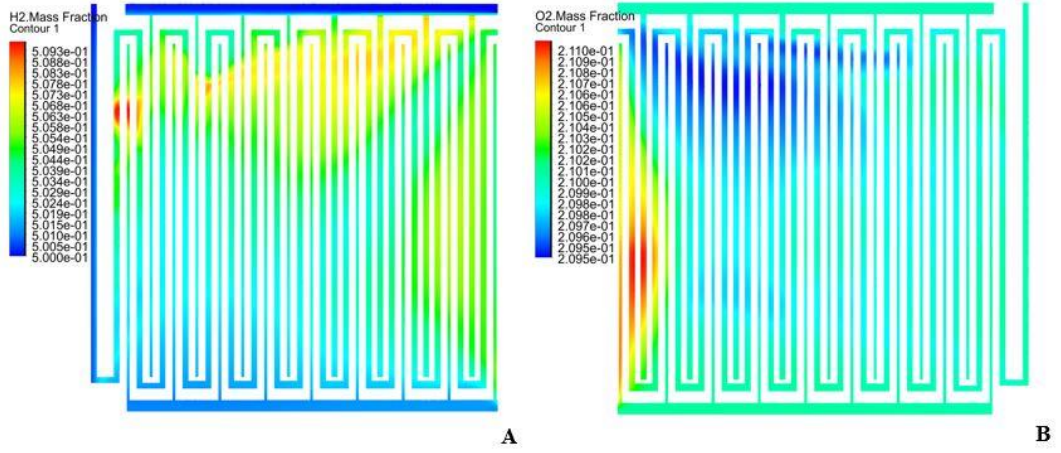


Şekil 4. 18.2 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot

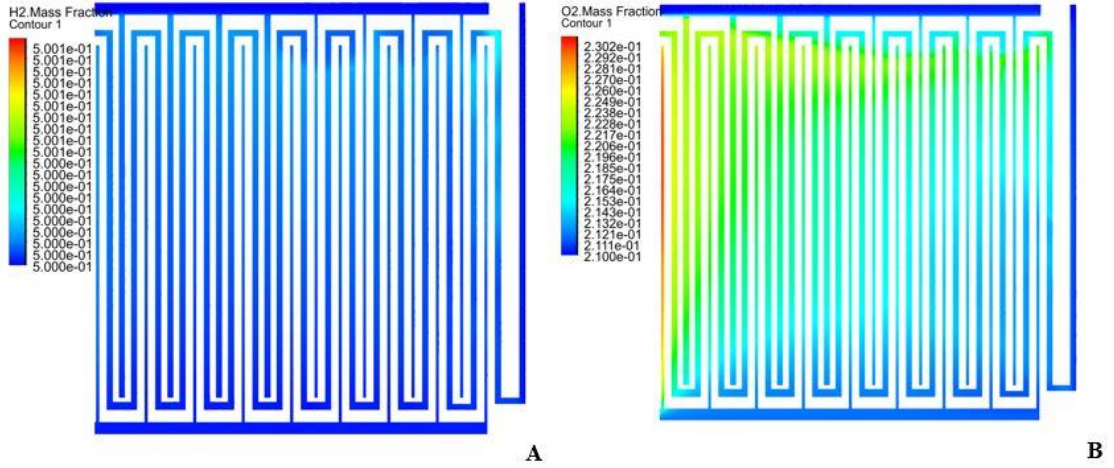


Şekil 4. 19. 3 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot

Şekil 4. 20 ve Şekil 4. 21’de 1 ve 2 atm çalışma basıncı altında hidrojen, oksijen kütle kesirleri değerlendirilmiştir. Ek olarak koyulmuş akış kanalları daha fazla hidrojenin ve oksijenin etkileşime girmesini tetiklemiştir fakat değişen çalışma koşullarında katalizör ve membrandaki etkilerin ayrı olarak incelenmesi gerekmektedir.



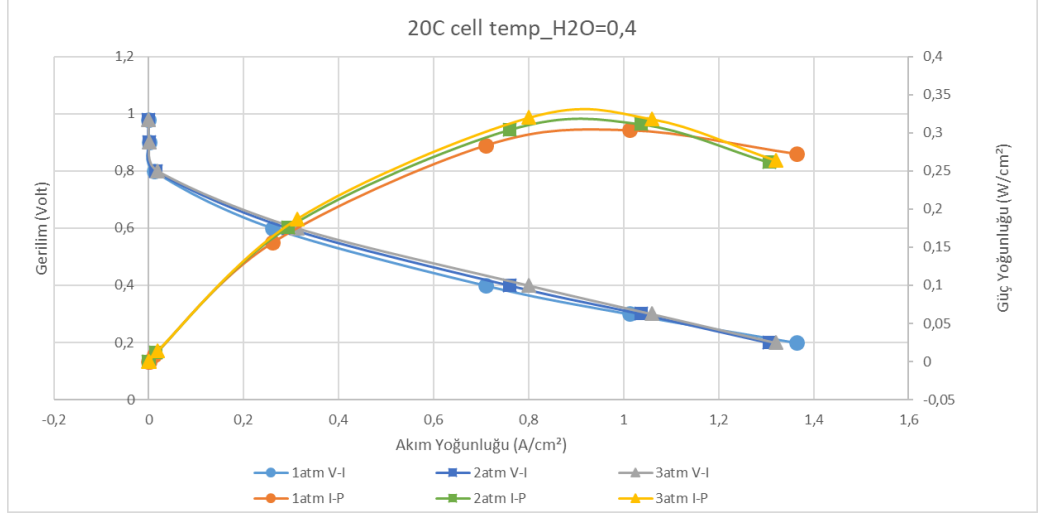
Şekil 4. 20. 1 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen



Şekil 4. 21. 2 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen

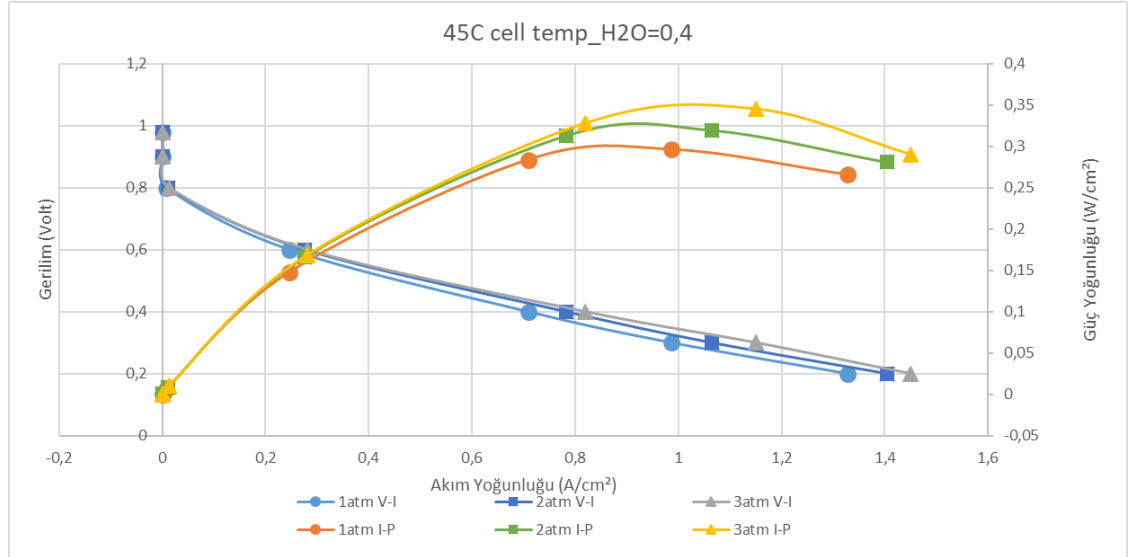
4.4. %50-50 İşletme Basıncı-Performans İlişkisi

%50-50 debi ayrımlı yakıt pili Bölüm 4.3'deki gibi analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir. 20 °C pil sıcaklığındaki basınca bağlı olarak performans değişim miktarları Şekil 4. 22'de gösterilmiştir. Sabit sıcaklıkta basınç 1'den 2 atm yükseltildiğinde güç yoğunluğu %2,46 artış göstermiştir. Basınç 3 atm yükseltildiğinde ise güç yoğunluğundaki %5,36 artmıştır.



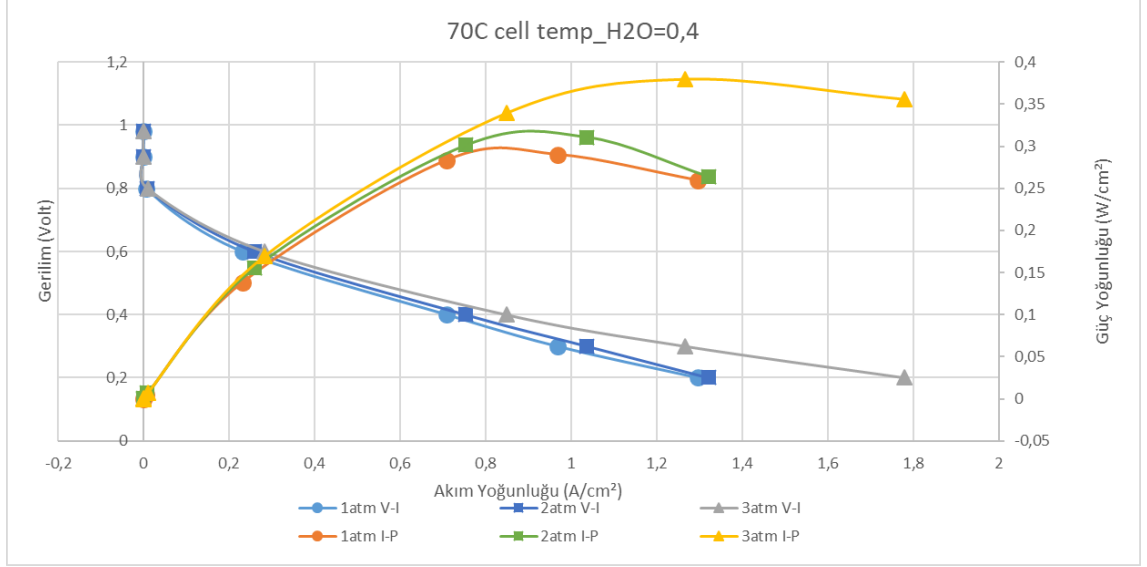
Şekil 4. 22. %50-50 20°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri

Pil sıcaklığı 45 °C olan basınca bağlı performans değişim eğrileri ise Şekil 4. 23'de gösterilmiştir. Sıcaklık sabit tutularak basınç 1'den 2 atm basınca yükseltildiğinde güç yoğunluğu %7,86 artış göstermiştir. Basınç 1'den 3 atm çalışma basıncına yükseltildiğinde ise; güç yoğunluğu %16,51 artış yaşamıştır.



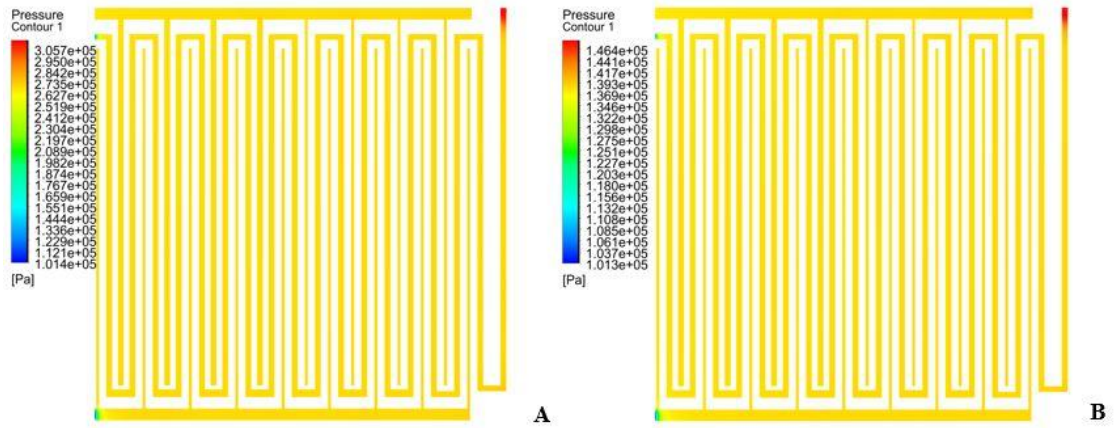
Şekil 4. 23. %50-50 45°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri

70 °C aynı şartlarda analizler gerçekleştirilmiştir ve sonuç eğriler Şekil 4. 24'de verilmiştir. 1 atm' den 2 atm ve 3 atm basınç yükseltildiğinde güç oranı artışları sırasıyla %7,13 ve %30,78 olmuştur.

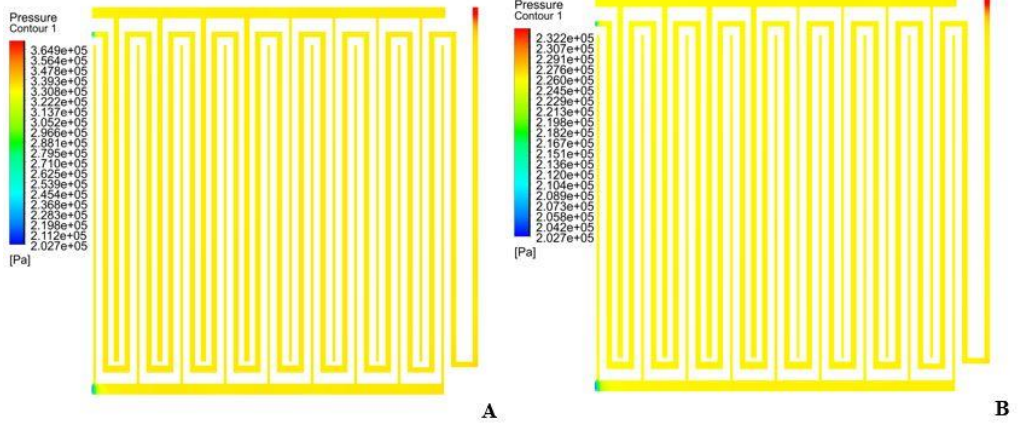


Şekil 4. 24. % 50-50 70°C, farklı çalışma basınçları için performans eğrileri

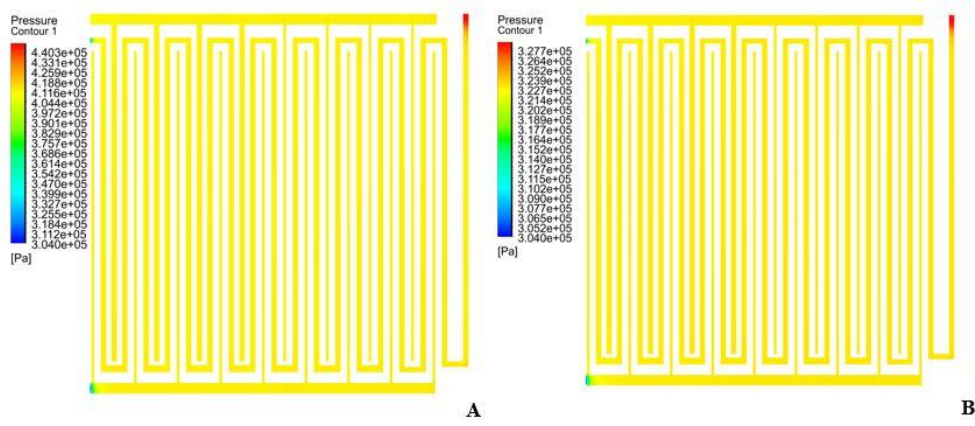
Şekil 4. 25, Şekil 4. 26 ve Şekil 4. 27’de anot ve katot akış kanalları belirgin bir basınç düşüşü görmektedir. Ardından basınç dağılılı homojen bir şekilde ilerlemiş ve gaz akış kanallarından çıkışını tamamlamıştır.



Şekil 4. 25. 1 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı A) Anot B) Katot

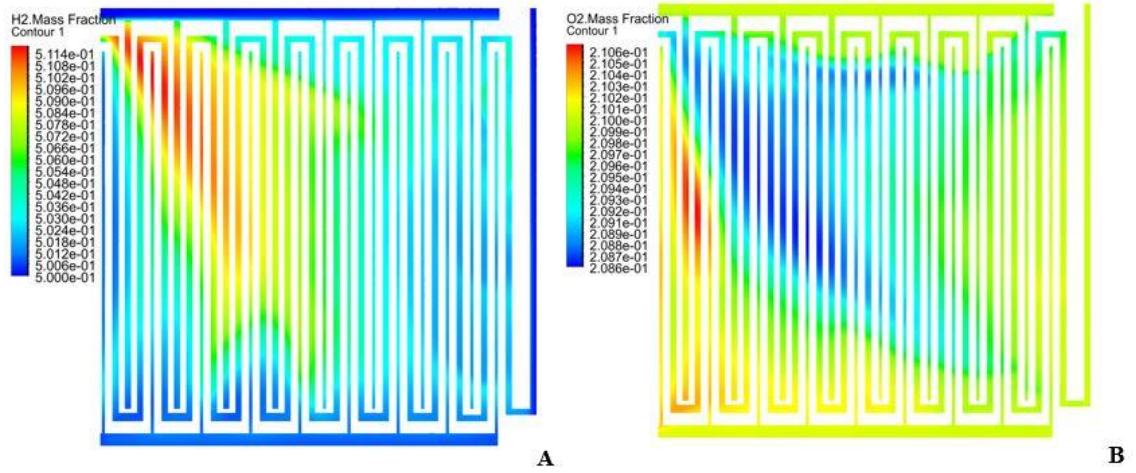


Şekil 4. 26. 2 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı **A)** Anot **B)** Katot

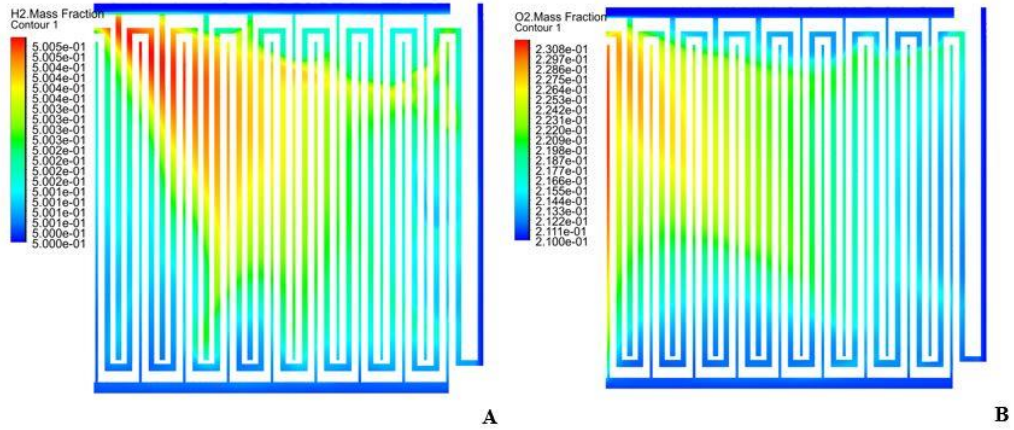


Şekil 4. 27. 3 atm basınçta gaz kanallarındaki basınç dağılımı **A)** Anot **B)** Katot

Şekil 4. 28 ve Şekil 4. 29’de 1 ve 2 atm çalışma basıncı altında hidrojen, oksijen kütle kesirleri akış oranının %50-50 olduğu durum için değerlendirilmiştir. Ek olarak koyulmuş akış kanalları bu akış oranında daha fazla hidrojenin ve oksijenin etkileşime girmesini tetiklemiştir fakat yine değişen çalışma koşullarında katalizör ve membrandaki etkilerin ayrı olarak incelenmesi gerekmektedir.



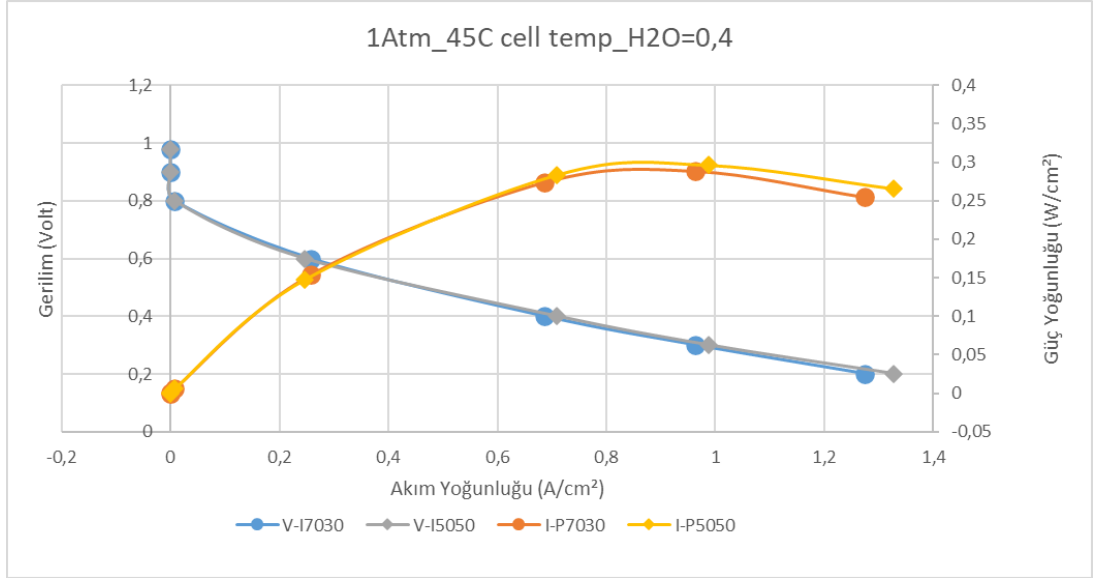
Şekil 4. 28. 1 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen



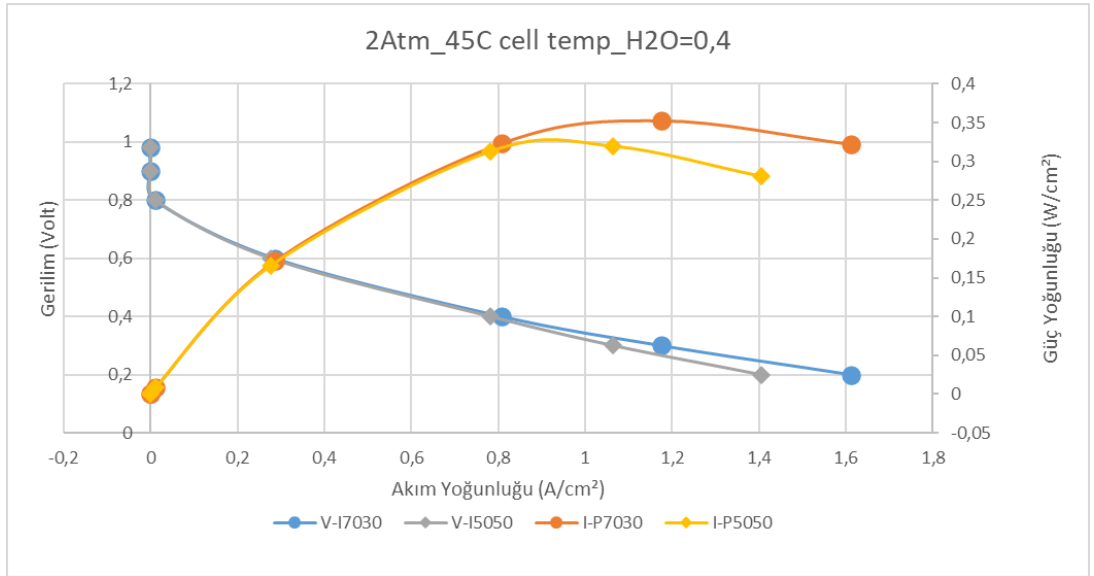
Şekil 4. 29. 2 atm basınç altında kütle kesirleri A) Anot hidrojen B) Katot oksijen

4.5. Debi-Pil Sıcaklığı Performans İlişkisi

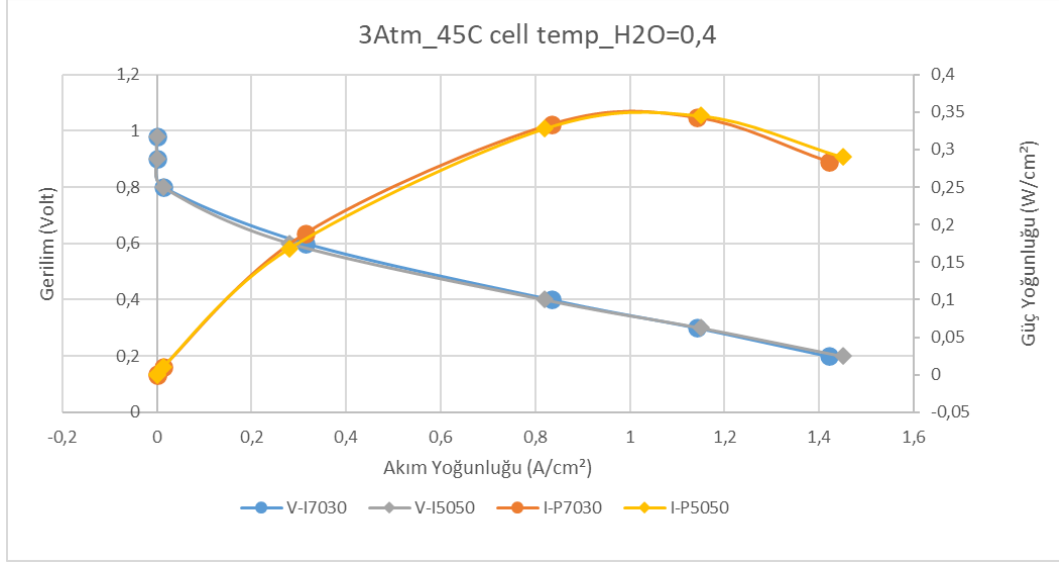
1, 2 ve 3 atm çalışma basıncı ve 45°C pil çalışma sıcaklığında balık solungaç tipi akış alanının %70-30 ve %50-50 oranlarında beslenmesi sonucu kaydedilen polarizasyon ve güç eğrileri sırasıyla Şekil 4. 30, Şekil 4. 31 ve Şekil 4. 32’de verilmiştir. %70-30 besleme oranı altında maksimum güç yoğunluğu 2 atm çalışma basıncında 0,352 W/cm² iken akım yoğunluğu 1,175 A/cm² olarak belirlenmiştir. Öte yandan %50-50 besleme oranında maksimum güç yoğunluğu 3 atm basınç altında 0,345 W/cm² iken akım yoğunluğu 1,15 A/cm² olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 30. 1 atm basınç altında performans değerlendirmesi



Şekil 4. 31. 2 atm basınç altında performans değerlendirmesi



Şekil 4. 32. 3 atm basınç altında performans değerlendirmesi

%50-50 besleme düzeninde maksimum güç yoğunluğu hemen hemen aynı olsa da güç yoğunlukları arasındaki fark artmıştır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere düşük akım yoğunluklarında pilin %50-50 oranında çalıştırılması verimli bir kullanım sağlamaya müsait görünmektedir. Öte yandan akım yoğunluğunun yükseldiği durumlarda %70-30 besleme oranına doğru geçiş yapılabileceği bir pil işletim stratejisi olarak analizler sonucunda ortaya çıkmıştır. Su üretiminin yoğun olduğu akım-gerilim düzeylerinde su tahliyesi önem kazanacağı için omuz altı konveksiyon etkilerinin daha güçlü olduğu %70-30 besleme oranının daha yüksek performansla sonuçlanabileceği anlaşılmaktadır.

5. SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada üç boyutlu ve yakıt pilini bir araya getiren PEM yakıt pilinin tüm parçaları modellenerek FLUENT yazılımı yardımıyla çözülmüştür. Yakıt pili hücrenin anot ve katot girişindeki kütle akış oranları değiştirilerek yakıt pili modelinin cevabı aranmıştır. Sonrasında her bir kütleli debi için üç farklı sıcaklık ve basınç altında analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir:

Bazı ara sıcaklıklarda basınç artışına rağmen gözlemlenen konsantrasyon kaybının nedeni katalizör tabakasında görülen hafif düzey su akıntısından kaynaklanmaktadır. Belirlenen işletme basıncına göre sıcaklığın yeterince yüksek olması durumunda performansın basınç artışı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu noktada balık solungaç tipi akış alanının farklı akış modülasyonları oluşturmaya müsait yapısı sayesinde oluşan verimsiz ara koşulların aşılması pilin sağlıklı çalışma rejimine getirilmesine olanak tanıyacağı anlaşılmaktadır.

Bir ucu kapalı kanallardan oluşan kenar hattı ve orta hat arasındaki debi farkı omuz altı konveksiyon mertebesini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Membran dehidrasyonu üzerinde önemli etkileri olan sıcaklık parametresinin kontrol edilemediği durumlarda omuz altı konveksiyon mertebesinin düzenlenerek pil stabilitesinin sağlanması daha pratik bir uygulama seçeneği olarak ortaya çıkmaktadır.

Debinin çoklu girişler arasındaki dağılımının farklı oranlarda da test edilerek solungaç tipi akış alanının pil performansı üzerine etkilerinin daha yüksek veri çözünürlüğünde haritalanması sonraki çalışma olarak faydalı olacaktır. Ayrıca ilgili akış alanı tasarımının soğuk başlatma olarak bilinen zorlu iklim koşullarındaki ilk başlatma performansı açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aydın, M. (2007). *PEM yakıt pilinin iki boyutlu modellemesi* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, İstanbul.
- Badduri, S. R., Srinivasulu, G. N., & Rao, S. S. (2020). Influence of bio-inspired flow channel designs on the performance of a PEM fuel cell. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 28(3), 824–831. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.07.010>
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells Theory and Practice Book*. Elsevier Science & Technology, USA, (Richard C. Dorf). Burlington: Elsevier Academic Press.
- Bethoux, O. (2020). Hydrogen fuel cell road vehicles: State of the art and perspectives. *Energies*, 13(21). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en13215843>
- Bıyıkoğlu, A. (2003). Historical Development, Working Principles and Current Status of Fuel Cells. *G. Ü. Journal of Science*, 16(3), 523–542.
- Borup, R., & Vanderborgh, N. (1995). Design and testing criteria for bipolar plate materials for PEM fuel cell applications. *Mat Res Soc Symp Proc*, 393, 5–151.
- Busick, D., & Wilson, M. (2000). Development of composite materials for PEFC bipolar plates. *Mat Res Soc Symp Proc*, 575, 51–247.
- Cai, G., Liang, Y., Liu, Z., & Liu, W. (2020). Design and optimization of bio-inspired wave-like channel for a PEM fuel cell applying genetic algorithm. *Energy*, 192. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116670>
- Carcadea, E., Ismail, M. S., Ingham, D. Bin, Patularu, L., Schitea, D., Marinoiu, A., ... Varlam, M. (2021). Effects of geometrical dimensions of flow channels of a large-active-area PEM fuel cell: A CFD study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(25), 13572–13582. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.150>
- Cavusoğlu, A. (2006). Fuel Cell and Usage Areas. *Uludağ University Institute of Science*, 123.
- Çelik, E. (2020). *PEM Yakıt Hücrelerinde Su ve Isı Yönetimine Yönelik Biyo Esinlemeli Kanal Tasarımı ve Optimizasyonu* Erman ÇELİK (Doktora). ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ, BURSA.
- Celik, E., & Karagoz, I. (2022). Performance assessment of a four-pass serpentine proton exchange membrane fuel cell with non-humidified cathode and cell state estimation

- without special measurement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(15), 9382–9394. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.001>
- Cooper, J. (2005). Design analysis of PEMFC bipolar plates considering stack manufacturing and environment impact. *Power Sources*, 2004(129), 69–152.
- D’Adamo, A., Haslinger, M., Corda, G., Höflinger, J., Fontanesi, S., & Lauer, T. (2021, April 1). Modelling methods and validation techniques for CFD simulations of PEM fuel cells. *Processes*. MDPI AG. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/pr9040688>
- Davies, D., Adcock, P., Turpin, M., & Rowen, S. (2000). Stainless steel as a bipolar plate material for solid polymer fuel cells. *J Power Sources*, 86, 42–237.
- Dawes, J. E., Hanspal, N. S., Family, O. A., & Turan, A. (2009). Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells: An investigation into the effects of water flooding. *Chemical Engineering Science*, 64(12), 2781–2794. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.01.060>
- European Commission. (2019). *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal*. Retrieved from Brussels, Belgium:
- European Parliament. (2019). *Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council: Setting CO2 Emission Performance Standards for New Passenger Cars and for New Light Commercial Vehicles, and Repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011*. Retrieved from Bruxelles, Belgium:
- Heinzel, A., Mahlendorf, F., Niemzig, O., & Kreuz, C. (2004). Injection moulded low cost bipolar plates for PEM fuel cells. *J Power Sources*, 131, 35–40.
- Hirschenhofer, J., Stauffer, D., Engleman, R., & Klett, M. (1998). *Fuel Cell Handbook* (4.). Reading PA:Parsons Corporation for U.S. Dept. of Energy, Office of Fossil Energy, Federal Energy Technology Center.
- Iranzo, A., Boillat, P., & Rosa, F. (2014). Validation of a three dimensional PEM fuel cell CFD model using local liquid water distributions measured with neutron imaging. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(13), 7089–7099. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.115>
- Jeon, D. H., Greenway, S., Shimpalee, S., & Van Zee, J. W. (2008). The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance. *International Journal*

- of Hydrogen Energy*, 33(3), 1052–1066. Retrieved 11 June 2023 from <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2007.11.015>
- Ju, H., & Wang, C. (2004). Experimental validation of a PEM fuel cell model by current distribution data. *J Electrochem Soc*, 151, 60–1954.
- Kadirov, M., Bosnjakovic, A., Bosnjakovic A, & Schlick, S. (2005). Membrane-derived fluorinated radicals detected by electron spin resonance in UV-irradiated Nafion and Dow ionomers: effect of counterions and H₂O₂. *J Phys Chem B*.
- LaConti, A., Hamdan, M., & McDonald, R. (2003). *Mechanisms of chemical degradation*. In. *Handbook of fuel cells: fundamentals, technology, and applications*, (Vol. 3).
- Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. Chichester, England: John Wiley and Sons.
- Li, X. (2006). *Principle of Fuel Cells*. New York: Taylor and Francis.
- Lim, C., & Haas, H. (2006). A diagnostic method for an electrochemical fuel cell and fuel cell components.
- Ma, X., Zhang, X., Yang, J., Zhuge, W., & Shuai, S. (2021). Impact of gas diffusion layer spatial variation properties on water management and performance of PEM fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 227. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113579>
- Mançuhan, Ç. (2006). Hidrojen ve yakıt pilleri tarihçesi. Retrieved 4 June 2023, from <https://www.termodinamik.info/hidrojen-ve-yakit-pilleri-tarihcesi>
- Özdal, A. (2018). Yakıt pili nedir. Retrieved 4 June 2023, from <https://www.muhendisbeyinler.net/yakit-pili-nedir/>
- Özdemir, B. (2012). *Serpantin kanallı PEM yakıt hücresinin sayısal analizi* (Yüksek Lisans Tezi). G.Ü., Ankara.
- Ozdemira, S. N., & Taymaz, I. (2021). Numerical investigation of the effect of blocked gas flow field on PEM fuel cell performance. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(11), 3581–3596. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03075-3>
- Panchenko, A. (2004). *Polymer electrolyte membrane degradation and oxygen reduction in fuel cells: an EPR and DFT investigation*. Institute für Phyzikalische Chemie der Universität, Stuttgart.

- Perahia, D. (2000). Structure and dynamics of thin ionomer films: a key to a stable fuel cell membrane. In *American Physical Society Meeting*. Minneapolis. Retrieved 4 June 2023 from <http://flux.aps.org/meetings/YR00/MAR00/abs/S4010.html>
- Roache, P. J. (1998). *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Albuquerque, New Mexico,: Hermosa Publishers.
- Rostami, L., Haghshenasfard, M., Sadeghi, M., & Zhiani, M. (2022). A 3D CFD model of novel flow channel designs based on the serpentine and the parallel design for performance enhancement of PEMFC. *Energy*, 258. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124726>
- Salva, J. A., Iranzo, A., Rosa, F., Tapia, E., Lopez, E., & Isorna, F. (2016). Optimization of a PEM fuel cell operating conditions: Obtaining the maximum performance polarization curve. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(43), 19713–19723. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.136>
- Saygılı, Y. (2013). *Modeling and control of a PEM fuel cell system* (MSc Thesis). METU Graduate School of Natural and Applied Sciences. METU Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Smithsonian Enstitüsü. (2008). PEM fuel cells. Retrieved 4 June 2023, from <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/pem/pemmain.htm>
- Song, C. (2002). Fuel Processing for Low-Temperature and High-Temperature Fuel Cells Challenges and Opportunities for Sustainable Development in the 21st Century, *Catalysis Today*, 77, 17–49.
- Taccani, R., & Zuliani, N. (2011). Effect of flow field design on performances of high temperature PEM fuel cells: Experimental analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(16), 10282–10287. Retrieved 11 June 2023 from <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2010.10.026>
- US Department of Energy. (2008). Parts of a fuel cell. Retrieved 4 June 2023, from http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_parts.html
- Valentín-Reyes, J., León, M. I., Pérez, T., Romero-Castañón, T., Beltrán, J., Flores-Hernández, J. R., & Nava, J. L. (2022). Simulation of an interdigitated flow channel assembled in a proton exchange membrane Fuel Cell (PEMFC). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123026>

- Velisala, V., Pullagura, G., Chinnam, N. K., & Ganta, R. (2022). Computational Fluid Dynamics Study of a Compound Flow Field for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Performance Enhancement. *Journal of Thermal Science*, 31(6), 2374–2384. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11630-022-1636-3>
- Wang, J. (2015). Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: A critical review. *Applied Energy*, 157, 640–663. Retrieved 11 June 2023 from <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.032>
- Wang, L., & Liu, H. (2004). Performance studies of PEM fuel cells with interdigitated flow fields. *Journal of Power Sources*, 134(2), 185–196. Retrieved 11 June 2023 from <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2004.03.055>
- Wikipedia. (2023). Proton-exchange membrane fuel cell. Retrieved 4 June 2023, from https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange_membrane_fuel_cell
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F. N., Al Makky, A., Mooney, J., Barouaji, A., ... Olabi, A. G. (2017). Development of Bi-polar plate design of PEM fuel cell using CFD techniques. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25663–25685. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.093>
- Williams, M., Begg, E., Bonville, L., Kunz, H., & Fenton, J. (2004). Characterization of gas diffusion layers for PEMFC. *J Electrochem Soc*.
- Yıldızbilir, F. (2006). *Generating electricity from fuel cell* (Master Thesis). Firat University, Elazığ.
- Yuan, X., Wang, H., Zhang, J., & Wilkinson, D. (2005). Bipolar plates for PEM fuel cells – from materials to processing. *J New Mat Electrochem Syst*, 8, 67–257.
- Zhang, J. (2008). *PEM fuel cell electrocatalysts and catalyst layers: Fundamentals and applications*. *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications*. Springer London. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-936-3>
- Zhang, S., Xu, H., Qu, Z., Liu, S., & Talkhoncheh, F. K. (2022, February 28). Bio-inspired flow channel designs for proton exchange membrane fuel cells: A review. *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231003>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Adem DÜZENLİ
Doğum Yeri ve Tarihi : SAMSUN 1993
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Tophane Teknik Lisesi
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Tekno Tasarım A.Ş. (2018-2021)
TUSAŞ (2021- ...)

İletişim (e-posta) : ademduzenli@gmail.com

Yayınları :-