

**PEM YAKIT HÜCRELERİNDE SU VE ISI YÖNETİMİNE
YÖNELİK BİYO ESİNLENMELİ KANAL TASARIMI VE
OPTİMİZASYONU**

Erman ÇELİK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PEM YAKIT HÜCRELERİNDE SU VE ISI YÖNETİMİNE YÖNELİK BİYO
ESİNLENMELİ KANAL TASARIMI VE OPTİMİZASYONU**

Erman ÇELİK
ORCID iD: 0000-0002-4254-9611

Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

TEZ ONAYI

Erman ÇELİK tarafından hazırlanan "PEM YAKIT HÜCRELERİNDE SU VE ISI YÖNETİMİNE YÖNELİK BİYO ESİNLENMELİ KANAL TASARIMI VE OPTİMİZASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Başkan : Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID iD: 0000-0002-7442-2746

İmza

Üye : Prof. Dr. Atakan AVCI
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID iD: 0000-0002-5985-02449

İmza

Üye : Prof. Dr. İhsan KARAMANGİL
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID iD: 0000-0001-5965-0313

İmza

Üye : Prof. Dr. Yusuf Ali KARA
Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID iD: 0000-0001-5598-7293

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üy. Ayetül GELEN
Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
ORCID iD: 0000-0003-4934-9644

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- 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 yararlanması 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.

27/11/2020

Erman ÇELİK

ÖZET

Doktora Tezi

PEM YAKIT HÜCRELERİNDE SU VE ISI YÖNETİMİNE YÖNELİK BİYO ESİNLENMELİ KANAL TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Erman ÇELİK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

Hidrojenin elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu elektrik enerjisine dönüştürülmesinde Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt pilleri; düşük çalışma sıcaklığı, hızlı devreye girme, yüksek güç yoğunluğu gibi özellikleriyle özellikle mobil sistemler için ideal bir enerji dönüşüm sistemi olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşın PEM yakıt pilleri; su akıntısı, kuruma, kurumaya bağlı aşırı sıcaklık bölgelerinin oluşması gibi olumsuz sonuçlar yönünden güçlendirilmeye muhtaçtır. Bu tez kapsamında, biyolojik yapıların geometrik özelliklerinden ve canlıların değişken koşullar karşısında geliştirdikleri adaptasyonlardan yararlanarak geliştirilen biyo esinlenmeli akış alanları ile bu problemlerin çözülmesi amaçlanmıştır.

Bu tez kapsamında üç yeni akış alanı geliştirilmiştir. Bunlar memelilerin dolaşım sistemlerinin hipoksi altındaki reflekslerinden yola çıkarak geliştirilen ara rezervuarlı, ara beslemeli akış alanları ve arıların bal peteklerinin şeklinden esinlenilerek geliştirilen bal peteği akış alanıdır. Ayrıca dört kanallı serpantin akış alanı farklı sıcaklık ve basınç etkileri altında referans olarak test edilmiştir. Ara beslemeli akış alanında reaktant besleme noktaları ve besleme oranları değişken kabul edilip optimum operasyon koşullarının deneysel olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçların açıklanmasında ihtiyaç duyulan noktalarda Ansys Fluent PEM Fuel Cell modülü ile yapılan sayısal analizlerden yararlanılmıştır.

Çalışma sonunda ara rezervuarlı akış alanının dört kanallı serpantin akış alanına göre yaklaşık %10 oranında daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Ara beslemeli akış alanlarında besleme oranlarının anot ve katot tarafında simetrik veya asimetrik yapılması arasında sürekli üstünlük gösteren bir korelasyon bulunmamaktadır. Çıkışa en yakın giriş portundan yapılan ara besleme debisinin yükselmesi güç çıkışının zayıflamasına neden olmuştur. Yeni tasarlanan akış alanları içinde en yüksek performansı doğru akışlı bal peteği akış alanının gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt pili, biyo esinlenmeli kanal tasarımı, ara besleme, bal peteği akış alanı,
2020, vii + 155 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

BIO INSPIRED CHANNEL DESIGN AND OPTIMIZATION INTENDED FOR
WATER AND HEAT MANAGEMENT IN PEM FUEL CELLS

Erman ÇELİK

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

Supervisor: Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ

In the conversion of hydrogen into electrical energy as result of electrochemical reactions, Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cells emerges as an ideal energy conversion system especially for mobile systems with its low operating temperature, rapid startup and high power density features. However, PEM fuel cells need to be strengthened in terms of negative consequences such as flooding, drying and hotspot formation. Within the scope of this thesis, it is aimed to solve these problems with bio-inspired flow fields developed by taking advantage of the geometric properties of biological structures and the adaptations of living things.

Three new flow field patterns have been developed. These are intermediate reservoir and intermediate feeding flow fields developed based on the reflexes of mammalian circulatory systems under hypoxia and the honeycomb flow area, which is inspired by the shape of the honeycombs of bees. Additionally, four-channel serpentine flow field was tested under different temperature and pressure effects as a reference. In intermediary feeding flow field, the reactant feed points and feed rates were accepted as variable and the optimum operating conditions were determined experimentally. While explaining the results, numerical analysis made with Ansys Fluent PEM Fuel Cell module were used if needed.

It was determined that intermediate reservoir flow field has 10% higher power density than four-channel serpentine flow field. The symmetrical or asymmetric feeding from anode and cathode doesn't correspond to a correlation which one of them leading maximum performance permanently. application of feed rates both on anode and cathode provided higher power density than the asymmetric feeding in intermediate feeding. Honeycomb flow area with direct flow has the highest performance among all.

Key words: PEM fuel cell, bio inspired channel design, intermediate feed, honeycomb flow field

2020, vii + 155 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora çalışmamın başından beri sabırla verdiği tüm destekleri için tez danışmanım kıymetli hocam Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım süresince “2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Burs Programı” kapsamında şahsıma tahsis etmiş oldukları burs için TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Doktora çalışmamın deneylerini gerçekleştirebilmek için “118M485- PEM Yakıt Pilleri İçin Ara Rezervuarlı ve İkincil Sıvı Tahliye Hatlı Bipolar Plaka ve Çok Noktadan Beslemeli ve Toplamalı Aktif Denetimli Biyo Benzeşimli Bipolar Plaka Geliştirilmesi” projesi ile TÜBİTAK 1001 programı kapsamında finansal destek sağlayan TÜBİTAK' a teşekkürlerimi sunarım. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Prof. Dr. Turhan Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde deneylerimi yapmak için bana imkan tanıyan ve uygun çalışma ortamı sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Selahattin ÇELİK' e teşekkürlerimi sunarım. Deney numunelerimin hazırlanması sırasında verdiği özverili destekler için Erciyes Üniversitesi öğretim elemanlarından Öğr. Gör. Mahmut ÇELİK' e teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimimin uzun ve yorucu süreci boyunca verdiği destekler ve gösterdiği sabır için eşime teşekkürlerimi sunarım. Daha lisans aşamasından başlayarak tercihim Uludağ Üniversitesi'nden yana kullanmam konusunda beni yüreklendiren ve öğrenim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen anne ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Erman ÇELİK
27/11/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	7
2.1 Yakıt Hücrelerinde Su ve Isı Yönetimi ve Önemi.....	7
2.2 Temel Akış Alanı Tasarımları.....	14
2.3 Temel Akış Alanları Üzerinden Kısmi İyileştirmeler.....	17
2.3.1 Paralel akış alanı üzerinde kısmi iyileştirmeler.....	17
2.3.2 Çıkıntılı tip akış alanı üzerinde kısmi iyileştirmeler.....	24
2.3.3 Serpantin akış alanı üzerinde kısmi iyileştirmeler.....	26
2.4 Biyo Benzeşimli Akış Alanı Kalıpları.....	32
2.5 Gelişmiş Akış Alanı Tasarımları.....	37
2.6 Akış Alanı Geliştirme Stratejilerinin Sınıflandırılması.....	44
2.7. Elektrot Kinetiği.....	55
2.7.1. Reaksiyon hızı.....	55
2.7.2. Reaksiyon sabitleri; transfer katsayısı.....	56
2.7.3. Akım – Potansiyel ilişkisi (Butler – Wolmer eşitliği).....	57
2.7.4. Akım yoğunluğu.....	59
2.8. Voltaj Kayıpları.....	60
2.8.1. Aktivasyon Kayıpları.....	61
2.8.2. İç akımlar ve karşıya sızıntı kayıpları.....	63
2.8.3. Omik kayıplar.....	66
2.8.4. Konsantrasyon kayıpları.....	67
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	71
3.1. Tasarımlara Referans Olan Biyo Benzeşim Yaklaşımının Kökenleri ve Geliştirilen Biyo Benzeşimli Akış Alanları.....	73
3.1.1. Ara beslemeli akış alanı tasarımı.....	73
3.1.2. Bal peteği akış alanı tasarımı.....	77
4.2. Malzeme Seçimi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	79
4.3. Deney Düzeneği, Hazırlık ve Ölçüm Prosedürü.....	82
3.4. Akış Alanlarına Uygulanan Test koşulları ve Deney Matrisleri.....	87
3.5. Sayısal Modelin Hazırlanması.....	90
3.5.1. Sayısal modelin eleman sayısından bağımsızlaştırılması.....	93
3.5.2. Sayısal modelin iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması.....	96
3.5.3 Sayısal model çözüm denklemleri ve sayısal model bileşen parametreleri.....	97
4. BULGULAR.....	101
4.1. Dört Kanallı Serpantin Akış Alanında Pil Sıcaklığı-Performans İlişkisi.....	101

4.2. Dört Kanallı Serpantin Akış Alanında İşletme Basıncı-Performans İlişkisi.....	109
4.2. Ara Rezervuarlı Dört Kanallı Serpantin Akış Alanının Performans Özellikleri....	114
4.3. Ara Beslemeli Dört Kanallı Serpantin Akış Alanının Simetrik Besleme Düzenindeki Performans Özellikleri	118
4.4. Ara Beslemeli Dört Kanallı Serpantin Akış Alanının Asimetrik Besleme düzenindeki Performans Özellikleri	123
4.5. Bal Peteği Akış Alanı Performans Özellikleri	125
4.6. Akış Alanları ve Performans Özelliklerinin karşılaştırılması	127
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	130
KAYNAKLAR	132
ÖZGEÇMİŞ	140

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
i	Akım yoğunluğu (coulomb/sn cm^2)
n	Reaksiyona giren molekül başına işlem gören elektron sayısı
F	Faraday sabiti 96,485 (Coulomb/elektron mol)
J	Birim yüzey alanı başına reaktant akısı (mol/sn cm^2)
k_f	İleri yöndeki reaksiyon (indirgenme) hız katsayısı
k_b	Geri yöndeki reaksiyon (oksidlenme) hız katsayısı
C_{ox}	İndirgenme reaksiyonuna giren bileşenlerin yüzey konsantrasyonları
C_{rd}	Oksitlenme reaksiyonuna giren bileşenlerin yüzey konsantrasyonları
k_B	Boltzman sabiti
h	Planck sabiti ($6,626069 \times 10^{-34}$ J.s)
R	Evrensel gaz sabiti (J/mol K)
T	Sıcaklık
G	Gibbs serbest enerjisi
ΔG_{ch}	Gibbs serbest enerjisi kimyasal bileşeni
α	Transfer katsayısı
E	Potansiyel fark (Volt)
i_0^{ref}	birim katalizör yüzey alanı başına denge akım yoğunluğu, A/ cm^2
a_c	Katalizör özgül alanı (cm^2/mg)
L_c	Katalizör yüklemesi. (mg/cm^2)
P_r	Reaktant kısmi basıncı (kPa)
P_r^{ref}	Referans basınç (kPa)
γ	Basınç katsayısı
E_c	Aktivasyon enerjisi (J/mol K)
T_{ref}	Referans sıcaklık, 298,15 K
R_i	Toplam hücre iç direnci Ω/cm^2
R_m	Membran ohmik direnci

Kısaltmalar Açıklama

BPP	Bipolar plaka
GDT	Gaz dağıtım tabakası
KT	Katalizör tabakası
PEM	Proton geçirgen membran

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Tekli PEM yakıt pili hücresi şematik gösterimi	3
Şekil 1.2. Baykuş kanat kesitinin üç boyutlu lazerle taranarak belirlenmesi (a) ve ucundaki tüy formunun mikroskop altında ki görünümü (b) ile Zheil-Abegg owlwing fan tasarımı (c)	5
.....	8
Şekil 2.1. Pil içinde su geçiş yönleri ve mekanizmaları.....	8
Şekil 2.2. Pilin akıntının farklı aşamalarındaki zamana bağlı gerilim davranışı (a) ile akıntı ve kuruma davranışlarının karşılaştırılması (b) ve kuruma, su akıntısı ve normal haldeki pil için gerilim-akım eğrisi (c)	10
Şekil 2.3. Paralel (a), paralel serpantin (b), çıkıntılı tip (c) ve iç içe geçişli (d) ve dairesel akış alanı (e)	15
Şekil 2.4. Sıvı su ve reaktant gaz yönlendirme için çoklu plaka yapısı (a) ve entegre yapıya (b) sahip akış kanalları (Fan ve ark., 2018’den değiştirilerek alınmıştır)	20
Şekil 2.5. Damlacık bölen delikli akış alanı (a) ve revize edilmiş hilal formulu çıkıntılı tip akış alanları (b).....	24
Şekil 2.6. Simetrik serpantin akış alanı (a) ve yakınlaşıp uzaklaşan kanallı serpantin akış alanı (b)	29
Şekil 2.7. Sabit debi (a) ve sabit basınç (b) yaklaşımına göre ara rezervuarlı pil tasarımları ve performans eğrileri (c). İki dönüş arasına yerleştirilmiş rezervuar görünümü (d) ve düzensiz şekilli ara rezervuarlı tasarım (e).....	31
Şekil 2.8. Sabit kanal genişliği ile iç içe geçişli tip (a), sabit kanal genişliği ile standart tip (b) ve Murray yasası uygulanmış iç içe geçişli tip (c) biyo benzeşimli akış alanı. Akciğer tipi akış alanının üç boyutlu modeli (d) ve akım gerilim eğrileri (e).....	35
Şekil 2.9. Paralel akış düzeni ile iç içe geçişli tip akış düzeni arasında geçiş yapabilen gelişmiş BPP’nin üst görünüş (a), kesit görünüşü (b) ve valf bağlantı şeması (c).....	38
Şekil 2.10. Altı kanallı serpantin akış alanına uygulanmış eğimli tasarımın (a) perspektif görünüşü (b), kesit detay resimleri (c) ve eğim yönüne göre su toplama karakteristikleri (d)	40
Şekil 2.11. Plaka yüzeyinin gözenekli su dağıtım malzemesi ile kaplanmış akış alanın kesit görünüşü, tam ve kısmi kaplanmış plaka yüzeyi. Gözenekli iç içe geçişli akış alanları (b)ve iki ağ arasına gözenekli malzeme yerleştirilmiş akış alanı. (c)	42
Şekil 2.12. Aktivasyon kutuplaşması kayıpları nedeni ile gerilim kayıpları-akım eğrisi.	62
Şekil 2.13 Aktivasyon kutuplaşması kayıpları nedeni ile logaritmik gerilim kayıpları-akım eğrisi.....	63
Şekil 2.14. İç akımlar yada hidrojen sızıntı kayıplarının açık devre gerilimi üzerine etkileri.	64
Şekil 2.15. $R_i=0,15 \Omega/\text{cm}^2$ iç direnç değeri için pilde meydana gelen gerilim kayıpları.....	67
Şekil 2.16. Sınırlayıcı akım yoğunluğu yakınlığında pil potansiyelindeki değişim.	69
Şekil 2.17. Akım-Gerilim eğrisi ve gerilim kayıp bölgeleri.	70
Şekil 3.1. Destek plakası üzerinde görülen bipolar plakanın (a) CNC freze tablasındaki çapaklı hali (b) ve işlenmekte olan bal peteği BPP ile bakır akım toplama plakası (d).....	72
Şekil 3.2. Ara beslemeli akış alanına sahip bipolar plaka tasarımı	75
Şekil 3.3. Ara beslemeli karbon polimer kompozit bipolar plaka	76

Şekil 3.4. Bal peteği akış alanına sahip bipolar plaka teknik çizimleri.....	78
Şekil 3.5. Karbon kompozit bal peteği akış alanı.....	79
Şekil 3.6. Akım toplama plakaları	79
Şekil 3.7. Membran elektrot bileşeni (a) ve destek plakası (b).....	80
Şekil 3.8. Tek hücreli yakıt pili montaj modeli (a) ve fiziksel numune (b).....	81
Şekil 3.9 Arbin yakıt pili test istasyonu	82
Şekil 3.10. Espec SH-221 iklimlendirme kabini (a) ve test numunesinin kabin içine yerleşimi (b)	83
Şekil 3.11. Serpantin ve Bal Peteği akış alanları için güç artış oranı ve sıkma torku eğrileri	84
Şekil 3.12. Deney düzeneği şematik gösterimi	86
Şekil 3.13. Yakıt pili dört geçişli serpantin şeffaf sayısal çözüm geometrisi (a) ve ara beslemeli yakıt pili opak sayısal çözüm geometrisi (b)	93
Şekil 3.15. Dört katmanlı ağ yapısına sahip sayısal model kesiti	95
Şekil 3.16. Akım yoğunluğu değeri ve H ₂ , O ₂ , H ₂ O hatalarının iterasyon sayısı ile değişimi	97
Şekil 4.1. 1 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri.....	101
Şekil 4.2. 1 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim kaybının akım yoğunluğu ile değişimi.....	102
Şekil 4.3. 0,2 A/cm ² akım yoğunluğunda membran orta katmanında 45°C (a) ve 70°C (b) pil sıcaklıklarındaki proton iletkenliği konturları.	103
Şekil 4.4. 0,2 A/cm ² akım yoğunluğunda membran orta katmanında 45°C (a) ve 70°C (b) pil sıcaklıklarındaki su muhteviyatı konturları ve fark konturu (c)	105
Şekil 4.5. 2 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri.....	106
Şekil 4.6. 2 atm sabit işletme basıncı gerilimi altında ve 0,2 A/cm ² akım yoğunluğunda 45°C ve 70°C pil sıcaklığı için membran orta yüzeyinde ohmik ısı kaynağı dağılımları	107
Şekil 4.7. 3 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri.....	108
Şekil 4.7. 20°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri.....	109
Şekil 4.8. 20°C pil sıcaklığı altında 1atm (a), 2 atm (b) ve 3 (atm) işletme basınçları altında 1,5 sıvı su aktivite değeri eş yüzey konturları.....	111
Şekil 4.9. 45°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri.....	112
Şekil 4.10. 70°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri.....	113
Şekil 4.11. Sınırlayıcı akım yoğunluğunun pil sıcaklığı ve işletme basıncı ile değişimi	114
Şekil 4.12. 45 °C pil sıcaklığı ve 1Atm işletme basıncında ara rezervuarlı akış alanı Akım-Gerilim ve Akım-Güç eğrileri.....	115
Şekil 4.13. 45°C pil sıcaklığı ve 1Atm işletme basıncında ara rezervuarlı ve dört geçişli serpantin akış alanı Akım-Gerilim ve Akım-Güç eğrileri.....	115
Şekil 4.14. 0,4V, 45°C 1 atm koşullarında GDT – BPP ara yüzeyinde 4 kanallı serpantin akış alanında (a) ve ara rezervuarlı akış alanında (b) oksijen konsantrasyonu ve konsantrasyonlar arasındaki fark (c) konturları	116

Şekil 4.15. 90-10-0 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri.	118
Şekil 4.16. 80-20-0 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	119
Şekil 4.17. 70-30-0 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	120
Şekil 4.18. 70-20-10 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	120
Şekil 4.19. 60-20-20 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	121
Şekil 4.20. 40-30-30 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	122
Şekil 4.21. Farklı simetrik ara besleme oranında pile ait akımyoğunluğu-gerilim (a) ve akım yoğunluğu-güç grafikleri (b)	123
Şekil 4.21. 80-20-0 oranında simetrik ve asimetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	124
Şekil 4.22. 60-20-20 oranında simetrik ve asimetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri	125
Şekil 4.23. Düz akışlı ve ters akışlı bal peteği akış alanının 1 atm basınç ve 45 °C sıcaklık koşullarındaki akım-gerilim ve akım-güç eğrileri	126
Şekil 4.24. Düz akışlı ve ters akışlı bal peteği akış alanının 2 atm basınç ve 45 °C sıcaklık koşullarındaki akım-gerilim ve akım-güç eğrileri	126
Şekil 4.25. Düz akışlı ve ters akışlı bal peteği akış alanının 3 atm basınç ve 45 °C sıcaklık koşullarındaki akım-gerilim ve akım-güç eğrileri	127
Şekil 4.26. 4 kanallı serpantin, ara rezervuarlı, ara beslemeli ve bal peteği akış alanlarının maksimum güç değerleri.	128

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

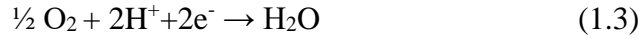
Çizelge 2.1. Akış alanı geliştirme stratejilerinin sınıflandırması.....	47
Çizelge 3.1. Deneylede ortak kullanılan özellik ve parametreler	87
Çizelge 3.2. Dört kanallı paralel serpantin akış alanına sahip model test matrisi.....	88
Çizelge 3.3. Simetrik ve asimetrik ara besleme debi rejimleri	89
Çizelge 3.4. Bal peteği akış alanı test matrisi	90
Çizelge 3.5. Yakıt pil modellerinin geometrik özellikleri.....	91
Çizelge 3.6. Ağ eleman sayısına karşılık akım, hata ve süre değerlerinin değişimi	96
Çizelge 3.7. Sayısal model referans parametreleri ve bileşen özellikleri	100
Çizelge 4.1. 4 kanallı serpantin ve ara rezervuarlı akış alanlarının GDT-BPP ara yüzeyinde 0,4 V, 1 atm ve 45°C koşullarındaki özellikler tablosu	117
Çizelge 4.2. 4 kanallı serpantin, ara rezervuarlı, ara beslemeli ve bal peteği akış alanlarının karşılaştırma tablosu.	129

1. GİRİŞ

Son yıllarda hava kirliliğinin artması, fosil yakıt tüketiminin sağlık tehditlerine yol açması ve yakıt rezervlerinin hızla tükeniyor olması; alternatif enerji kaynaklarının önem kazanmasına neden olmuştur ve bilimsel çalışmalarda alternatif enerji kaynaklarına odaklanılmasına yol açmıştır. Rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve jeotermal enerji kaynakları karbon salınımı yapmayan çevreci enerji kaynakları olarak bilinmesine rağmen; faydalı kullanım performanslarının ve dönüşüm verimlerinin iklim ve doğa koşullarına sıkı bağımlılığı ve mobil sistemlere uygulanmasında kısıtlayıcı özelliklere sahip olması, bu kaynakları ön görülemez ve güvenilir kılmaktadır. Bu noktada, yakıt olarak hidrojen ve yakıcı olarak havadaki oksijeni kullanmak suretiyle elektrokimyasal dönüşümlerle elektrik üreten Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt pilleri; düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunluğu, hızlı devreye girme performansı ile öne çıkan ve karbon salınımı yapmayan yeni nesil bir enerji dönüşüm teknolojisidir. PEM yakıt pilleri, otomobiller gibi mobil araçlarda güç ünitesi olarak kullanılmaya uygun sistemlerdir. PEM yakıt pillerinin; özellikle içten yanmalı motorlardan farklı olarak hareketli parçalar barındırmaması, sık bakıma ihtiyaç duymaması ve yaklaşık %35 verimle çalışan günümüz içten yanmalı motorlardan daha yüksek verimlerde (%40-60) çalışmaları PEM yakıt pillerini taşıt uygulamaları için uygun bir güç kaynağı haline getirmektedir (X. Li 2005, X. Li ve Sabir 2005a, Ralph 2006a). Uzun zamandan beri üzerinde yoğun bir şekilde geliştirme çalışmaları yapılan ve bir şarj döngüsüne ihtiyaç duyan pillerden gücünü alan elektrikli araçlar, son iki yıllık sürece kadar beklenen ticarileşme seviyesini yakalayamamıştır. Buna karşın; iklim değişikliği ve çevre kirliliği nedeni ile artan toplumsal hassasiyetlerin de etkisi ile birçok firmanın özellikle Avrupa pazarında dizel motorlu araç üretimine son vermesi ile elektrikli araçların aktif olarak ticari üretimi ve son tüketiciye ulaştırılması faaliyetleri hız kazanmıştır. Fakat pil teknolojisi her ne kadar gelişmiş ve şarj süreleri kısalmış olsa da; ortalama dolum süresi beş dakika olan ve bu sayede menzilde süreklilik sağlayan yakıt pillerinden enerjisini alan taşıtlar, tüketici alışkanlıkları açısından ele alındığında daha geniş bir pazar vadetmektedir.

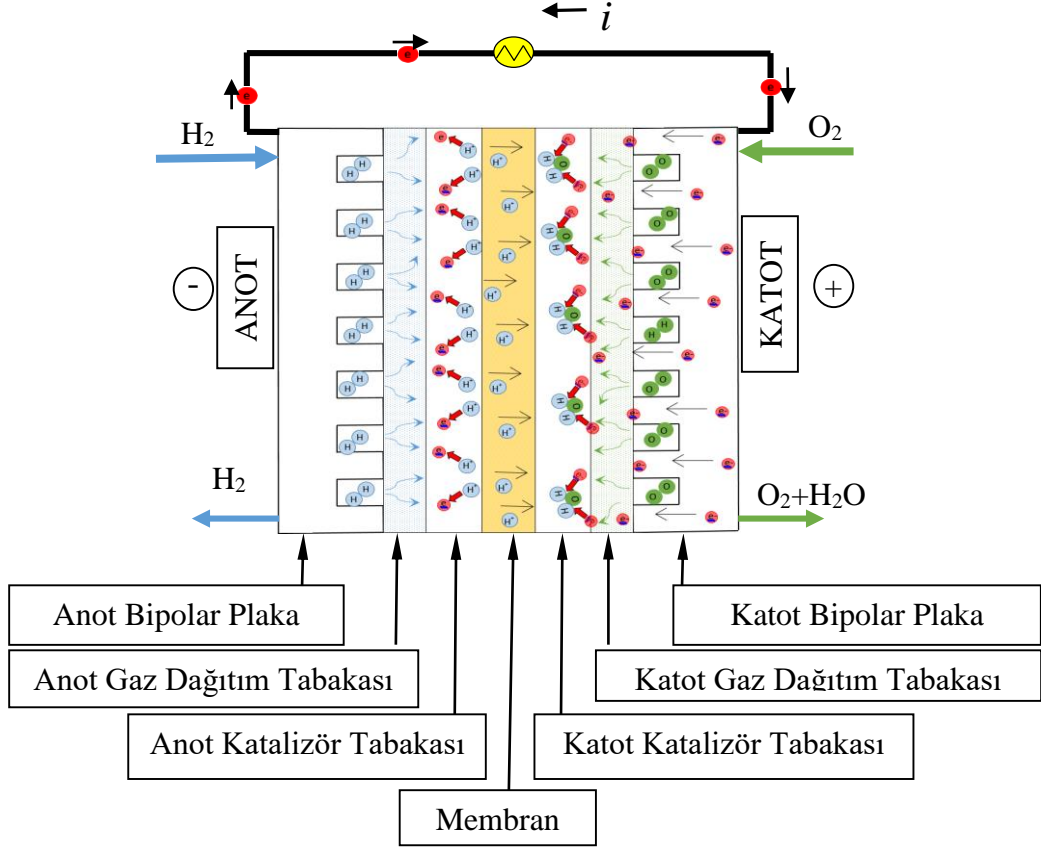
Tipik bir PEM yakıt pili içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal basamaklar; anot tarafında sisteme giren hidrojen moleküllerinin sahip oldukları elektronları serbest

bırakarak protonlar ve elektronlara dönüşmektedirler. Oluşan protonlar, proton geçirgen membrandan geçerek katot tarafına geçmekte, elektronların ise devre üzerinden katot ulaşmaktadır. Nihai olarak katot tarafından beslenen oksijen atomlarının membrandan geçerek gelen pozitif yüklü hidrojen atomları ve devreden gelen elektronlarla birleşerek elektrik akımı, su ve ısı üretimi gerçekleşmektedir. Meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonun genel hali denklem 1.1'deki gibi ifade edilse de; aslında toplam reaksiyon, anot tarafında denklem 1.2'de verilen hidrojenin oksidasyonu yada yükseltgenmesi ve katot tarafında denklem 1.3'de verilen oksijenin indirgenmesi alt reaksiyonlarından meydana gelmektedir.



Geleneksel bir yakıt pilinde, Şekil 1.1'de görüldüğü gibi anot ve katot tarafında gaz akış kanallarını üzerinde barındıran bipolar plakalar (BPP) bulunmaktadır. BPP üzerindeki gaz akış kanallarından sonra her iki tarafta yerleştirilmiş birer gaz difüzyon tabakası (GDT), ortada polimer esaslı proton geçirgen bir membran ve yine her iki tarafta membran ve GDT arasında konumlandırılmış platinyum esaslı birer Katalizör Tabakası (KT) bulunmaktadır. Anot ve katot tarafındaki platinyum esaslı KT, diğer katmanlarla karşılaştırıldığında oldukça ince bir kaplama şeklinde olsa da; yakıt pili mimarisinin izahında ayrı bir katman olarak değerlendirilmektedir. PEM yakıt pilini oluşturan her bir bileşen; yakıt pilinin performans ve dayanıklılığını belirleyen, en iyi su ve ısı yönetimini sağlamanın yanında elektrokimyasal olarak aktif olan alan boyunca iyi bir reaktant dağılımı sağlamak gibi fonksiyonları yerine getirmekten sorumludur (Dhahad ve ark. 2019, Ji ve Wei 2009). BPP'deki akış alanı tasarımı, su ve ısı yönetiminin yanı sıra reaktant dağıtımını üzerinde etkilere sahip olup; yakıt pili dizisinin toplam ağırlığını da belirleyen önemli bir parametredir. Dahası, akış alanları hücre çalışma karakterine bağlı olarak hücre voltaj stabilitesinde etkilidir (X. Li ve Sabir 2005a). Bu nedenle akış alanı tasarımı PEM yakıt pili araştırmasında yoğun dikkat çeken bir alandır (X. Li et al. 2007). Akış alanları iyileştirilerek; hücre içinde reaksiyon ürünü olarak oluşan ve reaktantların nemlendirilmesi için gönderilen suyun fazlalık kısmının etkili bir şekilde hücre dışına atılması, hidrojen ve oksijenin reaksiyon alanı boyunca girişten çıkışa kadar homojen bir

şekilde dağıtılması amaçlanmıştır. Böylece dengeli reaksiyon hızı dağılımı sağlanarak; reaksiyon ısısının da dengeli bir şekilde dağıtılmasını temin etmek suretiyle toplam hücre performansının artırılması hedeflenmiştir.

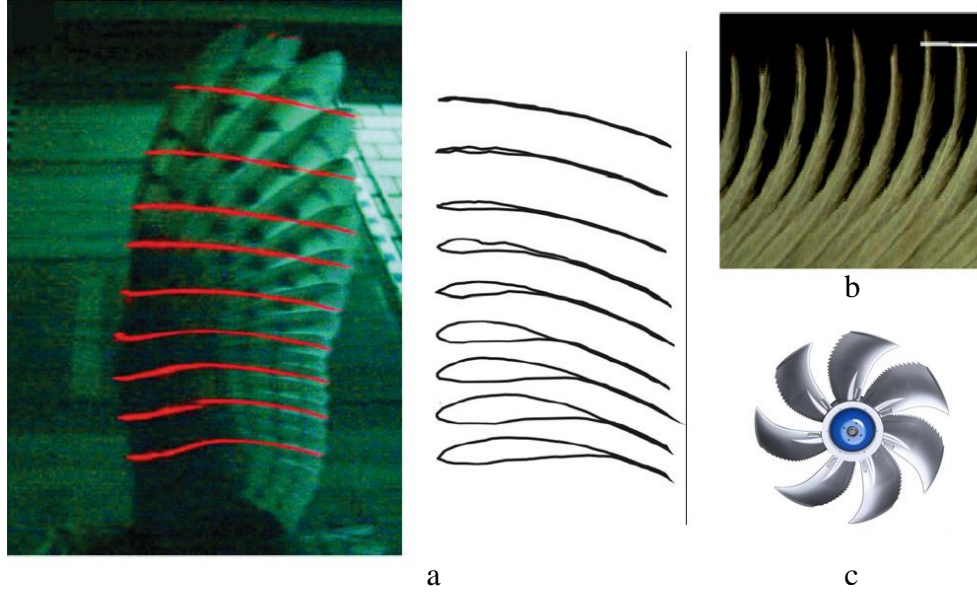


Şekil 1.1. Tekli PEM yakıt pili hücresi şematik gösterimi

Akış alanı iyileştirme çalışmalarında akış alanında kısmi düzenlemeler yapılmasının yanında, farklı performans artırma stratejileri ve yaklaşımları ile köklü değişiklikler yapıldığı da görülmüştür. Biyo benzeşim, biyo esinlenme ve biyomimikri gibi isimlerle bilinen yaklaşım, akış alanı iyileştirmede güncel bir araç olarak kullanılmaktadır. Doğadaki biyolojik yapıların belli bir fonksiyonu yerine getirmekteki üstün özellikleri referans alınarak; makul mühendislik sadeleştirmeler yapıldıktan sonra ilgili özelliğin amaç sisteme tasarıma aktarılması biyo benzeşimin temel ilkesini oluşturmaktadır. Teknik sistemlerde biyo benzeşim yapılarak daha yüksek performanslı versiyonlar üretilmesi yada yeni bir ürün geliştirilmesi faaliyetleri oldukça eskiye dayanmaktadır. 1940'lı yıllarda İsviçreli mucit George de Mistral tarafından icat edilen ve günümüzde ayakkabı, kıyafet ve kayak ekipmanları gibi birçok alanda yaygın kullanıma sahip olan

ve iki parçayı tekrarlı olarak bir araya getirip ayırmakta kullanılan cırt cırt; en temel biyo benzeşim örneklerinden biridir. Köpekleri ile yürüyüşe çıktığında köpeklerin tüyelerine ve kendi kıyafetlerine yapışan pıtrakları mikroskop altında inceleyen mucit, pıtrakların üzerindeki dikenlerin gözle bakıldığında düz dikenlere sahip görünmesine rağmen; aslında kanca formunda çıkıntılara sahip olduğunu belirlemiştir. Biyolojik bir form olarak doğada rastlanan bu form referans alınarak uçlarda pıtraklarınkine benzer şekilde kanca formunda biten daha sert malzemedan imal edilmiş ince çıkıntılı bir doku ve karşısında daha yumuşak malzemedan imal edilmiş yumaksı tüylü bir dokuya sahip iki banttan oluşan ürünü tasarlamıştır. Biyo benzeşimin ticari teknik bileşenlerin mühendislik uygulamalarında görülen en belirgin örneklerden biri, avlarına yaklaştıklarını hissettirmeyecek kadar sessiz uçabilen peçeli baykuşların kanat yapısı referans alınarak Alman Ziehl-Abegg tarafından üretilen sessiz aksiyal fan tasarımı önemli bir örnek olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.2c)(ZIEHL-ABEGG Germany -Owl wing).

Baykuş kanadının özelliklerinin, bir fanda gürültü azaltma çözümü olarak kullanılacak aşamaya gelmesinden önce; baykuşların sessiz uçuş adaptasyonları birçok bilimsel araştırma sonucunda keşfedilmiştir. Kuşların kanat şekilleri ve modülasyonlarının uçuş dinamiklerini iyileştirmede kullanılmak üzere araştırma konusu olması çok eskiye dayanmakla birlikte; baykuş kanatlarının arka kenarının tırtıklı bir yapıda olmasının, uçuş sırasında gürültü azaltmada bir adaptasyon olduğu Mascha (1904) tarafından gösterilmiştir. Ayrıca kanatların, karşılama kenarından arka kenara kadar boyuna uzanan ipliklerle yumuşak bir kanat yüzeyi oluşturmasının da ikinci bir gürültüsüz uçuş adaptasyonu olduğu anlaşılmıştır (Mascha 1904). Süregelen araştırmalar içinde Graham (1934), kanadın karşılama kenarında bulunan püsküllerin uçuş gürültüsünü azaltmakta üçüncü bir adaptasyon olduğu belirlenmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte biyo benzeşime konu olan adaptasyonlar farklı teknik yöntemlerle detaylı olarak incelenerek daha net tanımlamalar yapılmıştır. Şekil 1.2 a'da görüldüğü gibi süzülme uçuşu yapan bir baykuşun kanat formunun, sayısal verilerle net bir şekilde temsil edilebilmesi için; üç boyutlu lazer tarama yapılmış ve kanat kesitinin kanat açıklığı doğrultusu boyunca incelendiği gösterilmiştir. Ayrıca çeşitli mikroskop incelemeleri kanadın arka kenarındaki tırtıklı formun anlaşılmasında faydalı olmuştur (Weger et al. 2017).



Şekil 1.2. Baykuş kanat kesitinin üç boyutlu lazerle taranarak belirlenmesi (a) ve ucundaki tüy formunun mikroskop altında ki görünümü (b) ile Zheil-Abegg owlwing fan tasarımı (c) (Weger et al. 2017'dan alınmıştır.)

Bu tez çalışmasının amacı PEM yakıt pillerinde biyolojik yapılardan esinlenerek yeni akış alanı modelleri geliştirmek, geliştirilen akış alanlarının performanslarını deneysel olarak incelemek, ortaya çıkan tasarıma dayalı performans sonuçlarını Ansys Fluent PEM Fuel cell modül ortamında yapılan bilgisayar destekli analizlerle PEM yakıt pili elektrokimyası ve pil içi akış açısından açıklamaktır. Hesaplama akışkanlar dinamiği incelemelerinin Ansys Fluent ortamında yapılmasının nedeni; ilgili yazılımın, reaktant difüzyonunu yakıt pili elektrokimyası ile birlikte eş zamanlı olarak üç ekseninde çözmesidir. Tasarım aşamasına geçmeden önce mevcut konvansiyonel akış alanı geometrilerinin performans özellikleri incelenmiş olup; bu akış alanlarının kuvvetli ve zayıf yönleri belirlenmiştir. Daha sonra literatürde yapılmış olan akış alanı geliştirme çalışmaları incelenerek ortaya konan tasarımın özellikleri; çıkış kaynağı, amaç, fonksiyon stratejisi gibi birçok yönden ele alınarak bu tez çalışması kapsamında yapılan tasarımlar için bir yol haritası oluşturulmuştur. Bu sayede yeni biyo benzeşimli akış alanları tasarlanırken yapılacak tasarımın belli bir probleme odaklanması ve bir strateji doğrultusunda gerçekleştirilmiş olması ve bir çözüm stratejisine sahip olması amaçlanmıştır. Yeni tasarımlar için referans alınan biyolojik yapılar ve olaylar incelendikten sonra; imalatta güçlük çıkarabilecek geometrik özellikler sadeleştirilerek tasarımlar tamamlanmış ve akış alanı imal edilebilir hale getirilmiştir. Tasarımı tamamlanan akış alanları temin edilen karbon kompozit ticari bipolar plakalara CNC frezeleme tekniği ile işlenerek deneylerde kullanılacak deney

numuneleri elde edilmiştir. Deney numunelerinin hazırlanmasını, bir yakıt pilinin otomobillerde kullanımı sırasında maruz kalacakları dış etkiler doğrultusunda belirlenen koşullarda gerçekleştirilen performans testleri takip etmiş ve çalışma tamamlanmıştır.

Bu tez kapsamındaki akış alanı geliştirme çalışmaları yapılırken insan dolaşım sisteminin değişen koşullara karşı geliştirdikleri vasküler sistem adaptasyonları ve arıların oluşturduğu bal peteği yapısı referans alınmıştır. Günümüzde PEM yakıt pilleri için biyo benzeşimli akış alanı geliştirme alanında çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Özellikle bitki yapraklarındaki damar yapısındaki dallanmalar ve daralmalar, insan solunum ve dolaşım sistemindeki yapılar yoğun olarak irdelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde; biyo benzeşim yaklaşımı uygulanırken şekli benzerlik yaklaşımının benimsendiği görülmüştür. Buna karşın canlılarda boyutsal olarak yada görsel olarak tanımlanamayan ve yapı içinde bir damar dallanma modülasyonu gibi sürekli var olmayan ve kendisini ihtiyaç anında gösteren davranışsal adaptasyonlar bulunmaktadır. Canlılarda değişen koşullara karşı cevap vermek üzere, fiziki özellikler aynı kalmak kaydıyla, o koşullar altında ortaya çıkan davranışsal adaptansyonlar tıp literatüründe refleks olarak adlandırılmaktadır. Daha önceki biyo benzeşim yaklaşımlarında biyolojik yapıların sahip olduğu biçimsel benzerliklerin benimsenmesine ek olarak; bu tez çalışmasında biyolojik yapıların refleks adaptasyonları da biyo benzeşim kökeni olarak kullanılmıştır. Sıcak kanlı canlılara ait kalp-damar sisteminin; dinlenme yada hipoksi koşullarına karşı gösterdiği refleksler, bu çalışmaya temel oluşturmuştur. Arılar tarafından yaşam alanı, kuluçka ve besin deposu olarak inşa edilen, sadeleştirilerek üniform bir şekil olarak ifadesi eş kenar altıgen olarak tasvir edilen bal peteği yapısı; sandviç kompozit tasarımı başta olmak üzere birçok alanda biyo benzeşim kökü olarak kullanılmıştır. Bu zamana kadar olan çalışmalarda bal peteği yapısının mukavemet üzerine katkı sağlayan özellikleri, PEM yakıt pili akış alanlarından beklenen özelliklerle birlikte düşünüldüğünde; bal peteği yapısının uygun sadeleştirmeler ve mühendislik tasarımlarla daha verimli bir yakıt pili üretmek için bir akış alanına dönüştürülebileceği anlaşılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

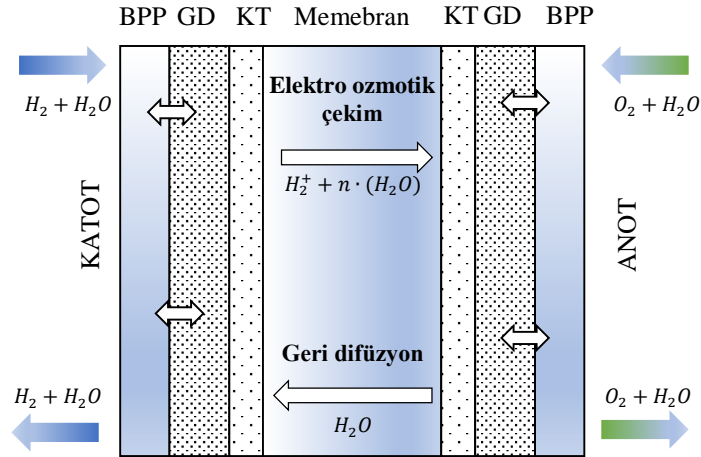
Akış alanı geliştirmek için su ve ısı yönetimine etki eden parametrelerin, yakıt pili elektrokimyasının ve mevcut akış alanı tasarımlarının (patent veri tabanları ve bilimsel çalışmalarda özellikleri tanımlanan) anlaşılması, cevap verilecek ihtiyacın belirlenmesinde bir yol haritası çizilmesinde faydalı olacaktır. Ele alınan akış alanı tasarımlarının; çıkış noktası (orişin), tasarım amacı, amaca ulaşmak için tasarımda benimsenen strateji, tasarımın güçlü ve zayıf yönleri yada geliştirmeye açık yönlerini karşılaştırmalı olarak ele alınması yeni yapılacak akış alanının amaç ve stratejisini belirlemede faydalı olacaktır.

2.1 Yakıt Hücrelerinde Su ve Isı Yönetimi ve Önemi

PEM yakıt pillerinde üstesinden gelinmesi gereken önemli problemlerden ikisi su ve ısı yönetimidir. Su yönetimi, membranı yeterince nemli tutarken pil içinde de reaktant geçiş yollarını kapatacak sıvı su oluşumundan kaçınmaktır. Isı yönetimi pil içinde ortaya çıkan ısının; polimer membran sıcaklığının membran boyunca homojen olmasını sağlayacak şekilde eşit dağılımlı olarak tahsis edilmesi ve fazla ısının, membran yapısını bozacak seviyelerin üzerindeki sıcaklıklara yol açmaması için, pil dışına transfer edilmesidir. Pil içerisinde bir yandan kimyasal reaksiyonlar sonucunda su üretilmekte olup; dış nemlendirme yapıyor ise reaktantlarla birlikte pil içerisine su girişi olmaktadır. Pilden çekilen yük ve operasyon koşullarına bağılı olarak; fazla suyun tahliye edilememesi halinde farklı katmanlarda su akıntısı veya membran kuruması gözlenebilir. Polimer membranın içerdiği su miktarı membranın proton iletkenliğini ile birlikte aktivasyon kayıplarını belirlemektedir. Yeterince nemlendirilemeyen membranın proton iletkenliği düşer ve beraberinde pilin direnci artmış olur. Bu nedenle membranın yeterince nemlendirilememesi kadar pil içinde fazla su bulunması da; kontrol altına alınması gereken bir konudur. Yakıt pili içindeki suyun etkili bir şekilde tahliye edilememesi; gaz akış kanallarında ve gaz dağıtım tabakası içindeki gözeneklerde su akıntısının başlamasına neden olarak katalizör tabakasına ulaşması gereken reaktantların geçiş yollarını tıkayıp kısa vadede konsantrasyon kayıplarına yol açacaktır. Membran nemlendirirken su akıntısından yada kurumadan kaçınmak; pilden çekilen akım yoğunluğu, sıcaklık, reaktant debisi, işletme basıncı, nemlendirme miktarı, pil tasarımı ve

diğer bileşenlerin iyi bir şekilde optimize edilmesine bağlıdır. Gereken dengenin kurulması pil performansını artırırken, pil ömrünün de uzamasını sağlayacaktır.

Yakıt pillerinde su tahliyesi, temel olarak gaz kanalları üzerinden gerçekleşirken; pil içinde membran üzerinden ve gaz difüzyon tabakası üzerinden de farklı mekanizmalarla su geçişi olmaktadır. Hücreden belirtilen mekanizmalarla su çıkışı ve hücreye su girişi olmasını yanında; su, membran üzerinden elektro ozmotik çekim ve ters difüzyon olmak üzere iki mekanizma ile anot ve katot arasında yer değiştirmektedir. Elektro ozmotik çekim, elektronlarını bırakmış hidrojen atomlarının membran üzerinden anot tarafından katot tarafına geçerken elektrostatik etkilerle beraberinde su moleküllerini de taşıması ile gerçekleşir. Elektro ozmotik çekim kuvvetinin bir ölçütü olan elektro ozmotik çekim katsayısı bir protonla anot tarafından taşınan su molekülü sayısı şeklinde ifade edilir (Zawodzinski 1993). Ters Difüzyon ise katot tarafı ile anot tarafı arasındaki su konsantrasyonu farkının artmasına bağlı olarak, konsantrasyonun fazla olduğu bölümden az olduğu bölüme doğru membran üzerinden su geçişinin gerçekleşmesi şeklinde tanımlanabilir. Suyun pil içerisinde yer değiştirme mekanizmaları ve yakıt piline giriş çıkış mekanizmaları Şekil 2.1 'de verilmiştir.

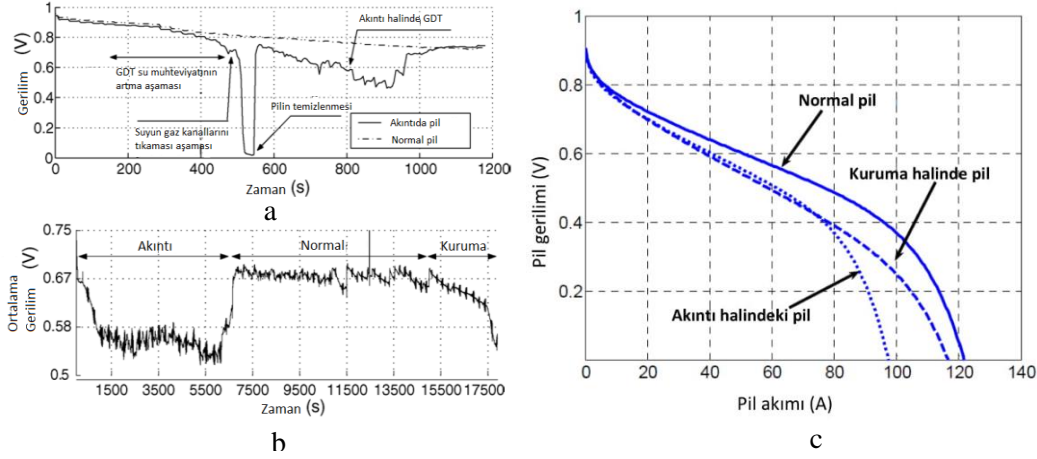


Şekil 2.1. Pil içinde su geçiş yönleri ve mekanizmaları

PEM yakıt pillerinde su akıntısı, pil içerisindeki su buharı kısmi basıncının işletme sıcaklığındaki doyma basıncının üstüne çıkması halinde su buharının yoğunlaşarak sıvı hale dönüşmesidir. Akıntı, genellikle suyun olduğu KT üzerinde yada membran üzerinden gerçekleşen su geçiş mekanizmalarının etkisi ile membran yakınlığında başlar. Akıntının

oluşmasına neden olan işletme koşullarının devam etmesi halinde pilin diğer katmanlarına yayılır. Kuruma ise temel olarak membranın su muhteviyatının azalması şeklinde tanımlanır ve etkisini su kaybına bağlı olarak ortaya çıkan iyonik iletkenlik düşüşü ve gerilim kaybı şeklinde gösterir. Pil içinde akıntı veya membran kuruması benzer şekilde kendini göstermektedir. Bu etkiler, her iki durumda da akım çekilmekte olan pilde gerilim kayıpları olarak ortaya çıkmaktadır. Bu eğilimler; otomotivde uygulanan PEM yakıt pillerinin içinde buldukları durumun önceden belirlenerek beklenen olumsuz sonucu ortadan kaldıracak önlemlerin alınabilmesi için indikatör olarak kullanılmak istenmiştir. Yakıt pilindeki performans kaybının, akıntı veya kuruma kaynaklı olup olmadığını anlamak için; işletme parametreleri ile akıntıya veya kurumaya zorlanan pilin zamana bağlı gerilim değişimi grafiği kullanılmıştır. Buna göre Şekil2.2a'da KT'de akıntının başlamasından GDT'nin suya doyması arasında zamana yayılmış kademeli bir gerilim düşüşü gözlenmiştir. Bu performans düşüşünün nedeni GDT gözeneklerini dolduran sıvı su moleküllerinin, reaktantları aktif yüzeye ulaşmaktan alıkoymasıdır. GDT'nin suya doymasının ardından akış alanını oluşturan kanallara yayılan su, kanallardaki gaz geçişini engelleyerek gerilimin keskin bir biçimde sifıra yakın bir değere düşmesine neden olmuştur. Kanalların gaz akımı ile temizlenmesinin takiben pil gerilimi kısa sürede yükselse de akıntıyı yaratan koşulların devamı halinde daha büyük basamaklar halinde gerilim düşüşü gözlenir. Şekil 2.2b'deki akıntı, normal koşullar ve kuruma halindeki pillere ait gerilim – zaman formasyonu incelediğinde, akıntıda performansın daha hızlı düştüğü ve gerilimde sürekli çalkantılar olduğu gözlenirken; kuruma halinde zamana bağlı sürekli gerilim düşüş formasyonu izlenmektedir (Fouquet et al. 2006). Buna karşın tek hücreli bir pilde zamana bağlı grafik yardımı ile akıntı yada kuruma ayırımı yapmak mümkün olsa da; otomotiv uygulamalarında kullanılan pil yığınlarının yüzlerce hücreden oluştuğu durumlarda hücre bazlı olarak böyle bir ayırımın yapılması çok sayıda sensör ve yan bileşen gerektirmesi nedeni ile uygulanabilir görünmemektedir. Yığın halindeki pilin çalışma sırasında hangi eğilimde olduğunun tespitinin; pilin işleme sürekliliğini kesintiye uğratan yada çok sayıda sensör ihtiyacı bulunan yöntemlerle belirlenmesinin dezavantajlarını ortadan kaldırmadan yola çıkılarak, pilin içinde bulunduğu eğilim akım gerilim eğrisindeki gidişattan tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bunun için nümerik olarak hazırlanan modelde pil kuruma, akıntı ve normal çalışma hallerinde modellenerek eğri üzerinde farklı

bölgelerde görülen değişimler incelenmiştir. Şekil 2.2 c de görüldüğü gibi kuruma eğilimine giren pilin omik direncinin daha yüksek olduğu buna karşın; akıntı halindeki pilin ise yüksek akım çekilmesi halinde konsantrasyon kaybına uğradığı görülmüştür (Frappé et al. 2011).



Şekil 2.2. Pilin akıntının farklı aşamalarındaki zamana bağlı gerilim davranışı (a) ile akıntı ve kuruma davranışlarının karşılaştırılması (b) (Fouquet ve ark., 2006’ dan değiştirilerek alınmıştır) ve kuruma, su akıntısı ve normal haldeki pil için gerilim-akım eğrisi (c) (Frappe ve ark., 2011’ den değiştirilerek alınmıştır) ve (Fouquet et al. 2006), (Frappé et al. 2011)

Katot tarafına hem elektro ozmotik etkilerle su taşınması hem de bu bölgede reaksiyon sonucu su üretilmesi; suyun katot tarafında kontrol altına tutulmasını çok daha zor bir denge problemi haline getirmektedir ve sonuçta daha sık karşılaşılan problemlerden biri olan katot akıntısı oluşmaktadır. Ayrıca katot tarafında sıvı su akıntısı oluşmasına neden olan mekanizmalardan üçüncüsü nemce doymuş veya aşırı nemlendirilmiş oksitleyici girişidir. Bunun yanında pil içine su enjekte edilmesi yine sıvı su akıntısını tetikleyen parametrelerdendir (Ji ve Wei 2009b). Pil içerisinde üretilen su miktarı pilden çekilen yük ile beraber artmaktadır. Pillerde üretilen fazla suyun anot tarafına geri difüzyon yaparak, reaksiyon ısısı ile buharlaşarak, su buharı difüzyonu ve sıvı suyun gözenekli gaz dağıtım tabakası içinde kılcallık etkileri gibi mekanizmalar ile katot tarafından uzaklaşabilmesi mümkünken; özellikle yüksek akımda çalıştırılan pillerde membran üzerinden su geçiş mekanizmaları arasındaki dengenin bozulması ve fazla suyun akış kanalları yardımıyla yeterince etkili bir şekilde deşarj edilememesi akıntının devam etmesine neden olmaktadır (St-Pierre et al. 2000). Pil içerisinde sıvı su akıntısının oluşması ve süreklilik

arz etmesi halinde katalizör tabakasının bağlı olduğu yüzeyden çözünerek diğer kirleticilerle birlikte H⁺ iyonlarının geçiş yollarını tıkaması söz konusudur. Su akıntısının KT üzerindeki uzun süreli etkileri Wilson ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Tepe yükte 90-105 °C' de aşırı nemlendirilmiş reaktantlarla yapılan 4000 saat ömür testlerinde, 2200 saatin sonunda KT 'yi oluşturan parçacıkların su akıntısı nedeni ile bağlı oldukları yerden koparak göçüşüme başladığı ve aglomerasyona uğrayarak daha büyük partiküller haline geldiği görülmüştür. Belirlenen süre sonunda 3nm den küçük katalizör partikülü miktarının %40 'tan %5 'e düştüğü gözlenmiştir (Wilson 1993). Katalizör tabakasındaki Pt partiküllerinin yüzey alanının aglomerasyon nedeni ile küçülmesi pilin aktivasyon enerjisini yükselterek performans kaybına neden olmaktadır. Katot tarafında akıntı başlaması halinde elektrik akımı yoğunluğunun aktif yüzey alanı boyunca dağılımında düzensizlikler ortaya çıktığı belirlenmiştir. Reaksiyonun farklı hızlarda gerçekleştiği aktif alan boyunca akıntı olmayan bölgelerde yeterli reaktant seviyeleri sonucu yüksek reaksiyon hızı, akım yoğunluğu ve sıcaklıklar görülürken; akıntı görülen bölümlerde ise reaksiyon hızı düşerek aktif yüzeyin diğer bölümlerine göre daha düşük akım yoğunluğu ve sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır (Jamekhorshid et al. 2009). Bu durum, su yönetimi kaynaklı bir ısı yönetim problemi doğurmaktadır. Farklı sıcaklık bölgelerine sahip membranın termal gerilmeler nedeni ile deforme olması yada lokal kuruma nedeni ile reaktant kısa devreleri görülmesi olasıdır.

Su akıntısının anot tarafında görülmesi özellikle soğuk iklim koşullarında pilin nemlendirilmiş reaktantlarla beslenmesi durumunda sık rastlanan bir olgudur. Nemlendirilmiş reaktantlarla beslenen pilin içindeki su buharı yüzeylerde yoğunlaşarak hidrojenin katalizöre ulaşması engellenmiş olur. Bu durumda anotta hidrojen yoksunluğuna bağlı olarak elektrot potansiyelinde anormal artışlar baş göstererek hidrojen oksidasyon reaksiyonu yerini katalizör malzemesine destek olarak kullanılan karbonun oksidasyonuna bırakır. Oksidasyon reaksiyonuna giren karbon, korozyona uğrar ve anot tarafında katalizör tabakasının incilmesi durumu ortaya çıkar. Bu da pilin anot tarafında KT 'nin bozunmasına bağlı performans kayıplarına yol açar. Anot akıntısında karbon korozyonu, katalizör partikül aglomerasyonundan daha baskın bir mekanizma olup; pil voltajındaki zamana bağlı kayıplar, akıntı olmadığı duruma nazaran

10 kat daha hızlı gerçekleşmektedir (Mansu Kim et al. 2014). PEM yakıt pillerinde hücre gerilimine göre kabul edilebilir membran bozulma hızı ortalama 1-10 $\mu\text{V/h}$ seviyesindeki gerilim düşüşleridir. Çalışma koşullarının daha zorlayıcı olduğu durumlarda belirtilen oran artmaktadır(G Hinds 2004).

Elektrot akıntısı GDT altında KT 'de oluşan su ve membrandan geçerek gelen su; katot tarafındaki GDT 'den geçerek kanala ulaştıktan sonra akış kanalları ile veya ısıtıcılarla buharlaştırılarak veya membran üzerinden geri difüzyonla anot tarafına geçerek bu bölgeden uzaklaşma imkânına sahiptir. Fakat bu mekanizmalar, ilgili bölümde su akıntısı oluşumunun önüne geçmekte yetersiz kaldığında; yakıt pilinin düşük doygunluk seviyesine sahip reaktant akışı ile beslenerek pil içerisindeki sıvı suyun buharlaştırılıp reaktantlara yüklendikten sonra pil dışına çıkarılması da uygulanan bir su yönetim stratejisidir. Katot tarafında su akıntısı oluşma ihtimali anot tarafına nazaran daha fazla olsa da; katot tarafında üretilen su miktarının membranı nemlendirmede yetersiz kaldığı durumlar da görülmektedir. Böyle bir durumda reaktant gazların nemlendirilmesi bir seçenek olarak uygulamalarda kullanılmaktadır. Öte yandan anot tarafının nemlendirilmesi ihtiyacı; genelde yakıt pili yüksek akım yoğunluklarında çalışırken, anot tarafında membranın kurumaması halinde ortaya çıkmaktadır. Yüksek akım yoğunluklarında elektro ozmotik çekim mekanizması geri difüzyon mekanizmasına baskın hale gelerek; anottan katota taşınan su miktarının, ters difüzyonla katot tarafından anot tarafına geçenden çok daha fazla olmasına yol açmaktadır. Yüksek akım yoğunluğu nedeni ile görülen membran kurumaması, kalın membranların nemli kalmak için daha yüksek miktarda suya ihtiyaç duyması nedeni ile, kalın membranlarda daha sık görülmektedir (Ji ve Wei 2009b). Yakıt pillerinde membran kurumamasına karşı yaygın olarak kullanılan yöntem reaktantların dışarıdan nemlendirilmesi olsa da; özellikle kompakt sistemler için yakıt pili uygulamalarında sistem ağırlığını artıran ve parazit güç yutulmasına neden olan ek nemlendirici bileşenler istenmemektedir. Bu noktada;

- Pil içine doğrudan su enjeksiyonu
- Destek olarak güçlendirilmiş gaz difüzyon tabakaları ile birlikte daha ince membran kullanımı
- İçine katalizör partikülleri emdirilmiş kendi kendini nemlendiren membran kullanımı

- Özellikleri geliştirilmiş gaz dağıtım tabakaları gibi çok sayıda su yönetimine yönelik teknik geliştirilmiştir.

Geliştirilen su yönetim stratejilerine rağmen; su tahliye hızı ve sıvı haldeki su miktarının gaz haldeki su miktarına oranı pilin işletme koşulları ve tasarımı ile yakından ilişkilidir. Pilin işletme sıcaklığı, basıncı ve pile beslenen reaktant debisi gibi parametrelerin; operasyon sırasında pil içerisinde ne kadar su buharı bulunacağı, su buharlaşma hızı ve su buharı basıncı üzerine etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle pilden su tahliyesinin verimi bu parametrelere bağlıdır. Yakıt pillerinde su yönetimi ile ilgili tasarımlar ve geliştirmeler; yakıt pili işletme parametrelerinin birbiri ile etkileşimi ve çapraz etkileri iyice anlaşılabilir şekilde gerçekleştirildiğinde daha güvenilir sonuçlar verecektir. Bu nedenle yakıt pilinde su yönetimi ile ilgili farklı koşullarda yapılmış çalışmaların incelenmesi faydalı olacaktır.

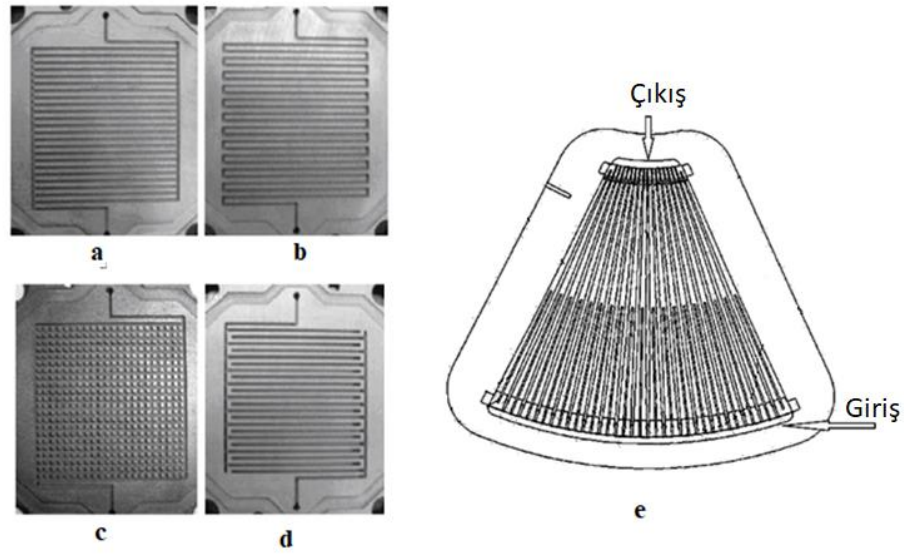
Diğer mekanizmalar ile karşılaştırıldığında, geri difüzyon mekanizmasının su taşınmasında diğer mekanizmalara göre daha az etkili olduğu görülmüştür. Anot tarafına geri difüzyonun gerçekleşebilmesi için membranın katot tarafındaki su miktarının anot tarafına göre daha yüksek olması gerekmektedir. Geri difüzyonun elektro ozmos etkileriyle anot tarafından katot tarafına su geçişine baskın olduğu aralık genellikle pilin $0,3 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunun altında çalıştığı durumlarda geçerlidir (Nguyen 1993). Teorik olarak ideal bir yakıt pilinde ısı üretimi sadece su üretim reaksiyonu sırasında olduğu kabul edilmektedir. Buna karşın fiziksel olarak çalışmakta olan bir yakıt pilinde üretilen toplam ısıнын %20'sinin ohmik kayıp ısısı, %35'inin entropi kaynaklı ısı ve %45'inin reaksiyon ısısı olarak üretildiği bilinmektedir (Ghasemi et al. 2017). Katot ve anot tarafındaki asimetrik potansiyel oluşumu entropi üretiminin artmasına ve katot tarafında daha çok ısı üretilmesine neden olmaktadır (Gülzow et al. 2000, Ju et al. 2005, Yan et al. 2004). Sözü geçen mekanizmalarla ortaya çıkan ısının kötü su yönetimi sonucu da membran kuruması ve buna bağlı kısa vadede membran proton iletkenliğinde düşüşler ortaya çıkabilmektedir. Kötü yapılan ısı yönetiminin devamında membran yüzeyindeki dengesiz sıcaklık dağılımı kızgın nokta oluşumuna ve uzun vadede noktasal delikler oluşmasına neden olmaktadır. Membran yüzeyindeki delikler hidrojenin katot tarafına doğrudan geçerek orada oksijenle kontrolsüz birleşimi sonucu pilin sıcaklığının daha çok artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle yakıt pili içinde oluşan fazla ısının dışarı atılması

gerekmektedir. Özellikle yığın halindeki yakıt pillerinde ısı yönetimi belli aralıklarla anot ve katot bipolar plakaları arasına yerleştirilen soğutucu plakalarla sağlanmaktadır.

Pilden su tahliyesi için çeşitli mekanizmalar çalışmakta olsa da; pilin içinde bulunduğu çalışma koşullarında bu mekanizmaların su tahliyesinde yeterli olmaması durumunda özel gaz dağıtım tabakası ve akış kanalı tasarımları ile veya pil ısıtıcılar ile suyun katalizör tabakasından uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Her ne kadar gaz dağıtım tabakaları, katalizör tabakasında oluşan suyun tahliye edilmesine yardımcı olsa da bu tabaka içinde su tahliyesi için gereken konsantrasyon farkı; gaz dağıtım tabakasının kalınlığı, gözenekliliği, su iticiliği gibi çok sayıda parametreden etkilenmektedir. Akış alanlarında kanal genişliği, derinliği, kanallar arası mesafe gibi parametreler akış hızını etkileyerek su tahliyesini hızlandırmanın yanında reaktantların gözenekli tabaka içinde ne kadar etkili bir şekilde difüze olacağını ve reaksiyonun gerçekleşeceği kimyasal olarak aktif katalizör tabakasına ne kadar etkili bir şekilde ulaştırılacağı üzerinde oldukça belirleyicidir. Bu noktada akış kanalı tasarımı yakıt pillerinin performans ve ömür parametrelerini iyileştirmek için; su ve ısı yönetiminde üzerinde çalışılması gereken önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.

2.2 Temel Akış Alanı Tasarımları

Bilindiği üzere PEM yakıt pillerinde reaktantların reaksiyona gireceği alana verimli bir şekilde ulaştırılması ve reaksiyon sonucu pil içinde oluşan fazla suyun dışarı atılması BPP içinde yer alan akış kanalları ile gerçekleştirilmektedir. Pazarda ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılan dört temel akış alanı mevcuttur. Bunlar Şekil 2.3 a, b, c, d 'de sırayla verildiği gibi paralel, paralel serpantin, çıkıntılı tip ve iç içe geçişli tip akış alanlarıdır.



Şekil 2.3. Paralel (a), paralel serpantin (b), çukuntılı tip (c) ve iç içe geçişli (d)(X.-D. Wang et al. 2008) ve dairesel akış alanı (e) (US20080213648A1 2005)

Paralel akış alanı giriş uçları ana dağıtıcı manifoldta çıkış uçları ise bir toplayıcı manifoldta bağlı ve bu iki manifold arasında birbirine paralel bir şekilde dizilmiş düz kanallardan oluşmaktadır. Bu akış alanı tipi bazı dezavantajlı özelliklerine rağmen; en düşük basınç kaybı ile reaktant akışı sunan akış alanıdır. Akışkanlar akma direncinin daha düşük olduğu yoldan akma eğiliminde olduğu için paralel akış alanında da reaktantlar ana dağıtıcı manifoldun giriş portuna yakın ucuna bağlı paralel kanallarda akma eğiliminde olup; dağıtıcı manifoldun giriş ucunun tersi yönde kalan kanallarda düşük debide akış gözlenmektedir. Bu akış alanı mimarisinin bir sonucu olarak, kanallar arasındaki konsantrasyon farklılıkları reaktif alanda da yüksek ve düşük reaktant kısmi basınca sahip bir dağılım oluşturmaktadır. Reaktantların aktif yüzey boyunca eşit bir şekilde dağıtılamaması sonucu farklı reaksiyon hızları nedeni ile membran üzerinde kararsız sıcaklık bölgeleri oluşmaktadır. Kanal içinde su damlacıkları oluşması halinde paralel kanallar oluşan suyun pil dışına atılması konusunda yetersiz kalmaktadır. Reaktantların, tıkalı kanallar yerine açık olan kanalı tercih etmesi yine konsantrasyon dengesizliklerine yol açmaktadır. Paralel akış alanına sahip pillerde basınç kayıplarının düşük olması, reaktantların; kimyasal olarak aktif olan katalizör tabakasına doğru zorlanması yerine onları pil katmanlarına paralel akma eğilimine girmesine neden olarak pilde konsantrasyon kayıpları ve düşük akım yoğunlukları ile sonuçlanmaktadır (X. Li ve Sabir 2005b, X.-D. Wang et al. 2008).

Serpantin akış alanı temel haliyle, tek bir kanalın giriş manifoldundan başlamak suretiyle dönüşler yaparak BPP'yi birbirine paralel kanallar oluşturacak şekilde taramasıyla oluşmuş akış alanı olarak tanımlanabilir. Serpantin akış alanı, pili içinden su tahliyesi için verimli bir tasarım olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşın girişten çıkışa doğru, reaktant konsantrasyonunda belirgin bir fark oluşmaktadır. Konsantrasyon farkı nedeni ile aktif yüzey boyunca farklı reaksiyon hızları ortaya çıkmakta ve membranda farklı sıcaklık bölgelerinin oluşması sık gözlenmektedir. İlerleyen süreçte membranda kalıcı hasara yol açan kızgın nokta formasyonunun önüne geçmek için; birçok serpantin akış uygulamasında anot ve katot tarafındaki giriş ve çıkışların çapraz bağlanması ile anot tarafındaki hidrojenle katot tarafındaki oksijenin ters akışlı olarak sisteme gönderilmesi yöntemi uygulanmaktadır. Bu sayede yüzeyde daha dengeli reaksiyon hızları elde edilerek aşırı sıcak bölge oluşumundan korunmuş olur. Plaka boyutunun çok büyük olduğu durumda giriş ve çıkış arasında kanal içindeki konsantrasyon ve basınç farkının dengelenebilmesi için birden fazla kanala sahip serpantin akış alanları kullanılabilir (H. Liu et al. 2014).

Çıkıntılı tip akış alanı genellikle kare yada dairesel çıkıntıların BPP üzerinde sıralı yada saptırılmış düzende dizilmesiyle arada kalan boşlukların oluşturduğu akış alanı olarak tanımlanmaktadır (Ralph 2006b). Çıkıntılı tip akış alanı diğer bir düşük kayıplı akış alanı olmasına rağmen; damlacık oluşumu durumunda, paralel akış alanında olduğu gibi, düşük direnç doğrultusunu seçen reaktantlar düzensiz reaksiyon ve sıcaklık bölgeleri oluşturma potansiyeline sahiptir. Çıkıntılı tip akış alanının diğer bir dezavantajlı yönü, pil içinde yüksek gaz akış hızlarına ulaşılması durumunda çıkıntıların arkasında akışın dönme hareketine girdiği bölgeler ortaya çıkarak bu bölgelerde konsantrasyon kayıplarına bağlı düşük akım alanları oluşmaktadır.

Birçok akış alanı mimarisi akışkanın; kanal veya kanalların giriş ucundan girerek kanal uzunluğunu boydan boya kat edip çıkış ucunda pili terk etmesi şeklinde dizayn edilmiştir. İç içe geçişli akış alanında ise BPP üzerindeki giriş ve çıkış manifoldunu doğrudan birbirine bağlayan bir yapı söz konusu değildir. İç içe geçişli akış alanında reaktantlar temel olarak giriş manifolduna bağlı bir ucu kapalı kanallara girdikten sonra GDT üzerinden difüzyona uğrayarak tekrar giriş kanallarına benzer şekilde bir uçları kapalı

diğer uçları çıkış manifolduna bağlı kanallara geçerek çıkışa ulaşmaktadır. Akış alanı mimarisi gereği, ucu kapalı kanallar içinde membran ve GDT tabakalarına paralel seyrederek çıkışa ulaşamayan reaktantlar; tabakaların normal doğrultusunda zorlanmış olurlar ve bu sayede reaktantların KT tabakasına ulaşma etkinliğini destekleyecek difüzyon etkileri güçlenmiş olur. Reaktant difüzyonunu güçlendiren konveksiyon etkileri aynı zamanda gözenekli tabaka içindeki suyun da aktif bir şekilde kanala taşınmasını destekleyici yönde işlev görmektedir. Buna karşın gazların giriş manifolduna bağlı kanallardan çıkış manifolduna bağlı kanallara geçişi sadece gözenekli GDT üzerinden mümkün olduğu için; reaktantlar gözenekli tabakada belirgin basınç kaybına uğrarlar ve pompalama ihtiyacı ortaya çıkarak parazit güç tüketimi oluşturur(Cooper et al. 2016, Wood et al. 1998).

2.3 Temel Akış Alanları Üzerinden Kısmi İyileştirmeler

PEM yakıt pili bileşenlerinden olan katalizör tabakası, gaz dağıtım tabakası, membran gibi bileşenler üzerinde yoğun bir şekilde çalışmalar yürütülmekle beraber; akış alanı ve BPP tasarımı çalışmaları günümüzde hala önemini korumaktadır. Bunun nedeni BPP bileşenlerinin; toplam pil yığını ağırlığının yaklaşık %78,6'sını teşkil ediyor olması, pilin diğer katmanları için temel destek elemanları olmaları, reaktantların aktif alan boyunca etkili bir şekilde dağıtma görevine sahip olmaları ve fazla suyun pil dışına atılmasını sağlamalarıdır. PEM yakıt pili akış alanı geliştirme çalışmalarında kısmi iyileştirme tanımı; temel akış alanlarının mimarileri üzerinde rota değişikliği, kanal bağlama, dış bileşen ekleme gibi belirgin farklılıklar yaratmadan yapılan değişiklikleri kapsamaktadır. Çeşitli modifiye edilmiş akış alanlarına sahip PEM yakıt hücrelerinin performansı sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Sayısal yöntemlerin, deneysel yöntemlere göre daha az zaman ve maliyet ihtiyacı bulunması nedeniyle daha çok tercih edilen bir yöntem olduğu görülmektedir. Sayısal yöntemler, deneysel çalışmalardan önce performansla ilgili bir öngörü geliştirmekte sıklıkla kullanılmaktadır.

2.3.1 Paralel akış alanı üzerinde kısmi iyileştirmeler

Avantajlı özelliklere sahip temel akış alanı tasarımlarından biri olan paralel akış alanının bazı yönlerden hala geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Bu nedenle, performansı artırmak için paralel akış alanı mimarisi üzerinde geliştirilen ve uygulanan bazı stratejiler olduğu görülmüştür. Denklem 2.1'deki bütün bileşenlerin gaz formunda olması halinde

belirlenmiş Nernst eşitliğinden anlaşılacağı gibi aktif yüzeydeki reaktant kısmi basınçlarının yüksek olması daha yüksek pil potansiyeli sağlayacaktır. Diğer bir deyişle KT üzerindeki reaktant konsantrasyonunun hücre potansiyeli ile doğru orantılı bir ilişkisi bulunmaktadır (Barbir 2005).

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} \quad (2.1)$$

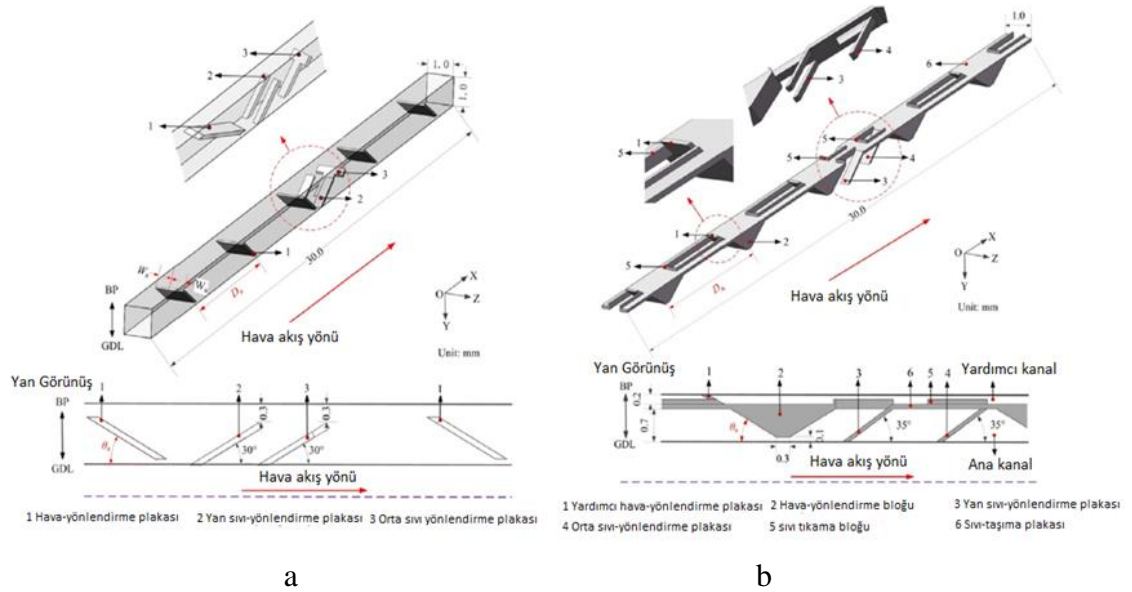
Denklem 2.1’de E_0 standart hücre potansiyelini, R standart gaz sabiti (8,314J / mol K), F Faraday sabiti (96,5 cloumb / mol), T Kelvin cinsinden reaktantların sıcaklığı, n redoks reaksiyonunda aktarılan elektronların mol sayısı ve P reaktant gazların ve su buharının kısmi basıncıdır. Bu nedenle paralel akış alanlarında KT üzerindeki reaktant kısmi basıncının artmasını sağlayacak iyileştirmeler, performans artışı sağlanmasına katkıda bulunacaktır.

Akış kanalını kısmen veya tamamen bloke etmek için kullanılan engel veya blokaj ilavesi, reaktif yüzeye doğru akma yerine girişten çıkışa kadar kanal içinde akma eğiliminde olan reaktantların, reaksiyon yüzey normali doğrultusunda akışa zorlamak için bir yöntem olarak kullanılır (H.-C. Liu et al. 2005). Kanallar içindeki blokaj etkisini göstermek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Genel olarak, özellikle konsantrasyon kayıplarının şiddetlendiği daha düşük gerilimli çalışma koşullarında, düz kanallar içinde kısmi blokaj ile blokaj eklemenin faydası baskın hale gelmektedir (Heidary et al. 2016). Kanal içine şaşırtıcılar şeklinde blokajların eklenmesi durumunda şaşırtıcı üst seviyesi ve kanal derinliği arasındaki boşluk oranının yanında, şaşırtıcı sayısının da pil performansında belirleyici olduğu görülmüştür. Diğer yakıt hücresi parametrelerine bağlı olarak optimum bir şaşırtıcı sayısı ve boşluk oranı belirlenmelidir (Biyikoglu ve Oztoprak 2012). Artan sayıda blokaj, GDT'deki gözenekliliğin azalmasıyla birleştiğinde, parazit pompalama enerji tüketimini artıran ciddi basınç kaybına neden olabilmektedir. Öte yandan, membranın nemlendirilmesi açısından reaksiyon verimliliğinin bir göstergesi olarak kabul edilen KT üzerindeki su konsantrasyonu, artan blokaj sayısı ile önemli ölçüde artmaktadır. Blokaj yüksekliğinin artması ile blokaj elemanı ucu ve GDT yüzeyi arasında kalan gaz geçiş aralığı sıkılaştırdığında, GDT'deki bir reaktant konsantrasyonu artmaktadır. 3-5 adet blokaj elemanı kullanımının 0,7 GDT gözeneklilik değeri ile

kullanıldığında ile optimal olduğu Soon ve ark. (2005) tarafından bildirilmiştir (Soong et al. 2005).

Blokaj şekli ve konumlandırmanın, basınç kaybı ve yakıt pili performansı üzerinde belirgin etkileri vardır. Akış kanalına dikdörtgen, yarım daire biçimli ve trapez formlu çıkıntılar yerleştirmenin etkileri; Ghanbarian ve Kermani (2016) tarafından incelenmiştir (Ghanbarian ve Kermani 2016). Çalışmada, 0,2 V hücre potansiyelinde kanal içine kare, yarım daire ve trapez çıkıntılar eklenmesi sonucu sırayla %1,37, %3,08 ve %3,11 civarında net güç artışının elde edildiği bildirilmiştir. En belirgin performans kazancı akış kanalına trapez formunda çıkıntı ilavesiyle elde edilirken, sürtünme kayıplarını belirleyen en büyük ısılanabilir yüzey alanına sahip olması nedeni ile diğer geometriler arasında en yüksek basınç kaybına yine trapez formlu blokaj kullanımında rastlanmıştır. Heidary ve ark. (2017) tarafından akış kanalını tamamen kapatan blokajların kanal içine sıralı ve saptırmalı dizilim konfigürasyonunda dizilmesini temsil edecek bir model hazırlanmıştır (Heidary et al. 2017). Reaktantların kaburga altı konveksiyon etkileri ile kimyasal olarak aktif olan KT tabakasına ulaşma etkinliği sıralı dizilim konfigürasyonu ile artırılmış olmakla beraber; saptırmalı blokaj dizilim konfigürasyonu ile bu artış % 28 oranında daha yüksek bir düzeye taşınmıştır. Kaburga altı konveksiyon etkileri saptırmalı blokaj diziliminde daha homojen reaktant dağılımı sağlamanın yanında daha az basınç düşüşü oluşmasını sağlamaktadır (Heidary et al. 2017). Sıralı dizilimde tam blokaj uygulamasında katmanlar arasındaki reaktant akışı kuvvetlense de; özellikle çıkışa yakın bölgelerde girişe göre aşırı basınç farkına yol açarak konsantrasyon kayıplarına neden olmaktadır. Diğer yandan saptırmalı dizilimin, daha az basınç kaybına neden olması ile katmanlar arasında konveksiyon etkilerini güçlendirmek için daha uygun olduğu görülmektedir. Paralel akış alanlarında kanalı tam kapatan blokaj veya saptırıcı kullanımı genel pil performansını artırsa da; tasarım stratejisi, hem basınç kaybı hem de kanal su akıntısı bağlamında dikkatle ele alınmalıdır. Özellikle pilin soğuk başlangıç gibi zorlu koşullar altında çalışması sırasında, kanal içinde oluşabilecek sıvı su molekülleri blokajlar nedeni ile GDT'ye doğru akmaya zorlanarak yaygın GDT akıntısı oluşturma potansiyeline sahiptir. GDT içinde kılcallık etkileri ile ilerleyen akıntı hali reaktantların KT tabakasına ulaşmasını engelleme potansiyeline sahiptir. Bu noktada Fan ve ark. (2018) tarafından gazları ve sıvı suyu kanallar içerisindeki plakalar ve çıkıntılar ile yönlendirerek gazları GDT'ye zorlayan ve sıvı haldeki suyu reaktif alandan uzaklaştırma

fonksiyonuna sahip iki yeni katot akış kanalı önerilmiştir (Fan et al. 2018). Sırasıyla Şekil 2.4 a ve b'de sırayla verilen çok plakalı ve entegre yapı olarak adlandırılan tasarımlarda, işlevleri reaktant gazı GDT katmanına zorlamak ve sıvı suyu reaktif alandan uzağa yönlendirerek kanallar yardımıyla atılmasını sağlamak olan iki tip plaka ve kanal içi girinti mevcuttur. Yeni tasarımların performans artışı, geleneksel akış kanallarına kıyasla pompa kayıplarını dikkate alarak optimize edilmiş plaka açısı, sayısı ve plakalar arası boşluklar ile çoklu plaka yapısı ve entegre yapı için sırasıyla% 4,7 ve 7,5 olarak bildirilmiştir. Entegre tasarımın, konveksiyon etkilerinin güçlendirilmesinde çok plakalı tasarımdan daha etkili olduğu tespit edilirken; daha yüksek basınç kaybına yol açtığı için pompalama enerji tüketimini arttırdığı için daha az net performans artışı sağlamıştır. Yeni tasarımların tüm avantajlı özelliklerinin yanı sıra, daha karmaşık imalat prosedürlerine ihtiyaç duyuyor olmaları uygulama maliyetlerini yükseltecektir.



Şekil 2.4. Sıvı su ve reaktant gaz yönlendirme için çoklu plaka yapısı (a) ve entegre yapıya (b) sahip akış kanalları (Fan ve ark., 2018'den değiştirilerek alınmıştır (Fan et al. 2018)

Bir yakıt pilinde hücre performansı üzerindeki en önemli etkilerden biri, akış alanı boyunca reaktantların eşit dağılımı ve konsantrasyonudur ancak; geleneksel paralel akış alanında olduğu gibi reaktantların, basınç kaybının daha düşük olduğu hat boyunca akma eğiliminde olması reaktantların dengesiz dağılımıyla sonuçlanmaktadır. Sabit kanal genişliği ve derinliğine sahip paralel akış hatlarında giriş manifoldundan uzakta konumlandırılmış kanallarda basınç kaybı daha yüksektir. Montie ve ark. (2008), Şekil

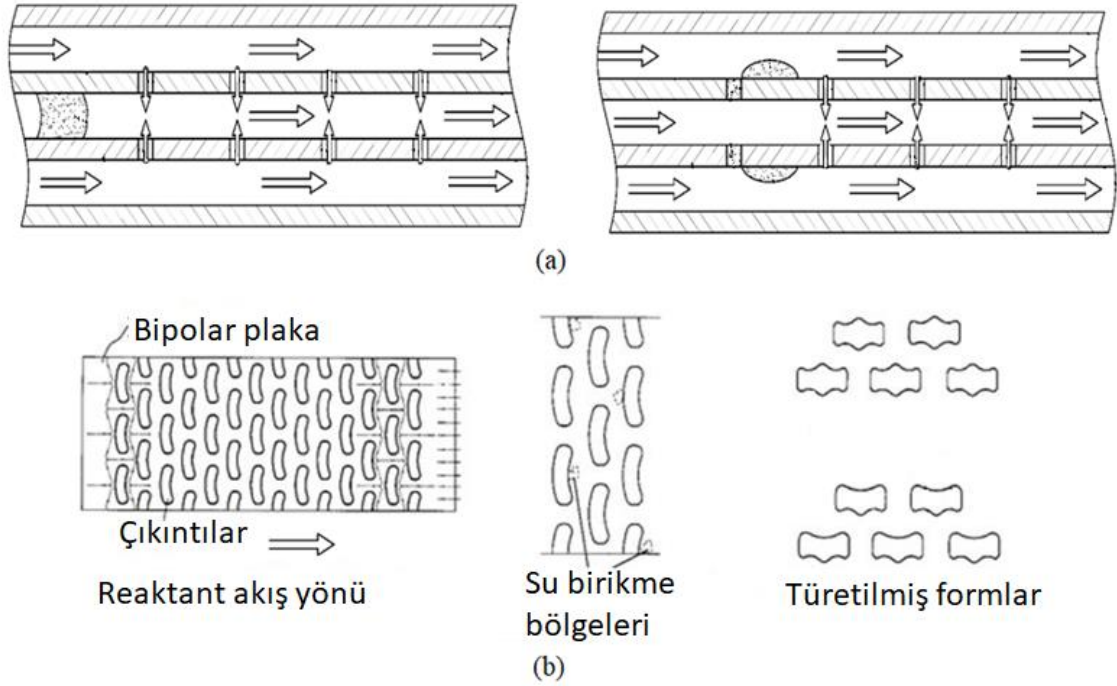
2.3 e' de görüldüğü gibi dış kenara yakın giriş manifoldu ile iç kenara yakın çıkış manifoldu arasında dairesel dizilimle düz olarak uzanan kanalların oluşturduğu daire dilimi şeklinde yeni bir BPP tasarlamış ve patentlemiştir (US20080213648A1 2005). Tasarımda gaz kanalları birbirine paralel dizilime sahip olmasa da; düz kanalların girişte aynı giriş manifoldunu ve çıkışta aynı çıkış manifoldunu paylaşması tasarım paralel akış alanı kökenine sahip olduğunu göstermektedir. Yeni tasarımda kanal derinliği ve genişliğinin akış uzunluğu boyunca eksponansiyel olarak daralması; yüzey alanı boyunca miktarı azalan akışkanların kısmi basınçlarını sabit tutarak aktif membran yüzey alanı boyunca homojen akım yoğunluğu elde edilmesi için alınmış bir önlemdir. Kanal mimarisini daralan kanal yapısına sahip olmasının bir diğer amacı, reaksiyonlar sırasında tüketim ile reaktant gazların miktarının azalmasına rağmen su tahliye kuvvetini yeterli seviyede tutmaktır. Kanal genişliğinin eksponansiyel olarak daralması, reaktantların kısmi basınçlarını sabit tutmak için uygun olmasına rağmen; reaktant gazların girişte radyal olarak homojen girişi sağlanamadığı sürece risk devam edecektir. Benzer şekilde Lee ve ark. (2019); açık katot pasif hava soğutmalı PEM yakıt pili yığınları için membranın susuz kalmasını önlemek ve hücre soğutma performansını arttırmak amacıyla paralel akış alanı benzeri bir akış alanı önermiştir (Lee et al. 2019). Yeni tasarımın işleyiş algoritması, reaktant hava kanalları yoluyla su tutulmasını arttırmak için reaktant havanın yavaşlatılırken; soğutma havası tarafında daralan kanal genişliği ile soğutma havasının hızlandırılmasına ve böylece soğutma havasının taşınımıyla ısı transferi kapasitesinin artırılması şeklindedir. Paralel akış alanlarında odağı su tahliyesini hızlandırmaya olan diğer tasarım stratejilerinin aksine; yeni tasarım mimarisinin odağı, su tutmayı arttırmaya yöneliktir.

Manifold ve dağıtıcı revizyonları, paralel akış alanına sahip PEM yakıt pillerinde kanallar arasında dengeli reaktant dağılımını arttırarak performans iyileştirmesi için benimsenen stratejilerden biridir. Imbrioscia ve Fasoli (2014) çalışmalarında da görüldüğü gibi, dağıtıcı revizyonuna eşlik eden bazı küçük kanal kesit revizyonları kanallarda daha dengeli reaktant basıncı ve hız dağılımı sağlamak için sık kullanılan bir stratejidir (Imbrioscia ve Fasoli 2014). CFD simülasyonları aracılığıyla performans kriteri olarak hız ve basınç dağılımı referans alınarak beş yeni dağıtıcı revizyonu önerilmiş ve etkileri incelenmiştir. Birinci revize edilmiş tasarım, kesiti lineer daralan bir dağıtıcı ve akış yönü

boyunca lineer genişleyen bir toplayıcı arasında eş kesit ölçülerine sahip paralel kanallardan meydana gelmektedir. İkinci tasarımda birinci tasarımdakine benzer şekilde daralan bir dağıtıcı ve genişleyen bir toplayıcı vardır ancak; kesitlerdeki değişimler lineer değildir. Üçüncü tasarımda dağıtıcının üst kenarı toplayıcının ise alt kenar ark şeklinde olup; dağıtıcı ve toplayıcı kesitlerinin ortada daha geniş kesitlere sahip olmasını sağlamaktadır. Dördüncü tasarımda, dağıtıcı ve toplayıcı kesitleri paralel kanalların kesitlerinden dört kat daha geniş olduğu gözlenmiştir. Paralel kanal sırasının ortasına yakın olanların dağıtıcıya bağlandığı bölgede ise kanal kesitinin gaz geçişinin kısılmasını sağlayacak şekilde daraldığı görülmüştür. Son tasarımda dördüncü tasarıma benzer şekilde daha geniş dağıtıcı ve toplayıcılarla bağlantılı farklı kesit ölçülerine sahip paralel kanallardan oluşan bir yapı gözlenmektedir. Son tasarımda, paralel kanalların hidrolik çapı, ortadaki sıralara yaklaşırken orantılı olarak artacak şekilde kesitleri genişletilmiştir. Tüm revizyonların etkisini ele almak için CFD sonuçları ele alındığında; ilk üç tasarımın homojen basınç dağılımı anlamında belirgin bir fark yaratmadığı görülmüştür. Ancak daha geniş dağıtıcı ve toplayıcı kesitinin yanında orta sıradaki kanal kesitlerinin daha geniş olduğu son tasarım en yüksek performansı göstermiştir. Benzer şekilde Hossain ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, dağıtıcı ve toplayıcı kesitlerinin genişletilmesinin yanında paralel kanallardan ortaya yakın sıradakilerin kesitlerinin değiştirilmesinin; aktif yüzey alanının orta bölgesindeki görülen yetersiz reaktant dağılımının bertaraf edilmesinde etkili olduğu görülmüştür (Sajid Hossain et al. 2017). Giriş dağıtıcısı ve çıkış toplayıcı arasındaki kanal sıralarındaki reaktant basınç ve konsantrasyon dengesizliğini ortadan kaldırmak için, her bir kanalın değişen uzunluklar, kesit ve alt dallanmalara sahip olduğu, böylece akış uzunlukları boyunca kanal segmentlerinin oluşturulduğu yeni bir strateji ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda, enine kanal kesit ve uzunlukları bakımından birbirinden farklı kanallardan oluşan iki yeni revize paralel akış alanı Lim ve ark. (2017) tarafından incelenmiştir. Kanallar giriş bölümünde daha geniştir ve geniş kesitli bu kanalların her biri çıkış bölümüne kadar üç veya dört alt dala ayrılmış kanalı beslemektedir. Üçlü ve dörtlü olarak dallanan kanallar çıkış kısmında tekrar tek kanalla toplanırlar. Akış alanının çıkış kısmındaki kanal kesitleri, giriş bölümünde daha geniş bir kanalla beslenen üçlü veya dörtlü alt kanalı topluyorsa, çıkışta daha dar bir kesitle devam eder ve tam tersi durum da geçerlidir. İlk tasarım tek giriş ve çıkışa sahipken, ikinci tasarım kanal kesiti açısından ilk tasarımdakiyle aynı tasarım

felsefesi ile tasarlanmış olup; ilkinden farklı olarak iki giriş ve iki çıkış manifoldundan oluşmaktadır. Reaktantların hızı ve basınç dağılımı kanallar arasında nispeten dengelenirken, değerler akış uzunluğu boyunca kademeli olarak değişmektedir (Lim et al. 2017). Tasarım stratejisi olarak kanal segmentasyonu, daha dengeli reaktant dağılımı sağlama potansiyeline sahipken kanal akıntısı meydana gelmesi halinde, reaktant tüketimi göz önüne alındığında yetersiz sıvı su deşarjının gözlemlenmesi mümkündür. Paralel akış alanının bir dezavantajı olarak, bir kanalda su damlası oluşumu, akış alanında reaktantların durgun olduğu akış bölgelerinin oluşmasına yol açar ve bu nedenle konsantrasyon kaybı ve aktif yüzey boyunca eşit olmayan akım dağılımı ile sonuçlanır. Kanal içinde akıntı halindeki su damlacıklarının daha küçük parçalara bölünerek ardından bitişik kanallar yoluyla taşındığı bir tasarım stratejisi, kanallarda çıkışa yakın bölgelerde düşük konsantrasyon oluşumunu önlemek için uygulanan yeni bir stratejidir. Bu strateji doğrultusunda Shirvanian ve Hirano (2009), çıkış noktası paralel akış alanı olan delikli bir akış alanı önermiş ve patentini almışlardır (US20100261087A1 2009). Şekil 2.5 a'da görüldüğü gibi damlacıklar tarafından tıkanan kanallar nedeni ile ortaya çıkan durgun akış bölgesi oluşumunun önüne geçmek için; tüm kanallar omuz çıkıntılarının düşey yüzeyine dik doğrultuda açılmış delikler vasıtasıyla bitişik kanallara bağlanmıştır. Kanallardan biri tıkanıldığında tıkanan hattın tıkanıklıktan sonraki kısmının; komşu kanalla bağlantısını sağlayacak üçgen, daire veya dikdörtgen şeklinde açılması mümkün olan delikler yoluyla beslenmesi mümkündür. Deliklerin bir başka görevi, büyük boyutlu damlacıkların deliğin her iki yüzeyindeki basınç farkı ile delik içinden geçerek bitişik kanallara sürüklenmesini ve daha küçük damlacıklara ayrılmasını sağlamaktır. Daha küçük damlacıklara ayrılan sıvı su, bitişik hatlardaki reaktant akışı ile gaz veya sıvı şeklinde pil dışına taşınmaktadır. Tasarımın, test edilen koşulda toplam su tahliye kapasitesini artıran ve genel performansta iyileşme sağladığı bildirilmesine rağmen; farklı akış hızlarında, delik kesitlerinde ve delik sayıları için incelenmesi gerekmektedir. Tasarımda temel olarak deliklerin aşırı büyük damlacıkları bölmesi ve tıkanmış akış hattının başka bir art akımla beslenmesi amaçlanmıştır. Ancak, kanallar arası basınç farkı omuz çıkıntıları içinden açılan deliklerden geçen gaz geçişi ile dengelendiği için; omuz çıkıntıları altında gerçekleşen konveksiyon etkilerinin azalacak olması dikkate alınarak tasarım optimize edilmelidir. Bu noktada Wang ve ark. (2018) katot için, bazıları nemlendirilmiş hava taşıyan ve bazıları da ara girişlere sahip kuru hava taşıyan paralel

akış hatlarından meydana gelmiş benzer bir tasarım önermiştir (Y. Wang et al. 2018). Ara girişlerin ana girişten uzaklığı ve girişten beslenen reaktant debisinin performans üzerine etkili olduğu bildirilmiştir. Yan kanal girişinin, ana girişten toplam kanal uzunluğunun % 30'u kadar uzağına konumlandırılması ve yan girişten beslenen toplam hava akış debisinin %70'inin yan girişlerden beslenmesi durumunda performansın belirgin bir şekilde artırıldığı belirlenmiştir.



Şekil 2.5. Damlacık bölen delikli akış alanı (a) (Wang ve ark. 2018'den değiştirilerek alınmıştır) ve revize edilmiş hilal formulu çıkıntılı tip akış alanları (b) (Gao Y., 2012'den değiştirilerek alınmıştır).(US20090214929A1 2012, Y. Wang et al. 2018)

2.3.2 Çıkıntılı tip akış alanı üzerinde kısmi iyileştirmeler

Çıkıntılı tip akış alanının problemleri taraflarından biri, reaktantların akış yolunda daha az dirençle karşılaştığı rotayı takip etmesi nedeniyle çıkıntılar altındaki konveksiyon etkilerinin zayıflığıdır. Bu durum genellikle membran kurumasına ve konsantrasyon kaybına neden olmaktadır. Geleneksel dairesel veya dikdörtgen kesitlerden farklı yeni fonksiyonel çıkıntı şekli oluşturmaya yönelik yeni bir tasarım stratejisi önerilmiştir. Yong Gao'nun icadı, çıkıntılı tip akış alanının revize edilmiş bir şeklidir (US20090214929A1 2012). Akış alanı, ana plakanın yüzeyi, GDT tabakası ve bir tarafı hilal diğer tarafı dışbükey bir forma sahip çıkıntılarının yüzeylerinin sınırlandırdığı hacimden meydana gelmiştir. Çıkıntılarının şekli slot formunda çıkıntının bükülmüş halini anımsatmaktadır.

Çıkıntıların dışbükey yüzü akışı karşıladıktan sonra iki zıt yöne ayrılmasını sağlar ve reaktantların çıkıntılar altında GDT katmanına akmaya zorlarken; çıkıntılar arasındaki boşluklar reaktant gazların daha geniş bir yüzey alanına yayılmasını sağlar. Şekil 2.5b'de görülen kesik çizgi ile işaretlenmiş alanlar, membran kurumasını önlemek için yerel olarak su birikiminin sağlandığı alanlardır. Çıkıntı tipi akış alanı geometrisi, yüksek akışkan hızlarında çıkıntılar arkasında akışın girdaba girdiği alanlar oluşmasına meyilli bir tasarımdır. Buluşun akışı karşılayan konkav çıkıntı yüzeyi reaktantların aktif bir şekilde yüzeye dağılımını sağlarken akış yönünün tersi tarafta kalan hilal formulu içbükey yüzey membran nemlendirmesi için gereken su buharının tutulmasını sağlayacaktır. Çıkıntı yüzeylerinin keskin köşe ve dönüşler yerine konveks ve konkav formulu eğri forma sahip olması akış yönünde konsantrasyon ve basınç düşüşlerinin büyümemesini sağlamaktadır. Tasarım, Şekil 2.5b'de görüldüğü Gao Y. (2012) tarafından farklı çıkıntı şekilleri türetilmiştir (US20090214929A1 2012). Önerilen tasarım tanımlanan faydalarına rağmen hala yüksek akış hızlarında konsantrasyon kaybı ve ihtiyaç fazlası su birikmesine yol açabilecek aşırı girdap bölgeleri oluşturmaya müsaittir. Diğer taraftan tasarım, karşı BPP nin hizalanmasında yaşanacak aksaklık durumunda veya aşırı sıkma kuvveti uygulandığında membranda deformasyona yol açabilecek bir yapıya sahiptir. Gözenekli malzemeler, su yönetimi ve homojen reaktant dağılımı ile ilgili olarak çıkıntılı tip akış alanından kaynaklanan olumsuzlukların etkisini azaltmak için kullanılabilir. Gözenekli ara parçaların çıkıntılar arasındaki boşluklara entegrasyonunun, çıkıntılı tip akış alanlarının tepe güç çıkışını arttırdığı gözlenmektedir. % 60 ile % 90 arasında değişen farklı gözeneklilik oranına sahip gözenekli ara parçalar yerleştirilmesinin, yakıt pili tepe güç çıkışını tek kanallı serpantin akış alanına göre % 9.5-10.5'ten fazla arttırdığı gözlemlenmiştir. Yakıt pili performansı, çıkıntılarının sıralanma şekli ve gözenekli ara eklentilerinin gözeneklilik değerleriyle değişme eğilimindedir (P. Karthikeyan et al. 2015). Gözenekli ara parçaların, konsantrasyon kaybına yol açan girdaplı reaktant akış bölgesi oluşumunu ortadan kaldırdığı ve bu sayede genel pil performansını artırdığı tahmin edilmektedir. Ek olarak gözenekli ara parçaların; akış dirençleri olarak çalışıp reaktantların yüzey üzerinde homojen bir şekilde dağılmasını sağladığı düşünülmektedir. Atyapi ve ark. (2019), reaktant konsantrasyonu, hızı ve basıncı gibi değişkenlerin homojen dağılımı yanında girişten çıkışa kadar düşük basınç kaybı sağlamak için; sıralı yada saptırmalı dizilime sahip bal peteği formunda çıkıntılardan oluşan yeni bir çıkıntılı

tip katot akış alanı önermiştir (Atyabi ve Afshari 2019). Yeni tasarımın sayısal değerlendirmesi sonucunda, bal peteği biçimli çıkıntılı tip akış alanının, çok geçişli serpantin akış alanları gibi değişkenlerin homojen dağılımını mümkün kılarken; paralel akış alanları gibi daha az basınç kaybı gerçekleştirdiği rapor edilmiştir.

2.3.3 Serpantin akış alanı üzerinde kısmi iyileştirmeler

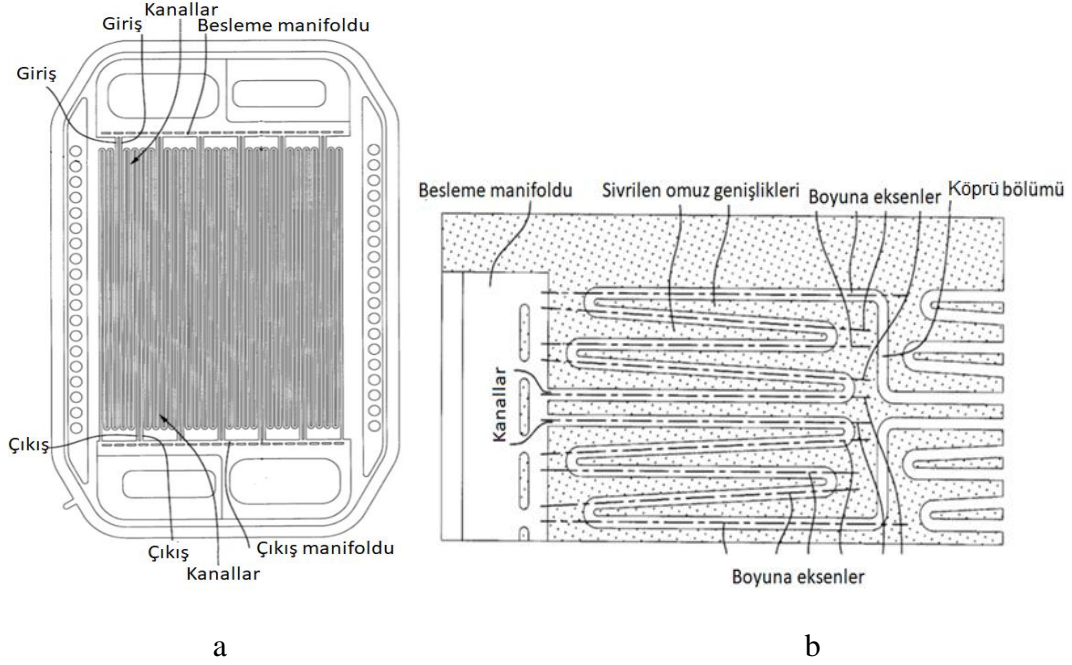
Çok uzun akış uzunlukları, reaktant gazların yol boyunca tüketiliyor olması, akış yolundaki birçok dönüş bulunması gibi nedenlerden dolayı ortaya çıkan basınç kaybı; serpantin akış alanlarında ortaya çıkan performans kaybının temel nedenleri olarak görülmektedir. Reaktantların yol boyunca basınç kaybına uğraması, kanal içindeki sıvı haldeki suyun pil dışına sürülmesinde yetersizlikler doğurmakla beraber; girişle çıkış arasında aşırı reaktant basınç farkı oluşmasına neden olmaktadır. Farklı basınç bölgeleri oluşması, doğrudan reaktant kısmi basıncı ile ilişkili olan reaksiyon hızının bölgeler arasında farklı olmasına neden olmakta ve ısı yönetim problemlerine yol açmaktadır. Serpantin akış alanlarında kanal genişliği, derinliği, kanallar arasındaki mesafe, serpantin kanallarının sayısı ve dönüş sayısı gibi parametreler paralel serpantin akış alanı tasarımları yapılırken dikkate alınan en etkili parametreler olarak görülmektedir (Ghanbarian et al. 2018). Paralel serpantin akış alanında kanal genişliği ve omuz genişliği oranının düşürülmesinin; paralel akış alanı gibi konvansiyonel akış alanlarında uygulandığına nazaran daha etkili bir performans artışı sağladığı görülmüştür (Kerkoub et al. 2018). Bu nedenle, kanal genişliği- omuz genişliği oranının değiştirilmesi, serpantin akış alanları için kısmi iyileştirme metodu olarak uygulanmıştır. Kısmi iyileştirmelerden bir diğeri, kanal derinliğinin girişten çıkışa doğru azaltılması şeklinde tarif edilen daralan-genişleyen akış alanı tasarımı ilk ortaya çıkanlardan biridir. Reaktant basıncını kanal uzunluğu boyunca stabil tutulması ve oluşan sıvı suyun kanal dışına etkili bir biçimde taşınmasını sağlayan tasarım pil performansı ve su yönetimi açısından belli bir kanal derinliğine kadar olumlu sonuç vermektedir. Aynı tasarım stratejisi ile Chowdhury ve Akansu (2017) tarafından araştırılan yeni tasarımda, daralan-genişleyen akış alanı sayesinde akış uzunluğu boyunca tüketilmesine rağmen reaktantların kısmi basınçlarının korunduğu ve hızlanan reaktant akışı sağlanarak daha iyi su transferi elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak toplam pil performansında % 19-27'ye kadar iyileşme sağladığı bildirilmiştir (Chowdhury ve Akansu 2017). Benzer şekilde Chowdhury ve

Timurkutluk (2018), daralan-genişleyen kanal derinliklerinin hücre performansı açısından etkisini; su yönetimi ve farklı katmanlardaki reaktant konsantrasyonlarını da dikkate alarak araştırmışlardır (Chowdhury ve Timurkutluk 2018). Çalışmanın sonucu, azalan kanal derinliğine sahip bir serpantin akış alanı; çıkışa yakın bölgelerde reaktant konsantrasyonu azalmasını telafi ederek daha yüksek fazlalık su deşarj kapasitesi sağlamak ve daha yüksek bir pil performansı sunmaktadır. Reaktantların kimyasal olarak aktif düzleme dik olarak akma eğilimi, yüksek kanal basıncı ile artmaktadır. Bu arada, reaksiyon sonucu KT yüzeyi üzerinde üretilen su deşarjının, GDT yüzey düzleminden kanala doğru yönlendirilmiş bir reaktant akışıyla uzaklaştırılması sağlanmalıdır. Bu prosesin devamlılığı için KT'a reaktant geçişini engelleyebilecek gözenekli GDT içinde bulunan suyun aynı zamanda kanala itilmesini sağlayacak kanal yönünde bir akış da sağlanmalıdır. Bitişik akış kanalları arasındaki basınç farkından kaynaklanan omuz altı konveksiyon, reaktif alan düzlemine dik doğrultudaki hem iç hem de dış yönlü hız bileşenlerine sahip olan gerekli reaktant akış hareketini içermektedir. Buna karşın omuz altı konveksiyonun, bitişik akış kanallar arasındaki belirli bir basınç farkı değerine kadar pil performansına katkıda bulunduğu Chen ve ark (2017) tarafından bildirilmiştir (S. Chen et al. 2017). Çalışma kapsamında yapılan deneylere göre optimum basınç farkı, kanal-omuz genişliği oranı, kanal derinliği-genişlik oranı ve GDT'nin gözenekliliğine bağlı olarak hesaplanması gerektiği bildirilmiştir. Özellikle serpantin akış alanlarında bitişik akış kanalları arasındaki basınç farkı çok uzun akış boylarında şiddetli hale gelebilir ve plaka boyunca kanallar tarafından yapılan dönüşlerle konsantrasyon ve basınç kayıpları oluşarak toplam hücre performansı düşmektedir. Bu nedenle, yakıt pili performansını ve pilin su yönetimi kapasitesini arttırmak için bitişik kanallardan omuz altı konveksiyon ve kısa devre akımların kontrol altına alınması, amaçlanmaktadır. Bitişik kanallar arasında aşırı omuz altı konveksiyon ve kısa devre akımlarını engellemek için kanallardaki basınç kayıplarını azaltmak; ortaya çıkan ilk stratejilerden biridir. Bahsi geçen stratejiden hareketle, Wu ve ark. (2018) ve Velisala ve Srinivasulu (2018) yaptıkları çalışmalarda aşırı basınç düşüşünü ortadan kaldırmak için çok geçişli paralel serpantin kanalları önermişlerdir. Ancak çalışmada artan kanal sayısı ile gaz hızının azaldığı ve kanalların içinde daha yoğun su birikimi gözlenmiştir (Velisala ve Srinivasulu 2018, Wu et al. 2018). Tek geçişli serpantin akış alanı daha yüksek pil performansı sunarken çok geçişli serpantin akış alanlarına göre daha fazla basınç kaybına yol açarak

parazit pompalama gücü tüketimine doğurmaktadır. Çalışmanın sonucunda, tekli serpantin akış alanının küçük aktif alana sahip PEM yakıt pilleri için daha uygun olduğu tespit edilirken; çok kanallı serpantin akış alanlarının, daha az basınç kaybına yol açmaları nedeni ile, daha büyük aktif alana sahip PEM yakıt pilleri için uygun olduğu belirtilmiştir. Karthikeyan ve ark. (2019), çok kanallı serpantin akış alanlarında sık görülen sıvı su birikmesinin etkilerini bertaraf etmek için; omuzlar içine hizalı yada saptırılmış şekilde yerleştirilmiş gözenekli ara parçalarla sıvı haldeki suyun göçüşümünü sağlayacak bir revizyon önermiştir (M. Karthikeyan et al. 2019). Hizalanmış dizinin su yönetimi açısından daha iyi performans sağladığı belirlenmiştir. Öte yandan, gözenekli karbon ara parçaların hidrofobik olmaları nedeni ile metal süngere göre fazla suyun deşarjını daha etkili gerçekleştirmesi gibi, gözenekli malzemenin su taşıma kabiliyeti üzerinde etkili olduğu bildirilmektedir.

Akış uzunluğunun tasarımıyla kısaltılması yaklaşımı Rock ve ark. (1998) tarafından ele alınmıştır. Çalışmada aynı giriş manifoldundan başlayan ve aynı çıkış manifoldunda son bulan, plaka ortasından geçen eksene göre birbirine aynalanmış bir şekilde yerleştirilen birbirinden ayrı serpantin kanal gruplarından oluşan bir akış alanı önerilmiştir (US6099984A 1998). Detaylı olarak Şekil 2.6 a'da görülen bu patentli tasarımın temel amacı, uzun kanallar yerine daha küçük serpantin akış bölümleri oluşturarak girişten çıkışa basınç kaybını en aza indirecek şekilde daha kısa kanallar kullanarak; reaktant konsantrasyonunu tüm akış uzunluğu boyunca stabil tutmaktır. Tasarım, her bir serpantin grubu için ele alındığında önerdiği amaç doğrultusunda performans gösterme potansiyeline sahipken; kanal gruplarını besleyen giriş manifoldunda yaşanabilecek herhangi bir basınç dengesizliği halinde reaktant basınçları her bir serpantin sıra grubu arasında çok fark gösterebilir. Bazı durumlarda tek serpantin akış yolunu daha kısa uzunluklarda daha küçük serpantin akış alanlarına bölmek, dönüş sayısını artırarak kanallar arasındaki basınç farkını yükselteceği için; kanallar arasındaki kısa devre gaz akımlarını sınırlamak için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, Griffith ve Rock (2002) tarafından kanalların birbirine yaklaşmış birbirinden uzaklaşacak şekilde bir düzene sahip olduğu ve geleneksel serpantin akış düzeninden farklı olarak kanalların birbirine paralel olmadığı bir akış alanı önerilmiştir (Griffith ve Rock 2002). Yeni tasarımda kanallar, Şekil 2.6b'de görüldüğü gibi dönüşten sonra birbirinden uzaklaşarak kısa devre akımlarını ve

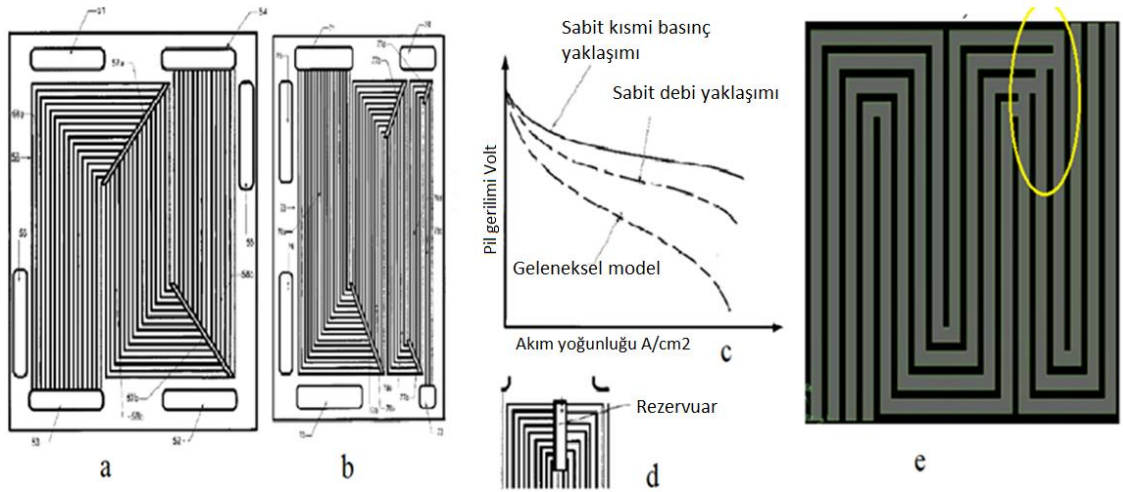
aşırı omuz altı konveksiyonu engelleyecek şekilde daha geniş bir omuz genişliği sunmaktadır. Bununla birlikte, tasarımda dönüş sayısının artırılmasından kaçınılmalıdır.



Şekil 2.6. Simetrik serpantin akış alanı (a) ve yakınlaşıp uzaklaşan kanallı serpantin akış alanı (b) (Rock J.A., 1998 ve Karthikeyan M. Ve Rock J.A., 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

Kanal uzunluklarının farklı olmasından kaynaklanan kanallar arası aşırı basınç farkı ve konsantrasyon farkının etkilerini azaltmak için kanallar arası basınç dengesini sağlamak amacıyla iki strateji geliştirilmiştir. Stratejinin temel yapısı kanallar arasında geçiş noktaları oluşturmak yada kanalları belli aralıklarla toplayıp sonra tekrar kanallara dağıtmak şeklinde açıklanabilir. Bu strateji doğrultusunda Bai ve ark. (2004) tarafından geliştirilen yeni nesil bir grup akış alanı Şekil 2.7 a ve b de görüldüğü gibi; kanallardaki reaktantların BPP üzerine açılmış ara rezervuarda toplandıktan sonra yeniden kanallara dağıtıldığı konvansiyonel çok geçişli serpantin akış alanı şeklindedir. Önerilen yeni tasarımlar kanal boyunca sabit debi ve sabit kısmi basınç sağlamak üzere iki farklı amaç doğrultusunda geliştirilmiştir (US7524575B2 2004). Sabit debi yaklaşımı için yapılan tasarımda, kanal sayısı rezervardan önce ve sonra eşittir. Sabit kısmi basınç sağlama yaklaşımında ise rezervuar çıkışındaki kanal sayısı girişteki kanal sayısından daha azdır. Sabit debi yaklaşımı ile geliştirilen tasarım, kanallar arası kısa devre akışına

neden olan, bitişik kanallar arasındaki aşırı basınç farkını ortadan kaldırırken, ikinci tasarım kanal sayısının da azalıyor olması sayesinde pil içinde tüketime bağlı olarak gazlar tüketiliyor olmasına rağmen; daha küçük bir hacimde akmaya zorlandıkları için kısmi basınçlarını korumaktadırlar. Kısmi basınçların korunduğu ikinci tasarımın kanal içindeki suyun daha etkili bir şekilde tahliye edildiği düşünülmektedir. Tasarımların her ikisinin de konvansiyonel çok geçişli serpantin akış alanına göre Şekil 2.7c'de görüleceği gibi daha iyi performans sergiledikleri görülmüştür. Buna karşın sabit kısmi basınç yaklaşımı ile geliştirilen akış alanına sahip pilin; sabit debi yaklaşımına göre geliştirilenden daha yüksek güç çıkışı sağladığı görülmüştür. Rezervuarı, Şekil 2.7d'de görüldüğü gibi iki dönüş arasında bulunan düzlükte konumlandırılması şeklinde akış alanı üzerinde farklı konumlara yerleştirilmiş halde görmek mümkündür. Önerilen iki tasarımda kanal içinde reaktantlarla birlikte hareket ederken kanalın daha geniş olan rezervuara açılmasıyla hızını kaybederek rezervuar içinde birikme potansiyeli bulunmaktadır. Biriken suyun yer çekimi etkileri ile bazı kanallarda daha çok yoğunlaşması diğer bir potansiyel tehlikedir. Benzer şekilde Rahimi-Esbo ve ark. (2016), Şekil 2.7e'de görüldüğü gibi, rezervuarının şekli düzenli bir geometrik formda olmayan yine kanalların bir araya toplanıp dağıtıldığı çok geçişli akış alanlarının performanslarını Ansys Fluent CFD aracılığıyla incelemişlerdir (Rahimi-Esbo et al. 2016). Sonuçlar, kanal sayısının 2'den 1'e düştüğü model için en iyi performans artışının sağlandığını ve performans artışının 0,5 V'un altındaki gerilimlerde gözlemlendiğini göstermiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi, kanal sayısı değişikliğinin bir optimizasyon problemi olarak araştırılması önem arz etmektedir.



Şekil 2.7. Sabit debi (a) ve sabit basınç (b) yaklaşımına göre ara rezervuarlı pil tasarımları ve performans eğrileri (c). İki dönüş arasında yerleştirilmiş rezervuar görünümü (d) ve düzensiz şekilli ara rezervuarlı tasarım (e). (Bai D., 2004 ve Esbo R., 2016'den değiştirilerek alınmıştır)

PEM yakıt pillerinde GDT tabakası içindeki su birikimi omuz çıkıntılarının altındaki bölgede daha yoğun bir şekilde görülmektedir. Bu noktadan hareketle omuz altında biriken aşırı suyun kanal içine alınarak tahliye edilmesi stratejisi ortaya çıkmıştır. Choi ve ark. (2012), kanallar arasındaki aşırı basınç farkını düzenlemenin yanında omuz çıkıntısı altında oluşan suyun bulunduğu yerden çekilmesini sağlamak için; ana akış kanallarına paralel olarak omuz yüzeylerine akış kanallarından daha küçük kesite sahip olacak şekilde oyulmuş yardımcı kanallara sahip yeni bir tasarım önermiştir (Choi et al. 2012). Yeni tasarımda yardımcı kanallardan toplanan suyun ana kanallara geçmesini ve ana kanallarla tahliye edilmesini sağlamak için; omuz çıkıntısı içine yardımcı kanala dik doğrultuda oyulmuş, ana kanalla yardımcı kanalı birbirine bağlayan ikincil yardımcı kanallar bulunmaktadır. Her iki modelin sayısal analiz sonuçlarına göre yeni tasarımın geleneksel serpantin akış alanına göre yaklaşık% 23,74 oranında daha yüksek performans göstereceği tahmin edilmektedir. Buna karşın omuz çıkıntısı içine açılan birincil ve ikincil yardımcı kanallar, omuz temas yüzeyinin daraltması nedeni ile membran elektrot bileşenleri üzerinde sıkma torku ile birlikte dengesiz gerilmeler oluşmasına ve bu bileşenlerin zarar görmesine neden olma potansiyeline sahiptir. Öte yandan omuz temas yüzeyinin daraltması nedeni ile GDT bölgesindeki aşırı gözeneklilik kaybı omuz altı konveksiyon etkilerini kırsarak ve akım toplama yüzeyi olan omuz kesitinin azalmasına bağlı olarak toplam pil performansında kayıplara yol açma potansiyeline sahiptir.

Tasarımda ikincil yardımcı kanallarının sayısı ve kesiti, çalışma koşullarına ve performans beklentilerine göre optimize edilmelidir. Çok geçişli bir metalik serpantin akış alanında omuz bölgesinde su birikimini ortadan kaldırmak için Baik ve Seo (2018) tarafından yeni bir revizyon önerilmiştir (Baik ve Seo 2018). Yeni tasarımın daha düşük yüksek frekans direnci ve daha yüksek akım yoğunluğunun yanında daha az basınç düşüşünü sağladığı görülmüştür. Akış kanallarının kanal taban yüzeyi, daha az basınç kaybına sahip bir akış rejimi için geleneksel akış alanı tasarımlarının birçoğunda pürüzsüz ve düz olarak tasarlanmıştır. Bunla birlikte, yeni tasarımda serpantin kanallarda kanal tabanı dalgalı formda tasarlanmak suretiyle, kanal içinde akış yerel olarak küçük vortekslere sokularak GDT tabakasında zorlanmış konveksiyonun artırılması ve böylece yakıt pili performansının artırılması amaçlanmıştır. Li ve ark. (2017) kanal tabanında kenarlarının eğim açıları 15, 30 ve 45 derece olan dalga formuna sahip serpantin akış alanını incelemiştir (W. Li et al. 2017). En iyi performans, dalga eğim açısının 30 derece olduğu dalgalı kanal modelinde gözlenmiştir. Dalgalı tasarımın, özellikle aktif alandaki reaktant konsantrasyonunu iyileştirerek genel performansı arttırdığı bildirilse de; model kanal içi su akıntısı koşulları altında düşük sitokiyometrilere için araştırılmalıdır.

2.4 Biyo Benzeşimli Akış Alanı Kalıpları

Biyo benzeşimli akış alanları, yaprak kanalı ve akciğer bronş sistemi gibi madde taşıma özellikleri bakımından üstün olan biyolojik dolaşım yapılarından esinlenerek üretilen akış alanı düzenleridir. Biyolojik dağılım yapıları mühendislik sistemlere uygulanırken benzeşim sınırlarının net bir şekilde anlaşılması ve benzeşimin yalın bir şekilde uygulanabilmesi için bazı teoriler kullanılır. Murray yasası, PEM yakıt pili akış alanında özellikle yaprak damar örüntüsünü taklit ederken, yaprak damarı çatallanmalarındaki ana ve alt kanal çevresi arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak sergileyen en yaygın kullanıma sahip teoridir. Denklemi eşitlik 2.2'de verilen teoriye göre iki alt kanala bağlanan ana kanalın çevresi c_0 olarak adlandırılırken; c_1 alt kanallardan birincisinin çevre uzunluğunu temsil etmekte olup c_2 ikinci alt kanalın çevre uzunluğunu temsil etmektedir.

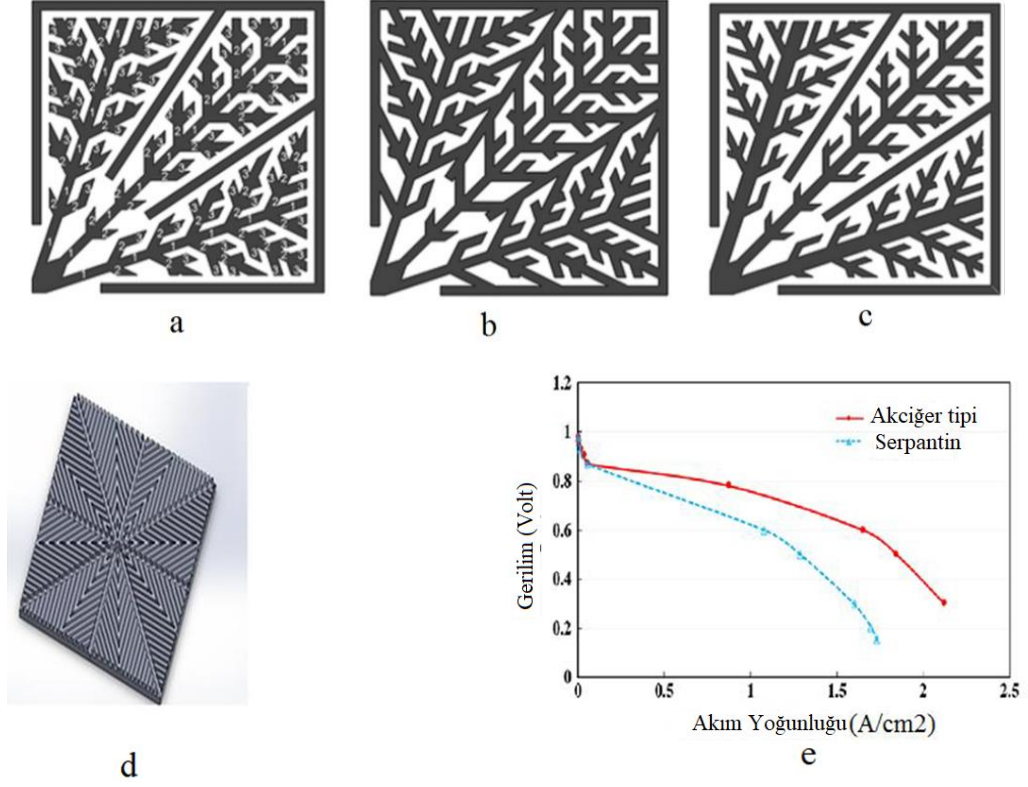
$$c_0^{2,49} = c_1^{2,49} + c_2^{2,49} \quad (2.2)$$

Yaprak damarı çatallanma kalıbı, biyo benzeşimli akış alanı tasarımı için Murray yasası ile birleştirilerek başvuru en yaygın biyolojik yapılardır. Ruan ve ark. (2016), tarafından önerilen tasarımda olduğu gibi girişe bağlanan kanallarının kesiti giriş manifoldundan çıkış manifolduna yakınlaştırırken Murray yasasına göre daralırken çıkış kanallarının kesitleri aynı şekilde artmaktadır (Ruan et al. 2016). Yeni tasarım paralel ve serpantin akış alanlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda biyo benzeşimli akış alanında toplam pil performansının yaklaşık % 30 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Performans artışının özellikle konsantrasyon kaybının baskın hale gelmeye başladığı ve maksimum güç değerinin alındığı akım değeri yakınlığındaki yüksek akım yoğunluğunda çalışma bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir.

Guo ve ark (2014) tarafından Murray yasası kullanılarak yaprak damarından referans alınarak önerilen üç tip biyo benzeşimli akış alanı mimarisinin pil performansı üzerine etkileri deneysel ve sayısal olarak yapılan bir çalışma ile özetlenmiştir. Önerilen tasarımlarda, hazırlanan kanal konumlandırma şekli ve kanal geometrileri, yaprak damarları ile en benzer formda olanlardır. İlk tasarım şekli, sabit kanal genişliğine sahip iç içe geçişli akış alanı benzeri bir mimariye sahipken (Şekil 2.8a) ikincisi ise iç içe geçişli tipte olmayan, yani kanalların hem giriş hem de çıkış manifolduna doğrudan bağlı olduğu akış alanı modelidir (Şekil 2.8a). Şekil 2.8c'de görülen üçüncü tasarım, Murray yasası uygulanmış olan iç içe geçişli tip akış alanı mimarisine sahiptir. Üç yeni biyo benzeşimli tasarım, özellikle konsantrasyon kayıplarının şiddetlendiği daha yüksek akım yoğunluk bölgesinde; birbirine seri bağlı paralel akış alanlarına hem de konvansiyonel iç içe geçişli akış alanına göre % 20-25 arasında daha iyi performans göstermiştir. Üç yeni akış alanına sahip pillerden en iyi performans Murray yasası uygulanmış olan iç içe geçişli tip biyo benzeşimli modelde elde edilirken; ikinci en iyi performans sabit kanal genişliğine sahip iç içe geçişli tip biyo benzeşimli akış alanında görülmüştür. En düşük performans artışı ise sabit kanal genişliğine sahip iç içe geçişli tipte olmayan akış alanında gözlenmiştir. İç içe geçişli tip akış alanı tasarımlarında omuz altı konveksiyon etkileri daha yoğun olduğu için reaktantların GDT tabakasına daha etkin bir şekilde nüfuz etmesi sağlanmış ve performans artışı görülmüştür. Ayrıca kanal kesitlerinin Murray yasası ile belirlendiğinde tüketime bağlı reaktant azalmasına rağmen kanal için kısmi reaktant basıncı korunarak elde edilen performans artışı kuvvetlenmiştir (Guo et al. 2014).

Kang ve ark. (2019) Ginkgo ve Dicotyledonous bitkilerine ait yaprak damarlarını referans olarak iki yeni biyo benzeşimli akış alanı önermiştir (Kang et al. 2019). Modellerin performansları çok geçişli serpantin ve paralel akış alanı karşılaştırılarak araştırılmıştır. Ginkgo yaprak damar tasarımı en yüksek performansı gösterirken, güç yoğunluğu çoklu serpantinden % 7 daha düşük olup; buna karşın reaktant gaz dolaşımı için ihtiyaç duyduğu pompalama enerjisi ihtiyacı serpantin akış alanının sadece % 3'ü kadardır. Ginkgo bitkisi yaprak damar tasarımına sahip akış alanının su tahliye etme kapasitesinin, paralel akış alanından daha yüksek, ancak çoklu serpantin akış alanından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dikotiledon bitkisi yaprak damar tasarımına sahip akış alanının en kötü su deşarj kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Dallanma sayısının artması ile birlikte kanal kesitinin daralması, geleneksel akış alanlarına sahip yakıt hücrelerinde olduğu gibi biyo kaynaklı akış modellerinde de pil performansına katkıda bulunmaktadır (T. Chen et al. 2012). Öte yandan, akış uzunluğu boyunca zaten basınç kaybının az olduğu paralel akış alanı gibi geleneksel akış alanlarına dallanmalar eklenmesinin, basınç kaybını azaltmakta önemli bir katkı sağlamayacaktır. Sonuç olarak kanallara dallanma ilavesinin aktif yüzey üzerinde daha etkili reaktant dağılımı sağlamaya daha uygun bir yaklaşım olduğu tespit edilmiştir (Pablo Martin Belchor et al. 2015).



Şekil 2.8. Sabit kanal genişliği ile iç içe geçişli tip (a), sabit kanal genişliği ile standart tip (b) ve Murray yasası uygulanmış iç içe geçişli tip (c) biyo benzeşimli akış alanı. Akciğer tipi akış alanının üç boyutlu modeli (d) ve akım gerilim eğrileri (e) (Guo N. Ve ark., 2014 ve Asadzade M. ve Shamloo A., 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Geleneksel akış alanlarında membran yüzey alanından kolay bir şekilde istifade edilebilmesi ve tasarım yığın haline getirilirken, plakanın zarar görmesi de dahil teknik bir problemle karşılaşılması için; giriş ve çıkış manifoldları, BPP'nin kenarlarına yakın köşegen bir şekilde yerleştirilmektedir. Bununla birlikte, kanalları daha az dönüşe sahip yüksek performanslı bir pil için Asadzade M. ve Shamloo A. (2017) tarafından önerilen biyo benzeşimli akış alanı modelinde belirtilen yaygın kullanımın dışına çıktığı görülmüştür. Önerilen biyo benzeşimli tasarımın çıkış noktası insan akciğeri olup; giriş manifoldu Şekil 2.8d 'de görüldüğü gibi plaka ortasına yerleştirilmiş olup amaç reaktantların daha küçük bir basınç kaybı ile yüzeye dağıtılmasını sağlamaktır. İnsan akciğerinden esinlenerek oluşturulan biyo benzeşimli akış alanında reaktantlar, plaka merkezinden kenarlara uzanan sekiz ana kanal ve ana kanallarla aynı kesite sahip ve ana kanala 135° açısal sapma ile bağlanan ikincil kanallarla dağıtılmaktadır. Akciğer benzeşimli akış alanının, Şekil 2.8e'de verilen I-V eğrisinden görüldüğü gibi seri olarak birbirine bağlı paralel kanallarla oluşturulan serpantin akış alanından daha yüksek

performans gösterdiği rapor edilmiştir (Asadzade ve Shamloo 2017). Çoğu yeni akış tasarımının performans üzerine olan etkileri, özellikle konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu 0,3 volt altındaki pil potansiyelinde gözlenirken; akciğerden esinlenilerek elde edilen biyo benzeşimli akış alanının pil performansı, omik kayıpların baskın olduğu 0,8 ile 0,4 volt arasında da daha yüksektir. Çalışmada rapor edilmemiş olsa da; omik kayıp bölgesindeki performans artışının, yeni tasarımın daha iyi bir su yönetimi sağlayarak membranın su içeriğini ve proton iletkenliğini olumlu etkilemesiyle açıklanabilir. Önerilen akciğer şekilli akış alanının, belli miktarda güç elde edebilmek için seri halde birbirine bağlı çok sayıda hücre yığından meydana gelmesi gereken PEM sistemlerine uygulanabilmesi mümkün görünmemektedir. Membran yüzeyinin aktif kullanımını engelleme ve sızdırmazlık sorunlarına neden olama potansiyeli bulunduğu için; orta noktadan giriş yaklaşımı yığın halinde kullanım açısından detaylı bir şekilde ele alınmalıdır.

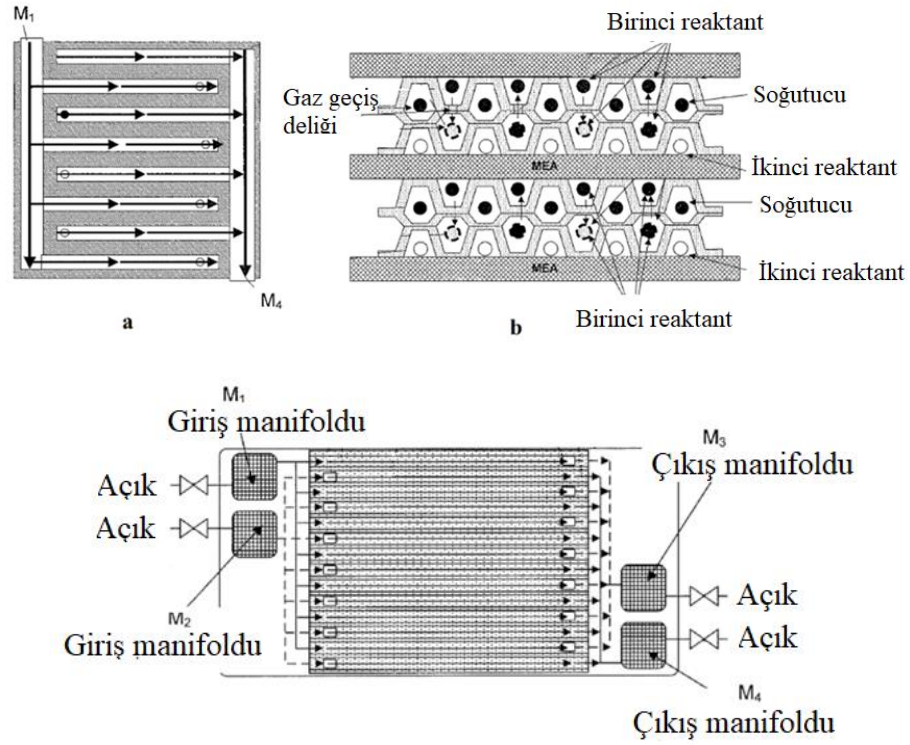
Bir yakıt pilinde reaktantların kimyasal olarak aktif katmanında verimsiz dağıtımı, su ve ısı yönetimini de etkileyen en belirleyici performans parametrelerinden biridir. Özellikle uzun akış yolu ve çoklu düz kanallar içinde paralel akış durumunda, aktif yüzey boyunca reaktantların dengesiz dağılımı daha belirgin hale gelerek performans kaybına yol açmaktadır. Bu noktada Wang ve ark. (2010), daha az basınç kaybıyla daha homojen reaktant dağılımı elde etmek için; vasküler akış ağlarından esinlenerek iki yeni akış alanı önermiştir (C.-T. Wang et al. 2010). Sonuç olarak yeni tasarımlarla basınç kaybı geleneksel bir serpantin akış alanınıninkinin yaklaşık % 14.8 üne azaltılırken, güç kazancı geleneksel bir paralel akış alanının % 57'sine kadar arttırılmıştır. Önerilen tasarımın önemli bir performans kazancı sağladığı bildirilmiş olsa da, giriş ve çıkış arasındaki reaktant konsantrasyonu farkının yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca, reaktantların akış hızının aşırı düşmesi su birikmesine neden olabileceğinden, tasarım performansının sıvı su yönetimi kapsamında ele alınması daha önemlidir.

Biyo benzeşimli kanal tasarımlarında dallanma açısını veya kanal kesitini belirlemede Murray yasasının kullanımı oldukça yaygındır. Hui ve ark. (2017) tarafından daha iyi reaktant ve nem dağılımı için yeni bir kesişen tipte akış alanı önerilmiştir. Murray yasası kanalların birbiri ile kesiştiği noktada kanalların birbirine göre açılarının belirlenmesinde kullanılmıştır (Dong-Hui et al. 2017). Kesişen akış alanının, tekli serpantin akış alanına

göre daha üniform akım dağılımı ve su yönetimi sağlayarak daha yüksek pil performansı sunduğu rapor edilmiştir. Buna karşın önerilen akış alanı mimarisi, kanal akıntısı açısından özellikle kanal kesişim noktasının sıvı su birikmesi nedeni ile tıkanması koşullarında ve daha büyük bir aktif alana sahip pil içinde sınanması önem arz etmektedir.

2.5 Gelişmiş Akış Alanı Tasarımları

Gelişmiş akış alanı tasarımı, ilave bileşenlere sahip olan veya farklı akış rejimlerinin özelliklerini aynı anda barındıran veya konvansiyonel akış alanlarının sahip olduğu zayıflıkları ortadan kaldırmak için özel bir amaca yönelik yapısal ayrıntıya sahip akış alanları olarak karakterize edilebilir. 2008 yılının başında, iki farklı akış alanını tek bir plakada barındıran ve ihtiyaç halinde birinden diğerine geçebilen BPP'ler tasarlamak yeni bir tasarım felsefesi olarak ortaya çıkmıştır. Her akış alanının verimli ve verimsiz çalışma aralıkları farklılık gösterebileceği için; çok fonksiyonlu BPP'ler mevcut çalışma koşulları altında daha yüksek performans sergileyecek akış alanları arasında geçiş yaparak, pilin daha geniş bir aralıkta verim kaybına uğramadan işlev görmesi sağlamış olur. Toyota şirketi tarafından reaktant gazların reaksiyon bölgesi boyunca tercihe göre paralel yada iç içe geçişli akış alanı düzeninde dağıtılmasına olanak tanıyan yeni bir BPP geliştirilmiştir (US20100075186A1 2008). Şekil 2.9'da görülebileceği gibi, plastik şekil verme yöntemleri ile şekillendirilmiş saç plakalarla üç farklı katman halinde kanal sıralarından meydana gelen bir akış alanı mevcuttur. Katmanlardan biri Şekil 2.9a'da görüldüğü gibi GDT tabakası ile doğrudan temas halinde olup bu katmandaki kanallar başında ve sonundaki delikler ile orta katmandaki kanallara bağlanmaktadır. Orta katmandaki kanallar, Şekil 2.9c'de görüldüğü gibi başında ve sonunda plaka dışındaki birer valfe bağlı olup; valflerin açılıp kapanmasına göre iki farklı akış alanı arasında geçiş yapılmasını sağlamaktadır. Paralel akış düzeninde akış sağlanarak pilin özellikle sıfırın altındaki sıcaklık koşullarında hızlı başlaması sağlanmakta olup; iç içe geçişli akış rejimi sayesinde uzun saatler boyunca çalışmak zorunda kalan pilin yüksek sıcaklık etkilerinden zarar görmeden çalışması sağlanır. Yapılan tasarımla görüldüğü gibi her iki akış alanının avantajları aynı plakada birleştirilmiştir.



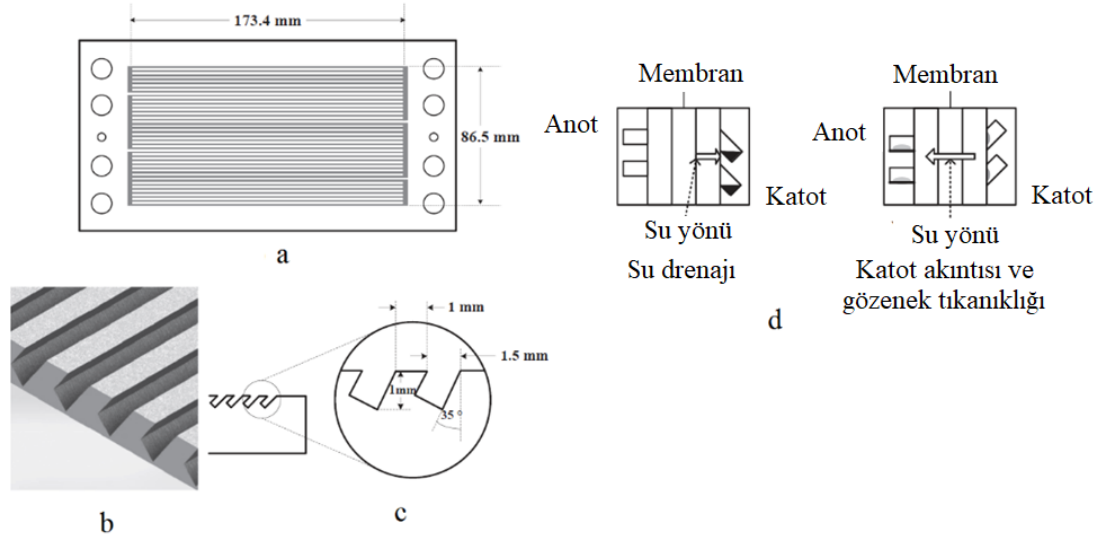
Şekil 2.9. Paralel akış düzeni ile iç içe geçişli tip akış düzeni arasında geçiş yapabilen gelişmiş BPP'nin üst görünüş (a), kesit görünüşü (b) ve valf bağlantı şeması (c) (Amemiya K. 2008'den değiştirilerek alınmıştır.)

Santamaria ve ark. (2013) tarafından Toyota'nın buluşuna benzer şekilde paralel ve iç içe geçişli akış alanları arasında geçiş yaparken ondan farklı özellikler de barındıran yeni bir akış alanı önerilmiştir (Santamaria et al. 2013). Yeni tasarım, özellikle Toyota'nın buluşundan farklı olarak iki akış düzeni arasında kısmen geçiş sağlama özelliğine sahip olmakla beraber üç katmanlı sac levha kullanımı bu tasarımda mevcut değildir. Önerilen yeni tasarım su üretimi ve güç talebinin yüksek olduğu ve omuz altı konveksiyonun gerekli olduğu 0.6 A/cm^2 'nin üzerindeki yüksek akım yoğunluklarında koşullar için geliştirilmiştir. Yeni tasarım geliştirilirken iç içe geçişli tip akış alanında birim pil aktif alanı başına ortaya çıkan 20 mW/cm^2 gibi yüksek basınç kaybı dikkate alınmıştır. Basınç kaybını telafi etmek için yeni tasarımda farklı akış alanları arasında kısmi geçiş yapabilme özelliğine sahip hibrit akış alanı geliştirme üzerinde durulmuştur. Tasarım, giriş ve çıkış manifoldlarına bağlı iki valfin açık veya kapalı konumlarına göre dördü yüksek basınçta ve onların aralarına yerleştirilmiş üç adet düşük basınçta reaktant gaz taşıyan kanallardan oluşmaktadır. Yeni tasarımın en yüksek performans sunduğu durum valflerin yarı açık

olduğu ve böylece akış alanının yarı paralel yarı iç içe geçişli tip akış alanı gibi davrandığı durumda gözlenmiştir (Tong et al. 2013).

Katot tarafında aşırı su akıntısı nedeni ile gaz akışının tıkanması eşit olmayan reaktant dağılımı ve konsantrasyon kayıplarının oluşması paralel akış alanında sık karşılaşılan temel bir problemdir. Bu nedenle, klasik paralel akış alanında Wang ve ark. (2019) tarafından katot tarafında kanal içine belli aralıklarla ikincil girişlerden ek kuru hava beslenmesi yaklaşımı yeni nesil bir iyileştirme olarak önerilmiştir. Ara hava girişinin ana girişten toplam kanal boyunun % 30 uzağında olması ve ara girişten verilen hava kütle akışının toplam hava girişinin % 70'i kadar olduğu durumda pildeki performans artışı konvansiyonel paralel akış alanına göre %13,2 ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır (Y. Wang et al. 2017). Ara giriş portlarının yeri ve kütle akış hızı, yeni tasarım için kritik performans parametreleri olarak belirlenmiştir.

Dikdörtgen kanal kesiti şekli neredeyse tüm akış alanlarında en yaygın kullanılan kanal kesit profilidir. Her ne kadar trapez, üçgen veya yarı dairesel gibi çok sayıda kanal kesit profili performans artışı açısından araştırılsa da, kesit değişimi tasarımı yeni nesil akış alanı olarak nitelenmek için yeterli değildir. Buna karşın Wawdee ve ark. (2015) tarafından önerilen ve şekil 2.10 a, b ve c'de ön, yan ve kesitli perspektif görünüşleri görülen ve bir akış alanından ziyade kesit tasarımı gibi sınıflandırılabilir eğimli akış alanı; yer çekimi etkileri ile birlikte ele alındığında gelişmiş bir akış alanı olarak sınıflandırılabilir (Wawdee et al. 2015).



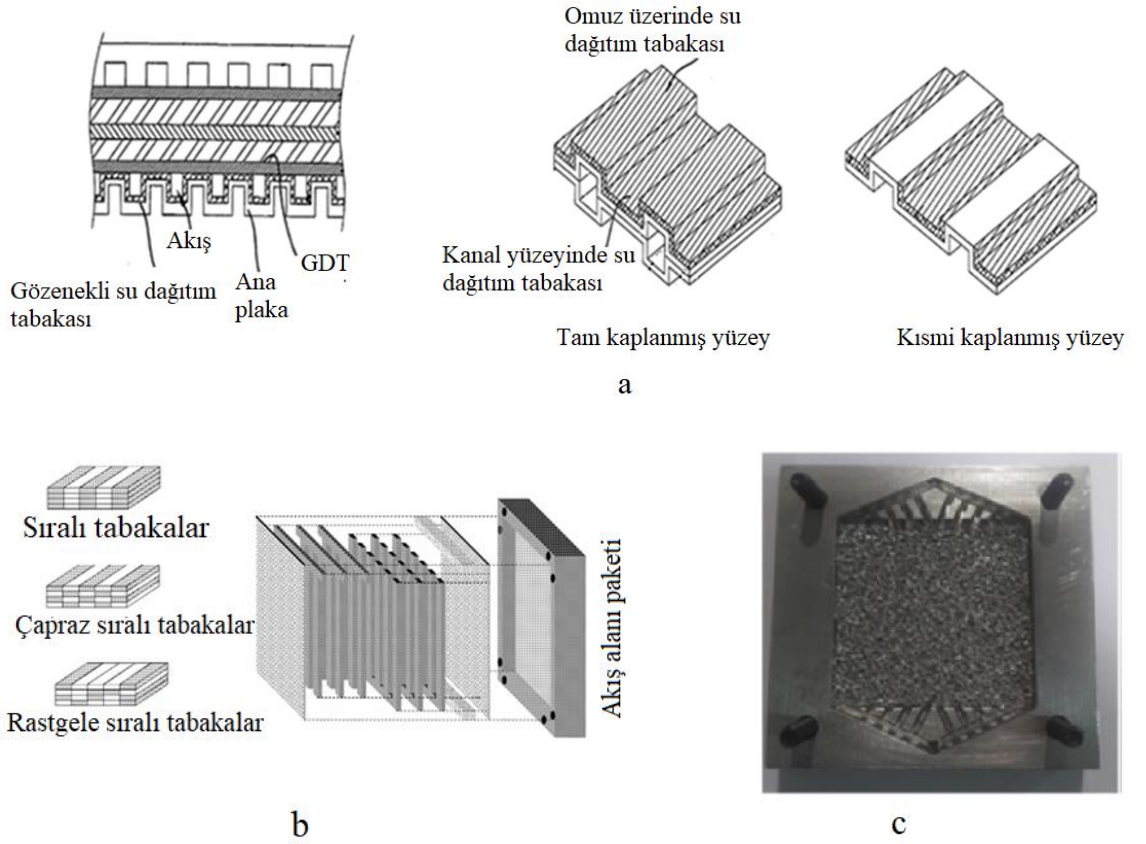
Şekil 2.10. Altı kanallı serpantin akış alanına uygulanmış eğimli tasarımın (a) perspektif görünüşü (b), kesit detay resimleri (c) ve eğim yönüne göre su toplama karakteristikleri (d) (Wawdee P. ve ark, 2015'den değiştirilerek alınmıştır)

Eğimli tasarım sıvı su birikiminin olumsuz etkilerini azaltırken membranı yeterince nemli tutmak için geliştirilmiştir. Eğimli tasarımın etkileri, pilin bir tarafındaki kanal yapısı konvansiyonel dikdörtgen kesitli tutularak bir tarafında eğimli kanal yapısı kullanılmak suretiyle araştırılmıştır. Farklı nemlendirme oranları, dikdörtgen ve eğimli kanalların farklı kombinasyonlarla bir araya getirilmesi ve eğimli plakaların farklı oryantasyonları ile yapılan çok sayıda deney sonucunda su akış yönünün belirlenebileceği anlaşılmıştır. Şekil 2.10 d'de görüleceği gibi pilin anot tarafındaki plakada konvansiyonel dikdörtgen kesitli kanal yapısı ve katot tarafına aşağı yönlü eğimli kanal yapısı kombinasyonu kurulması sonucu, su hareketinin anot tarafından katoda doğru olduğu ve böylece toplanan fazla suyun katottan atılabileceği açıklanmaktadır. Bunun aksine katot tarafı yukarı eğimli bir levha ile değiştirildiğinde, aşırı suyun gözenekli GDT tabakasına doğru akarak membranın nemlendirilmesine katkıda bulunmasına rağmen gözenekli yapıda tıkanmalara yol açacağı görülmüştür. Eğimli kanalın işlevi yerçekimine bağlıdır. Taşıtlar gibi titreşim oranı yüksek dinamik sistemler için eğimli tasarımın performansı, ters yerçekimi yönündeki çeşitli ivme kuvveti altında araştırılmalıdır.

Son zamanlarda büyük ilgi gören üç boyutlu ince gözenekli ağ yapısından oluşan akış alanlarının, mikro düzeyde akış yönlendirmeleri yaparak; geleneksel akış alanlarında kanal içine ek yönlendirici yada blokaj koymaktan daha pratik bir uygulama olduğu

düşünülmektedir. Bu yaklaşıma göre geliştirilmiş bilinen en iyi ticari uygulama, Toyota'nın Mirai araçlarında, hücre yığını boyunda selefine göre % 24 oranında kısalma sağlarken yığın hacmi başına % 36 güç artışı sunan modeldir (Nonobe 2017). Mevcut Toyota Mirai araçlarında katot tarafında üç boyutlu ince bir ağ formunda kullanılan bu akış alanı Kim ve ark. (2017) tarafından hazırlanan üç boyutlu bir model üzerinden araştırılmıştır (Jinyong Kim et al. 2017). Çalışmada reaktantların gözenekli katman içine girmesi için akış direnci oluşturan ve gözenekli tabakalardaki suyun da dışarı alınmasını sağlayan mikro ölçekte ardı ardına sıralanmış çok sayıda yönlendiriciden oluştuğu görülmüştür. Geliştirilen akış alanının kullanıldığı pillerin yüksek akım yoğunluğunda çalıştığı durumda reaktantların gözenekli katmanlar içinde difüzyonunda Forchheimer'in atalet etkisinin baskın olduğu bulunmuştur. Tasarımdaki üç boyutlu yönlendirici formdaki çıkıntı etrafında oluşan ikincil bir akışla gözenekler içindeki suyun tahliye edildiği görülmüştür.

Gözenekli katı malzemeler, daha mobil uygulamalar için daha hafif gaz dağıtım plakaları oluşturmak ve reaktant konveksiyon etkilerinin artırılması için kullanılmakla beraber yığın halindeki pillerde ısı eşanjörü olarak kullanıldıklarında daha yüksek ısı transfer kapasitesi sunmaktadırlar (Awin ve Dukhan 2019, Vazifeshenas et al. 2019). Bu malzemelerin gaz dağıtım kapasitelerinin iyi olması tercih edilmelerinde önemli bir etkiye sahip olsa da; bu malzemelerin, kılcallık etkisinden dolayı, reaktantların kimyasal olarak aktif bölgeye ulaşmasını engelleyecek şekilde gözeneklerinde sıvı suyu tutarak tıkanıklığa yol açma potansiyelleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, gözenekli malzemelerin kılcallık etkileri ile su biriktirme özelliği geçirgen olmayan bipolar plaka art tabakası üzerine kaplanarak bir su yönetim tekniği olarak kullanılmaktadır. Wenbin ve ark. (2005), akış kanallarının üzerine oyulduğu geçirimsiz ana plakanın üst yüzeyini kanal formunu koruyacak şekilde gözenekli hidrofilik katmanla kaplayarak yeni bir akış alanı oluşturmuştur (US20050181264A1 2004). Tasarımın ana amaçları, üretilen sıvı suyu yüzey boyunca homojen dağıtmak ve gözeneklerin içinde suyu tutarak membranı sürekli olarak nemlendirmektir. Plaka yüzeyini su yatkınlığı bulunan gözenekli tabaka ile kaplama yaklaşımıyla hazırlanan tasarım farklı tiplere sahiptir. Şekil 2.11 a'da görüldüğü gibi tasarımlardan birinde kanal iç yüzeyi ve omuz yüzeyi dahil tüm yüzeyin kaplandığı ve omuz çıkıntılarının kaplanmadığı iki farklı model bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Plaka yüzeyinin gözenekli su dağıtım malzemesi ile kaplanmış akış alanının kesit görünüşü, tam ve kısmi kaplanmış plaka yüzeyi. Gözenekli iç içe geçişli akış alanları (b) ve iki ağ arasında gözenekli malzeme yerleştirilmiş akış alanı. (c) (Wenbin ve ark. 2004)

Gözenekli malzemelerin kılcallık etkileri ile gaz dağıtımında üstün özelliklere sahip olması nedeni ile Kim ve ark. (2018) tarafından gözenekli köpük malzemelerin ana gaz dağıtıcı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Optimize edilmiş koşullar altında metal köpük malzemedен imal edilmiş gaz dağıtıcıları olan bir PEM yakıt pili yığınının paralel akış alanına sahip yakıt pili yığına nazaran daha yüksek güç çıkışı sağladığı belirlenmiştir (M. Kim et al. 2018). Gözenekli akış alanına sahip yakıt pillerinin, özellikle yüksek güç yoğunluğunda çalıştığı ve konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu koşullarda gözenekli metal köpüğün yüksek kütle taşıma kabiliyeti ile daha iyi performans sunduğu gözlenmiştir. Fly ve ark. (2018) in yaptığı çalışmada metal köpük gaz dağıtıcıların daha yüksek performans sağlamalarının tek sebebinin gözenekli yapının sağladığı etkili gaz dağıtımını olmadığını belirtmiştir. Çalışmada gaz dağıtıcıyı oluşturan köpük ligamentlerinin sıkıştırma etkisiyle GDT tabakasının içine girişim yapmasıyla gaz

dağıtımında GDT ve BPP arasında ortam sürekliliği sağlandığı ve GDT üzerine homojen kuvvet dağılımı sayesinde temas direncinin azaldığı ve pilin akım toplama stabilitesinin arttığı gözlemlenmiştir (Fly et al. 2019). Benzer şekilde yine Fly ve ark. (2018) gözenekli metal köpük malzemenin sıkıştırılmasıyla üzerinde yarı dairesel kanallara sahip yeni bir gözenekli hibrit akış alanı önermişlerdir (Fly et al. 2018). Tasarımda yer alan kanallar sayesinde gözenekli malzeme içindeki difüzyon direnci ve yaşanan basınç kaybı daha düşük seviyelere indirgenmiştir. Hossain ve Shabani (2018) tarafından yapılan çalışmada köpük malzemenin paketlenmesinden meydana gelen akış alanlarının konvansiyonel paralel akış alanına göre daha yüksek ısı deşarj etme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir (Sajid Hossain ve Shabani 2018). Buna karşın Bao ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışma, sıvı su akıntısı başladığında gözenekli akış alanının su tahliye hızının, konvansiyonel paralel akış alanından daha düşük olduğu görülmüştür (Bao et al. 2019). Bununla birlikte gözenekli malzemenin akış alanı olarak kullanılması planlanıyorsa malzemenin hidrofobikliğinin, gözeneklerin tamamen tıkanmasını önlemek için bir gereklilik olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, hidrofilik, hidrofobik veya her ikisinin bir kombinasyonu halinde farklı malzemelerin kullanımı ile gözenekli akış alanı oluşturma ile ilgili yeni stratejiler hala geliştirilmektedir. Hidrofilik ve hidrofobik gözenekli malzemelerin bir arada kullanılması ile Pien ve Warshay (2008) tarafından yeni bir akış alanı önerilmiştir. Bu akış alanında BPP, Şekil 2.11b' de görüldüğü gibi gaz geçirimsiz bir plaka oyuğu içerisine bantlar şeklinde gözeneklilikleri farklı hidrofilik ve hidrofobik malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş katmanların üst üste yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Hidrofilik ve hidrofobik bantların sıralaması üç farklı düzende hazırlanmıştır. Bantların ardışık olarak bir hidrofilik bir hidrofobik şeklinde sıralandığı ve alt katmanı oluşturan bantların da aynı sırayı takip ettiği sıralı tabakalar ilk modeli oluşturmaktadır. İkinci modelde ise katmanların her biri birinci tasarımda olduğu gibi bir hidrofilik ve bir hidrofobik bandın birbirini takip ettiği düzenden oluşmasına ramen; alt katmanlar hidrofilik bantların üzerine hidrofobik bantlar denk gelecek şekilde saptırmalı olarak birleştirilmiştir. Üçüncü modelde hem katmanlar arasında hem de aynı katmanı oluşturan bantlar arasında belli bir düzen bulunmayıp hidrofilik ve hidrofobik bantların rastgele bir araya getirilmesi ile oluşturulmuşlardır. Tasarımın amacı, pil içinde oluşan suyun hidrofilik tabaka içine alınarak reaktif alandan uzaklaştırılması üst katmanlara iletmesi ve hidrofobik tabakaları su iticiliği kullanılarak da suyun plaka

çıkışına doğru itilmesini sağlamaktır (US8313870B2 2008). Wilberforce ve ark. (2019) tarafından farklı dağıtıcı ve toplayıcı geometrilerine sahip alüminyum köpük malzemeden oluşan gözenekli akış alanları ele alınmış olup en verimli BPP Şekil 2.11 c’de verilmiştir. Çalışmada gözenekli akış alanı tasarımlarının verimi üzerinde dağıtıcı ve toplayıcıların geometrisinin şeklinin de etkili olduğu gösterilmiştir.

Xu ve ark. (2019) tarafından yüksek sıcaklıklı açık katot PEM yakıt pilleri için üç yeni akış plakası tasarımı önerilmiştir (Xu et al. 2019). Paslanmaz çelik köpük malzemeden imal edilmiş üzerinde dairesel, dikdörtgen ve slot şeklinde cepler bulunan katot plaka, dış ortam havası ile doğrudan temas halindedir. En iyi performansın elde edildiği modelin, üzerinde slot şeklinde cepler bulunan model olduğu ve bu modelde hava direncinin en düşük olduğu belirtilmiştir. Gaz dağıtıcı olarak gözenekli tabaka kullanımı, fazla sıvı su oluşumunun erken bir aşamasında GDT'den aktif su deşarjını sağlayabilmesine rağmen; uzun çalışma süreleri sonunda gözenekli tabakanın suya doyması ve akıntıyı şiddetli hale getirmesi gibi potansiyel riskleri beraberinde getirmektedir.

2.6 Akış Alanı Geliştirme Stratejilerinin Sınıflandırılması

Şimdiye kadar yapılan akış alanı geliştirme faaliyetleri ve tasarımlarının menşei, hedefi, tasarım stratejisi, tasarımın güçlü yönleri ve tasarımın muhtemel zayıflıkları gibi özelliklerin net bir şekilde tanımlanması yeni bir tasarımın yapılması için önemli bir adımdır. Önceki çalışmalar incelendiğinde PEM yakıt pili akış alanı geliştirme stratejilerini üç ana grupta sınıflandırmak mümkündür. Birinci grup stratejiyi kısmi iyileştirmeler olarak adlandırılan, temel akış alanları üzerinde basınç kaybı, dengesiz reaktant dağılımı, aşırı su drenajı veya membranı yeterli düzeyde nemlendirme gibi amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen küçük ölçekli değişiklikler oluşturmaktadır. Bununla birlikte, yapılan kısmi iyileştirmelerin faydası belirli tasarım ve uygulama koşulları altında rapor edilmiştir. Kısmi bir iyileştirme olarak özel bir amaç doğrultusunda geliştirilen tasarım stratejisi pil performansını belirlenen koşullar altında artırırken; çalışma sırasında farklı koşulların oluşması halinde tam tersi performans karakteri sergileme potansiyeline sahiptir. Örneğin, tabakalar arasındaki konveksiyon etkilerini güçlendirerek performans artışı elde etmek amacıyla geliştirilen kanal için engel yada yönlendirici plaka yerleştirme stratejisi; sistemdeki basınç kayıplarını aşırı miktarda arttırmanın yanında kanal akıntısı oluşması durumunda su tahliyesini zorlaştıran bir

karaktere bürünebilmektedir. Görüldüğü gibi üretilen kısmi iyileştirme stratejileri; çalışma koşullarının değişken olmadığı ve sürekli olarak kontrol altında tutulduğu sistemler için uygun çözümler sunma potansiyeline sahiptir. Buna karşın özellikle güç ihtiyacının ve çalışma koşullarının agresif bir şekilde değişken olduğu mobil uygulamalar için, kısmi iyileştirmeler yapılmış sabit özelliklere sahip akış alanların yerine değişken koşullara duyarlı, esnek performans aralığı sunan tasarımlara ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

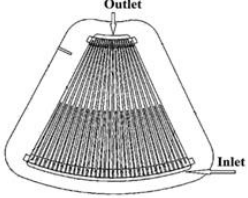
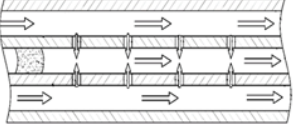
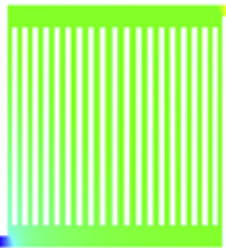
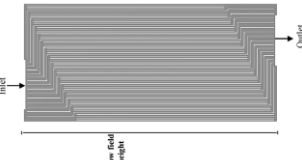
Yakıt hücresi akış alanı tasarım stratejisinin ikinci grubunu biyo benzeşimli akış alanları oluşturmaktadır. Biyo benzeşim yaklaşımı; çoğunun temeli Murray yasasına dayanan ve düşük basınç kaybı sayesinde etkili reaktant dağıtımı ve su yönetimi sunma amacıyla son yıllarda ortaya çıkan yeni bir stratejidir. Murray yasasının akış alanı dallanması ve kesit korelasyonunu belirlemede kullanılması, performans kazancı sağlamasına rağmen; biyolojik kökenin pile uygulanırken açık uçlu yada iç içe akış alanında görüldüğü gibi kapalı uçlu olacak şekilde uygulanmasının performans artışı üzerinde etkili olduğu çalışmalardan elde edilen diğer bir çıkarımdır. Sonuçta, biyo ilham teorisinin daha az basınç düşüşü için sadece geometrik benzerlik olarak uygulandığı belirlenmiştir. Biyo benzeşim yaklaşımının uygulamaları incelendiğinde, benzerliğin sadece geometrik benzerlik üzerine kurulduğu görülmüştür. Biyo benzeşim kökeni olarak sadece geometrik benzerliği kullanmak yerine canlıların farklı koşullar için geliştirdikleri mevcut vücut bütünlüğünü koruyarak vücudun işleyiş şeklini değiştirmek suratiyle sağladıkları adaptasyonlar, yakıt pili akış alanı geliştirmede biyolojik köken olarak kullanılma potansiyeline sahiptir.

Gelişmiş akış alanları adı verilen grup, üçüncü akış alanı tasarım stratejisidir. Gelişmiş akış alanları; aynı bipolar plakayla pilin, aşırı su akıntısı yaratacak koşullardan membran kurumasına yol açabilecek koşullara kadar, çok daha geniş bir aralıktaki çalışma parametrelerine uyum sağlamasını mümkün kılan yenilikçi bir yaklaşımdır. Yaygın olarak kullanılan standart akış alanları ise aksine daha dar çalışma koşullarında işlev görecektir şekilde fonksiyonel rijitliğe sahip sistemlerdir. Gelişmiş akış alanları grubu altında, değişen çevresel ve işletme koşulları talebini karşılamak için çok fonksiyonlu veya duyarlı akış alanları olarak da adlandırılabilir, aynı plakada akış rejimini değiştirme stratejisi ortaya çıkmıştır. Stratejinin bir sonucu olarak, aynı plakada çoklu

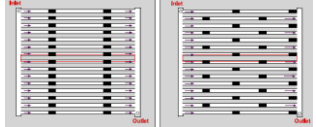
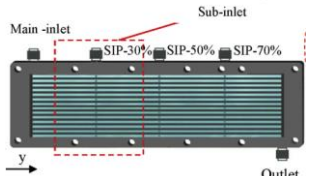
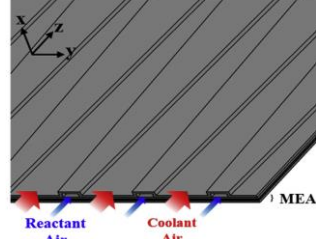
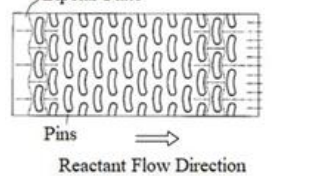
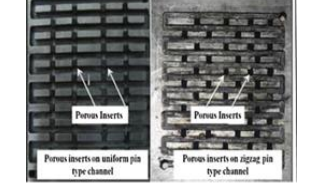
akış rejimlerine hizmet eden yeni bir bipolar plaka tipinin ticarileşmesi beklenmektedir. Böyle bir ürün, araçlar gibi aşırı değişen enerji ve çalışma koşulu değiştirme sistemlerinin taleplerini karşılamaya aday görünmektedir. Bu stratejiyle geliştirilen akış alanlarının çeşitli akış rejimlerinin farklı kombinasyonlarına genişletilmesi veya mevcut taleplere göre akış rejimleri arasında kısmen geçiş yapabilmesi, ürünün kullanım esnekliğini artırmaktadır.

Su yönetimi PEMFC performansında önemli bir rol oynamasına rağmen; zaman zaman kısa süreli yüksek güç ihtiyacı veya sıra dışı atmosferik koşullar nedeniyle su akıntısı veya membran kurummasını önlemek mümkün olmamaktadır. Oluşan suyu gözenekli ara kanallarla toplayıp hızlı bir şekilde deşarj etmeyi veya membran nemini korumayı sağlayan gözenekli ve gözeneksiz malzemeleri geometrik tasarım öğeleri ile bir araya getirme stratejisi gelişmiş akış alanı uygulamaları altında sınıflandırılabilir. Kullanılan malzemelerin gözeneklilik değerleri ve suya yatkınlık gibi özelliklerin, tasarımın performansını belirleyen önemli faktörler olduğu bilinmektedir. Bu noktada çok fonksiyonlu akış alanları ve bu akış alanlarının daha hassas çalışmasını sağlayacak kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve biyo benzeşimle akış alanı geliştirme çalışmalarının geometrik benzerlik özelinden çıkarılarak fonksiyonel benzerliğe genişletilmesi, daha verimli ve esnek akış alanı tasarımları yapılmasına olanak tanıyacaktır. Akış alanlarının detaylı sınıflandırması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

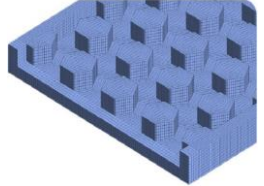
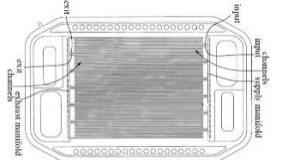
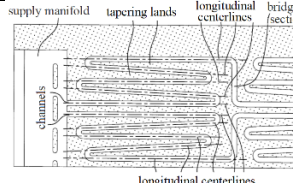
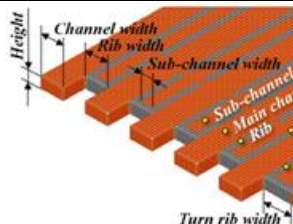
Çizelge 2.1. Akış alanı geliştirme stratejilerinin sınıflandırması

Ref.	Köken	Amaç	Tasarım stratejisi	Tasarımın güçlü yönleri	Muhtemel zayıflıklar	Tarih	
(US20080213648A1 2005)	Paralel akış alanı	Akış uzunluğu boyunca reaktant kısmi basınçlarını sabit tutmak.	Kanal derinliğini sabit tutmak kaydıyla hava fazlalık katsayısına göre kanal genişliğini eksponansiyel olarak azaltmak. Kanalları radial olarak yerleştirmek.	Katot tarafı akışı tek fazlı durumda tutar. Reaktant kısmi basıncındaki düşüşü azaltır.	Anlık hava stokiyometri değişimine toleransı düşük. Havanın dairesel doğrultuda girmemesi halinde düzensiz reaktant dağılımına yol açabilir.	2005	
(US20100261 087A1 2009)	Paralel akış alanı	Durgun reaktant akış bölgelerini ortadan kaldırmak. Sıvı su damlacıklarını küçük parçalara bölmek ve hızlı bir şekilde tahliye etmek.	Su damlacıklarını daha küçük parçalara bölmek için bitişik kanallar arasında delikler açılması	Kanal içinde belli bölgelerde sıvı su yığılmasını önlemesi.	Tasarım, GDT ve KT gibi alt katmanlarda su birikmesini önleyemez.. BPP üzerinde belirli bir boyutta üretilen delikler, değişen akış hızlarında işlev görmeyebilir.	2009	
(Imbrioscia ve Fasoli 2014)	Paralel akış alanı	Akış alanında daha düzgün reaktant hız ve basınç dağılımının sağlanması.	Dağıtıcı, toplayıcıların; kanalların genişlik ve derinliğini değiştirme. En iyi sonuç için dar kanallarla daha geniş dağıtıcı ve toplayıcı kullanımı.	Kanallar boyunca daha düzgün basınç ve hız dağılımı sunar. Özellikle giriş ve çıkış manifoldları civarında dengeli basınç ve hız dağılımı sunar.	Kesiti genişleyen dağıtıcı ve toplayıcı nedeniyle akış hızı düşerek yoğunlaşmanın birikmesine yol açma potansiyeli bulunmaktadır	2014	
(Lim et al. 2017)	Paralel akış alanı	Kanallar arasında üniform reaktant dağılımı sağlamak	Paralel kanal gruplarını farklı kesitlerde kanallarla beslemek. Giriş kanal kesiti büyük olan paralel kanal grubunu dar kesitli bir kanalda toplarken dar başlangıç kesitini geniş kanalda toplamak.	Paralel kanal grupları arasında dengeli reaktant dağılımı sunar.	Özellikle geniş kesitli dağıtıcı ile başlayıp dar kesitli toplayıcıda biten paralel kanal grubunda, yoğunlaşma koşulları oluşması halinde yüksek basınç kaybı oluşma potansiyeli.	2017	

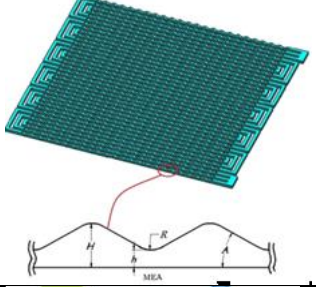
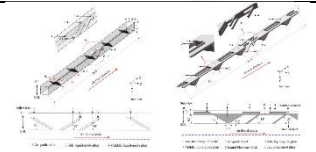
Çizelge 2.1

(Heidiary et al. 2017)	Paralel akış alanı	Daha iyi reaktant ve su taşınımı için reaktant akış yönünün reaksiyon düzlemine normal doğrultuda geliştirilmesi.	Paralel gaz dağıtım kanallarının içine kauçuk bloklar eklenmesi.	GDT'den kanala doğru su akışı ve kanaldan GDT ye doğru reaktant akışı gelişmiştir	Akış uzunluğu boyunca basınç kaybını aşırı yükselterek pompalama enerjisi ihtiyacını artırabilir.	2017	
(Y. Wang et al. 2017)	Paralel akış alanı	Akış kanallarından sıvı suyun aktif olarak uzaklaştırılma performansını artırmak.	Geleneksel paralel akış alanında katot plakası kanallarına, girişten farklı uzaklıklarda ilave kuru hava girişi ağızları eklemek.	Kanal içinde biriken suyun atılması için, ek itici güç oluşturur.	Ara girişlerde besleme basıncının ayarlanamaması durumunda girişten çıkışa doğru olması gereken akış yönü bozulabilir.	2017	
(Lee et al. 2019)	Paralel akış alanı	Kuru reaktant beslenmesi durumunda oluşan suyun kanal içinde kalmasını ve membranın nemli kamasını sağlamak.	Genişleyen reaktant taşıyıcı kanallar oluşturularak çıkışa doğru akışı yavaşlatmak. Çıkışa doğru daralan soğutucu kanallar oluşturularak çıkışta soğutucu hızını arttırmak.	Daralan soğutucu kanal kesiti ile daha etkili pil soğutması sağlarken membran nemlendirmede etkili bir çözümdür.	Plaka geometrisi, pil yığılı oluşturulurken sıkma torkuna bağlı olarak membran üzerinde dengesiz gerilmeler oluşturabilir.	2019	
(US20090214929 A1 2012)	Çıkıntılı akış alanı	Reaktantları yüzey boyunca daha geniş bir alana homojen bir şekilde dağıtmak ve membran nemlendirmesi için gereken kadar suyu içerde tutmak.	Çıkıntı tipi olarak akışı karşılayan yüzeyi dış bükey ve tersi yöndeki yüzeyi iç bükey olan geometrik form oluşturmak.	Yanal reaktant dağıtımında etkili sonuçlar verme potansiyeline sahiptir.	Hilal formundaki yüzeyler civarında konsantrasyon kayıplarına yol açabilir. Sıkıştırma torkuna bağlı olarak membranda dengesiz gerilmeler yaratabilir.	2012	
(P. Karthikeyan et al. 2015)	Çıkıntılı akış alanı	Homojen reaktant dağılımının artırılmak ve dönüşlü akış bölgesinin ortadan kaldırılması	Çıkıntılar arasındaki boşluklara gözenekli parçalar yerleştirmek.	Homojen reaktant dağıtım kapasitesi artırılmıştır.	Gözenekli parçalar basınç kaybı yaratma ve su biriktirme nedeni ile konsantrasyon kaybı ve pompalama gücü tüketimine neden olmaya eğilimlidirler.	2015	

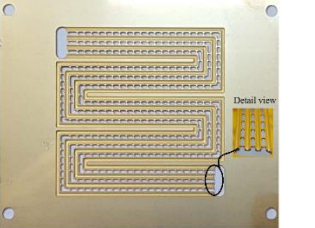
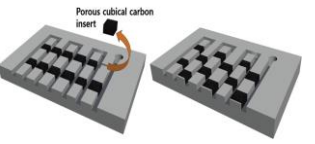
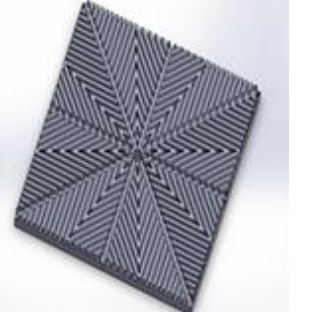

Çizelge 2.1

(Atyabi ve Afshari 2019)	Çıkıntılı akış alanı	Reaktant basınç kaybını, konsantrasyonu ve hızını stabil tutmak.	Petek biçimli çıkıntıların saptırmalı düzende akış alanına yerleştirilmesi.	Yeni tasarım; homojen hız, basınç dağılımı sunar. Homojen konsantrasyon dağılımı sunar.	Çıkıntılar arkasında hala devridaim bölgeleri oluşturma eğilimidir. Öte yandan, hem plaka hem de membran elektrot üzerindeki dengesiz kuvvet dağılımına yol açma potansiyeline sahiptir.	2019	
(US6099984A 1998)	Serpantin akış alanı	Serpantin kanallarda giriş ve çıkış uçları arasındaki basınç farkının azaltılmak.	Tek bir uzun kanal yerine birbirine paralel yerleştirilmiş daha kısa serpantin akış hattı grupları oluşturmak.	Daha dengeli bir basınçla giriş ve çıkış boyunca daha homojen reaktant dağılımını tahsis eder.	Giriş manifoldundaki kayıplar nedeniyle serpantin kanal grupları arasında aşırı konsantrasyon değişikliklerine neden olabilir.	1997	
(Griffith ve Rock 2002)	Serpantin akış alanı	Omuz altı konveksiyonu sınırlandıran etkileri ortadan kaldırmak.	Kanalları paralel yerleştirmek yerine, dönüşlerden sonra birbirinden uzaklaşan kanal düzeni oluşturmak.	Reaktant akışını KT yüzeyine dik olarak artırır.	Akış kanallarının daha küçük gruplara bölünmesi, akış yolu üzerine basınç kayıplarına yol açan ve parazit pompalama kaybını artıran çok sayıda dönüş eklemektedir.	2002	
(Choi et al. 2012)	Serpantin akış alanı	Kanallar arasında basınç dengesi oluşturulmak ve omuz altı konveksiyonu iyileştirmek. Omuz altı su transferini güçlendirmek.	Ana kanallar arasına omuz içinde alt kanal ekleme ve ana kanalları ve alt kanalları küçük bypass kanalları yoluyla birbirine bağlamak.	Daha homojen reaktant ve basınç dağılımı, omuz altından daha etkili su tahliyesi sunar.	Tasarımda alt kanalların omuz çıkıntısı içinde olması nedeni ile omuz genişliği azalmakta olup; akım toplama bozuklukları ve daralan temas yüzeyine bağlı mekanik gerilim oluşturma potansiyeline sahiptir.	2012	

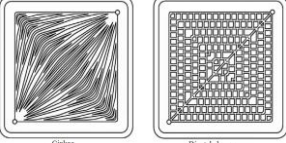
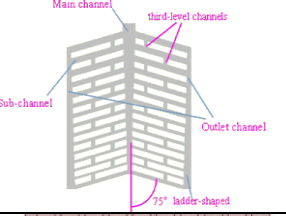
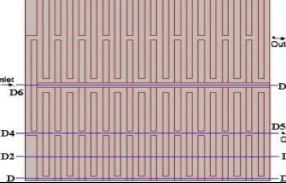
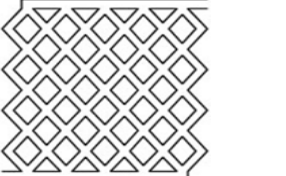
Çizelge 2.1

(W. Li et al. 2017)	Serpantin akış alanı	GDT'de reaktant konsantrasyonunu güçlendirmek ve aktif su deşarjı sağlamak.	Akış kanallarının iç yüzeyini dalgali formda oluşturmak.	Reaktantların GDT içine difüzyonunu destekleyici özelliktedir.	Kanal içi su akıntısı başlaması halinde gaz geçişinin su birikintisi nedeni ile engellenmesi potansiyeline sahiptir.	2017	
(Chowdhury ve Akansu 2017)	Serpantin akış alanı	Reaktant kısmi basıncını girişten çıkışa kadar sabit tutmak ve aktif sıvı su deşarjı sağlamak.	Derinliği değişen kanal yapısı geliştirmek.	Kanal uzunluğu boyunca sabit reaktant konsantrasyonu sunmanın yanında çıkışa yakın bölgelerde kanal içi basıncı su tahliyesine yetecek kadar yüksek tutma ya elverişli bir tasarımıdır.	Kanal derinliğindeki değişimin, diğer işletme ve pil parametreleri de dikkate alınarak optimize edilmemesi durumunda konsantrasyon kayıpları yaratma potansiyeline sahiptir.	2017	
(Chowdhury ve Timurkütük 2018)	Serpantin akış alanı	Kanal boyunca reaktant kısmi basıncını korumak ve çıkışa kadar kanal içi su itme kabiliyetini sağlamak.	Girişten çıkışa kadar daralan kanal derinliğine sahip serpantin akış kanalları tasarlamak.	Su tahliyesini güçlendirmiş ve akış boyunca reaktant kısmi basıncının yüksek tutulmasını sağlamıştır.	Değişen kanal derinliği nedeniyle oluşan farklı plaka kalınlığı, yüksek sıkıştırma kuvveti altında zayıf mukavemet bölgeleri oluşmasına ve plaka çatlamasına zemin hazırlama potansiyeline sahiptir.	2018	
(Fan et al. 2018)	Serpantin akış alanı	Omuz altı konveksiyon etkilerinin arttırmak ve sıvı suyun GDT'den uzaklaştırılmasını sağlamak.	Sıvı su ve reaktant gazların yönlendirilebilmesi için kanal içine yönlendirici plaka ve girintiler yerleştirmek	Artırılmış konvektif etkiler ve su deşarjı sunar.	Kompleks imalat yöntemlerine ihtiyaç duyması.	2018	

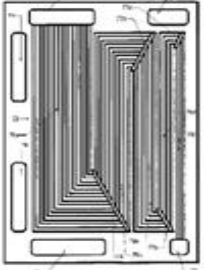
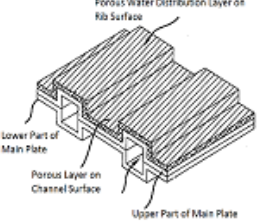
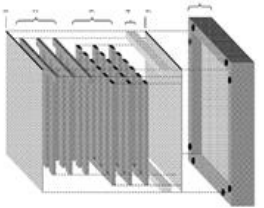
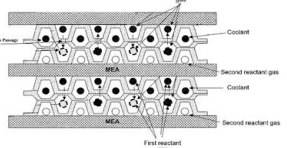
Çizelge 2.1

(Baik ve Seo 2018)	Serpantin akış alanı	Omuz altı su birikiminin olumsuz etkisinin ortadan kaldırılmak.	Kaburga üzerine su tahliye deliklerin açmak.	Omuz altında etkili su tahliyesi ve daha düşük yüksek frekans kayıpları.	Yüksek sıkma torkları altında delik açılmış bölge kenarları boyunca membran ve elektrotta deformasyona yol açma potansiyeli bulunmaktadır.	2018	
(M. Karthikeyan et al. 2016)	Serpantin akış alanı	Yoğuşan suyun KT ve GDT den göçüşüm yoluyla uzaklaştırmak.	Kanalları birbirinden ayıran omuz çıkıntıları içine sıralı yada saptırmalı düzende karbon gözenekli parçalar yada metal sünger malzeme yerleştirmek.	Özellikle yüksek akım yoğunluğunda oluşan suyun GDT'den aktif bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır.	Tasarım, su akıntısının uzun sürmesi ve gözenekli malzemenin suya doyması koşullarında konsantrasyon kaybı yaratma potansiyeline sahiptir.	2019	
(Asadzade ve Shamlou 2017)	Biyo benzejmimli akış alanı	Akış boyunca basınç kayıplarını azaltmak.	Giriş manifoldunu, bütün kanalların çıkışa kadar olan boyları eşit olacak şekilde plaka ortasına yerleştirmek. Ortadan giriş ile kanalları keskin dönüşleri olmayan bir düzene kavuşturmak.	Akış uzunluğu boyunca basınç kayıplarının azalmasını sağlamıştır.	Tasarım, özellikle ikincil kanalların bağlanma noktalarında durgun akış bölgeleri oluşturma potansiyeline sahiptir. Ortadan girişli plaka tasarımı pil yığını oluşturmaya müsait olmayıp; membran alanının aktif kullanımını engelleme potansiyeline sahiptir.	2017	
(Guo et al. 2014)	Biyo benzejmimli ve iç içe geçişli akış alanı	Omuz altı konveksiyon etkilerini güçlendirmek ve reaktant kısmi basıncını akış alanı boyunca korumak.	Murray yasasına uygun şekilde daralan, yaprak damar formunda dallanan kanal yapısı geliştirmek.	Aktif alan üzerinde reaktant kısmi basıncının yüksek tutulmasına katkı sağlamıştır.	İç içe geçişli tipte tasarlanmayan modelde özellikle çıkış manifolduna yakın bölgede durgun akış bölgeleri oluşturma eğilimine sahiptir.	2014	

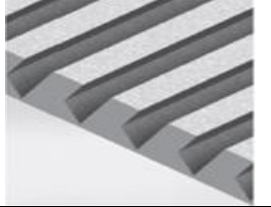
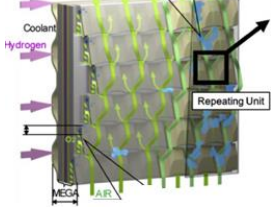
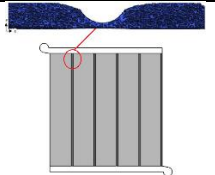
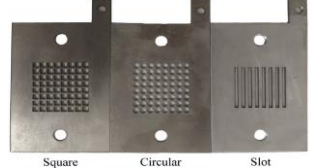
Çizelge 2.1

(Kang et al. 2019)	Biyo benzejmimli akış alanı (Yaprak damar yapısı))	Yüksek su tahliyesi elde etmek.	Ginkgo ve Dicotyledonous yapraklarının damar yapısından esinlenerek akış alanı geliştirmek.	Özellikle Ginkgo yaprağı benzeşimi ile elde edilen modelde, çok kanallı serpantin akış alanına göre daha düşük basınç kaybı ortaya çıkmaktadır.	Tasarımın dar temas yüzeylerine sahip olması plakaların yeterince hassas bir şekilde hizalanamaması durumunda yüksek sıkıştırma torkları altında membran ve elektrotta deformasyon oluşma potansiyeli bulunmaktadır.	2019	
(Ruan et al. 2016)	Biyo benzejmimli ve paralel akış alanı	Reaksiyon yüzeyi boyunca reaktant kısmi basıncının daha dengeli ve yüksek tutulması.	Murray yasasına göre hesaplanmış üç seviye değişen kanal kesiti kullanmak.	Özellikle yüksek akım yoğunluklarında reaksiyon bölgesi boyunca daha dengeli ve daha yüksek reaktant konsantrasyonu sunmaktadır.	Dar kanal kesiti bölgelerinin, sıvı su birikimi oluşma potansiyeli bulunmaktadır.	2016	
(C.-T. Wang et al. 2010)	Paralel ve serpantin akış alanı	Akış uzunluğu boyunca basınç kaybını en aza indirmek ve homojen reaktant dağılımını sağlamak.	Reaktant akışını bir plakaya çarptırmak suretiyle ikiye bölmek ve toplam akış alanını yine bir plaka yardımıyla homojen iki kısma bölmek.	Akış uzunluğu boyunca daha homojen reaktant dağılımı ve daha az basınç düşüşü.	Tasarımın düşük akış hızı yaratma eğiliminin yanında serpantin akış alanı ile benzer tasarım şekli, keskin akışkan dönüşleri nedeni ile sıvı su birikimi yaratma potansiyeline sahiptir.	2009	
(Dong-Hui et al. 2017)	Biyo benzejmimli ve paralel akış alanı	Reaktif alan ve membran boyunca daha muntazam reaktan ve nem dağılımını güçlendirmek.	Dallanma açıları Murray yasasına göre belirlenmiş dallanan ve tekrar bir araya gelen kanal yapısı geliştirmek.	Aktif alanda daha iyi reaktant ve nem dağılımı sunar.	Tasarımın daha geniş BPP üzerine uygulanması durumunda tasarım parametrelerinin tekrar hesaplanma ihtiyacı bulunmaktadır.	2017	

Çizelge 2.1

(US7524575B2 2004)	İleri tasarım (Serpantin akış alanı)	Kanallar arasında dengeli reaktan dağılımı oluşturmak.	Akış alanı üzerine reaktantların belli aralıklarla toplanıp tekrar kanallara dağıtılmasını sağlayacak ara havuzlar yerleştirmek.	Aktif alan boyunca daha dengeli reaktant dağılımı ve daha yüksek kısmi basınç sağlamada etkilidir.	Tasarımın yavaşlayan gaz hızı nedeni ile özellikle havuz bölgesinde su biriktirme eğilimi bulunmaktadır. Öte yandan tasarım küçük alanlı plakalara uygulandığında, kanallar arasında konveksiyon etkileri için ihtiyaç duyulan bazal basınç farkını ortadan kaldırma eğilimi bulunmaktadır.	2004	
(US20050181264A1 2004)	İleri tasarım (Tümü)	Kılcaklık etkisi ile GDT'den su birikmesini ortadan kaldırmak ve membranı nemlendirilmesini desteklemek.	Akış plakasının GDT'ye bakan iç yüzeyini hidrofilik gözenekli malzeme ile kaplamak.	Sıvı su oluşumunun erken safhalarında sıvı suyun GDT'den etkili bir şekilde çekilmesini sağlar.	Yeni tasarım her ne kadar fazla sıvı su oluşumunun erken safhasında GDT'den aktif su deşarjını sağlasa da; uzun akıntı süreleri sonunda gözenekli ortamın suya doyması durumunda su akıntısının etkilerini şiddetlendirme potansiyeline sahiptir.	2005	
(US8313870B2 2008)	İleri tasarım (İç içe geçişli akış alanı)	Homojen reaktant dağılımı sağlamak ve aktif sıvı su deşarjı sunmak.	Farklı gözeneklilik, hidrofilik veya hidrofobik özelliklere sahip gözenekli malzemelerin; geçirimsiz bir kavite içinde karakterlerine bağlı olarak katmanlar halinde sistematik bir şekilde bir araya getirilerek akış alanı oluşturmak.	Homojen reaktant dağılımı ve aktif sıvı su transferi sağlar.	Sıvı su akıntısının erken safhalarında tasarım beklenen fonksiyonu yerine getirir de akıntının ileri aşamalarında konsantrasyon kaybına yol açma potansiyeline sahiptir.	2008	
(US2010007518 6A1 2008)	İleri tasarım (Paralel ve iç içe geçişli akış alanı)	Farklı akış düzenlerinin sahip olduğu avantajları, değişen işletme koşullarına göre kullanabilmek.	Plaka içinde farklı katmanlarda kanallar oluşturmak suretiyle giriş ve çıkışa yerleştirilmiş valflerle anlık olarak paralel ve iç içe geçişli tip akış alanı arasında anlık geçiş yapan akış alanı tasarlamak.	Akış alanının paralel ve iç içe geçişli tip arasında anında değiştirme imkanı sunar. Değişen koşullara hızlı adaptasyon imkanı sağlar.	Orta katmandaki kanallar su akıntısı durumunda tıkanma potansiyeline sahiptir.	2012	

Çizelge 2.1

(Wawdee et al. 2015)	İleri tasarım (Tümü)	Su dengesini korurken kanal içi sıvı su akıntısını engellemek.	Suyu yerçekimine göre toplamak veya boşaltmak için geliştirilmiş yukarı veya aşağı yönüne eğimli bir kanal kesiti geliştirmek.	Kanal içi akıntı oluşması halinde bile GDT tabakasındaki suyu aktif bir şekilde uzaklaştırma özelliğine sahiptir.	Omuz bölgesinin eğimli olması montaj işlemi sırasında dengesiz mekanik kuvvet dağılımına neden olabilir. Eğimli tasarımın performansı, otomobiller gibi farklı yönde ivmelere maruz kalacağı dinamik sistemlerde kullanıldığında olumsuz yönde değişebilir.	2015	
(Jinyong Kim et al. 2017)	İleri Tasarım (Sıkı örgünlü ağ tabaka)	Daha etkili reaktant dağılımı sağlamak ve geliştirilmiş sıvı su uzaklaştırma özelliklerine sahip olmak.	Reaktantların alt katmanlara yayılabilmesi için reaktantların girdaplı yayılmasını sağlayacak çıkıntılarla sahip ince ağ şeklinde akış tasarımı geliştirmek. Ayrıca akış doğrultusu boyunca düşük basınca sahip mikro basınç bölgeleri yaratacak açıklıklar eklemek.	Geliştirilmiş alt katman konveksiyonu ve daha iyi su deşarjı sağlar.	Tasarımın akış doğrultusunda aşırı basınç kayıplarına sebep olma potansiyeli bulunmaktadır.	2015	
(Fly et al. 2018)	İleri tasarım (Gözenekli akış alanı)	Difüzyon direni ve basınç kaybını azaltarak üniform reaktant dağılımı elde etmek.	Optimize edilmiş manifold şekline sahip; metal köpük malzeme üzerinde yarı dairesel forma sahip kanallar oluşturmak.	Akış uzunluğu boyunca daha az difüzyon direnci ve basınç düşüşü görülmüştür.	Üretim yöntemi parametreleri, metal köpüğü sıkıştırırken gözeneklerin aşırı derecede sıkışmasını önlemek için hassas bir şekilde ayarlanmalıdır. İki fazlı akış parametreleri de araştırılmalıdır.	2018	
(Xu et al. 2019)	İleri tasarım (Delikli tip)	Hava konveksiyon kapasitesini artırmak ve akış direncini azaltmak.	Doğrudan atmosferle temas eden katot BPL üzerinde farklı şekillerde yuvalar açarak akış alanı oluşturmak.	Düşük akış direnci ve gelişmiş konveksiyon sunar.	Yığın konfigürasyonu için ek tasarım ihtiyacı bulunmaktadır.	2019	

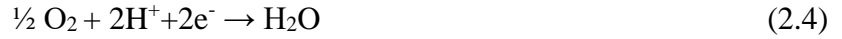
2.7. Elektrot Kinetiği

PEM yakıt pilleri elektrokimyasal enerji dönüşüm cihazları olup; işleyişleri aşağıda verilen anot ve katot tarafında eş zamanlı olarak gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlara bağlıdır.

Anot Tarafında:



Katot Tarafında



Denklem 2.3 ve 2.4 ile verilen reaksiyonlar toplam reaksiyon ifadeleri olup; geri planda bir çok alt reaksiyonun kademeli bir şekilde gerçekleşmesi ile meydana gelmektedirler.

2.7.1. Reaksiyon hızı

Elektrot yüzeyinde gerçekleşen bir reaksiyonda reaksiyon hızı, akımı oluşturan elektronların elektrot yüzeyinde serbest kalma ve tüketilme hızı olarak tanımlanmaktadır. Reaksiyon hızı, elektronların elektrolitten katı elektrot yüzeyine veya ters yönlü olarak geçebilmesi için aşması gereken enerji eşiği tarafından belirlenir.

Akım yoğunluğu, birim yüzey alanından geçen akım (elektron veya iyonlar) olarak tanımlanmaktadır. Faraday yasasına göre akım yoğunluğu birim yüzey alanı başına transfer edilen yük ve tüketilen reaktant miktarı ile doğru orantılıdır. Genel ifadesi Denklem 2.5'de verildiği gibidir.

$$i = n \cdot F \cdot j \quad (2.5)$$

i: Akım yoğunluğu ($\text{Coulomb}/\text{sn cm}^2$)

n: Reaksiyona giren molekül başına işlem gören elektron sayısı

F: Faraday sabiti 96,485 ($\text{Coulomb}/\text{elektron mol}$)

j: Birim yüzey alanı başına reaktant akısı ($\text{mol}/\text{sn cm}^2$)

Reaksiyon hızı, yakıt pili hücresine dıştan yerleştirilecek bir akımölçer ile ölçülebilmektedir. Dıştan ölçülen akım ve akım yoğunluğu değerleri, elektrot üzerinde ileri ve geri yöndeki yük akımları arasındaki net farkı vermektedir. Yakıt pillerindeki elektrokimyasal reaksiyonlar genel olarak reaksiyona giren maddelerin oksitlenmesi yada indirgenmesi işlemlerini içermektedir:



Bir hidrojen – oksijen yakıt pilinde anot tarafı reaksiyonu hidrojenin elektronlarını serbest bırakıp ürün olarak proton ve elektronlar oluşturduğu bir oksitlenme reaksiyonu iken katot tarafındaki reaksiyon ürün olarak suyun üretildiği oksijenin indirgenmesi reaksiyonudur.

Yakıt pillerinde denge hali, hücreden herhangi bir dış elektriksel akım çekilmediği an olarak tanımlanmakla beraber bu aşamada membranın her iki tarafında gerçekleşen oksitlenme ve indirgenme hızlarının eşit olduğu kabul edilmektedir.

Reaksiyona giren maddelerin tüketim miktarları reaktantların yüzeydeki konsantrasyonları ile doğru orantılıdır. Denklem 2.7 ile tanımlanan ileri yönlü reaksiyon için reaktant akısı:

$$j_f = k_f \cdot C_{ox} \quad (2.8)$$

olarak tanımlanırken Denklem 2.6 ile tanımlanan geri yöndeki reaksiyon için reaktant akısı:

$$j_b = k_b \cdot C_{rd} \quad (2.9)$$

k_f : İleri yöndeki reaksiyon (indirgenme) hız katsayısı

k_b : Geri yöndeki reaksiyon (oksitlenme) hız katsayısı

C_{ox} : İndirgenme reaksiyonuna giren bileşenlerin yüzey konsantrasyonları

C_{rd} : Oksitlenme reaksiyonuna giren bileşenlerin yüzey konsantrasyonları

Denklem 2.6 ve 2.7 ile belirtilen ve biri elektron serbest bırakırken diğeri elektron tüketen bu reaksiyonlar sonucunda üretilen net akım, serbest bırakılan ve tüketilen toplam elektron miktarı arasındaki fark kadardır. Bu durumda net akım:

$$i = n \cdot F \cdot (k_f \cdot C_{ox} - k_b \cdot C_{rd}) \quad (2.10)$$

Denge halinde, ileri ve geri yöndeki reaksiyonlar eş zamanlı olarak devam etmelerine rağmen üretilen net akım sifıra eşittir. Dış elektriksel akımın çekilmediği, ileri ve geri yöndeki reaksiyon hızlarının eşit olduğu denge durumundaki akım, değişim akım yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır.

2.7.2. Reaksiyon sabitleri; transfer katsayısı

Kimyasal reaksiyonlarda toplam reaksiyonun girenleri, ara ürünleri ve nihai ürünleri arasındaki enerji düzeylerini ele alarak standart aktivasyon entalpisi, aktivasyon entropisi

ve aktivasyon Gibbs serbest enerjisi gibi değişkenlerden yola çıkarak reaksiyon mutlak hızını açıklamakta geçiş hal teorisi kullanılmaktadır. Geçiş hal teorisi dikkate alındığında, bir elektrokimyasal reaksiyonda reaksiyon hızının Gibbs serbest enerjisi terimini de içerdiği görülmektedir. Gibbs serbest enerjisi terimini içeren transfer katsayısı

$$k = \frac{k_B \cdot T}{h} \exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right) \quad (2.11)$$

k_B : Boltzman sabiti

h : Planck sabiti ($6,626069 \times 10^{-34}$ J.s)

R : Evrensel gaz sabiti

T : Sıcaklık

G : Gibbs serbest enerjisi

Denklem 2.11'deki ΔG Gibbs serbest enerjisi farkı terimi ele alınarak oksitlenme ve indirgenme reaksiyonları için ayrı ayrı açıldığında kimyasal ve elektriksel terimler içerdiği görülmektedir. İndirgenme reaksiyonu için Gibbs serbest enerjisi farkı terimi

$$\Delta G = \Delta G_{ch} + \alpha_{rd} \cdot F \cdot E \quad (2.12)$$

Benzer şekilde oksitlenme reaksiyonu için:

$$\Delta G = \Delta G_{ch} - \alpha_{ox} \cdot F \cdot E \quad (2.13)$$

ΔG_{ch} : Gibbs serbest enerjisi kimyasal bileşeni

α : Transfer katsayısı

F : Faraday sabiti 96,485 (Coulomb/elektron mol)

E : Potansiyel fark (Volt)

“ch” alt indisi denklemin kimyasal bileşenini ifade etmektedir. Denklem 2.11; Denklem 2.12 ve 2.13 ile yeniden düzenlenirse indirgenme ve oksitlenme reaksiyonlarına ait reaksiyon hız katsayıları sıra ile

$$k_f = k_{o,f} \exp\left[\frac{-\alpha_{rd}FE}{RT}\right] \quad (2.14)$$

$$k_b = k_{o,b} \exp\left[\frac{\alpha_{ox}FE}{RT}\right] \quad (2.15)$$

2.7.3. Akım – Potansiyel ilişkisi (Butler – Wolmer eşitliği)

Denklem 2.5, alt bileşenler ile birlikte yeniden düzenlendiğinde net akım yoğunluğu

$$i = n \cdot F \left\{ k_{o,f} C_{ox} \exp\left[\frac{-\alpha_{rd}FE}{RT}\right] - k_{o,b} C_{rd} \exp\left[\frac{\alpha_{ox}FE}{RT}\right] \right\} \quad (2.16)$$

Denge halinde reaksiyon her iki yöne devam etmesine rağmen; potansiyel E_r olup net akım sıfıra eşittir. Denge halinde reaksiyonların gerçekleşme hızı değişim akım yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. Denklem 2. 16, denge hali için güncellenirse:

$$i_0 = n \cdot F \cdot k_{0,f} C_{Ox} \exp \left[\frac{-\alpha_{Rd} F E_r}{RT} \right] = n \cdot F \cdot k_{0,b} C_{Rd} \exp \left[\frac{\alpha_{Ox} F E_r}{RT} \right] \quad (2.17)$$

Denklem 2.16 ve 2.17 bir araya getirilerek akım yoğunluğu ve potansiyel arasında bir ilişki elde edilebilir.

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_{Rd} F (E - E_r)}{RT} \right] - \exp \left[\frac{-\alpha_{Ox} F (E - E_r)}{RT} \right] \right\} \quad (2.18)$$

Denklem 2.18 Butler-Volmer eşitliği olarak bilinen akım ve potansiyel arasındaki ilişkiyi veren denklemdir. E_r , tersinir yada denge potansiyeli olarak adlandırılır. Anod tarafında tersinir potansiyel 0V iken katot tarafında, 25 °C sıcaklık ve atmosferik basınç koşullarında, 1.229 V olup; katot tarafındaki potansiyel sıcaklık ve basınçla değişmektedir. Tersinir potansiyel ile elektrot potansiyeli arasındaki fark, aşırı gerilim olarak adlandırılır. Aşırı gerilim, yakıt pilinin akım üretmek için ihtiyaç duyduğu farktır. Butler-Volmer eşitliği anod ve katot tarafı için geçerlidir. Eşitlik anod tarafı için yazılırsa

$$i_a = i_{0,a} \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_{Rd,a} F (E_a - E_{r,a})}{RT} \right] - \exp \left[\frac{\alpha_{Ox,a} F (E_a - E_{r,a})}{RT} \right] \right\} \quad (2.19)$$

Katot tarafı için yazılırsa:

$$i_c = i_{0,c} \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_{Rd,c} F (E_c - E_{r,c})}{RT} \right] - \exp \left[\frac{\alpha_{Ox,c} F (E_c - E_{r,c})}{RT} \right] \right\} \quad (2.20)$$

Denklem 2.19'da anod tarafındaki gerilim pozitif olup ($E_a > E_{r,a}$) ; oksidasyon etkilerinin daha baskın olması nedeni ile ilk terim ihmal edilebilir ve denklem

$$i_a = -i_{0,a} \exp \left[\frac{\alpha_{Ox,a} F (E_a - E_{r,a})}{RT} \right] \quad (2.21)$$

haline indirgenebilir. Nihai ifadenin sahip olduğu işaretin negatif olması anottan akımın ayrılıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde gerilim katot tarafında negatif olup ($E_c > E_{r,c}$); ilk terimi daha baskın hale getirir. Böylece Butler Wolmer eşitliği katot tarafı için

$$i_c = i_{0,c} \exp \left[\frac{-\alpha_{Rd,c} F (E_c - E_{r,c})}{RT} \right] \quad (2.22)$$

haline indirgenebilir. Platinyum katalizör kullanılan hidrojen-oksijen yakıt pillerinde transfer katsayısı yaklaşık 1 alınır. Denklem 2.3 ve 2.4 ele alındığında reaksiyona giren elektron sayısının anot tarafında 2 katot tarafında 4 olduğu görülmektedir. Bu durumda akım hesaplanırken transfer katsayısının sonucu 1 olan $n \cdot \alpha$ gibi bir çarpıma eşit olduğu görülmektedir. Larmine ve Dicks, hidrojen yakıt pilinin, iki elektronun işleme girdiği anot tarafı için $\alpha=0.5$ ve katot tarafı için de $\alpha=0.1$ den 0.5 ' e değişen değerler tanımlamışlardır. Newman ise α değerini 0.2 ile 2 arasında değişen değerler olarak tanımlamıştır.

2.7.4. Akım yoğunluğu

Yakıt pillerinde denge akım yoğunluğu (i_0) kimyasal reaksiyon hız katsayısıyla benzer özellikleri ifade etmektedir. Denge akım yoğunluğu, reaksiyon hız katsayılarından farklı olarak reaktant konsantrasyonuna bağlıdır. Efektif denge akım yoğunluğu (birim elektrot yüzey alanı başına), aynı zamanda elektrot katalizör yüklemesi ve katalizör özgül yüzey alanının (Birim kütlenin toplam yüzey alanı m^2/kg) bir fonksiyonudur. Birim gerçek katalizör yüzey alanı başına belli bir basınç ve sıcaklık değerindeki referans denge akım yoğunluğu bilinirse; herhangi bir basınç ve sıcaklıktaki etkin denge akım yoğunluğu denklem 2.23 ile hesaplanabilir.

$$i_0 = i_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}} \right)^\gamma \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right] \quad 2.23$$

Buradan;

i_0^{ref} : birim katalizör yüzey alanı başına denge akım yoğunluğu, A/cm² (25 °C referans sıcaklık 101.25 kPa referans basınç koşulları altında)

a_c : Katalizör özgül alanı (Pt için teorik limit 2400 cm²/mg dır. Fakat uygulamada, katalizör ve elektrot yapılarının tam bileşmemesi nedeni ile ilgili değer %30 a varan oranlarda oranında düşerek 600-100 cm²/mg olarak uygulanabilmektedir.

L_c : Katalizör yüklemesi. (Uygulamada elektrotlar yaklaşık olarak 0,3 – 0,5 mg/cm² oranında katalizör ile yüklenirken daha düşük oranlarda yükleme yapmak mümkündür. Fakat bu durum daha düşük pil gerilimi ile sonuçlanabilir.

P_r : Reaktant kısmi basıncı.

P_r^{ref} : Referans basınç, kPa

γ : Basınç katsayısı (0,5 ile 1 arasındadır)

E_c : Aktivasyon enerjisi (Oksijenin Pt üzerinde indirgenmesi için 66 J/mol K dir)

R : Gaz sabiti (8,314 J/mol K dir)
T : Sıcaklık, K
 T_{ref} : Referans sıcaklık, (298,15 K)

$a_c \cdot L_c$ çarpımı elektrot pürüzlülüğü olarak adlandırılırken; birim elektrot yüzey alanı başına katalizör ile kaplanmış alan olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca denklem 2.23 te kısmi basınçlar oranı yerine katalizör tabakası üzerindeki reaktant konsantrasyonları oranı da hesaplamalarda kullanılabilir.

Denge akım yoğunluğu bir elektrotun elektrokimyasal reaksiyona girme yatkınlığının bir ölçütü olarak değerlendirilmektedir. Denge akım yoğunluğunun yüksek olması, elektrot yüzeyinin daha aktif olduğunu göstermektedir. Bir hidrojen-oksijen yakıt pilinde anot tarafındaki denge akım yoğunluğu katot tarafına göre mertebelerce daha yüksek olduğu için (25 °C ve 1 atm basınçta $\sim 10^{-4}$ e $\sim 10^{-9}$ Acm²Pt) katot tarafındaki kapalı devre potansiyeli anot tarafındakinden çok daha fazladır. Bu nedenle, pil potansiyeli daha çok denklem 2.22'deki formül kullanılarak hesaplanır.

2.8. Voltaj Kayıpları

Bir yakıt pili reaktantlarla beslenirken ve elektrik devresi açık halde iken akım üretmez ve pilin; sıcaklık, basınç ve reaktant konsantrasyonuna bağlı olarak teorik gerilime çok yakın bir gerilim üretmesi beklenir. Fakat uygulamada açık devre gerilimi genellikle 1 voltun da altında olacak şekilde teorik gerilimden çok daha düşük seviyelerde olur. Bu durum yakıt pillerinde akım çekilmese dahi bir takım kayıpların olduğunu gösterir. Devrenin kapatılarak bir elektriksel yük uygulanması durumunda üretilen akımın bir fonksiyonu olarak kapalı devre akımının bir takım kaçınılmaz kayıplar nedeni ile düştüğü gözlemlenebilir. Sözü geçen kayıplar:

- Elektrokimyasal reaksiyon kinetikleri
- İç elektriksel ve iyonik kayıplar
- Reaktantların reaksiyon bölgesine taşınmasındaki zorluklar
- İç parazit akımlar
- Membrandan karşıya geçen reaktantlar

2.8.1. Aktivasyon Kayıpları

Kimyasal reaksiyonların başlayabilmesi için denge halinden ayrılmak gerekir. Bu durum aktivasyon kaybı olarak adlandırılmakla beraber yavaş ilerleyen elektrot dinamiğinden kaynaklanmaktadır. Denge akım yoğunluğu ne kadar yüksekse aktivasyon kayıpları o kadar düşüktür. Bu kayıplar hem anot hem de katot tarafında görülmekle beraber; katot tarafındaki oksijen indirgenme reaksiyonlarının çok yavaş gerçekleşmesi nedeni ile anot tarafındaki hidrojen oksidasyonu reaksiyonlarından daha yüksek fark potansiyeline ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır.

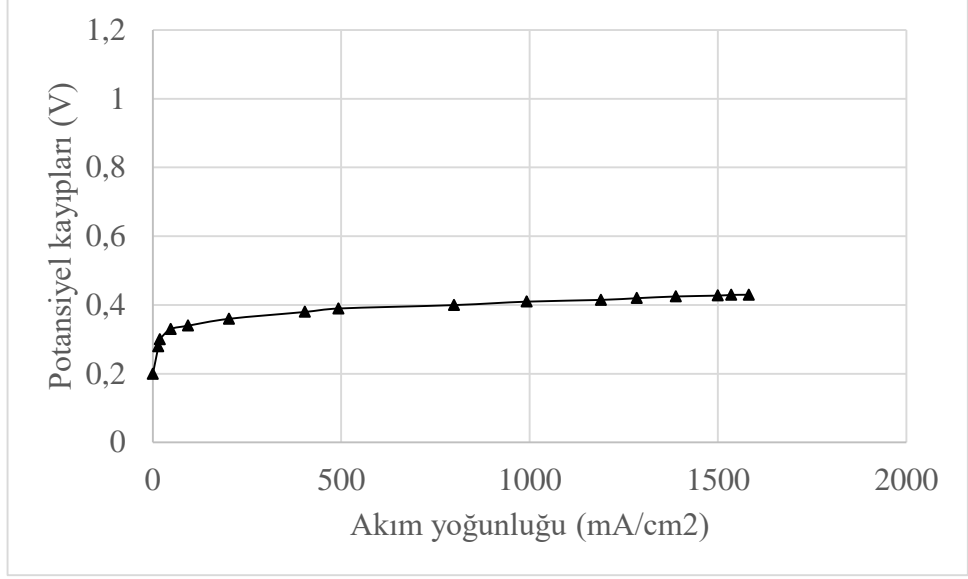
Daha önce de bahsedildiği gibi katot tarafındaki gibi göreceli olarak yüksek negatif kapalı devre gerilimlerinin (denge potansiyelinin altında akım gerilim uygulanması halinde) uygulanması durumunda Butler-Volmer denkleminin ilk kısmı baskın hale gelir ve eşitlik 2.18 şu hale gelir:

$$\Delta V_{\text{act,c}} = E_{\text{r,c}} - E_{\text{c}} = \frac{RT}{\alpha_{\text{c}} F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,\text{c}}} \right) \quad 2.24$$

Şelil 2.12’de oksijenin Pt üzerinde indirgenmesi sonucu oluşan kayıpları gösteren kayıp eğrisi verilmiştir. Benzer şekilde anotta kapalı devre gerilimleri (denge potansiyelinden büyük potansiyel farklarda) oluştuğunda Butler-Volmer eşitliğinin ikinci kısmı baskın hale gelerek denklem 2.25’ teki halini alır.

$$\Delta V_{\text{act,a}} = E_{\text{a}} - E_{\text{r,a}} = \frac{RT}{\alpha_{\text{a}} F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,\text{a}}} \right) \quad 2.25$$

Hidrojen oksidasyonu reaksiyonlarında elektro kimyasal açıdan tersinir potansiyel bütün sıcaklıklarda sıfırdır. Bu durum referans elektrot olarak anot standart hidrojen elektrotunun neden kullanıldığını açıklamaktadır. Böylece hidrojen anodu için $E_{\text{r,a}} = 0V$ dur. Anot tarafı için aktivasyon kutuplaşması hidrojen tarafı için oksijen indirgenme reaksiyonuna göre çok daha düşüktür.



Şekil 2.12. Aktivasyon kutuplaşması kayıpları nedeni ile gerilim kayıpları-akım eğrisi.

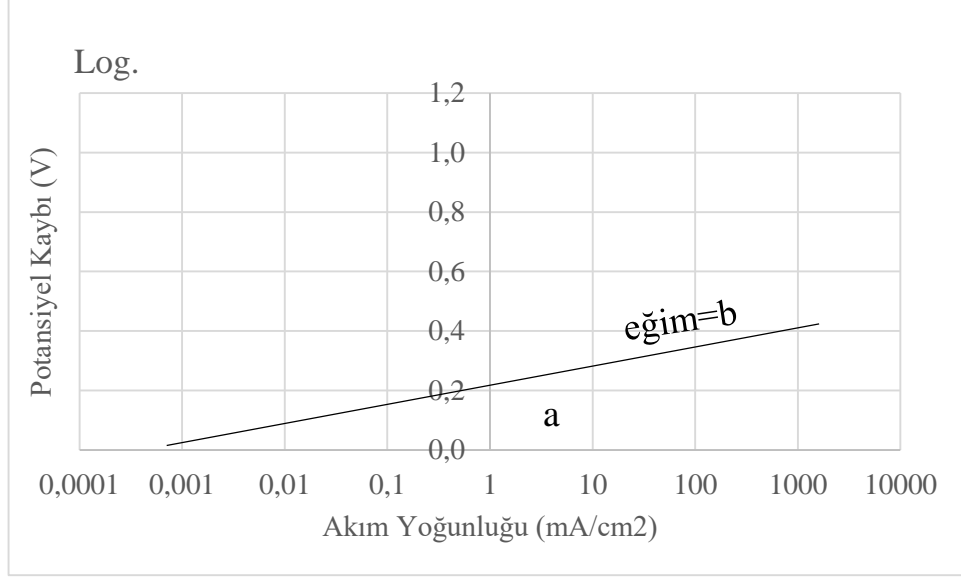
Aktivasyon kayıplarını göstermenin daha basitleştirilmiş bir yöntemi Tafel eşitliği olarak adlandırılan denklem 2.26'teki eşitliği kullanmaktır.

$$\Delta V_{act} = a + b \log(i) \quad 2.26$$

Burada;

$$a = -2,3 \cdot \frac{RT}{\alpha F} \log(i_0) \quad \text{ve} \quad b = 2,3 \cdot \frac{RT}{\alpha F}$$

b terimi Tafel eğimi olarak adlandırılır. Sabit bir sıcaklık değeri için Tafel eğimi sadece α transfer katsayısına bağlı olarak değişir. $\alpha = 1$ için Tafel eğimi 60 °C sıcaklıkta akımdaki her 10'luk artış gerilim tarafında yaklaşık 60 mV'luk fark yaratır. Eğer akım-gerilim ilişkisi Şekil 2.13'deki gibi logaritmik olarak grafik haline getirilirse; a,b ve i_0 gibi parametrelerin tayin edilmesi daha kolay bir hal alır.



Şekil 2.13 Aktivasyon kutuplaşması kayıpları nedeni ile logaritmik gerilim kayıpları-akım eğrisi.

Bir yakıt pilindeki kayıpların sadece aktivasyon kutuplaşmalarından meydana geldiği kabul edilirse hücre potansiyeli;

$$E_{\text{cell}} = E_c - E_a = E_r + \Delta V_{\text{act},a} \quad 2.28$$

$$E_{\text{cell}} = E_r - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) - \frac{RT}{\alpha_a F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,a}} \right) \quad 2.29$$

şeklinde hesaplanabilir. Eğer anot kutuplaşması ihmal edilirse eşitlik Tafel eşitliği ile aynı formda olacak şekilde:

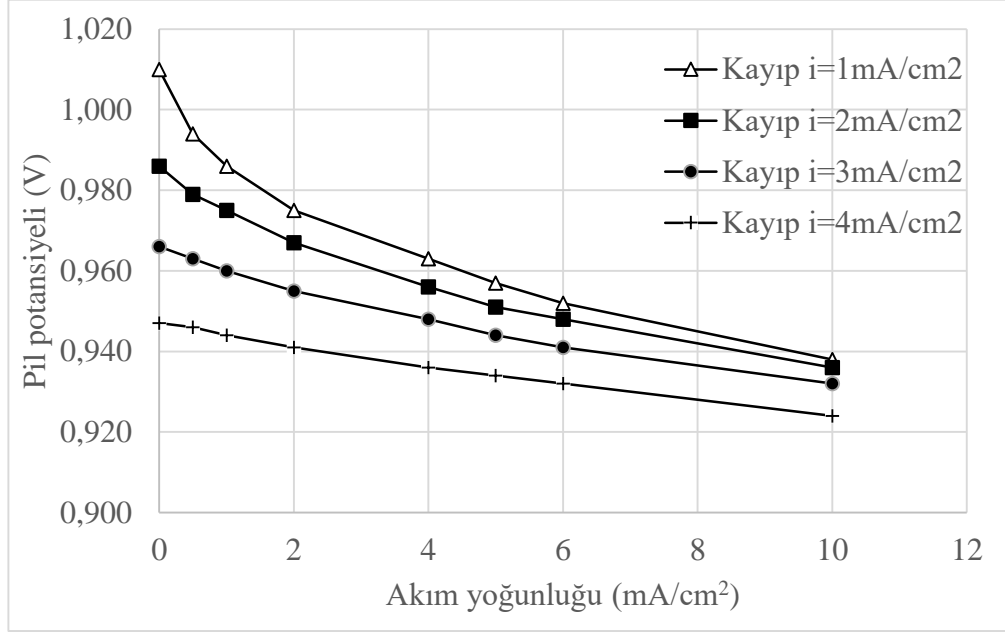
$$E_{\text{cell}} = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad 2.30$$

haline gelir.

2.8.2. İç akımlar ve karşıya sızıntı kayıpları

Membran (polimer elektrot) elektriksel olarak iletken ve gaz geçirgen bir malzeme olmasa da bir miktar hidrojen ve elektron membran üzerinden kısa devre yaparak karşı tarafa geçiş yapabilmektedir. Her bir hidrojen molekülü iki elektron içerdiği için karşıya sızıntı kayıpları ile iç akım olarak adlandırılan kayıplar temel olarak aynıdır. Bu kayıplar, karşıya sızan hidrojen miktarının tüketilen hidrojen miktarının yanında çok düşük olması nedeni ile ve karşı tarafa membran üzerinden kısa devre yapan elektronların pilde üretilen

akım yanında çok daha düşük olması nedeni ile kendilerini belirgin bir biçimde göstermeyebilir. Buna karşın yakıt pili açık devre potansiyelindeyken yada çok düşük akım yoğunluklarında çalışırken iç akım ve karşıya sızıntı kayıplarının açık devre gerilimi üzerine olan etkileri Şekil 2.14'deki grafikte görüldüğü gibi son derece baskın hale gelmektedir.



Şekil 2.14. İç akımlar yada hidrojen sızıntı kayıplarının açık devre gerilimi üzerine etkileri.

Toplam elektriksel akım, denklem 2.31'de görüldüğü gibi dış yada kullanılabilir olarak adlandırılan akım ile yakıt sızıntıları yada iç akımlar nedeni ile ortaya çıkan kayıpların toplamına eşittir.

$$I = I_{\text{ext}} + I_{\text{loss}} \quad 2.31$$

Akımın, A, membran aktif yüzey alanına bölünmesi ile denklem 2.32'deki gibi akım yoğunluğu elde edilir.

$$i = \frac{I}{A} \quad 2.32$$

Bu nedenle:

$$i = i_{\text{ext}} + i_{\text{loss}} \quad 2.33$$

olur.

Denklem 2.29'daki toplam akım yoğunluğundan potansiyelin hesaplanmasını sağlayan denklem, denklem 2.33 ile güncellenirse denklem 2.34'deki halini alır.

$$E_{\text{cell}} = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i_{\text{ext}} + i_{\text{loss}}}{i_0} \right) \quad 2.34$$

Bu nedenle dış akım, açık devre akımında olduğu gibi, sıfır olsa dahi; verilen koşullarda açık devre gerilimi tersinir hücre potansiyelinden hayli düşük olabilir. Aslında açık devre gerilimi hidrojen-hava yakıt pillerinde genellikle (operasyon basıncına bağlı olarak) 0,94 ve 0,97 arasındaki değerlerle 1 voltluk teorik değerın altındadır (Denklem 2.35).

$$E_{\text{cell,OCV}} = E_r - \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{i_{\text{loss}}}{i_0} \right) \quad 2.35$$

Hidrojen sızıntısı yada iç akımlar eşit olsa da bu kayıplar fiziksel olarak farklı etkilere sahiptir. Elektron kaybı elektro kimyasal reaksiyonlara gerçekleşikten sonra gerçekleşir böylece; aktivasyon kayıpları denklem 2.34'deki gibi gerçekleşir. Membran üzerinden karşıya geçen hidrojen, anot tarafındaki elektrokimyasal reaksiyona katılmaz ve bu durumda elektrokimyasal reaksiyon sonucu elde edilen akım dış akıma eşit olur. Buna karşın; katot tarafına membran üzerinden sızarak geçen hidrojen katot tarafındaki katalizör yüzeyinde $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ reaksiyonunu gerçekleştirerek katot tarafını depolarize edip katot potansiyel farkını (hücre potansiyelini) düşürür. Bu nedenle denklem 2.34 ve denklem 2.35 ile verilen eşitlikler yaklaşık sonuçlar verir. Hidrojenin membran üzerinden sızarak katot tarafına geçmesine benzer şekilde oksijen de membran üzerinden sızarak anot tarafına geçer. Bu durumda da benzer etkiler oluşurken depolarize olan taraf anot tarafındır.

Hidrojenin membran üzerinden sızarak katot tarafına geçmesi; membran geçirgenliği, membran kalınlığı ve itici kuvvet olarak hidrojenin membranın karşı tarafına göre kısmi basınç (hidrojen konsantrasyonu) gibi parametrelerin bir fonksiyonudur. Çok düşük açık devre potansiyeli (0.9 V değerinin belirgin bir şekilde altında olan değerler gibi) ciddi bir hidrojen sızıntısı veya elektriksel kısa devrenin göstergesi olabilir. Yakıt pilinden dış akım çekilmeye başlandığında katalizör tabakası üzerindeki hidrojen konsantrasyonu düşer ve membran üzerinden hidrojen geçişine neden olan itici kuvvet azalmış olur. Böyle bir

durumda çalışmakta olan bir yakıt pilinde karşıya sızıntı kayıplarının etkisinin neden ihmal edilebilir olduğu açıklanmış olur.

2.8.3. Omik kayıplar

Omik kayıplar, iyonların membrandan ve yakıt pilinin iletken bileşenlerinden geçmeye karşı gösterdiği dirençten kaynaklanan kayıplardır. Bu kayıplar denklem 2.36'teki gibi ohm yasası ile açıklanabilir.

$$\Delta V_{\text{ohm}} = iR_i \quad 2.36$$

Burada :

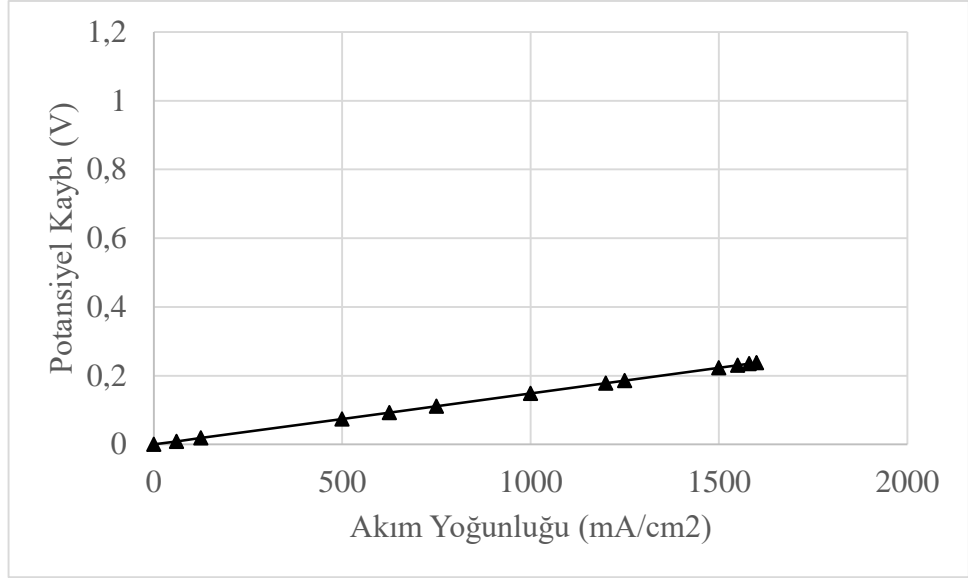
i: akım yoğunluğu, A/cm²

R_i: toplam hücre iç direnci (iyonik, elektronik ve temas kayıplarını içerir. Ω/cm²)

R_i terimi alt bileşenleri açılarak yazılırsa denklem 2.37'deki gibi

$$R_i = R_{i,i} + R_{i,e} + R_{i,c} \quad 2.37$$

Özellikle grafit veya grafit/polimer kompozit malzemeden imal edilmiş akım toplayıcılar kullanılan pillerde elektronik direnç kayıpları neredeyse ihmal edilecek düzeydedir. İyonik kayıplar ve temas kayıpları yaklaşık aynı mertebede kayıplardır. R_i eş değer iç direnç değerleri tipik olarak yaklaşık 0,1 ile 0,2 Ω/cm² arasındadır. R_i=0,15 Ω/cm² iç direnç değerine sahip bir yakıt pilinde omik kayıplar nedeni ile ortaya çıkan kayıplar Şekil 2.15'de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 2.15. $R_i=0,15 \Omega/\text{cm}^2$ iç direnç değeri için pilde meydana gelen gerilim kayıpları.

2.8.4. Konsantrasyon kayıpları

Konsantrasyon kayıpları, reaktantların elektrolit üzerinde elektrokimyasal reaksiyonlarla hızlı bir şekilde tüketilmesi sonucu konsantrasyon farklarının meydana gelmesi ile ortaya çıkmaktadır. Daha önce Nernst eşitliğinde ifade edildiği gibi elektrokimyasal reaksiyonların potansiyelinin reaktantların kısmi basınçları ile değiştiği belirtilmişti. İlgili eşitlik konsantrasyonlar cinsinden ifade edilirse denklem 2.38'deki forma dönüşür.

$$\Delta V = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_B}{C_S} \right) \quad 2.38$$

C_B : Reaktantın toplam gaz kütlesi içindeki konsantrasyonu mol/cm³

C_S : Reaktantın katalizör tabakası yüzeyindeki konsantrasyonu mol/cm³

Fick yasasına göre denklem 2.39'da görüldüğü gibi reaktant akısı kütle içindeki ve katalizör aktif yüzey tabakası üzerindeki konsantrasyon farkı ile doğru orantılıdır.

$$N = \frac{D \cdot (C_B - C_S)}{\delta} A \quad 2.39$$

Burada;

N: Reaktant akısı, mol/s

D: Reaktantların difüzyon katsayısı, cm²/s

A: Elektrot aktif yüzey alanı, cm²

δ: Difüzyon mesafesi, cm

Sürekli rejimde kimyasal reaksiyonlar ile reaktant tüketim hızı, denklem 2.40'deki difüzyon akısına eşittir.

$$N = \frac{I}{nF} \quad 2.40$$

Denklem 2.40 ve denklem 2.39 birleştirildiğinde akım yoğunluğunun konsantrasyon farkları cinsinden ifade edildiği denklem 2.41 elde edilir.

$$N = \frac{nF \cdot D \cdot (C_B - C_S)}{\delta} \quad 2.41$$

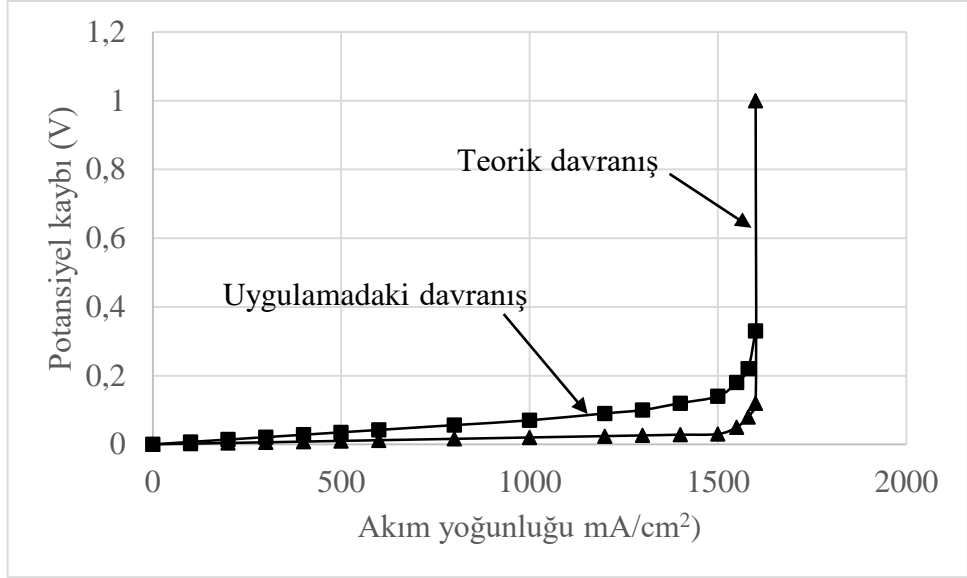
Katalizör yüzeyi üzerindeki reaktant konsantrasyonunun Denklem 2.41 dikkate alındığında akıma bağlı olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu ne kadar artarsa aktif yüzeydeki reaktant tüketimindeki artışa bağlı olarak konsantrasyon azalır. Reaktant yüzey konsantrasyonu, tüketim hızının difüzyon hızını aştığı durumda yani reaktantların yüzeye ulaşmasına fırsat kalmadan tüketilmesi halinde sıfır olur. Tam bu andaki akım yoğunluğuna sınırlayıcı akım yoğunluğu denir. Bu nedenle aktif yüzey konsantrasyonu $C_s=0$ olduğunda denklem 2.41'de $i=i_L$ olarak yeniden düzenlenirse sınırlayıcı akım yoğunluğu denklem 2.42'da verilmiştir.

$$i_L = \frac{nFDC_B}{\delta} \quad 2.42$$

Denklem 2.38, 2.41 ve 2.42 bir araya getirilerek yeniden düzenlenirse konsantrasyon kayıpları nedeni ile ortaya çıkan akım gerilim farkı denklem 2.43'deki gibi hesaplanır.

$$\Delta V_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad 2.43$$

Denklem 2.43 ve Şekil 2.16'den de anlaşılacağı gibi sınırlayıcı akım yoğunluğuna yaklaşıldığında pil potansiyelinde keskin düşüşler gözlenmektedir.



Şekil 2.16. Sınırlayıcı akım yoğunluğu yakınığında pil potansiyelindeki değişim.

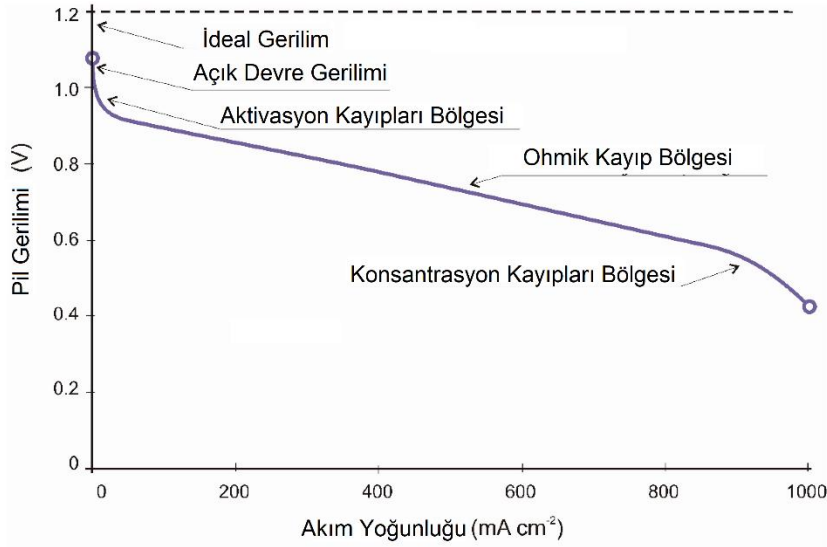
Sınırlayıcı akım yoğunluğunu, gözenekli gaz difüzyon tabakası içindeki homojensizliklerden dolayı pratikte tam olarak gözlemek mümkün olmamıştır. Aktif yüzey boyunca bazı bölgeler reaktant dağılımının homojen olmamasından dolayı bazı alanlardan daha sonra ulaşır. Sınırlayıcı akım yoğunluğu katot ve anotun herhangi birinde görülebilir.

Uygulamalarda sınırlayıcı akım yoğunluğuna ulaşıldığında keskin bir düşüş gözlenmemesinin diğer bir nedeni, denge akım yoğunluğunun katalizör tabakası üzerindeki reaktant konsantrasyonunun (C_s) bir fonksiyonu olmasındandır. Pilden çekilen akım yoğunluğu sınırlayıcı akım yoğunluğuna ulaştığında yüzeydeki konsantrasyon sıfıra giderken Denklem 2.19'de görüleceği gibi denge akım yoğunluğu da sıfıra yaklaşarak, Denklem 2.24 ve 2.25'den anlaşılacağı gibi, ek potansiyel kayıplarına yol açar. Bu nedenle Denklem 2.44'deki Kim ve ark tarafından tanımlanan ampirik formül voltaj kayıplarını daha iyi anlatmaktadır (Junbom Kim et al. 1995).

$$\Delta V_{\text{conc}} = c \cdot \exp\left(\frac{i}{d}\right) \quad 2.44$$

c ve d ampirik katsayılarının değerleri (Larminie ve Dicks 2003) dan sırayla $c=3 \times 10^{-5}$ ve $d=0,125 \text{ A/cm}^2$ olarak alınmıştır.

Bütün kayıpların toplam etkisini, yakıt piline ait akım gerilim grafiği üzerinde görmek mümkündür. Her bir kayıp, farklı bölgelerde baskın olmaktadır. Kayıpların akım-gerilim eğrisi üzerinde baskın olduğu bölgeler Şekil 2.17’ de verilmiştir.



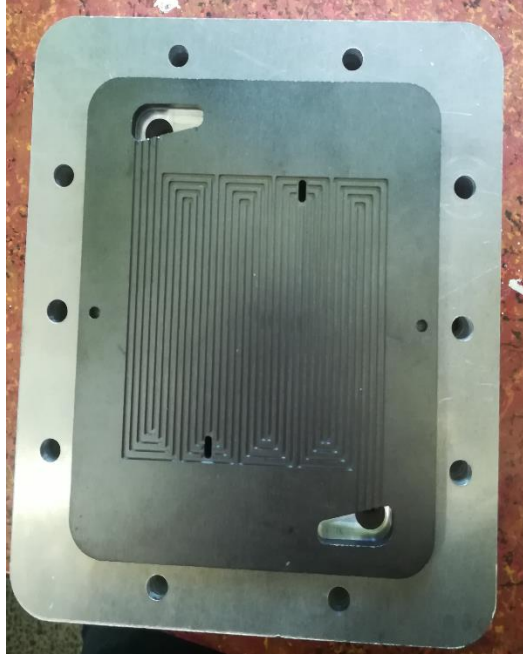
Şekil 2.17. Akım-Gerilim eğrisi ve gerilim kayıp bölgeleri.

Açık devre geriliminin ideal gerilimden daha düşük olmasında iç akımlar ve karşıya sızıntı kayıpları etkilidir. Özellikle pilden akım çekilmediği durumlarda bu etki belirgin bir şekilde hissedilmektedir. Pilden akım çekilmeye ve bununla birlikte reaktant tüketimi başladığında karşıya sızıntı kayıpları, diğer kayıpların yanında ihmal edilecek kadar küçük kalmaktadır. Pilden akım çekilmeye başladığında aktivasyon kayıpları gözlenmeye başlanmaktadır. Özellikle 0,1 A/cm² ve daha düşük pil akım yoğunluğu seviyelerinde keskin gerilim düşüşünün temel nedeni aktivasyon kayıplarıdır. Yakıt pilini oluşturan her bir katmanın sahip olduğu elektriksel iç direnç nedeni ile ortaya çıkan ohmik kayıplar, yaklaşık olarak 0,9 V ve 0,4 V gerilimde orta akım yoğunluğundaki pil işletme koşullarında baskındır. Pilden yüksek akım yoğunluğunda güç çekilmesi halinde konsantrasyon kayıpları nedeni ile pil geriliminde şiddeti artan bir düşüş gözlenmektedir. Bu bölge konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu konsantrasyon kayıpları bölgesi olarak adlandırılmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmanın erken safhasını literatürdeki ve patent veri tabanlarındaki akış alanlarının incelenmesi ve özelliklerinin sistematik olarak sınıflandırılması oluşturmaktadır. İncelemelerin ardından belirlenen teknik ihtiyaçları karşılamak için referans alınacak biyolojik adaptasyonlar ve geometriler incelenerek; yeni tasarımların teknik referansı belirlenmiştir. Sonraki aşamada biyo benzeşim referansları doğrultusunda geliştirilen akış alanlarına sahip BPP'lerin üç boyutlu katı modelleri Catia V5 üç boyutlu tasarım yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Elde edilen modeller üzerinden plakalar referans alınarak pilin diğer bileşenlerinin detaylı tasarımları tamamlanmıştır. Tasarımı yapılan bileşenlerin imalatı için üç boyutlu modeller kullanılarak bilgisayar destekli talaşlı imalat kodları çıkarılmıştır. Destek plakaları, akım toplama plakaları ve bipolar plakalar Johnford marka 3500 dev/dak takım devrine sahip sanayi tipi CNC frezelerde imal edilmiştir (Şekil 3.1). Çalışmanın ilk aşamasını oluşturan deney numunesi imalatı sürecine kadar olan işlemler sonrasında, çalışmanın ikinci kısmı olan performans araştırmalarına başlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen biyo benzeşimli akış alanlarının performans araştırmaları, deneysel ve sayısal olmak üzere temelde iki aşamada yapılmıştır. Deneysel araştırmalar, tek hücreli bir yakıt pili üzerinden yapılmıştır. Deney numunesinin tek hücreli kullanılmasının nedeni; pilin istenen işletme koşulları altında test edilir hale gelmesinin daha kısa sürede tamamlanması, performans testlerinin daha az reaktant ve enerji sarfiyatıyla gerçekleştirilebilmesi ve yığın halinde pillerde ihtiyaç duyulan soğutucu kanal gibi ek gereksinimlerin ortadan kalkmasıdır.

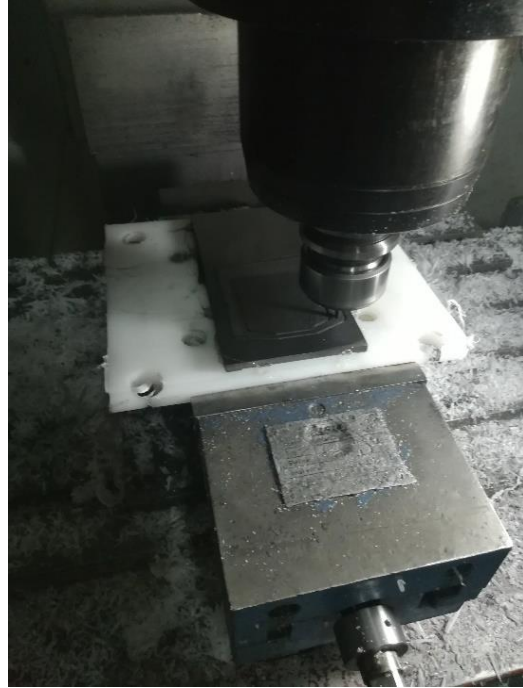
Yakıt piline ait bileşenlerin üç boyutlu tasarımları, yeni akış alanlarının Ansys Workbench ortamında yapılacak sayısal performans analizlerinde referans olarak kullanılmıştır. Tasarım modelleri üzerindeki bazı tasarım detayları sayısal model hazırlama aşamasında çeşitli mühendislik sadeleştirmelere tabi tutulmuştur. Sayısal modeli hazırlanan yakıt pillerinin performansları, Ansys Fluent PEM Fuel Cell Module paket programında hem yakıt pili elektrokimyası hem de reaktant akış mekanizmalarına ilişkin matematiksel denklemler eş zamanlı olarak çözdürülmek süratiyle analiz edilmiştir. Yapılan sayısal incelemeler; deneysel olarak elde edilen pil performans sonuçlarının, pil içi akış ve elektrokimyasal mekanizmalar ile birlikte ele alınmasını sağlamıştır.



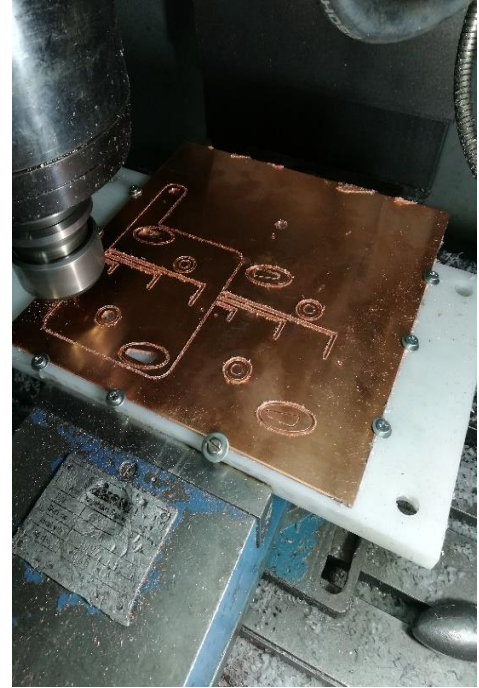
a



b



c



d

Şekil 3.1. Destek plakası üzerinde görülen bipolar plakanın (a) CNC freze tablasındaki çapaklı hali (b) ve işlenmekte olan bal peteği BPP ile bakır akım toplama plakası (d)

3.1. Tasarımlara Referans Olan Biyo Benzeşim Yaklaşımının Kökenleri ve Geliştirilen Biyo Benzeşimli Akış Alanları

Biyo benzeşimli tasarım yaklaşımının temelinde, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, biyolojik yapıların fiziksel özelliklerinin gerekli mühendislik sadeleştirmeler yapıldıktan sonra bir mühendislik sisteme aktarılması bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yeni tasarımlara biyo benzeşim yaklaşımı uygulanırken bir şekli benzerlik ve bir refleks benzerliği uygulanmıştır. Refleks benzeşimi uygulanırken tasarıma yansıtılan biyo benzeşimin kökeni; efor halinde yada hipoksi (oksijen yoksunluğu) koşullarında insan kadio vasküler sistemin (dolaşım sistemi) erken safha refleksleridir. PEM yakıt pillerinde konsantrasyon kayıplarına yol açan reaktant yoksunluğu ile insan vücudundaki dokularda görülen oksijen yoksunluğu benzer özelliklere sahip olup; insan vücudunda oksijen yoksunluğuna verilen tepkilerin yakıt pillerine uygulanması halinde konsantrasyon kayıplarının önüne geçilebileceği düşünülmüştür. Bu çalışmada ortaya konan tasarımlardan birinde de şekil benzeşimi uygulanmıştır. Şekil benzeşiminin kaynağı arıların bal yapmak yada temel yaşamsal ihtiyaçlarını sürdürmekte kullandıkları bal peteği formundaki örüntülerdir. Sadeleştirilerek eşkenar altıgene indirgenen bal peteği formu tasarımda benzeşim kökeni olarak kullanılmıştır.

3.1.1. Ara beslemeli akış alanı tasarımı

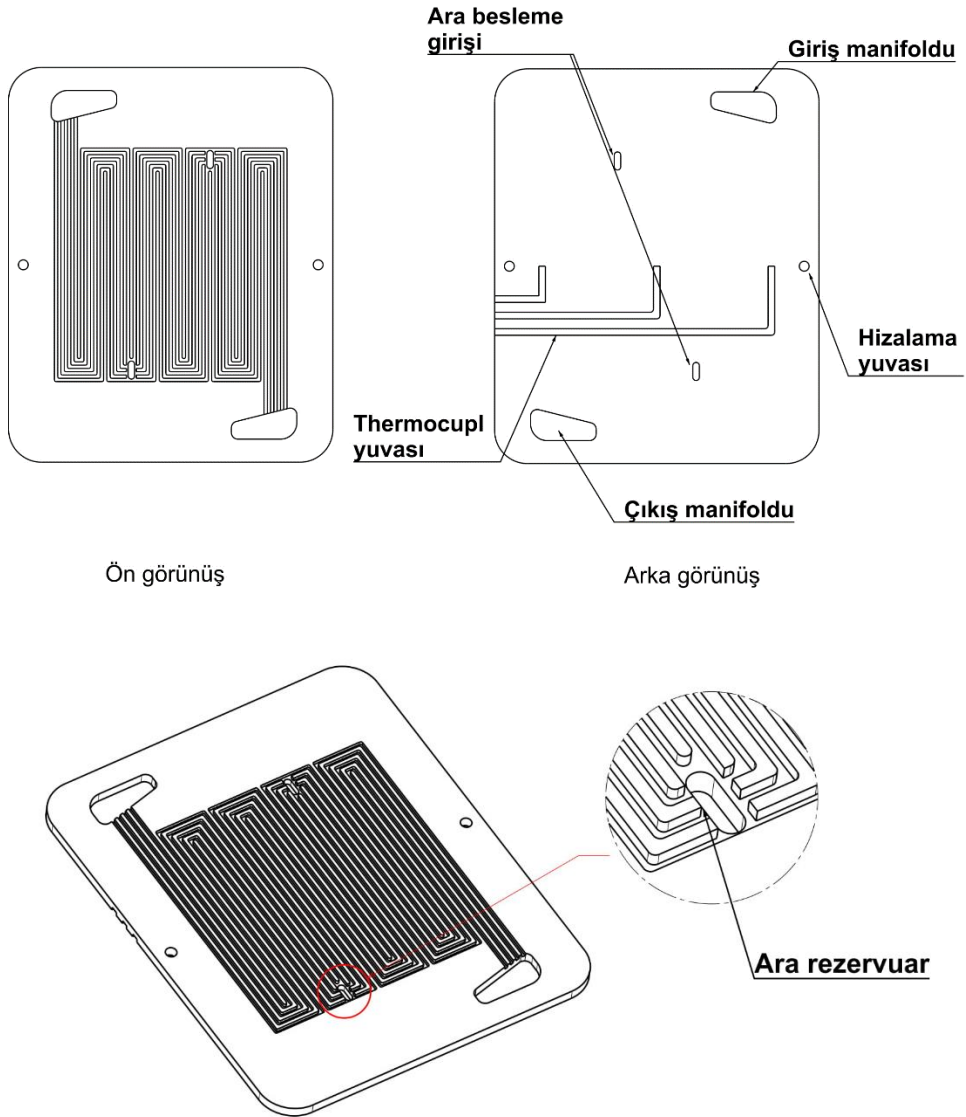
İnsan dolaşım sistemi, birbirine zincirleme olarak bağlı çok sayıda mekanizma ile yaşamsal fonksiyonları yerine getirmektedir. Dolaşım sistemi yaşamsal fonksiyonları yerine getirme işlevlerinin dayandığı en temel ilke vücuttaki kan akımının doku ihtiyaçlarına göre belirlenmesi ilkesidir. Vücuttaki kan akımının doku ihtiyacına göre belirlenmesi ilkesi; mikro damarlar ve doku ara yüzeyindeki reseptörlerle dokunun oksijen ve besin ihtiyacının belirlenmesi ve dokunun ihtiyacı ölçüsünde beslenmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bunun nedeni kalbin tüm dokulara eş zamanlı olarak aynı oranda debi artışı sağlayamayacak olmasıdır. Örneğin dokuların kan akımı ihtiyacı efor durumunda (vücut koşma veya spor gibi aktivite halindeyken) istirahat durumuna göre 20-30 kat olabilmektedir. Fakat kalp debisi istirahat durumundakinin yalnızca 4-7 katına kadar yükselebilmektedir. Bu noktada doku içindeki damarlar ihtiyacın az olduğu yerde azalıp ihtiyacın fazla olduğu yerde genişleyerek kanın ihtiyaç duyulan bölgeye lokal olarak yönlendirilmesi sağlanmaktadır (Guyton, A.C.; Hall 2011). Kanın ihtiyaca göre yönlendirilmesi şeklinde ortaya çıkan refleks, yakıt pillerinde giriş manifolduna yakın

kanal kesitinde aşırı yüksek reaksiyon aktivitesi çıkışa yakın kanal kesitinde ise reaktant yetersizliği nedeni ile konsantrasyon kayıplarının görülmesi durumu ortadan kaldırmak için kullanılabilir bir yaklaşımdır.

Tasarım detaylarının belirlenmesi için temel dolaşım ilkesinin yüksek rakım hipoksisi refleksleri ile birlikte ele alınması faydalı olacaktır. Yüksek rakımda atmosferdeki oksijen kısmi basıncı azalmakta olup; özellikle 2500 m'den daha yüksek rakımda oksijenin kana geçişi kısıtlanarak damar içi oksijen saturasyonu (konsantrasyon) belirgin ölçüde düşmektedir (Moore et al. 2011, Naeije 2010). Hipoksi durumunda vücudun erken aşamadaki adaptasyonu, kalbin pompalama hacmini artırmadan atım sayısını yükselterek dokulara pompalanan kan miktarını artırmaktır. Buna karşın erken safhada vücuttaki toplam kan kütlesi ve ortalama damar içi basınç değişmeyip uzun vadede kademeli olarak artmaktadır (Y. Liu et al. 2014). Öte yandan hipoksidede serebrovasküler sistem (dolaşım sisteminin beyin dokusunu besleyen kısmı) damarları, kandaki oksijenin 40-45 mmHg'nin altına düşmesiyle genişleyerek hayati olmayan uzak dokulardaki kanın da beyne gönderilmesi sayesinde beyin kanlanmasını %40 oranında artırmaktadır (Lucas et al. 2011). Hipoksi refleksinin dolaşım sisteminin farklı bölümlerindeki cevabından anlaşılacağı gibi kanın ihtiyaç duyulan bölgelere ihtiyaçla orantılı olarak dağıtılması mekanizması daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Hipoksidede özellikle kalbin kan debisini artırmasına rağmen; serebrovasküler sistem damarlarının genişleyerek basıncın aşırı artışı artmasının önüne geçilmiştir. Aşırı basınç artışının beyin dokusu özelinde sinir deformasyonuna yol açma potansiyeli bulunmasına benzer şekilde; yakıt pilinde de membran üzerinden kısa devre reaktant akışlarının oluşması ve hızlı reaksiyon bölgeleri ortaya çıkararak dengesiz sıcaklık artışı oluşmasına neden olma potansiyeli bulunmaktadır.

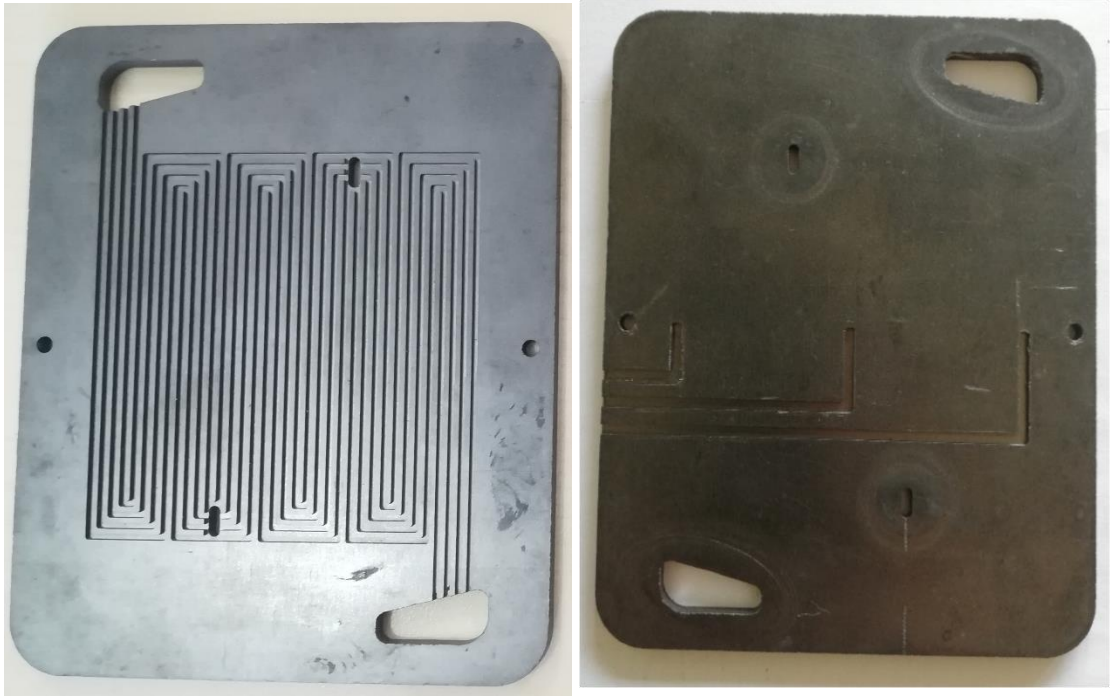
Ara beslemeli dört geçişli serpantin akış alanı kardiyovasküler sistem refleksleri dikkate alınarak geliştirilmiş ilk biyo benzeşimli akış alanı modelidir. Şekil 3.2'de ön, arka, perspektif ve ara besleme rezervuar detay görünüşlerinde görüldüğü gibi ara beslemeli akış alanı; akış kanallarını toplam akış uzunluğunun 1/3 ve 2/3'lük bölümlerinde birer rezervuar içine toplayıp tekrar aynı sayıda kanala bölen iki adet rezervuara sahiptir. Ara rezervuarlar üzerinde sisteme ek reaktant girişi yapılmasını sağlayacak besleme portları bulunmaktadır. Yakıt pili kanalları kardiyovasküler sistem damarları gibi anlık

olarak kesit değişimi yapma yeteneğine sahip olmadığı için; rekatant akışını bölmek amacıyla tasarımda kanal uzunluğu boyunca ek reaktant girişleri planlanmıştır. Pile gönderilmesi planlanan toplam rekatant miktarının tek bir girişten beslenmesi, giriş manifolduna yakın bölgede yüksek basınç merkezi oluşmasına yol açmaktadır. Reaktantlar akış uzunluğu boyunca tüketildiği için çıkışa doğru kanal içi reaktant basıncı düşmektedir. Düşen reaktant basıncı konsantrasyon kayıpları oluşturmanın yanında; kanal içinde oluşabilecek su moleküllerinin kanal dışına sürülmesi için gereken itici gücün kaybolmasına neden olmaktadır. Ara besleme yaklaşımı ile reaktantların farklı noktalardan beslenmesi akıntı halinde oluşan suyun tahliyesini kolaylaştırmak amacıyla da benimsenmiştir.



Şekil 3.2. Ara beslemeli akış alanına sahip bipolar plaka tasarımı

Bipolar plaka termokupl kabloları için yer sağlamak amacıyla 3 mm kalınlığında seçilmiştir. Kanal genişliğinin derinliğe oranı literatürde serpantin akış alanları için yaygın olan 1:1'dir. Ayrıca omuz çıkıntısı genişliği yine kanal genişliği ile aynı ölçüdedir. Kanal genişliği, derinliği ve omuz genişliği ölçüleri 1 mm'dir. Tasarımı yapılan akış alanında kanal geçiş sayısı dördür. Kanal sayısının dördü seçilmesinin nedeni, ilgili akış alanının geniş aktif yüzey alanına sahip pillere uygulanması aşamasında işlevini daha düşük basınç kaybıyla gerçekleştirebilmesi içindir. Plakanın arka yüzeyinde pil içi sıcaklığı membrana en yakın mesafeden ölçebilmek için termokupl kanalları açılmıştır. Testler sırasında iç sıcaklığın akış uzunluğunun ilk 1/3, 1/2 ve 2/3 lük bölümlerinden üç ayrı ölçüm alınması sağlanmıştır. Böylece çevre sıcaklığını pil sıcaklığı olarak kabul etmek yerine pilin membrana en yakın noktasındaki sıcaklıklar ölçülerek daha gerçekçi değerlerle işlem yapılması sağlanmıştır. Giriş manifolduna ek olarak iki ayrı ara besleme portuna sahip tasarımda ana girişten ve ara besleme portlarından hangi oranda reaktant besleneceği deneyler ile optimize edilerek en verimli debi oranları belirlenmiştir. Karbon polimer kompozit malzemeden imal edilmiş ara beslemeli akış alanına sahip bipolar plaka Şekil 3.3'te verilmiştir.

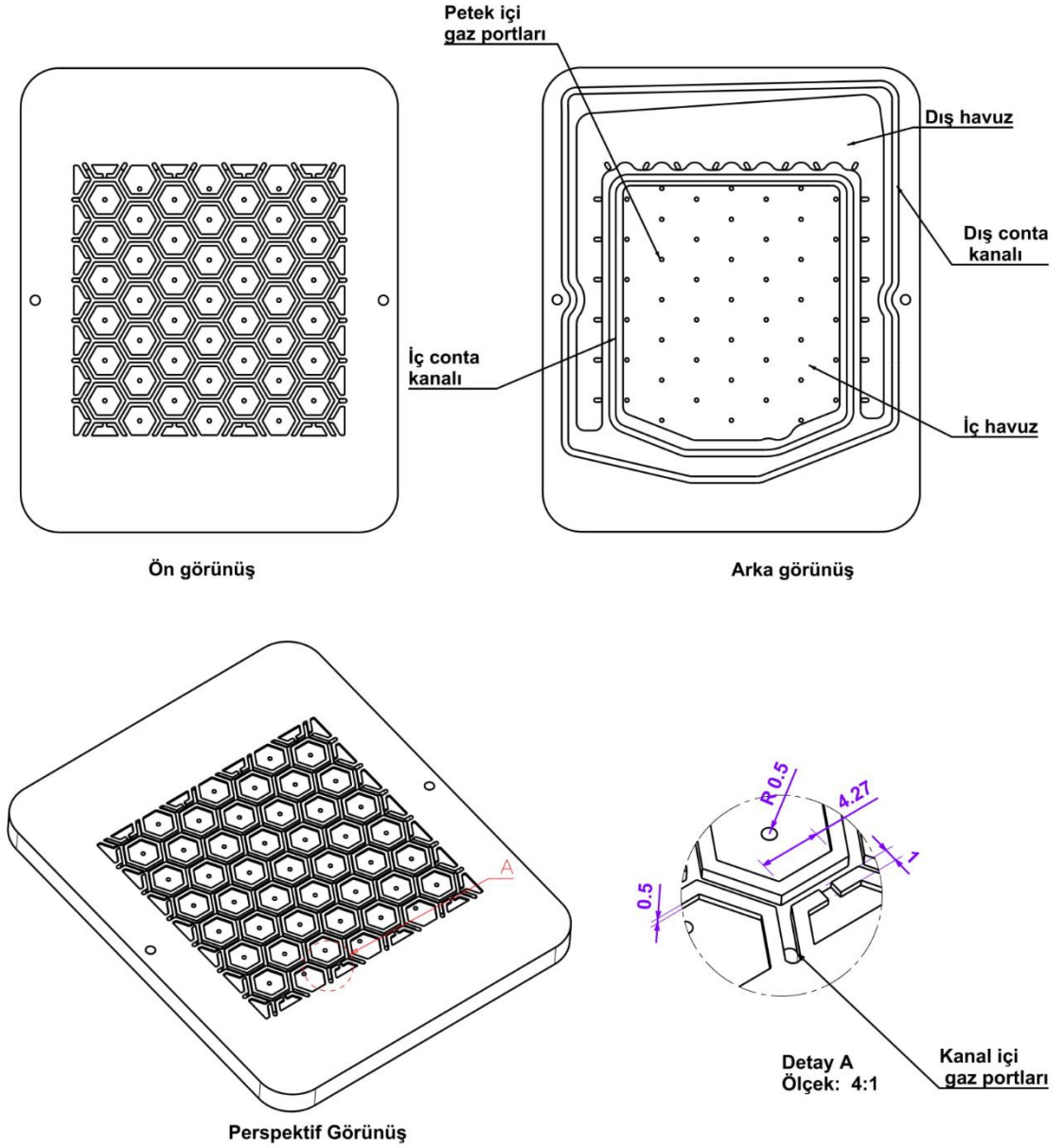


Şekil 3.3. Ara beslemeli karbon polimer kompozit bipolar plaka

3.1.2. Bal peteği akış alanı tasarımı

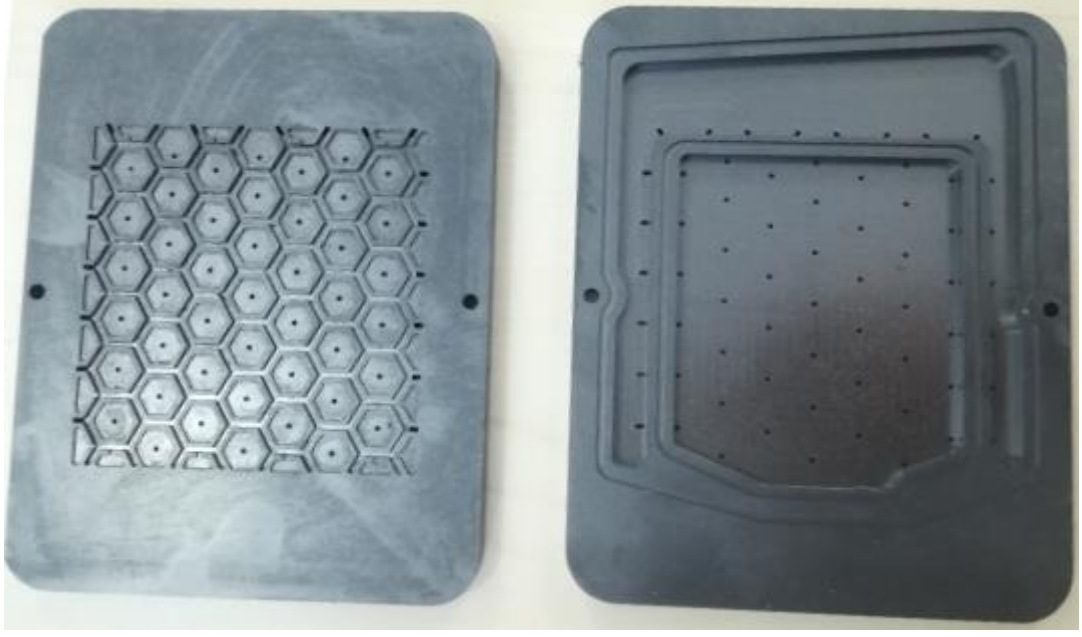
İdealleştirilmiş geometrisi eş kenar altıgen olarak bilinen bal peteği yapısı günümüzde mimari, malzeme bilimi ve tabakalı kompozitler gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ağırlıklı olarak malzemelerin mekaniğinde kullanılan bal peteği formunun özellikleri ile ilgili ilk tespitler 1800'l yıllarda yapılmıştır. Bal peteği şeklinin diğer çokgenlere göre yüzey alanı/kenar uzunluğu oranı en yüksek olan geometrik şekil olduğu bildirilmiştir (VARRO et al. 1929). Bu özelliğin arılara daha az balmumu salgısı kullanarak daha geniş depolama hacmi sağladığı düşünülmektedir (Darwin 1859). Bal peteği yapısının, akış alanı oluşturmak için biyo benzeşim kökeni olarak seçilmesinin nedeni yüzey alanı/evre uzunluğu oranının büyük olmasıdır. Geniş yüzey alanı reaktantı dağıtacak altıgen havuzlar şeklinde planlanarak aktif alanla reaktant arsında daha geniş bir doğrudan temas yüzeyi elde edilmesi için kullanılmıştır.

Bal peteği akış alanları şekil 3.4'te n görünüşte verildiği gibi; reaktant gazların aktif yüzey boyunca homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlayacak, 0.5 mm derinliğinde eş kenar altıgen formda havuzlara sahiptir. Altıgen havuzlar, merkezinden 1 mm çapındaki portlarla plakanın arka yüzündeki i havuza bağlanmaktadır. İ havuz, reaktantları rezerve olarak tutmakta olup; plaka n yüzündeki altıgen havuzlarda reaktant tükendiğinde plaka arkasındaki havuzlardan plaka n yüzüne beslenmektedir. Bu tasarım ile reaktantların aktif yüzeye ulaşmadan önce lokal kayıplar yada akış yolu boyunca tktlmeleri gibi kayıplar yaşanmaksızın tüm yüzeye eşit bir şekilde iletilmesi sağlanmıştır. Plaka n yüzündeki altıgen havuzlarla kanallar arasında plaka üzerinde doğrudan bir bağlantı bulunmamaktadır. Reaktantların altıgen havuzlarla kanallar arasındaki geçişi sadece GDT üzerinden mümkündür. Kanallara ulaşan akışkanlar plaka kenarlarına dizilmiş olan kanal içi gaz portlarından plaka arka yüzündeki dış havuza geçmektedir. Bu şekilde pil performansını artıran omuz altı konveksiyon mekanizmasının güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Kanal derinliği ve genişliği 1 mm'dir.



Şekil 3.4. Bal peteği akış alanına sahip bipolar plaka teknik çizimleri

Tasarımda altıgen kanalların dizilimi her kenarın komşuluğunda yine bir altıgen havuz olacak şekilde radyal formdadır. Bu dizilim şekli arı kovanlarındaki bal peteği dizilimi ile aynı olacak şekilde programlanmıştır. Kanal derinlikleri 1 mm ve altıgen formlu havuzlar ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Altıgen havuzların kanallara göre saha sığ imal edilmesinin amacı plakaların mukavemetini korumasının yanında reaktantların aktif yüzeye daha hızlı bir şekilde intikal etmesini sağlamaktır. Bal peteği akış alanlı karbon-polimer kompozit bipolar plaka Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Karbon kompozit bal peteği akış alanı

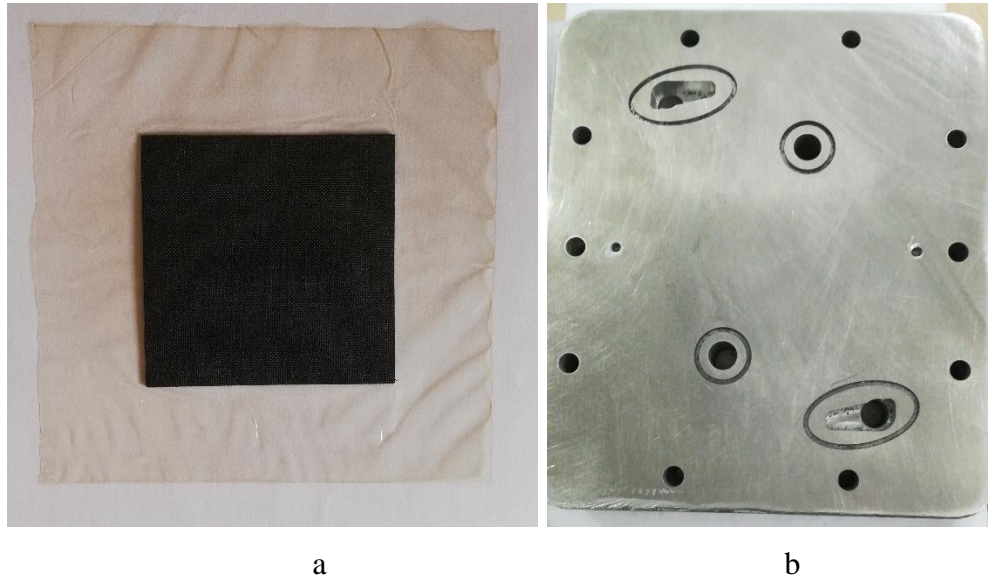
4.2. Malzeme Seçimi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Akış alanlarının testlerinde kullanılmak üzere iki tipte akım toplama plakası, bir çift üniversal destek plakası imal edilmiştir. Akım toplama plakaları 0.8 mm kalınlığında yüksek saflıkta bakır levhadan işlenerek elde edilmiştir. Akım toplama plakaları Şekil 3.6 da verilmiştir.



Şekil 3.6. Akım toplama plakaları

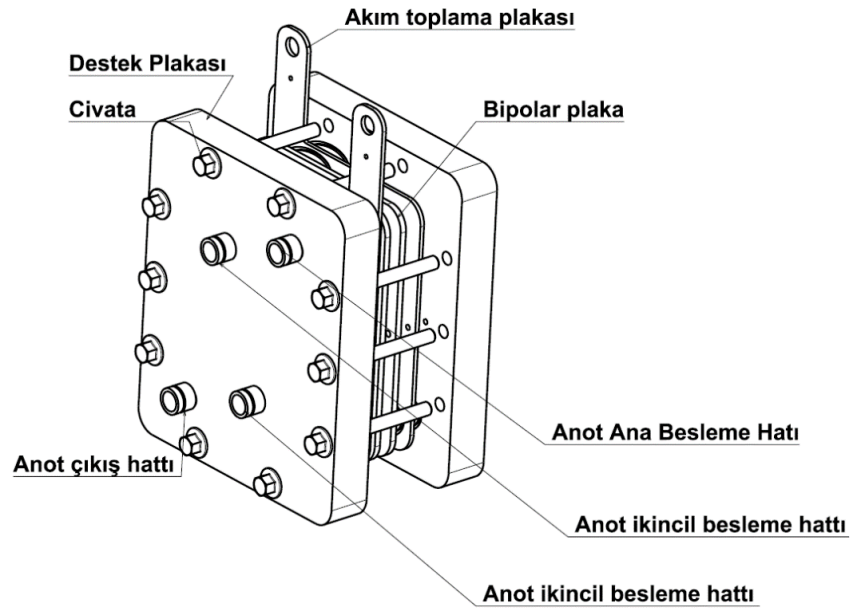
Deneylerde membran elektrot grubu olarak 27.5 µm kalınlığında Nafion XL membran ve 410µm kalınlığında WS1005 karbon kumaş hidroforik gaz dağıtım tabakası kullanılmıştır. Elektrotların anot ve katot tarafındaki platinyum yükleme miktarı 0.5 mg/cm²dir. Şekil 3.7a'da verilen membran elektrot grubu Aktif alan ölçüleri 7.1cmx7.1cm'dir. Membran ve elektrot grubu sıcak pres altında basınca maruz bırakılarak bir araya getirildiği için aktivasyon işlemine tabi tutulmuştur. Membranın nemlendirilmesi için suya yatırma yöntemi de uygulanmakta olup; bu yöntem, katmanların delaminasyonuna yol açtığı için tercih edilmemiştir. Aktivasyon için üretici tarafından belirlenen reçetedeki tekrarlı yükleme adımları, pil gerilim değerinin değişmediği en yüksek değere kadar tekrarlanmıştır.



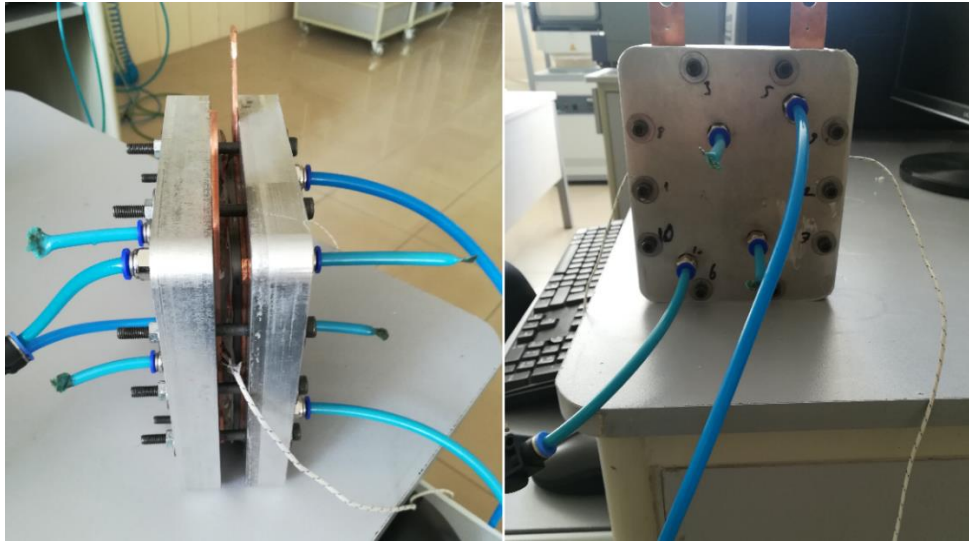
Şekil 3.7. Membran elektrot bileşeni (a) ve destek plakası (b)

Destek plakası, membran elektrot bileşiminin contalarla birlikte bipolar plakalar arasında sıkıştırılması ve akım toplama plakalarının BPP ile temas halinde tutulması için kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan destek plakası Şekil 3.7 b'de görüldüğü gibi 25 mm kalınlığında A1050 Alüminyum malzemedden hazırlanmıştır. Destek plakası ile akım toplama plakaları arasındaki sızdırmazlık, gaz bağlantı kanalları çevresine yerleştirilen kauçuk oringlerle sağlanmıştır. Destek plakası ve akım toplama plakası arasında elektrik akımı geçişini keserek pilin kısa devre olmasının önlemek amacıyla; destek plakalarının iç yüzeyi şeffaf poliüretan filmle kaplanmıştır. Ayrıca yakıt pilinin bir araya getirilmesi için plaka kenarlarında 10 adet M10 civata kanalı hazırlanmıştır. Destek plakası

geleneksel modelden farklı olarak birden fazla girişe sahiptir. Bu sayede destek plakaları ara beslemeli, bal peteği ve standart dört kanallı serpantin akış alanı için ortak kullanıma sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bipolar plakalar Tübitak MAM tarafından üretilen 3 mm ve 6 mm kalınlığındaki karbon-polimer kompozit ticari levhalardan imal edilmiştir. Deneilerin yapıldığı tek hücreli PEM yakıt pilinin montaj tarifini gösteren üç boyutlu bilgisayar çizimi Şekil 3.8 a’da verilmiştir. Ayrıca yakıt pilinin imal edilerek montajlanmış hali Şekil 3.8b’de görülmektedir.



a

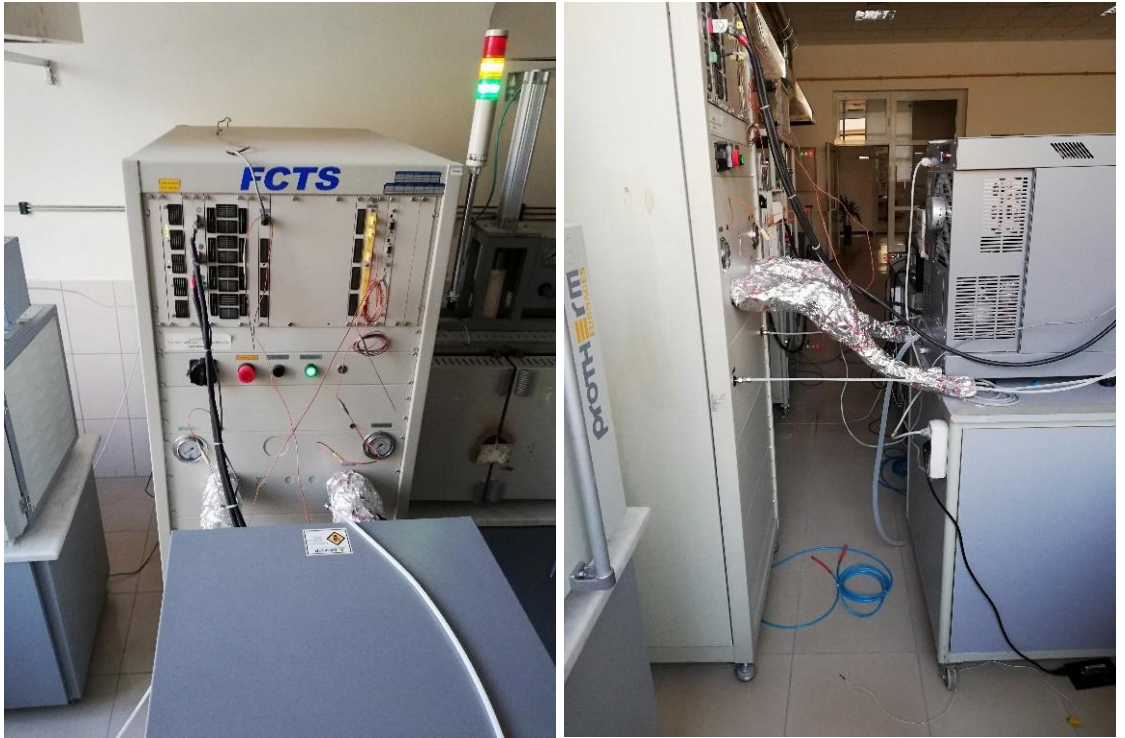


b

Şekil 3.8. Tek hücreli yakıt pili montaj modeli (a) ve fiziksel numune (b)

4.3. Deney Düzenegi, Hazırlık ve Ölçüm Prosedürü

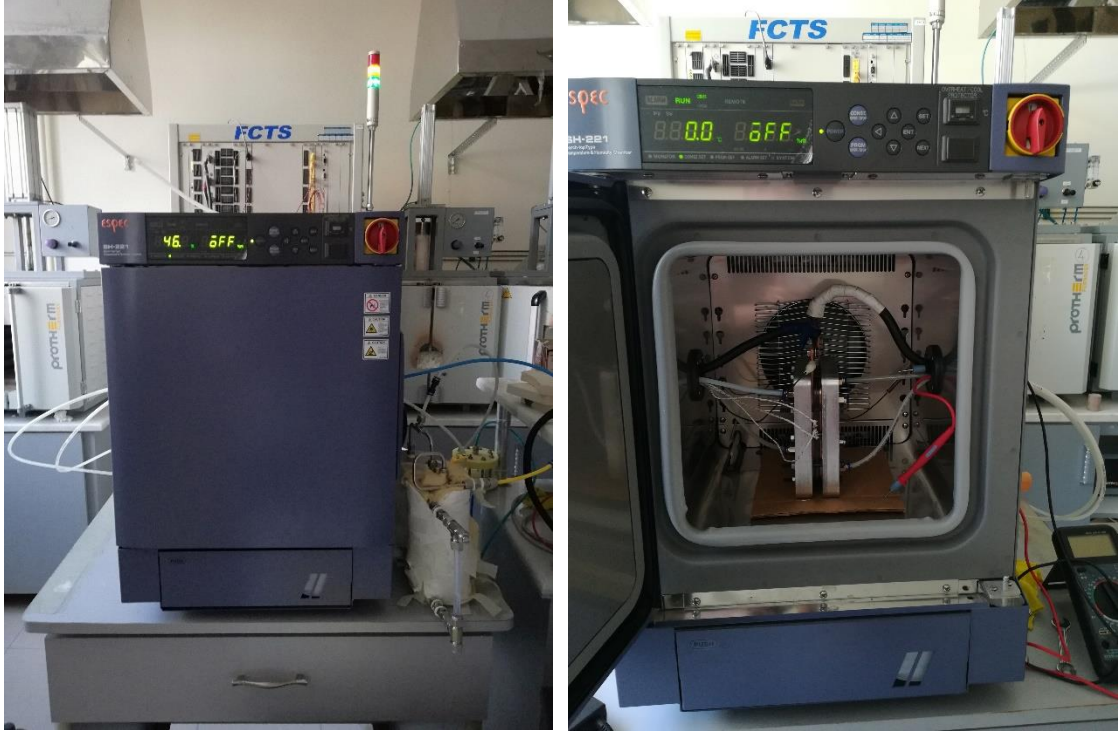
Yeni biyo benzeşimli akış alanlarına sahip deney numunelerinin testi için Şekil 3.9’da görülen Arbin marka yakıt pili test istasyonu kullanılmıştır. Test istasyonu, %99 saflıkta hidrojen tankına v azot tankına bağlı olup; test numunesinin anot tarafını hidrojen gazıyla beslemektedir. Katot tarafı test istasyonunun laboratuvar merkezi basınçlı hava hattından aldığı havayı, ayar değerlerine koşullandırmasından sonra beslemektedir. Azot gazı testler arasında geçişler yapılırken pilin varsa su akıntısı veya yabancı gaz etkilerinden kurtarılarak; her bir testin eş durumunda başlanmasında kullanılmaktadır. Elektronik yük ünitesine sahip olan test ünitesi, akım-gerilim eğrilerini potansiyostatik (gerilim bağlı) veya galvanostatik (gerilim bağlı) olarak elde edebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında deneyler potansiyostatik olarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan test istasyonu bilgisayar kontrollü olup; debi kontrolü, nemlendirme sıcaklığı kontrolü, akım gerilim kontrolü yüksek hassasiyetle gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.9 Arbin yakıt pili test istasyonu

Yakıt pili numunesini test edileceği sıcaklığa getirmek ve test sırasında pili istenen sıcaklıkta sabit tutmak için; hem ısıtma hem de soğutma özelliği bulunan Espec SH-221 marka iklimlendirme kabini kullanılmıştır. İklimlendirme kabini ısı pompalı olup, kabin

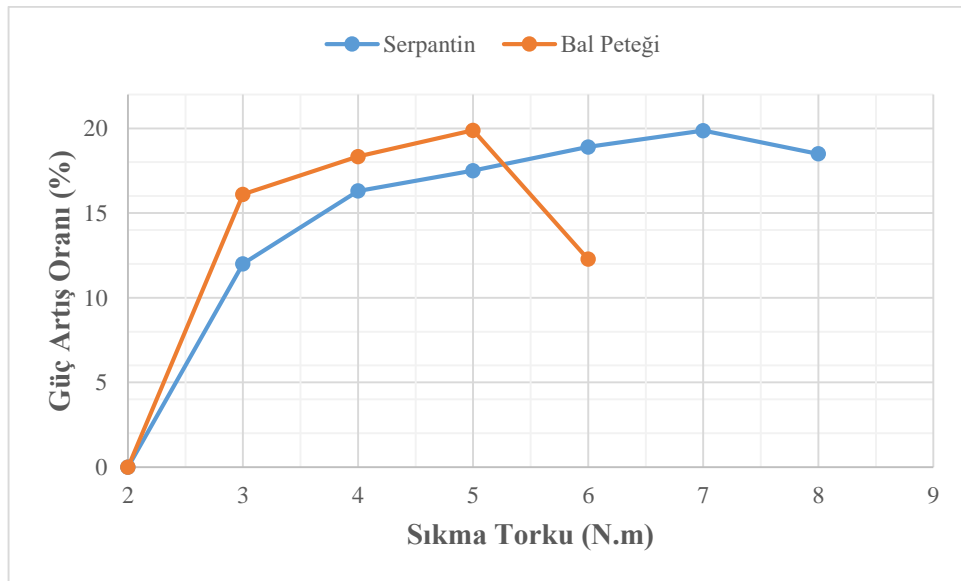
içi sıcaklığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklara ayarlanabilmektedir. Sıcaklık koşullandırmasının yanında iklimlendirme kabini ortam nemini de istenen değere hazırlama özelliğine sahiptir. Fakat bu çalışma kapsamında testleri yapılan yakıt pili açık katotlu bir tasarım olmadığı için; nemlendirme özelliği kullanılmamıştır. Test numunesi Şekil 3.10 a’da görülen iklimlendirme kabinin içine Şekil 3.10 b’de görüldüğü gibi yerleştirilerek gaz ve elektriksel bağlantıları yapılmıştır.



Şekil 3.10. Espec SH-221 iklimlendirme kabini (a) ve test numunesinin kabin içine yerleşimi (b)

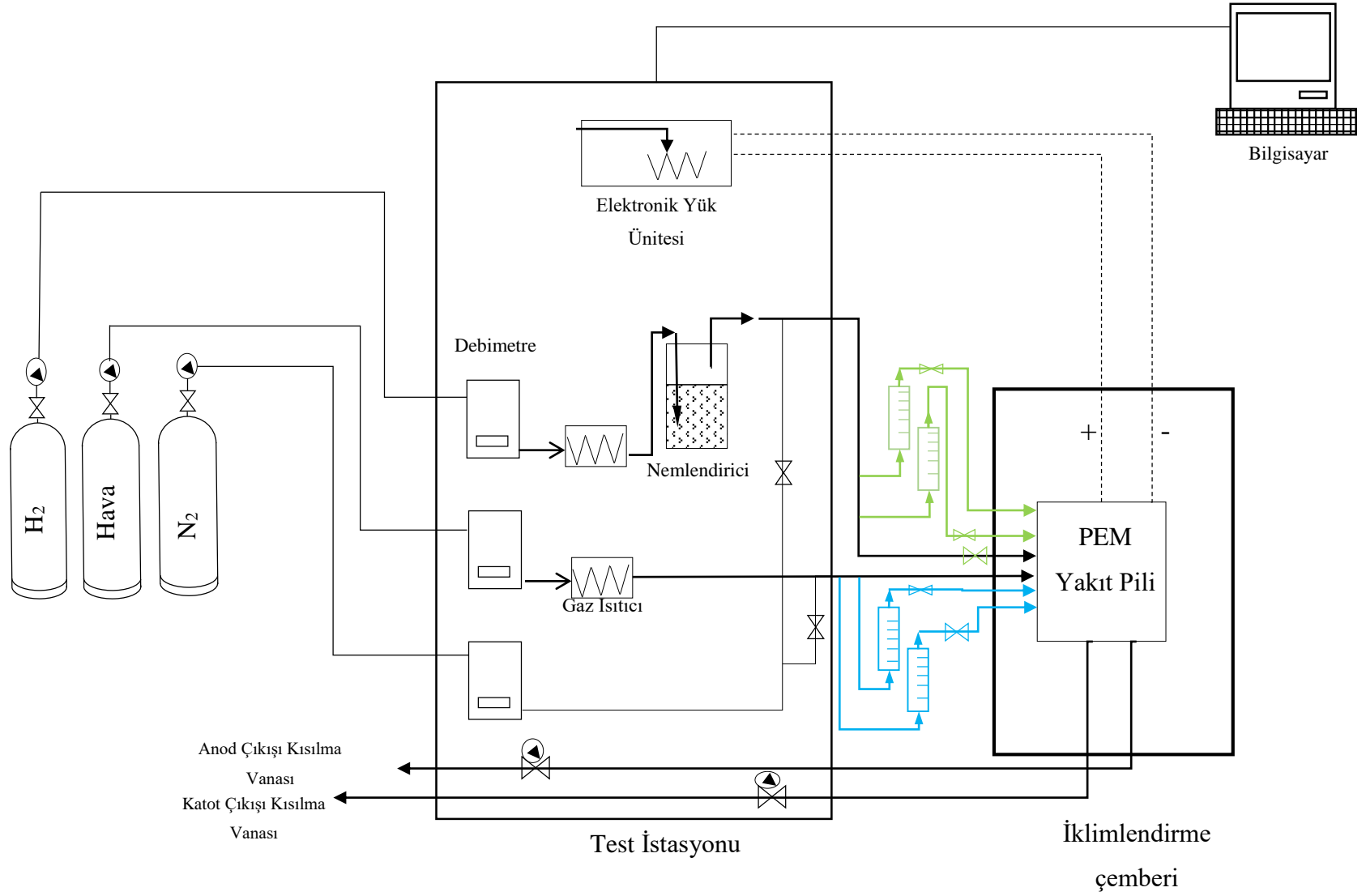
Testlere başlamadan önce Arbin test istasyonuna gaz girişini sağlayan vanalar açılarak sisteme gaz geçişi sağlanmıştır. Test istasyonunda reaktant nemlendirmesi için distile su tankı kontrol edilerek gerekiyorsa takviye yapılır. Nemlendirici sıcaklığı, reaktant sıcaklığı ve işletme basınçlarının ayar değerlerine ulaşmasına kadar sistemin denge haline gelmesi beklenir. Bu süre yaklaşık olarak 35 dakikadır. Diğer yandan iklimlendirme kabini içindeki test numunesinin iç katmanlarının sıcaklığının test matrisinde belirlenen değere ulaşması sağlanır. İklimlendirme kabinindeki numunenin istenen koşullara ulaşması, ayar sıcaklığına bağlı olarak 38 dakika ile 84 dakika arasında değişmektedir.

Yakıt pili numunesini bir araya getirirken uygulanan sıkma torku hem omuz çıkıntılarının GDT tabakasına temas etmesini ve akım toplanmasını sağlamak hem de contalar ve katmanlar arasındaki teması kuvvetlendirerek gaz sızdırmazlığını garantilemek açısından öneme sahip bir parametredir. Buna karşın sıkma torkunun fazla uygulanması, GDT tabakasının daha düşük bir kalınlığa zorlanarak gözenekliliğinin azalması ve tabakalar arasında gaz geçişinin kısıtlanmasına yol açabilmektedir. Test numunelerinin deneye hazırlanması sırasında pil bileşenlerini bir araya getirmek için uygulanan sıkma torku her farklı akış alanına sahip test numuneleri için deneysel olarak belirlenmiştir. Sıkma torku belirlenirken pil numunesinin sızdırmazlığı ve güç çıkışı parametre olarak kullanılmıştır. Tüm pil numunelerinde sızdırmazlığın 2 N.m tork ve üzerinde sağlandığı görülmüştür. Pillerin sıkma torkuna karşı gösterdikleri performans çıktısı 3 Atm basınç ve 45°C pil sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tork artışı her ölçümde 1 N.m olarak uygulanmıştır. Serpantin ve ara beslemeli akış alanlarına sahip numunelerde güç çıkışının 7 N.m torka kadar artış gösterirken 8 N.m tork değerinde azaldığı belirlenmiştir. Serpantin ve ara beslemeli akış alanında sıkma torku 7 N.m olarak uygulanmıştır. Bal peteği akış alanında güç çıkışının 5 N.m tork değerine kadar artarken 6 N.m torkta düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle sıkma torku bal peteği akış alanına sahip numune testlerinde 5 N.m olarak uygulanmıştır. Bal peteği ve serpantin akış alanına sahip yakıt pillerinin güç çıkışlarının torkla değişim oranı grafiği Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Serpantin ve Bal Peteği akış alanları için güç artış oranı ve sıkma torku eğrileri

Gerilim – akım eğrilerinin çıkarılması işlemi, test istasyonu içindeki elektronik yük ünitesi tarafından gerilim değerleri değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. Gerilim değerleri ortalama olarak 0.02 V basamaklar halinde değiştirilmekte olup; her bir gerilim değişiminden sonra 15 ila 30 saniye aralığında beklenmektedir. Her bir gerilim değişimi arasındaki bekleme süresi 15 saniye olarak ayarlanmış olsa da; gerilim değişimi sonunda akım değerinin stabil hale gelme süresi ayar değerini aştığı zaman, yazılım tarafından bekleme süresi uzatılmaktadır. Benzer şekilde; aktivasyon kayıplarının baskın olduğu açık devre gerilimine yakın gerilim değerlerinde (Açık devre geriliminin yaklaşık 0.1 volt uzağına kadar) gerilim değiştirme basamakları yazılım tarafından daha da küçültülmüştür. Aktivasyon kaybı baskın bölgede gerilim değiştirme basamaklarının küçültülmesi, ilgili bölgenin grafikte daha akıcı ve belirgin bir görünüme kavuşmasını sağlamıştır. Literatürde yakıt pili test prosedürü, sıklıkla gerilim değişim basamağı 0.1 volt ve bekleme süresi 5 dakika olarak uygulanmıştır. Buna karşın; bu tez çalışması kapsamında uygulanan test prosedüründe gerilim değiştirme basmağı 0,01 A/cm² şeklinde daha küçük değişimler halinde uygulandığı için; pilin her geçişten sora dengeye ulaşma süresi kısaltılarak pil stabilitesi artırılmıştır. Deneilerin yapıldığı düzenek şematik olarak Şekil 3.12’de verilmiştir. Şema üzerinde yeşil renkli olarak gösterilen ek hidrojen hatları ile mavi renkte gösterilen ek hava hattı; akışın farklı girişlere yönlendirilmeden önce bölündüğü ara besleme testleri için kullanılmıştır. Dört kanallı serpantin ve bal peteği akış alanı testlerinde yakıt pili, tek girişten beslenmektedir.



Şekil 3.12. Deney düzeneği şematik gösterimi

3.4. Akış Alanlarına Uygulanan Test koşulları ve Deney Matrisleri

Deneysel çalışmalar kapsamında dört kanallı paralel serpantin akış alanı, ara rezervuarlı dört kanallı serpantin akış alanı, biyo benzeşim kriterlerine göre geliştirilen ara beslemeli akış alanı ve bal peteği akış alanları test edilmiştir. Sadece akış alanı değişikliğinden kaynaklanan farkların belirlenebilmesi için tüm numunelerde Çizelge 3.1’de liste halinde verilen bazı bileşenler ve operasyon koşulları sabit tutulmuştur. Deneysel olarak test edilen pillerde aktif yüzey alanı 50 cm² dir. Pil testlerinde katot tarafında nemlendirme uygulanmamıştır. Böylece akış alanı tasarımı yapılan pillerin, katot tarafı nemlendirici içermeyen bir sistemdeki çalışma koşullarının oluşturulması amaçlanmıştır. Yakıt pillerinde işletme basıncının artışı ile pil performansının arttığı teorik olarak bilinmekle beraber; mobil sistem uygulamalarında reaktantların atmosfer basıncının üstündeki basınçlara sıkıştırılması parazit güç tüketimine neden olabileceği için sık tercih edilen ve arzulanan bir işletme yaklaşımı değildir. Öte yandan anot tarafı 70°C ‘de sürekli nemlendirilmiştir. Anot ve katot tarafından beslenen reaktant sıcaklıkları 70°C’ de sabit tutulmuştur. KT’a uygulanan Pt yüklemesi anot ve katot tarafında 0.5 mg/cm² olacak şekilde simetrik uygulanmıştır. Testler sırasında hidrojen gazı debisi 1.2 slpm ve hava debisi 2 slpm olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Deneyslerde ortak kullanılan özellik ve parametreler

Ortak İşletme Parametreleri	Aktif Alan	50 cm ²
	Anot Nemlendirici Sıcaklığı	70°C
	Katot Nemlendirici Sıcaklığı	-
	Anot Reaktant Sıcaklığı	70°C
	Katot Reaktant Sıcaklığı	70°C
	Anot Reaktant Debisi	1.2 slpm
	Katot Reaktant Debisi	2 slpm
	Membran Tipi	Nafion XL
	GDT Tipi	Carbon Kumaş
	Pt yükleme (Anot/Katot simetrik)	0.5 mg/cm ²

3.4.1. Dört kanallı paralel serpantin akış alanı deney matrisi

Dört kanallı paralel serpantin akış alanı üç farklı pil sıcaklık ve üç farklı reaktant basınç değeri için parametrik olarak test edilmiştir. Bu sayede yeni tasarımların performanslarının konumlandırılabilceği bir referans performans skalası elde edilmiştir.

Dört kanallı paralel serpantin akış alanı test edilirken pil sıcaklıkları 20°C, 45°C ve 70°C sıcaklıkları seçilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde pil sıcaklıklarının genellikle ideal çalışma sıcaklığına yakın olacak şekilde 60 ila 80°C arasında seçildiği görülmüştür. Bu tez çalışmasının kapsamında sıvı su akıntısı etkilerinin daha belirgin bir şekilde izlenebilmesi ve taşıtların soğuk iklim koşullarında çalışması sırasında karşılaşılabilecek durumlarla ilgili bir kestirim yapılması yapılabilmesi için 20°C'lik düşük bir sıcaklık kullanılmıştır. Basıncın sıvı su akıntısı ve membran kuruması üzerine etkileri ile ilgili bir referans oluşturulabilmesi için; testler atmosfer basıncının üzerinde üç farklı basınçta gerçekleştirilmiştir. Dört kanallı paralel serpantin akış alanı için yapılan deneysel koşulları gösteren test matrisi Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Dört kanallı paralel serpantin akış alanına sahip model test matrisi

İşletme Basıncı	1 Atm	2 Atm	3 Atm
Pil Sıcaklığı			
20°C	x	x	x
45°C	x	x	x
70°C	x	x	x

3.4.2. Ara rezervuarlı dört kanallı serpantin akış alanı ve ara beslemeli akış alanı deney matrisi

Ara beslemeli serpantin akış alanının ikincil ara besleme noktalarından reaktant beslemesi yapılmadığı hali, ara rezervuarlı akış alanını temsil etmektedir. Ara rezervuarlı akış alanı, geniş aktif yüzey alanının besleyen çok kanallı serpantin akış alanı üzerinde kanallar arasındaki basınç farkını dengelemek için kullanılan bir yöntemdir. Ara besleme işleminden önce ara rezervuarlı akış alanı üzerinde de testler gerçekleştirilmiştir. Yakıt pili sıcaklığı seçilirken; pilde sıvı su akıntısının etkilerinin görüleceği kadar düşük fakat ideal çalışma sıcaklığı yakınlığında bir sıcaklık değeri olarak 45°C belirlenmiştir. Dört kanallı serpantin akış alanı testleri incelendiğinde 45°C'lik çalışma sıcaklığının, su akıntısı ve kuruma arasında her iki etkiyi de temsil eden ortalama bir değeri olduğu görülmüştür. Testler sırasında ters basınç olarak 1 atm uygulanmıştır. Dört kanallı serpantin akış alanı sonuçlarına göre 1 atm basınç değeri sıvı su akıntısı etkilerinin kuruma etkileri ile beraber gözlenmesine olanak tanıdığı için tercih edilmiştir.

Ara beslemeli akış alanında ara besleme bölgelerinde toplam debi, farklı oranlarda bölünerek en verimli reaktant besleme rejimi deneysel olarak optimize edilmiştir. Reaktant besleme oranlarının anot ve katot tarafından simetrik uygulanması, anot tarafında farklı oranlarda ara besleme yapılırken katot tarafında sadece ana girişten reaktant beslenmesi ve katot tarafında farklı oranlarda ara besleme yapılırken anot tarafında sadece ana girişten reaktant beslenmesi olmak üzere üç farklı düzeyde testler yapılmıştır. Uygulanan testler Çizelge 3.3’de verilmiştir. Testler sonucunda elde edilen performans verileri ışığında optimum performans koşulları belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Simetrik ve asimetrik ara besleme debi rejimleri

	Anot Tarafı Besleme Oranları (%)			Katot Tarafı Besleme Oranları (%)		
	1. Giriş	2. Giriş	3. Giriş	1. Giriş	2. Giriş	3. Giriş
Simetrik Besleme	100	0	0	100	0	0
	90	10	0	90	10	0
	80	20	0	80	20	0
	70	30	0	70	30	0
	70	20	10	70	20	10
	60	20	20	60	20	20
	40	30	30	40	30	30
Asimetrik Katot	100	0	0	80	20	0
	100	0	0	70	30	0
	100	0	0	60	20	20
	100	0	0	40	30	30
Asimetrik Anot	80	20	0	100	0	0
	70	30	0	100	0	0
	60	20	20	100	0	0
	40	30	30	100	0	0

3.4.3. Bal peteği akış alanı ve ara beslemeli akış alanı deney matrisi

Bal peteği akış alanına sahip yakıt pili numuneleri 45°C pil sıcaklığı için test edilmiştir. Deney numunesi 1 atm, 2 atm ve 3 atm olmak üzere üç farklı ters basınç kademesinde performans testlerine tabi tutulmuştur. Bal peteği akış alanı, serpantin ve ara beslemeli akış alanı karakterinden farklı olarak, akış alanına giren reaktantların çıkışa kadar kanal içinde seyrederek ulaştığı bir mimariye sahip değildir. Bal peteği akış alanında iç içe

geçişli tip akış alanlarında olduğu gibi; akış alanına giriş yapan reaktantlar, GDT tabakasından geçerek çıkış manifolduna bağlı kanal bölümüne ulaşmakta ve akış alanını terk etmektedir. Bu nedenle akış alanının giriş manifolduna bağlı kanal bölümünde yüksek basınç merkezi oluşurken çıkış manifolduna bağlı kanal bölümünde düşük basınç merkezi oluşmaktadır. Bal peteği akış alanında altıgen formlu havuzlar ile altıgen havuzlar çevresindeki kanalların aktif yüzeyde kapladığı alan birbirinden farklı olduğu için; yüksek basınç merkezini havuz ve kanal tarafı olarak farklı bölümlerde oluşturmak için iki farklı akış düzeni belirlenmiştir. Doğru akım düzeni olarak adlandırılan düzende, altıgen havuzları besleyen plaka arkasındaki iç havuz giriş manifolduna bağlıken; petekler çevresindeki kanalları toplayan dış havuz çıkış portuna bağlıdır. Bu sayede bal peteği şeklindeki daha geniş yüzey alanına sahip bölümde yüksek basınç merkezi oluşturulmuştur. Ters akım düzeninde ise dış havuz giriş manifolduna bağlıken; iç havuz çıkış manifolduna bağlıdır. Bal peteği akış alanına ait test matrisi Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bal peteği akış alanı test matrisi

		Doğru Akım		
İşletme Basıncı Simetrik Anot/Katot		1 Atm	2 Atm	3Atm
		Ters Akım		
İşletme Basıncı Simetrik Anot/Katot		1 Atm	2 Atm	3Atm

3.5. Sayısal Modelin Hazırlanması

PEM yakıt pilli geliştirme çalışmalarının önemli basamaklarından biri yakıt pilinin bilgisayar ortamında oluşturularak sayısal çözümünün yapılmasıdır. Yakıt pili bileşenlerinin maliyetlerinin yüksek olması; sayısal modellemenin, tasarım ve imalat arasında önemli bir basamak olarak konumlandırılmasına neden olmuştur. Yakıt pili performansının bilgisayar ortamında sayısal değerlendirilmesi prosedürü; geometrik modelin oluşturulması, oluşturulan geometrik modelin sonlu büyüklükte hacim elemanlara bölünerek ağ yapısının oluşturulması ve sınır şartlarının belirlenerek çözücü ayarlarının yapılarak çözümü olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Çözümü yapılan yakıt pili modelinin performans çıktıları, kullanılan paket programın sunduğu

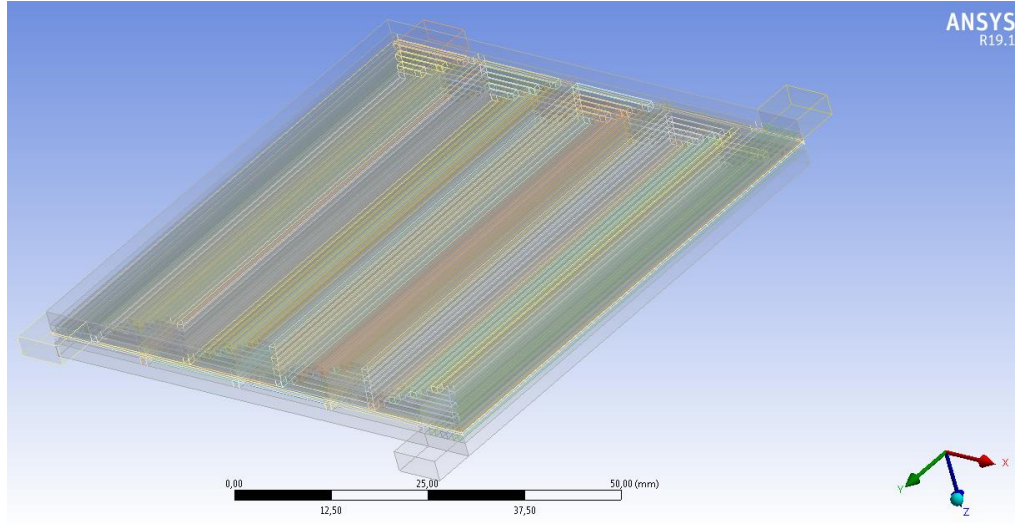
araçlarla incelenerek performans değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında yakıt pili performansının değerlendirilmesi Ansys Fluent programı içinde bir alt modül olarak kullanılan PEM Fuelcell Module ile yapılmıştır. Ana çözücü Fluent olsa da PEM Fuel Cell Module eklentisi; yakıt pili içindeki elektrokimyasal parametrelerin pil içerisindeki akışkan hareketlerinin sonucu olarak ortaya çıkan basınç, hız, reaktant akışı gibi parametrelerin pil elektrokimyasına entegre edilmesi ve elektrokimyasal sonuçlarının hesaplanmasını sağlamıştır. Çözümler iki ayrı iş istasyonu kullanılarak yapılmıştır. İş istasyonlarından biri Dell marka çift işlemcili intel Xeon E5 2643 3.3 Ghz işlemci, 64 GB ECC RAM, 1TB 7200 Rpm harddisk özelliklerine sahiptir. Analizlerde kullanılan diğer bilgisayar Supermiro marka çift işlemcili intel Xeon E5 2630 2.3 Ghz işlemci, 32 GB ECC RAM ve 240 GB SSD harddisk özelliklerine sahiptir.

Bu tez çalışmasında yakıt pilini oluşturan bileşenler Catia V5 programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sayısal çözüm için hazırlanan modelin temelini ise Catia V5 ortamında hazırlanan üç boyutlu geometrik modeller oluşturmuştur. Ansys Workbench içinde bulunan Design Modeller modülü modelleme yapmak için kullanılan bir araç olsa da; üçüncü parti tasarım programlarının sunduğu esnek araçlar, daha pratik ve esnek bir şekilde tasarım yapılmasına olanak tanımaktadır. Ana tasarım Catia V5 ortamında yapılırken modeli sadeleştirmek ve çözüme uygun hale getirmek için yapılan küçük ölçekli düzenlemeler Design Modeller ortamında yapılmıştır. Deneysel olarak kullanılan ve sayısal ortamda performans değerlendirmesi yapılan dört kanallı serpantin, ara beslemeli serpantin ve bal peteği akış alanına sahip yakıt pillerine ait bileşenlerin geometrik özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

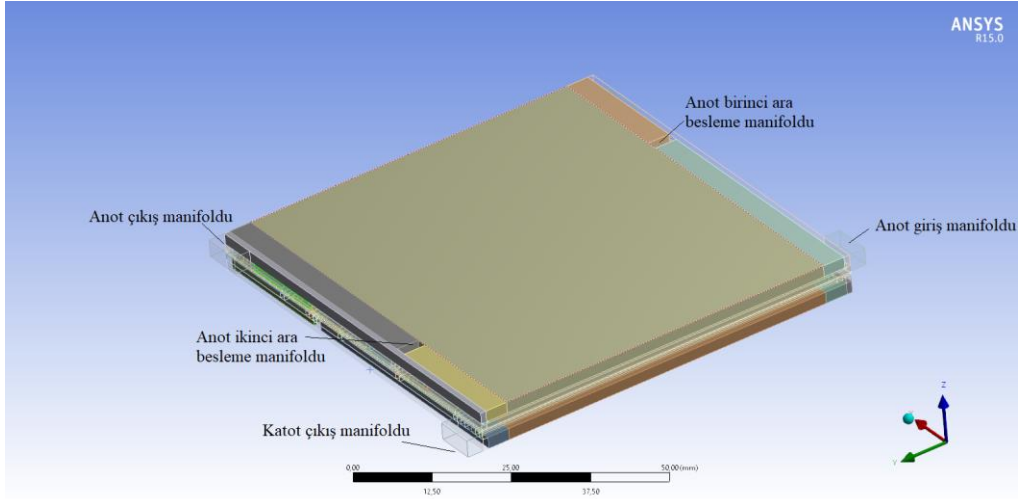
Çizelge 3.5. Yakıt pil modellerinin geometrik özellikleri

Geometrik Parametreler	Akış Alanı Tipine Göre Değerler		
	Serpantin	Ara Beslemeli	Bal Peteği
Aktif Alan	50 cm ²	50 cm ²	50 cm ²
Kanal İzdüşüm Alanı	26.24 cm ²	30.08 cm ²	30.45 cm ²
Omuz İzdüşüm Alanı	24.17	20.33	19.96
Toplam Bipolar Plaka Kalınlığı	3 mm	3 mm	6 mm
Bal Peteği Cep Derinliği	-	-	0.5 mm
Kanal Derinliği	1 mm	1 mm	1 mm
Kanal Genişliği	1 mm	1 mm	1 mm
Omuz Genişliği	1 mm	1 mm	1 mm
GDT Kalınlığı	410 µm	410 µm	410 µm
KT Kalınlığı	10 µm	10 µm	10 µm
Membran Kalınlığı	27.5 µm	27.5 µm	27.5 µm

Sayısal çözümde kullanılan geometriler asıl tasarımdan farklılıklar içermektedir. Asıl tasarımdan farklı olarak sayısal çözümü yapılacak model, bipolar plakaların ve diğer pil katmanlarının sadece aktif yüzey iz düşüm alanı büyüklüğündeki kısmını içermektedir. Amaç çözümde belirleyici olmayan; conta, hizalama deliği ve membran fazlalık açınım uzunluğu gibi bölümleri modelden çıkararak daha az bir sayısal ağ eleman sayısı ile hızlı bir çözüm yapabilmektir. Şekil 3.13 a'da dört kanallı serpantin akış alanına sahip pilin çözüm geometrisi ve Şekil 3.13 b'de ara beslemeli akış alanına sahip pilin opak görünüşü verilmiştir. Ara beslemeli akış alanının modelinde, düzenli ağ yapısı elde etmek için geometrik olarak bölünmüş alanlar görülmektedir. Gerçek üçboyutlu geometrik modelde giriş ve çıkış manifoldları eğrisel kenarlara sahip bir geometri iken; ağ yapısı oluşturulurken düzensiz eleman şekil ve geçişlerine neden olacağı için manifoldlar sadeleştirilerek kare prizma şekline getirilmiştir. Bunun yanında pilin mukavemetini artıracak veya imalat sırasında kaçınılmaz olan eğrisel kenar geçişleri silinerek köşeli forma dönüştürülmüştür. Bu kapsamda aslında slot delik formulu ara besleme yuvaları Şekil 3.13 b'de görüldüğü gibi dikdörtgene dönüştürülmüştür. Reaktant giriş ve çıkış bölgeleri ve ara besleme noktaları şekil üzerinde görülmektedir.



a



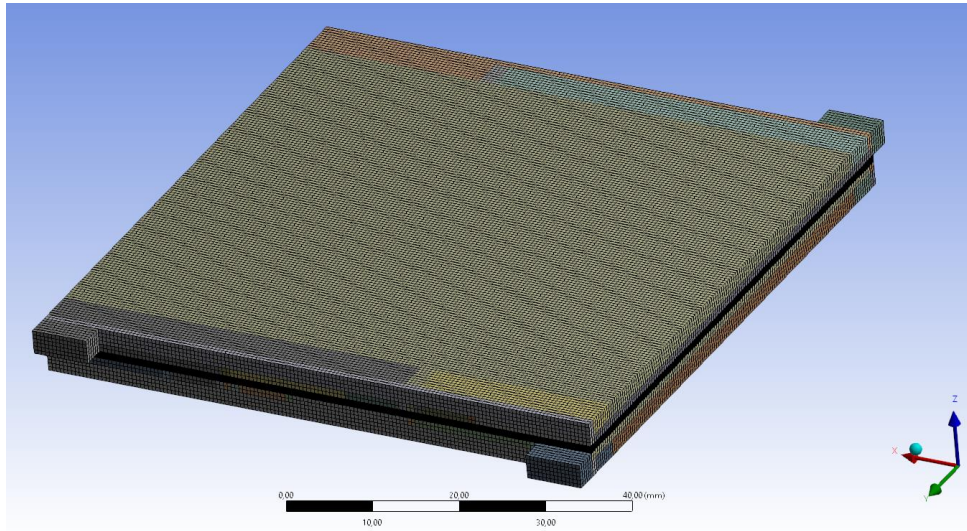
b

Şekil 3.13. Yakıt pili dört geçişli serpantin şeffaf sayısal çözüm geometrisi (a) ve ara beslemeli yakıt pili opak sayısal çözüm geometrisi (b)

3.5.1. Sayısal modelin eleman sayısından bağımsızlaştırılması

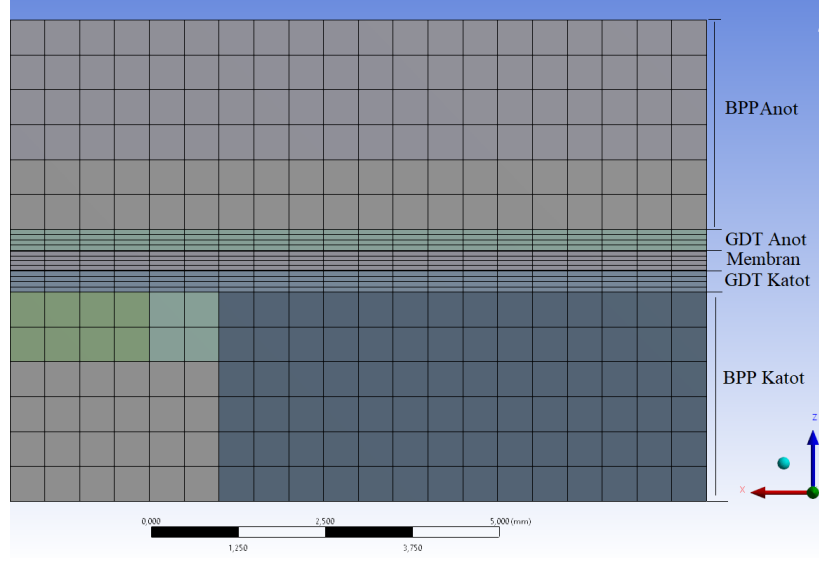
Yakıt pili modelinin sayısal çözümü, modeli oluşturan hacimlerin birim hacim elemanlar oluşturacak şekilde bölünerek; matematiksel denklemlerin, oluşan ağ yapısı üzerinde iteratif olarak çözülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Ağ yapısını oluşturan eleman boyutu ve sayısının belirlenmesi; ağ yapısının modeli temsil edebilirliği, işlem süresi ve sonuç doğruluğu kısıtları altında belirlenmektedir. Eleman boyutunun küçük tutulması, ağ yapısının çözünürlüğünü artırarak modelin aslına daha uygun temsil etmeni sağlamanın yanında hesaplama hatalarının azalmasını sağlamaktadır. Öte yandan artan eleman sayısı

işlem yükünü artırarak hesaplama süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu nedenle ağ yapısını oluşturan eleman boyutu ve sayısı belirlenirken işlem süresi ve çözüme yakınsaklık birlikte dikkate alınarak düzenleme yapılmaktadır. Bu çalışmada sayısal çözümü yapılmakta olan model çok sayıda katman ve farklı mekanizmaların işlediği farklı hacimsel bölümlerden meydana gelmektedir. Eleman sayısı belirlenirken ağ çözünürlüğünün, pili oluşturan katman yüzeylerinin normali doğrultusunda artırılması stratejisi uygulanmıştır. Hacimsel elemanlara bölünerek ağ yapısı oluşturulmuş model Şekil 3.14’te verilmiştir.

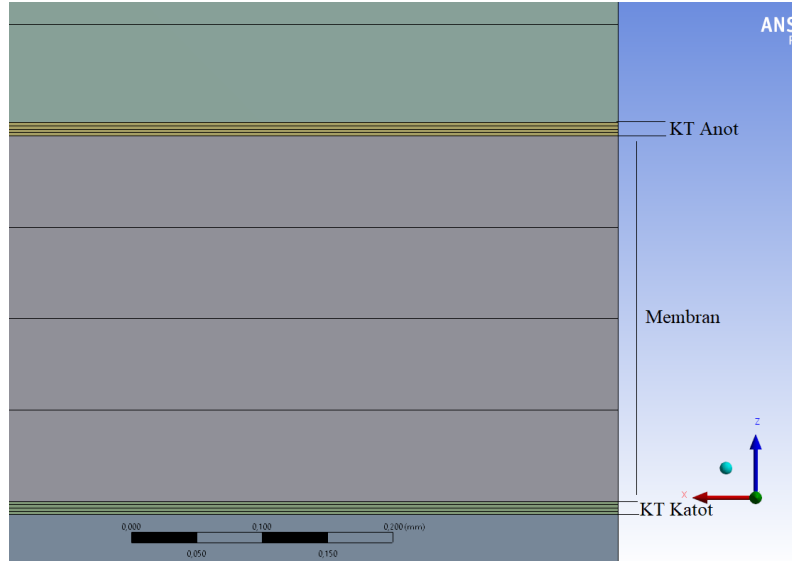


Şekil 3.14. Ağ yapısı oluşturulmuş sayısal pil modeli

Başlangıçta membran, KT ve GDT dahil her bir katman kalınlığı iki birim elemana bölünmüştür. Bu işlem sonunda elde edilen eleman sayısı 647264 dür. Elde edilen ağ yapısı ile 2 Atm basınç, 45°C pil sıcaklığında ve diğer operasyon koşulları önceki bölümde belirtilen ortak operasyon koşulları altında 0.4 volt gerilim değeri için analiz yapılmıştır. Analiz sırasında iki iterasyon arasında geçen süre, akım değeri, hidrojen, oksijen ve su arasındaki hata değerleri kaydedilmiştir. Aynı işlemler üç, dört ve beş ağ katmanlı olarak tekrarlanarak analizlere devam edilmiştir. Membran, KT ve GDT tabakalarının dört katmana bölünmesi ile elde edilmiş ağ yapısı kesitleri Şekil 3.15 a ve b’de verilmiştir.



a



b

Şekil 3.15. Dört katmanlı ağ yapısına sahip sayısal model kesiti

Eleman sayısının artması, işlemci yükünü artırarak, işlem süresinin uzaması ile sonuçlanmıştır. Öte yandan eleman sayısının artması ile akım değerinin sabitlendiği değerler arasındaki fark azalırken reaktant ve ürünler arasındaki hata miktarları da azalmaktadır. En düşük hatanın ve akım değerindeki değişimin, beş katmanlı olarak hazırlanan ve 748084 elemandan oluşan çözümde elde edildiği görülürken; yine en yüksek işlem süresinin de 8 saniye ile yine bu koşulda ortaya çıktığı görülmüştür. Çizelge 3.6'da eleman sayısına karşılık akım değeri, çözüm süresi ve reaktant hataları verilmiştir. Dört katmanlı çözüm ile beş katmanlı çözüm sonuçlarından; akımlar arasındaki farkın

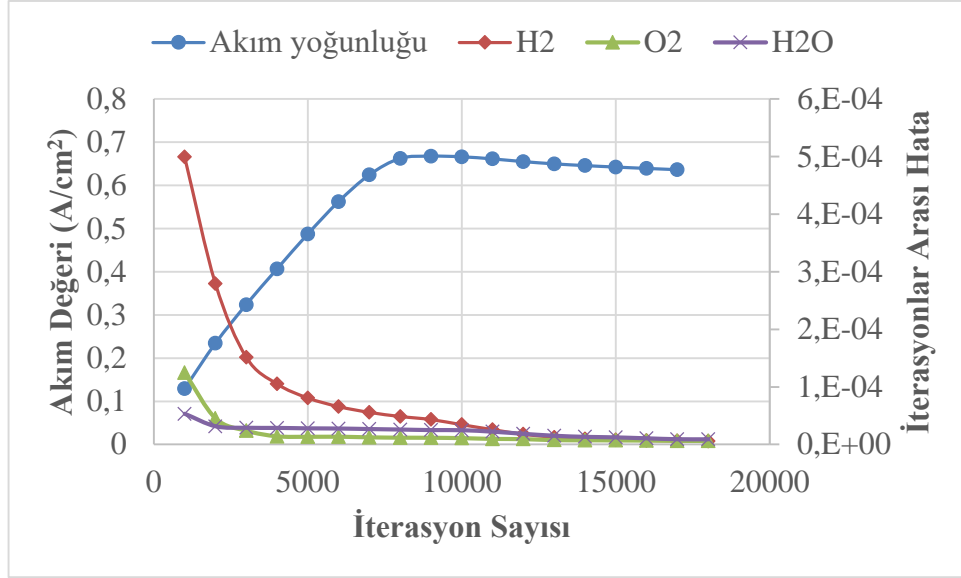
0.02 A, hidrojen hatasının $7.98 \cdot 10^{-6}$ Oksijen hatasının $7.30 \cdot 10^{-6}$ ve su hatasının $1.25 \cdot 10^{-5}$ olduğu görülmüştür. Tabakaların dört katmana bölünmesi ile elde edilen ağ yapısının, işlem doğruluğu ve analiz süresi kısıtları altında kabul edilebilir çözünürlüğü sağladığına karar verilmiştir.

Çizelge 3.6. Ağ eleman sayısına karşılık akım, hata ve süre değerlerinin değişimi

	Eleman Sayısı	Akım Değeri (A)	Reaktant Hataları			İterasyon Süresi (sn)
			H ₂	O ₂	H ₂ O	
2 Katman	445624	0,3087	1,62E-05	9,87E-06	5,67E-05	2
3 Katman	546444	0,6752	2,34E-05	8,02E-06	1,88E-05	3
4 Katman	647264	0,6307	7,98E-06	7,30E-06	1,25E-05	5
5 Katman	748084	0,6107	4,79E-06	6,27E-06	1,05E-05	8

3.5.2. Sayısal modelin iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması

Sayısal hesaplamalarla elde edilecek sonucun iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması işlemi için pilden alınan akım yoğunluğu ve hidrojen, oksijen, su hataları parametre olarak referans alınmıştır. Literatürden edinilen bilgiler ve yapılan analizlerden edinilen deneyimler ışığında; akım yoğunluğu değerinin nihai değere oturmada önce bir süre pozitif hata ile ilerlediği yani akım yoğunluğu çıktısının arttığı anlaşılmıştır. Daha sonra akım yoğunluğu değerinin negatif hataya dönerek nihai değere oturmaya başladığı görülmüştür. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi akım yoğunluğu değerinin iterasyon sayısına göre verildiği grafikte bir tepecikten sonra eğrinin yatay yönelim göstermesi beklenmektedir. Bir tepecik formasyonu ile kendini gösteren pozitif hatadan negatif hataya geçiş sağlandıktan sonra; iterasyonlar arasında akım yoğunluğu değerlerinin değişiminin 0.034 A/cm^2 'nin altına düşmesi, doğruluk seviyesi olarak yeterli kabul edilmiştir. 15000'inci iterasyona gelindiğinde kabul edilebilir fark değerine ulaşılmış olup; işlem zamanının da iktisatlı kullanımı dikkate alınarak çözümlenmelerin 15000 iterasyon basamağında gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Yine aynı grafikte hidrojen, oksijen ve su türlerine ait hata değerlerinin her bir iterasyonla değişimi verilmiş olup; yaklaşık 12000 inci adımda kabul edilebilir hata değerinin altına düşmüş oldukları tespit edilmiştir. Buna karşın akım yoğunluğu değerindeki fark istenen değerin altına düşmediği için; iterasyon sayısının tespitinde akım yoğunluğu değeri belirleyici olmuştur.



Şekil 3.16. Akım yoğunluğu değeri ve H₂, O₂, H₂O hatalarının iterasyon sayısı ile değişimi

3.5.3 Sayısal model çözüm denklemleri ve sayısal model bileşen parametreleri

Ansyst Fluent PEM Fuel Cell Module içinde hesaplamalar; yakıt pili içinde aynı anda gerçekleşen farklı mekanizmalara ait matematik denklemlerin eş zamanlı olarak çözülmesi ile yapılmaktadır. Bunun yanında temel modellere ek olarak sıvı su üretimi ve transferi, gözenekli tabakalarda maddelerin transferi modelleri de çözdürülmektedir.

PEM yakıt pili modülü içinde temelini anot ve katot tarafında gerçekleşen reaksiyonların oluşturduğu elektrokimyasal model, farklı çalışma grupları tarafından geliştirilen modellerin yazılıma entegre edilmesi ile elde edilmiştir (Kulikovsky 1999, Mazumder ve Cole 2003, Um et al. 2000). Üçüncü bölümde detaylı olarak anlatılan yakıt pili elektrokimyasına ait denklemler ve enerji denklemine ek olarak; Denklem 3.1'deki süreklilik ve Denklem 3.2'deki momentum denklemleri çözülmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (3.1)$$

Burada \vec{v} akışkanların hız alan vektörünü, S_m ise kaynak terimi temsil etmektedir.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla v) + S_m \quad (3.2)$$

Buradan μ karışımın viskozitesi, p statik basınç, ρ özgül ağırlık S_m momentum kaynak terimi temsil etmektedir.

PEM yakıt pilinin sayısal modellemesinde kütle ve momentum korunumu denklemlerine ek olarak;

- Enerjinin korunumu
- Türlerin korunumu
- Yükün korunumu

Denklemleri de çözülmektedir. İlgili denklemler; yakıt pili modelini oluşturan BPP, gaz kanalları, GDT, KT ve membranı temsil eden bölümlerden uygun olanlar için çözülmektedir.

Denklem 3.3'de verilen enerjinin korunumu denklemi yakıt pili modelini oluşturan tüm bölümler için çözülmektedir. Reaksiyon sonucu pil içinde oluşan, akışkanlarla taşınan, katmanların sahip olduğu elektriksel direnç nedeni ile oluşan ısı ile beraber pil dış yüzeyinden gerçekleşen ısı geçişi sonucu ortaya çıkan sıcaklık değişimlerinin çözümlenmesinde kullanılmaktadır.

$$(\rho c_p)_{\text{etkin}} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_{\text{eff}} (\mathbf{v} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{\text{etkin}} \nabla T) + S_e \quad (3.3)$$

Burada;

c_p : Karışımın ortalama özgül ısısı, J/kgK

T: Sıcaklık, K

k: Isıl iletkenlik, W/mK

S_c : Enerji kaynak terimi

Denklem 3.4'de verilen türlerin korunumu denklemi, pil içindeki kimyasal bileşenlerin her birinin ayrı ayrı korunumunu ifade etmektedir. Türlerin korunumu denklemleri; bir çoğu gözenekli katmanlardan oluşan yakıt pili modelinde reaktantların gözenekli katmanlar arasındaki geçişi sırasında ortaya çıkan değişimlerin çözümünü de barındırmaktadır.

$$\frac{\partial(\epsilon \rho x_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \epsilon \rho x_i) = \nabla \cdot (\rho D_{i,\text{etkin}} x_i) + S_{s,i} \quad (3.4)$$

Burada;

ϵ : Gözeneklilik

x_i : Türlerin kütleli oranı. i indisi hidrojen, oksijen, su buharı, azot, sıvı su gibi bileşenlerin her birini ifade eder.

$D_{i,etkin}$: Türlerin her biri için gözeneklilik ve bükümlülüğün bir fonksiyonu olarak hesaplanan etkin difüzyon katsayısı

Etkin difüzyon katsayısı Denklem 3.5'teki gibi hesaplanabilir.

$$D_{i,etkin} = D_i \varepsilon^\tau \quad (3.5)$$

Burada;

τ : Bükümlülük

Pil içerisinde elektriksel yükün transferi yük korunum denklemleri ile ifade edilmektedir. Elektriksel yük geçişi Denklem 3.6'da verilen elektriksel yük korunum denklemi ile ifade edilirken; membran üzerinde gerçekleşen iyon geçişi Denklem 3.7'de verilen iyonik yük korunumu denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\nabla \cdot (\kappa_{k,etkin} \nabla E_k) = S_{E,k} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot (\kappa_{m,etkin} \nabla E_m) = S_{E,m} \quad (3.7)$$

Burada;

$\kappa_{k,etkin}$: Katı bileşenin (GDT gibi) elektriksel iletkenliği, S/cm

$\kappa_{m,etkin}$: Elektrolitin (Membran ve katalizör gibi) iyonik iletkenliği, S/cm

E_k : Katı bileşenin potansiyeli, volt

E_m : Elektrolit potansiyeli, volt

S_E : Hacimsel akım transferi kaynak terimi

Sayısal çözümler için hazırlanan modelde kullanılan referans değerler ve bileşenlere ait fiziksel ve kimyasal özellik parametreleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Referans değerler belirlenirken literatürde yaygın kabul görmüş değerler ve bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sırasında yapılan çıkarımlar sonucunda belirlenmiştir. Bileşenlere ait fiziksel ve kimyasal özellik parametreleri, bileşen üreticileri tarafından sağlanan veriler kullanılarak elde edilmiştir. Sayısal modelde uygulanan işletme parametreleri deneysel çalışmada verilen ortak işletme parametreleri çizelgesinde verilenlerle aynıdır.

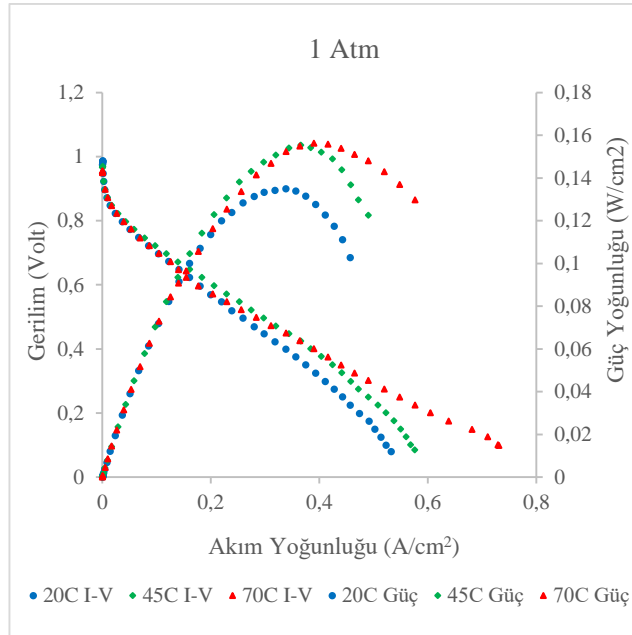
Çizelge 3.7. Sayısal model referans parametreleri ve bileşen özellikleri

Parametre	İlgili Bölüm		Birim
	Anot	Katot	
Referans Akım Yoğunluğu	10000	20	A/m ²
Referans 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

4. BULGULAR

4.1. Dört Kanallı Serpantin Akış Alanında Pil Sıcaklığı-Performans İlişkisi

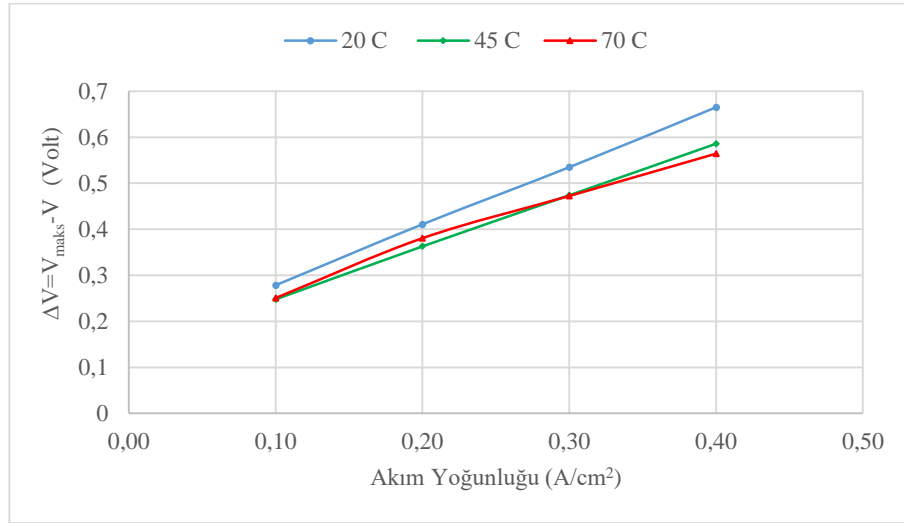
Dört kanallı serpantin akış alanında sıcaklığın performans üzerine etkileri 20°C, 45°C ve 70°C pil sıcaklıkları için her bir işletme basınç değerleri sabit tutularak deneysel olarak araştırılmıştır. 20°C pil sıcaklığı için maksimum güç yoğunluğu, 0,34 A/cm² akım yoğunluğunda 0,135 W/cm² olarak ölçülürken 45°C pil sıcaklığı için 0,37 A/cm² de 1,55 W/cm² ve 70°C pil sıcaklığı için 0,39 A/cm² de 0,156 W/cm² olarak ölçülmüştür. Şekil 4.1'de dört kanallı serpantin akış alanına sahip tek hücreli yakıt pilinin 1 atm simetrik işletme basıncı altında farklı sıcaklıklardaki gerilim-akım yoğunluğu (I-V) ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu eğrileri verilmiştir. Yakıt pilinden elde edilen maksimum güç yoğunlukları ele alındığında en düşük güç yoğunluğunun 20°C pil sıcaklığında elde edildiği tespit edilmiştir. Pil sıcaklığı 45°C ve 70°C' ye yükseltildiğinde 20°C'lik güç yoğunluğuna göre sırayla %15,1 ve %15,8 daha yüksek güç yoğunluğu elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.1. 1 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri

I-V eğrisinin 0,1 ile 0,3 A/cm² akım yoğunluğu aralığındaki bölümünde 70°C pil sıcaklığında yapılan ölçümle elde edilen gerilim değerinin 45°C pil sıcaklığı ile yapılan ölçüm değerlerinden daha düşük olduğu gözlenmiştir. Omik kayıpların baskın olduğu

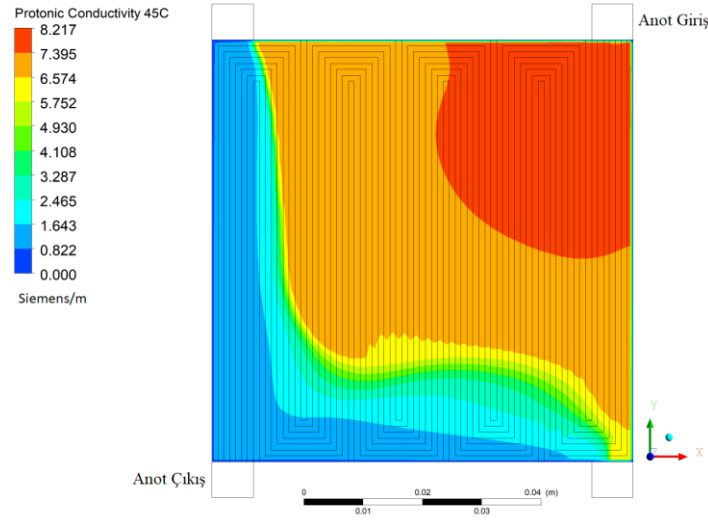
akım bölgesinde gözlenen bu senaryo, 70°C pil sıcaklığında işletilen pile ait membranın kuruma eğilimine girdiğine işaret etmektedir. Kuruma eğilimine giren membranın iyonik iletkenliğinin düşmesi, omik kayıp bölgesinde gerilimdeki düşüşe yol açarak membran kurumasının bir göstergesi olarak ortaya çıkmaktadır. Halihazırda katot tarafı nemlendirilmeden yapılan bu ölçümlerde; pilin düşük akım yoğunluğu bölgesinde işletilmesi membran nemlendirmesi için gereken su üretiminin de düşük olmasına neden olmuş ve kuruma etkilerini şiddetlendirmiştir. Şekil 4.2’ de pilden okunan maksimum gerilim değeri olan açık devre gerilimi ile her bir akım yoğunluğunda okunan gerilim değeri arasındaki farklarla elde edilmiş gerilim kaybı-akım yoğunluğu grafiği görülmektedir. 70°C pil sıcaklığında yapılan testlerde gerilim kaybının 45°C pil sıcaklığı ölçümlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Buna karşın akım yoğunluğunun artması ile birlikte pilde reaksiyon ürünü şeklinde üretilen su miktarının arttığı ve suyun kuruma etkilerini azaltması sonucu; gerilim kaybının azaldığı gözlemlenmiştir.



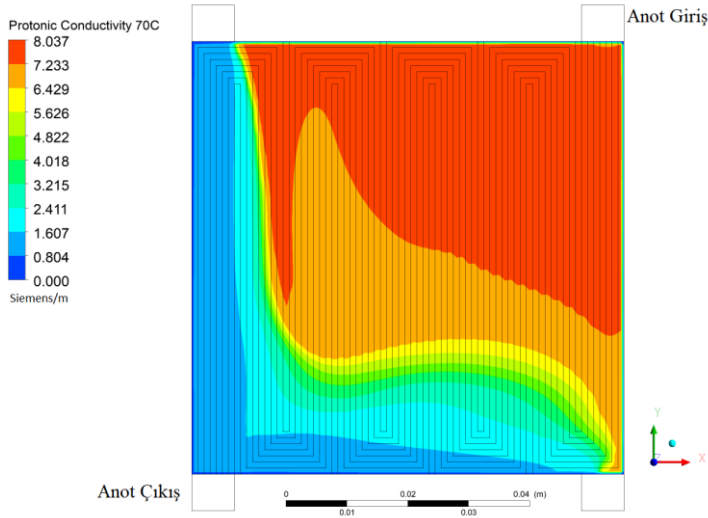
Şekil 4.2. 1 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim kaybının akım yoğunluğu ile değişimi

Şekil 4.3a ve b’ de, membran orta katmanından 0,2 A/cm² akım yoğunluğunda alınan proton iletkenliği değerlerine ait konturlar sırayla 45°C pil sıcaklığı için ve 70°C pil sıcaklığı için verilmiştir. 45°C pil sıcaklığında proton iletkenliğinin okunan en yüksek değeri 8,217 siemens/m iken 70°C pil sıcaklığında bu değer 8,037 siemens/m’ ye düşmektedir. Proton iletkenliğinin pilin genel performansı üzerine etkilerinin ve membran kuruma etkilerinin daha net anlaşılabilmesi için; proton iletkenlik değerinin yüzey ve membran hacim ortalamaları cinsinden ele almak faydalı olacaktır. Proton

iletkenlik değerinin membran toplam kalınlığının ortasındaki yzey ortalaması 45°C pil sıcaklığı için 5,491 siemens/m iken 70°C pil sıcaklığında bu değer 5,460 siemens/m dir. Membran kalınlığı boyunca proton iletkenliği farklı olabileceği için okunan proton iletkenliğinin hacim ortalaması değerleri de incelenmiş olup; 45°C ve 70°C pil sıcaklıklarını için sırayla 5,463 ve 5,435 siemens/m dir.



a

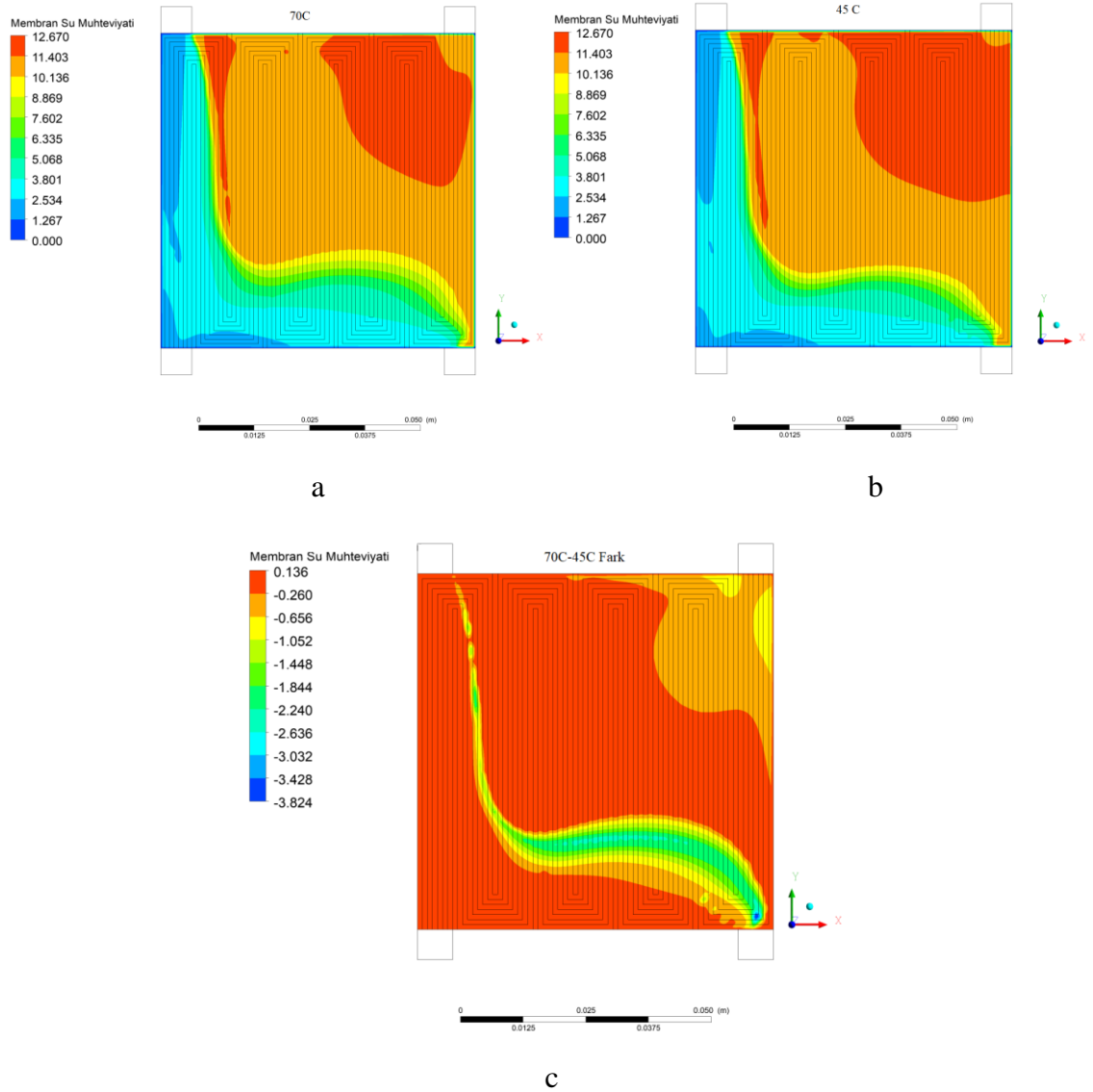


b

şekil 4.3. 0,2 A/cm² akım yoğunluğunda membran orta katmanında 45°C (a) ve 70°C (b) pil sıcaklıklarındaki proton iletkenliği konturları.

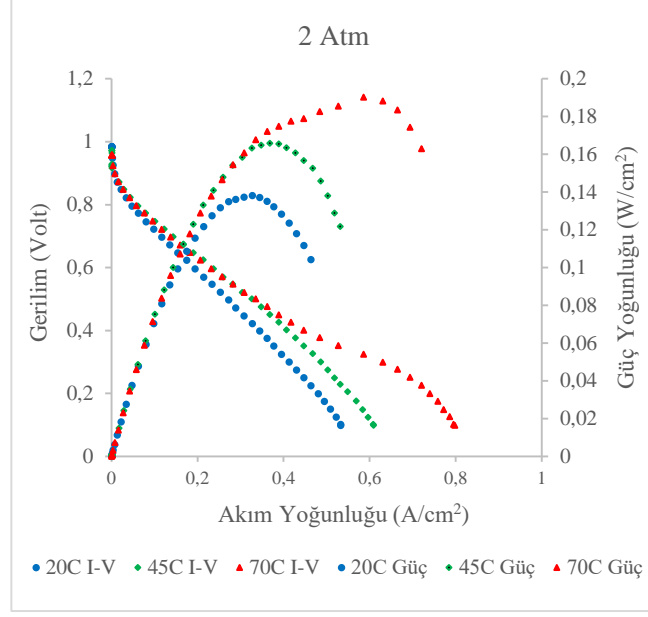
70°C ve 45°C pil sıcaklığında 1atm işletme basıncında sadece anot tarafında nemlendirme uygulanarak işletilen yakıt pilinin 0,2 A/cm² akım yoğunluğunda işletilmesi durumunda elde edilen membran orta yzeyindeki su muhteviyatı konturları şekil 4.4 a ve b de sırayla

70°C, 45°C için verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.4 c’de membran orta yüzeyi su muhteviyat farkları kontur olarak verilmiştir. Konturlardan anlaşılacağı gibi membran proton iletkenliğinin daha düşük olduğu 70°C pil sıcaklığında membran su muhteviyatının yüksek olduğu kırmızı renkle işaretli alanın 45°C’lik pil sıcaklığı koşullarına göre daha küçük bir alan kapladığı görülmektedir. Fark konturlarında anot giriş manifoldu çevresinde ve alt orta bölümde su muhteviyatı farkının belirginleştiği görülmektedir. Su muhteviyatı değerlerinin yüzey ortalaması 70°C pil sıcaklığı için 8,612 iken 45°C pil sıcaklığı için 8,885 olarak ölçülmüştür. Membran kalınlığı boyunca su muhteviyatı değerlerinin farklı olabileceği dikkate alındığında; toplam membran hacminin sahip olduğu ortalama membran su muhteviyatının ele alınması faydalı olacaktır. 70°C pil sıcaklığında mebran hacminin ortalama su muhteviyatı değeri 8.507 iken 45°C için bu değer 8,776’dır. Membran kuruma etkilerinin; düşük basınç ve düşük akım yoğunluğunda işletilmekte olan bir yakıt pilinde sıcaklıkla birlikte artış gösterdiği anlaşılmaktadır.



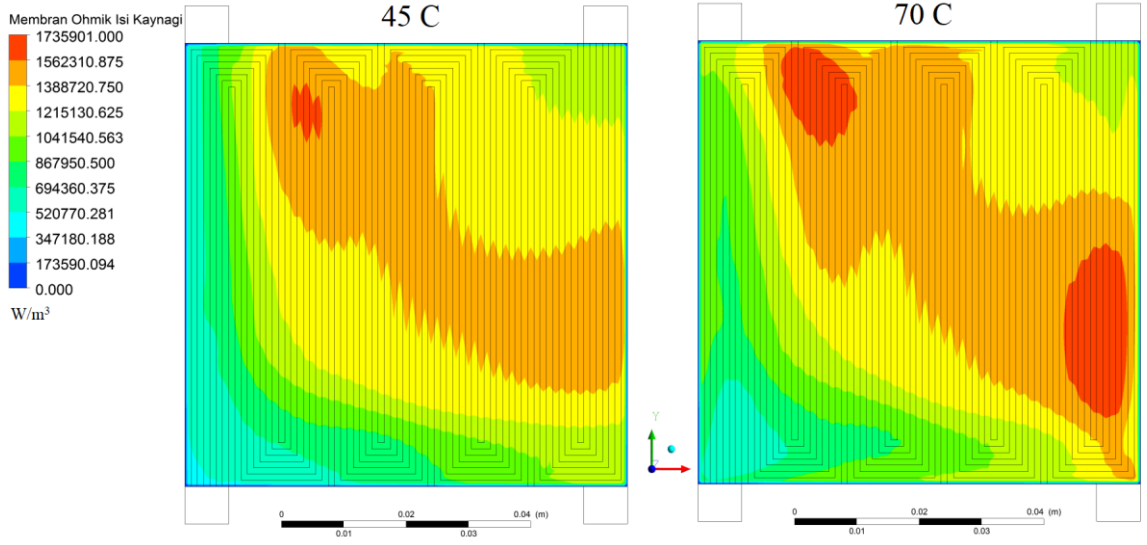
Şekil 4.4. $0,2 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda membran orta katmanında 45°C (a) ve 70°C (b) pil sıcaklıklarındaki su muhteviyatı konturları ve fark konturu (c)

Yakıt pili performansının pil sıcaklığı ile ilişkisi 2 atm sabit işletme basıncı altında ele alındığında; sıcaklıklara göre elde edilen performans eğrileri Şekil 4.5'te verilmiştir. 20°C pil sıcaklığında yapılan ölçümlerde en düşük güç yoğunluğu çıktısı $0,33 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda $0,138 \text{ W/cm}^2$ olarak elde edilirken; 45°C de yapılan ölçümlerde %22 ve en yüksek güç yoğunluğunun elde edildiği 70°C de yapılan ölçümlerde %40 güç yoğunluğu artışı gözlenmiştir. Sıcaklığın performans üzerindeki etkilerinin, işletme basıncının artışı ile birlikte daha belirgin hale geldiği anlaşılmıştır. Öte yandan, 70°C pil sıcaklığında görülen kuruma etkilerinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.5. 2 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri

Özel olarak membranın proton iletkenliği ve su muhteviyatı ile ilgilenilmediği durumda membranın ohmik direnci hakkında bu parametreler kullanılarak bir kestirim yapmak yerine; membran ohmik direncine ulaşmak için membran kesitindeki akım yoğunluğu ile ohmik ısı kaynağı terimleri pratik bir araç olarak kullanılabilir. Su kaybetmesi nedeni ile proton iletkenliğini kaybeden membranın iç direnci de yükselmekte ve üzerinden akım geçtiğinde akımın karesi ile orantılı olarak daha yüksek ohmik direnç ısısı üretme eğilimine girmektedir. Şekil 4.6'da 2 atm sabit işletme basıncı altında ve 0,2 A/cm² akım yoğunluğunda 45°C ve 70°C pil sıcaklığı için membran orta yüzeyinde ohmik ısı kaynağı dağılımları verilmiştir.



Şekil 4.6. 2 atm sabit işletme basıncı gerilimi altında ve $0,2 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda 45°C ve 70°C pil sıcaklığı için membran orta yüzeyinde ohmik ısı kaynağı dağılımları

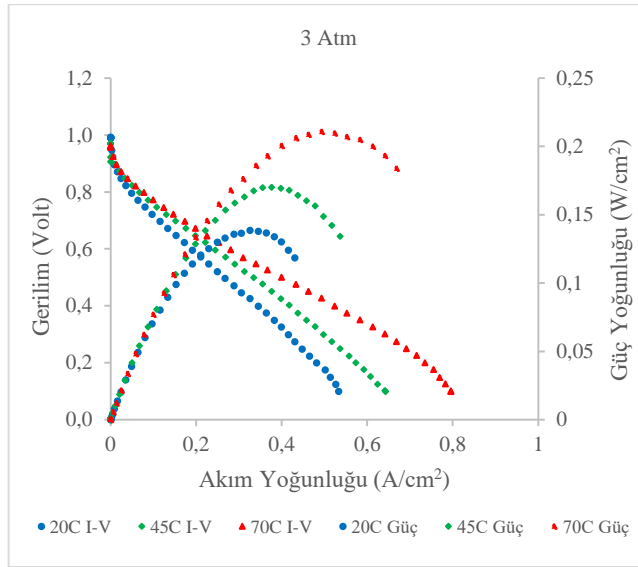
Şekil 4.6’da görüldüğü gibi kurumaya bağlı direnci artan membran, üzerinden geçen akıma bağlı olarak 70°C pil sıcaklığında işletilen pilin membranında yerel olarak daha yüksek ısı açığa çıktığı görülmektedir. Fakat bu durum tek başına membran kuruması hakkında net bir kaniya varılması için yeterli değildir. Membran yüzeyi boyunca artan ısı kaynağı teriminin tek bileşeni, Denklem 4.1’de görüldüğü gibi, sadece membran direnci olmayıp; ısı kaynağı terimi akımın karesi ile de doğru orantılıdır. O halde ohmik ısı kaynağı terimini akım şiddetinden bağımsızlaştırarak membran ohmik direncini elde etmek için ifadenin membran kesitindeki akım yoğunluğunun karesi ile sadeleştirilmesi, membran ohmik direncine erişilmesini sağlamıştır. Sadeleştirme işlemine geçilmeden önce birim metreküp hacim başına hesaplanan ortalama ohmik ısı üretim miktarı, $1,408 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ olan membran hacmi ile çarpılmıştır. Öte yandan membran orta kesitinden birim m^2 başına hesaplanan ortalama akım yoğunluğu membran aktif yüzey alanı olan $5,041 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ile çarpılarak boyutsal bütünlük sağlanmıştır.

$$\dot{q} = i^2 \cdot R \quad (4.1)$$

2 atm sabit işletme basıncı altında membran ohmik direnci 45°C pil sıcaklığı için $6,525 \cdot 10^{-3} \text{ ohm}$ olarak hesaplanırken 70°C pil sıcaklığı için $6,849 \cdot 10^{-3} \text{ ohm}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı gibi pilin 70°C sıcaklıkta işletilmesi durumunda membran ortalama direnci 45°C pil sıcaklığında işletilen duruma

göre daha yüksektir. Membran direnç değerleri her ne kadar birbirine yakın olsa da; 70°C pil sıcaklığında membran kuruma etkilerinin hala devam ettiği görülmektedir.

Performansın sıcaklıkla değişimi olgusunun, en yüksek işletme basıncı olan 3 atm de test edilmesi ile elde edilen performans eğrileri Şekil 4.7’ de verilmiştir. En düşük maksimum güç yoğunluğu değeri yine 20°C pil sıcaklığında 0,33 A/cm² kaydedilirken; performans artışı 45°C pil sıcaklığına çıkıldığında %15 ve 70°C pil sıcaklığına çıkıldığında %54 olarak gözlenmiştir.



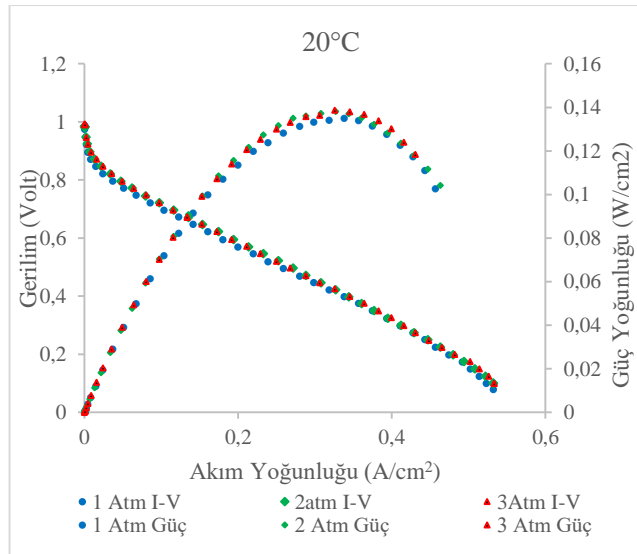
Şekil 4.7. 3 atm işletme basıncı altında farklı pil sıcaklıkları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri

Farklı sıcaklıklarda test edilen yakıt pilinde, 0,135 W/cm² ile 0,139 W/cm² arasında değişen değerlerle, en düşük güç yoğunluğu çıktısının belirgin bir şekilde 20°C pil sıcaklığında gözlenmiştir. I-V eğrilerinde neredeyse lineer seyreden omik kayıp bölgesinin sonlanıp artan eğimli bir yay formasyonu şeklinde gözlenen konsantrasyon kaybı yoğun bölge, 20°C’ lik pil sıcaklığına sahip testlerde daha düşük akım yoğunluklarında gözlenmiştir. Buna karşın pil sıcaklığının, reaktantların nemlendirildiği sıcaklık değeri olan 70°C’ ye yaklaşması ile birlikte konsantrasyon kayıpları daha yüksek akım yoğunluklarında ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, anot tarafından beslenen nemlendirilmiş reaktant içindeki su buharının daha soğuk olan pil bileşenlerinin yüzeyinde yoğunlaşarak; reaktantların KT tabakasına ulaşmasını engellemesi şeklinde açıklanabilmektedir. Deneyler sonucunda nemlendirme sıcaklığının, pil sıcaklığına yakın bir değerde seçilmesinin, su akıntısının önüne geçilmesine katkı sağlayacağı anlaşılmıştır.

20°C sıcaklıkta yapılan testlerde sıvı su akıntısı etkileri görülmesine rağmen; Şekil 4.2’de görülen gerilim kayıpları eğrisinin lineer formda devam etmesi, membranın suya doyduğunu ve kuruma kaynaklı bir iyonik direnç artışı yaşanmadığına işaret etmektedir.

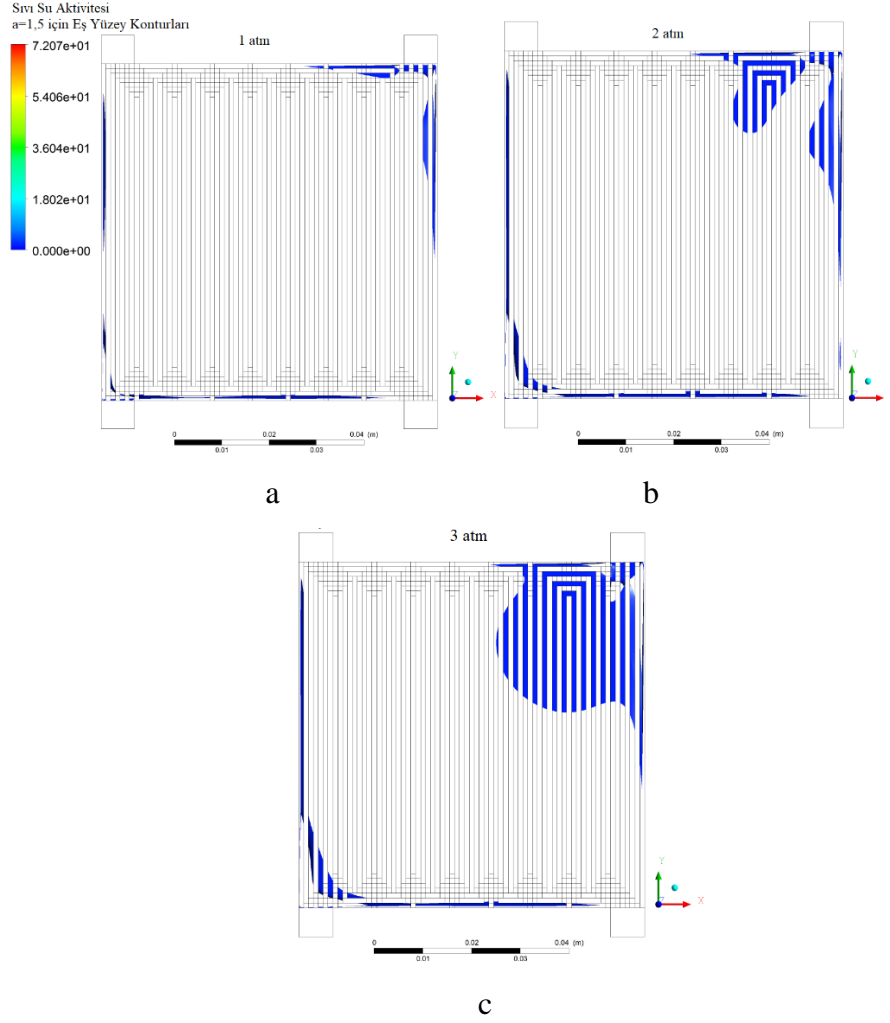
4.2. Dört Kanallı Serpantin Akış Alanında İşletme Basıncı-Performans İlişkisi

Dört kanallı serpantin akış alanına sahip yakıt pili numunesinin performans ve işletme basıncı ilişkisi 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınç değerleri ile yapılan testler sonucunda elde edilmiştir. Katot tarafı nemlendirilmeden testleri yapılan bu çalışmada 20°C sabit pil sıcaklığında basınca bağlı performans eğrileri Şekil 4.7’ de verilmiştir. Sabit sıcaklıkta 1 atm işletme basıncından 2 atm işletme basıncına geçildiğinde güç yoğunluğu artışının %0.81 olduğu görülmüştür. Öte yandan 1 atm işletme basıncından 3 atm işletme basıncına çıkıldığında ise; güç yoğunluğundaki artışın %1.04 olduğu belirlenmiştir. Nernst eşitliğinden bilindiği üzere; işletme basıncının artışı ile birlikte yakıt pili performansının düzenli olarak artması beklenmektedir. Buna karşın; basınçla birlikte performans artışı oldukça düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Yüksek işletme basıncının su buharının doyma sıcaklığını düşürmesi nedeni ile, sıvı su akıntısının şiddeti artmış olup; beklenen performans artışı gözlenememiştir. Önceki bölümde izah edildiği gibi 20°C gibi nemlendirici doyma sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olan yakıt pilinde halihazırda devam eden sıvı su akıntısı probleminin basınç artışı ile birlikte şiddetlendiği görülmüştür.



Şekil 4.7. 20°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri

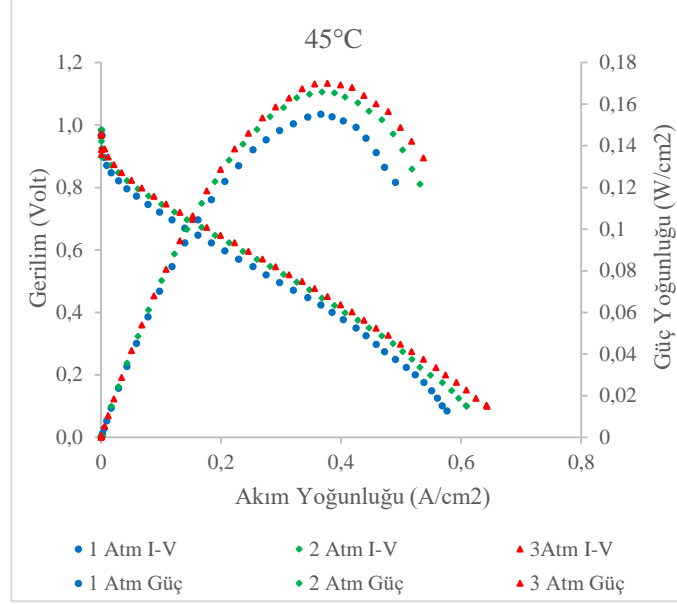
Yapılan sayısal analiz sonuçlarında sıvı su aktivitesi konturları, kontrol hacmi içerisindeki suyun sıvı halde olan kısmı ile ilgili en net bilgi veren araçlardan biridir. Sıvı su aktivitesi değerinin 1' den büyük olması, kontrol hacmi içindeki su moleküllerinin sıvı halde olduğunu göstermektedir. Şekil 4.8' de 20°C sabit pil sıcaklığı için 1atm, 2atm ve 3 atm işletme basınçları altında anot gaz kanallarını orta yüzeyinde sıvı su aktivitesi değerinin 1,5 olduğu eş yüzey konturları verilmiştir. Şekil 4.8 a' da verilen 1 atm işletme basıncında yoğunlaşma konturlarının giriş manifoldundan başlayarak pil kenarına yakın kanalların akış uzunluğu fazla olanlarda ağırlıklı olarak gözlemlendiği tespit edilmiştir. Basıncın 2 atm değerine yükseltilmesi ile birlikte sıvı suyun kapladığı alanın; genişleyerek birden fazla kanalı tamamen dolduracak şekilde özellikle ikinci dönüş bölgesinde yoğunlaştığı görülmüştür. Son olarak işletme basıncının 3 atm değerine yükseltilmesi, Şekil 4.8 c' de görüldüğü gibi, sıvı su tutulumunun beşinci dönüş bölgesini de kapsayacak şekilde geniş bir alana yayılmasına neden olmuştur. Kanal içi su akıntısının artan işletme basıncı ile birlikte güçlenerek baskın hale geldiği sayısal analiz sonuçlarında da anlaşılmıştır.



Şekil 4.8. 20°C pil sıcaklığı altında 1 atm (a), 2 atm (b) ve 3 (atm) işletme basınçları altında 1,5 sıvı su aktivite değeri eş yüzey konturları

45°C sabit pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için yapılan test sonuçlarına ait performans eğrileri Şekil 4.9' da verilmiştir. Buna göre 1 atm basınçtan 2 atm basınca geçerken maksimum güç yoğunluğu %6,7 artarken; 3 atm işletme basıncı uygulandığında elde edilen maksimum güç yoğunluğu %9.4 oranında artmıştır. 1 atm işletme basıncından 1 atm işletme basıncından 2 atm ve 3 atm işletme basıncına geçildiğinde güç yoğunluğu eğrileri arasındaki fark belirgin bir şekilde ayırt edilirken; 2 atm işletme basıncından 3 atm işletme basıncına geçildiğinde performans artışı daha düşük olmuştur. Basınç artışı ile birlikte pildeki güç çıkışında elde edilen artış oranları yükselmesine rağmen hala sıvı su akıntısı etkilerinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bu test koşulunda Nernst etkileri belirginleşmesine rağmen; 45°C'lik pil sıcaklığının hala anot tarafı nemlendirme

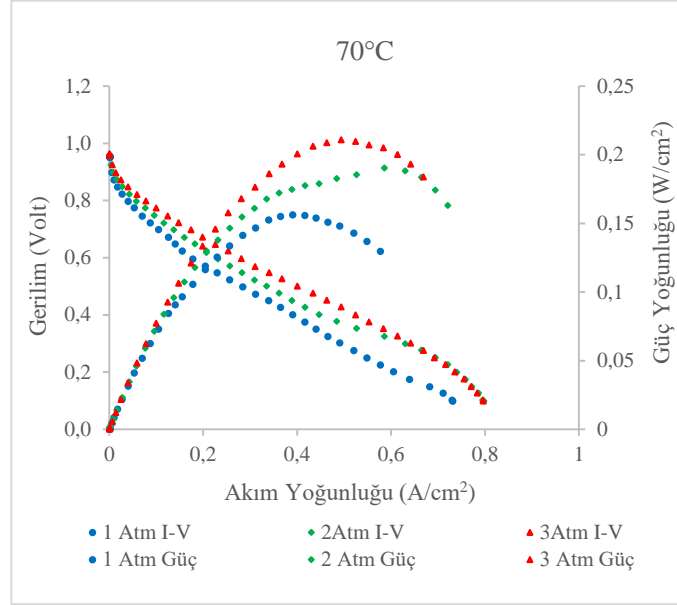
sıcaklığından düşük olması nedeni ile cidardaki yoğunmalardan dolayı akıntı halinde olan pilde, basınç artışı ile birlikte elde edilen performans artışı sınırlı düzeyde olmuştur.



Şekil 4.9. 45°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri

70°C sabit pil sıcaklığı altında yapılan testlerde pil performansının basınçla değişimi grafikleri Şekil 4.10' da verilmiştir. 1 atm işletme basıncından 2 atm işletme basıncına geçildiğinde maksimum güç yoğunluğundaki artış oranı %21,7 olarak kaydedilmiştir. 1 atm işletme basıncı 3 atm ye yükseltildiğinde, güç yoğunluğundaki artış %34,7 oranında gerçekleşmiştir. 70°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçlarında yapılan testlerde Nernst kaynaklı performans artışı belirgin bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, membrandaki kuruma kaynaklı etkilerin her üç basınç seviyesinde de baş gösterdiği tespit edilmiştir. 0,1-0,4 A/cm² aralığındaki ohmik kayıplar baskın bölgede basınç artışı ile birlikte gerilim kaybının azaldığı görülmektedir. Pil sıcaklığının yüksek olması nedeni ile ortaya çıkan kuruma etkileri, artan işletme basıncı ile baskılanmıştır. İşletme basıncının artması doyma sıcaklığını yükseltmekte ve membranın yeterince nemli kalmasını sağlamaktadır. 0,6 A/cm² akım yoğunluğunu üzerindeki konsantrasyon kayıpları baskın bölgede sonuçlar ele alındığında, 2 atm işletme basıncı ile 3 atm işletme basıncında işletilen pillerin aynı gerilim değerlerini yakalayarak benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Bu durum, bütün işletme basınçları için düşük akım yoğunluklarında üretilen suyun ve anot tarafından yapılan nemlendirmenin, membranı yeterince nemli

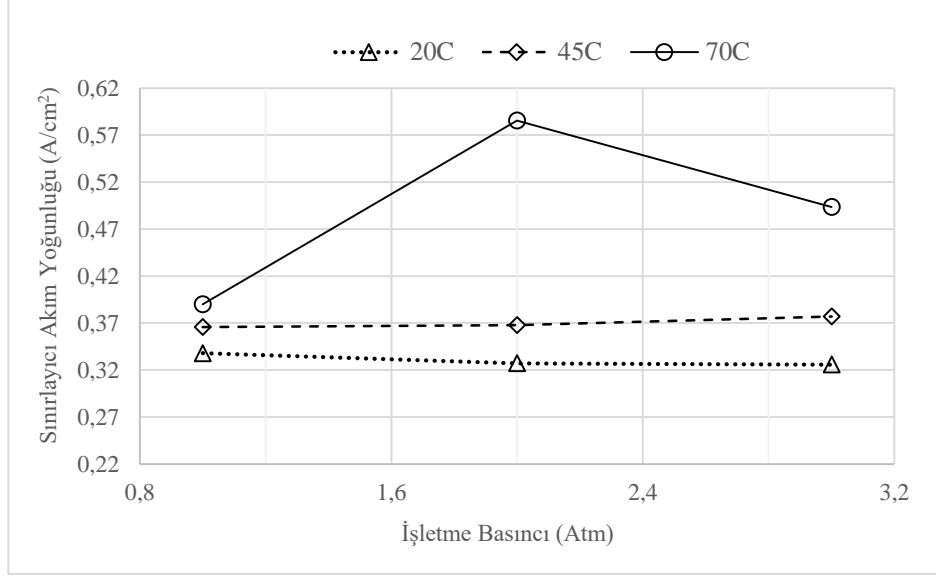
tutmaya yeterli olmadığını göstermektedir. Buna karşın 3 atm işletme basıncında yüksek akım yoğunluğu bölgesinde suyun doyma sıcaklığının düştüğü ve üretilen su miktarının fazlalık oluşturarak yoğuşmak suretiyle konsantrasyon kayıplarına yol açtığı şeklinde açıklanmaktadır.



Şekil 4.10. 70°C pil sıcaklığı altında farklı işletme basınçları için gerilim-akım yoğunluğu ve güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri

PEM yakıt pillerinde maksimum güç yoğunluğunun görüldüğü akım yoğunluğu değeri sınırlayıcı akım yoğunluğu olup; kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken iyon akısı ile ilişkilidir. Reaksiyon bölgesine iyon akısı veya reaktant akısının yetersiz kaldığı durumlarda reaksiyon hızının düşmesi ile kendini gösteren yoksunluk durumu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle sınırlayıcı akım yoğunluğu su akıntısı ile ilgili bir gösterge olarak kullanılabilir. Şekil 4.11’de sınırlayıcı akım yoğunluğunun her bir sabit pil sıcaklığı için basınçla değişimi grafiği verilmiştir. 20°C pil sıcaklığında sınırlayıcı akım yoğunluğu beklenenin aksine basıncın artışı ile birlikte düşmüştür. İşletme basıncının sınırlayıcı akım yoğunluğunu yükselttiği bilinmesine rağmen; ortaya çıkan bu senaryo daha önce de bahsedildiği gibi mevcut koşullarda bir sıvı su akıntısının göstergesi olarak tanımlanabilir. Bu sıcaklık değerinde işletme basıncındaki artış yoğuşma sıcaklığını düşürerek su akıntısını şiddetlendirmiştir. 45°C pil sıcaklığında su akıntısı etkileri hissedilmesine rağmen; sınırlayıcı akım yoğunluğu değeri basınçla birlikte artış göstermiştir. 70°C pil sıcaklığında 1 atm ile 2 atm işletme basıncı geçişinde akım

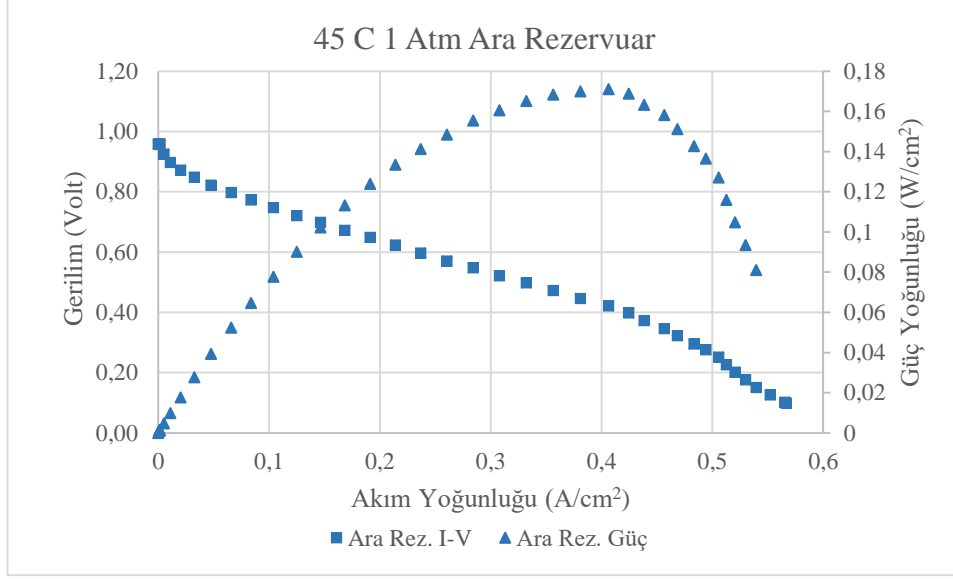
yoğunluğu değeri basınçla birlikte belirgin bir artış göstermiştir. Bu aralıkta bir su akıntısının olmadığı görülmektedir. Buna karşın 2 atm işletme basıncından 3 atm işletme basıncına geçildiğinde sınırlayıcı akım yoğunluğu değerinin düşmesi su akıntısının başladığının ve reaktantların katalizör tabakasına ulaşmasını engellediğinin göstergesidir.



Şekil 4.11. Sınırlayıcı akım yoğunluğunun pil sıcaklığı ve işletme basıncı ile değişimi

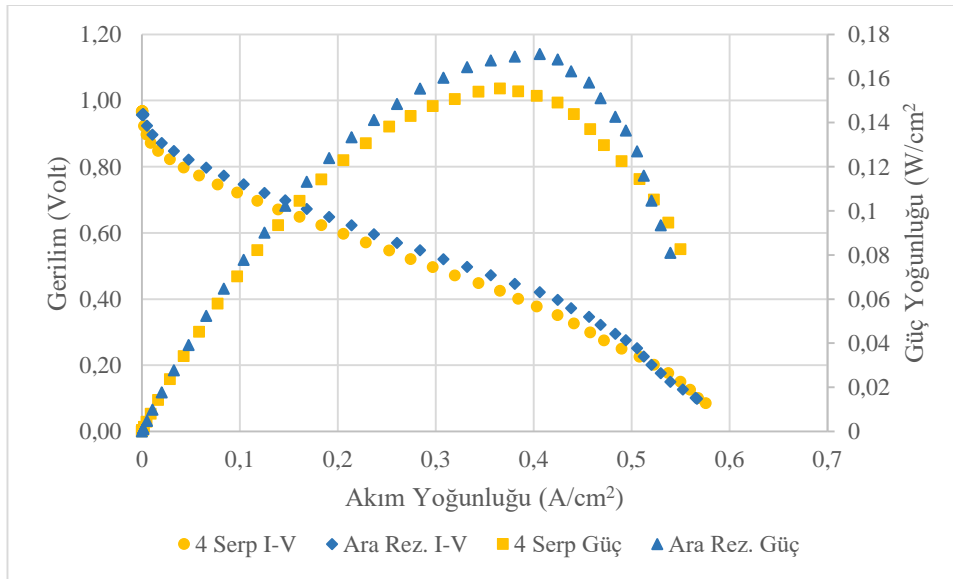
Görüldüğü gibi su akıntısından kurumaya doğru giden deney koşullarından 45°C pil sıcaklığı ve 2 atm işletme basıncı koşulları; su akıntısı etkilerini taşıırken basınç artışına bağlı Nernst etkilerinin de gözlemlenebildiği bir koşuldur.

4.2. Ara Rezervuarlı Dört Kanallı Serpantin Akış Alanının Performans Özellikleri
Akış uzunluğu boyunca reaktantların tüketilmesi ve kanal içindeki kayıplar nedeni ile kanallar arasında basınç farkları ortaya çıkmaktadır. Kanallar arasında meydana gelen basınç ve konsantrasyon farkı, belli bir seviyeye kadar omuz altı konveksiyon mekanizmasını destekleyerek reaktantların aktif alana ulaşmasında katkı sağlamaktadır. Buna karşın; komşu kanallar arasındaki farkın aşırı fazlalığı, reaktantların katalizör tabakası yüzey normali doğrultusu yerine yüzeye paralel olarak akmasına ve konsantrasyon kayıplarına neden olma potansiyeline sahiptir. Kanallar arasındaki basınç ve konsantrasyon farkını dengelemek için hazırlanan ara rezervuarlı akış alanının performansı deneysel olarak incelenmiştir. 1 atm işletme basınç ve 45°C pil sıcaklığı koşulları altında yapılan performans deneyleri sonucunda elde edilen Akım-Gerilim ve Akım-Güç eğrilerinden oluşan grafik Şekil 4.12’ de verilmiştir.



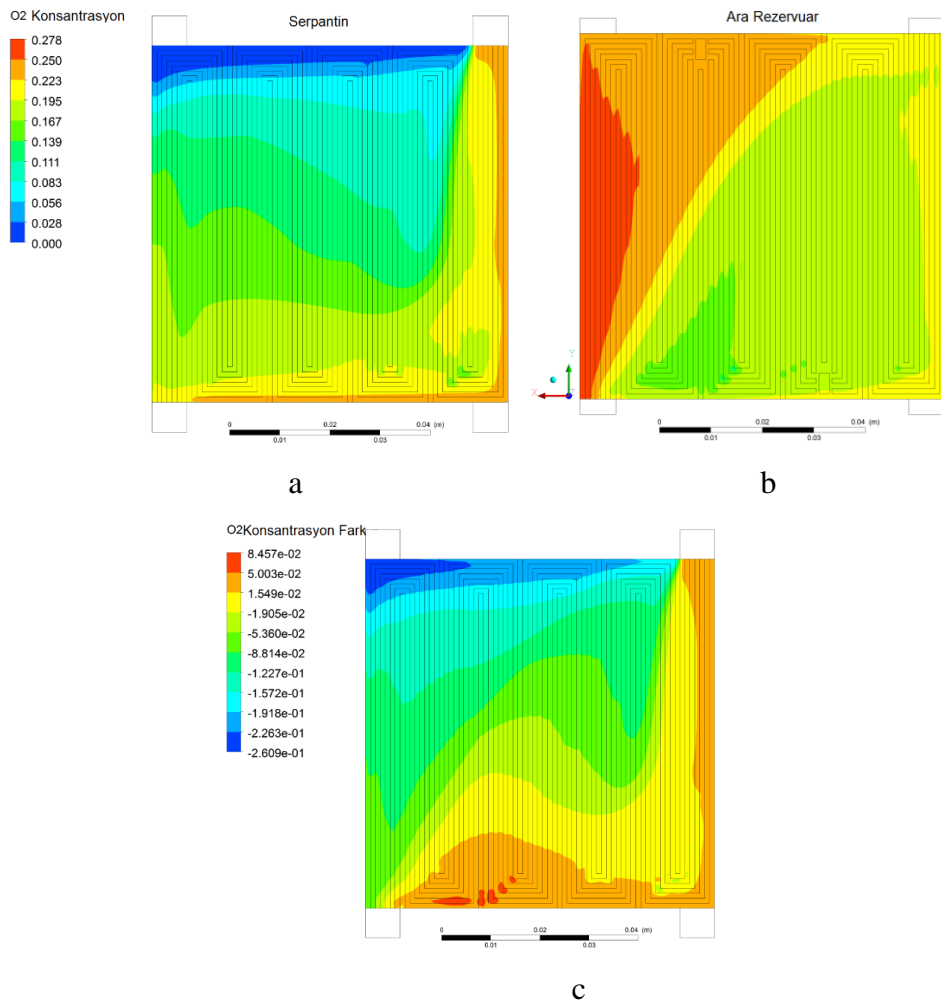
Şekil 4.12. 45 °C pil sıcaklığı ve 1Atm işletme basıncında ara rezervuarlı akış alanı Akım-Gerilim ve Akım-Güç eğrileri

1 Atm işletme basıncı ve 45°C pil sıcaklığı altında ara rezervuarlı akış alanına sahip yakıt pili üzerinde yapılan performans deneyleri sonucunda maksimum güç değerinin 0,171 W/cm² olduğu tespit edilmiştir. Maksimum güç yoğunluğuna 0,421 Volt gerilim değerinde ulaşılırken sınırlayıcı akım yoğunluğu, 0,406 A/cm² olmuştur. Ara rezervuarlı akış alanına sahip yakıt pili ve aynı koşullarda test edilmiş dört geçişli serpantin akış alanına sahip pillerin Akım-Gerilim ve Akım-Güç eğrileri Şekil 4.13’ de verilmiştir.



Şekil 4.13. 45°C pil sıcaklığı ve 1Atm işletme basıncında ara rezervuarlı ve dört geçişli serpantin akış alanı Akım-Gerilim ve Akım-Güç eğrileri

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi ara rezervuarlı akış alanına sahip yakıt pilinin maksimum güç çıkışı dört geçişli serpantin akış alanına sahip pilin güç çıkışından %10 oranında daha yüksektir. Öte yandan pil potansiyeli düşürülerek pilden çekilen akım değeri arttırılmaya devam edildiğinde; ara rezervuarlı akış alanında azalan gerilime karşılık akım değerindeki artış, dört geçişli serpantin akış alanına göre daha yavaş gerçekleşmiştir. Maksimum güç çıkışı olarak daha yüksek bir performans göstermiş olan ara rezervuarlı akış alanı; konsantrasyon kayıplarının baskın olduğu 0,2 volt pil geriliminde, dört geçişli akış alanına sahip yakıt piline göre daha düşük akım çıkışı sunmuştur.



Şekil 4.14. 0,4V, 45°C 1 atm koşullarında GDT – BPP ara yüzeyinde 4 kanallı serpantin akış alanında (a) ve ara rezervuarlı akış alanında (b) oksijen konsantrasyonu ve konsantrasyonlar arasındaki fark (c) konturları

Şekil 4.14 a' da 1 atm işletme basıncı, 45°C pil sıcaklığında ve 0,4V gerilimde işletilen 4 kanallı serpantin akış alanı ve Şekil 4.14 b'de ara rezervuarlı akış alanında GDT ve BPP ara yüzeyine denk gelen katmanda Oksijen konsantrasyonu konturları verilmiştir. Ara rezervuarlı akış alanı modelinde yerel konsantrasyon değerlerinin 4 kanallı serpantin akış alanına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.14 c' deki 4 kanallı serpantin ve ara rezervuarlı akış alanlarının aynı katmanındaki konsantrasyon farkı konturları incelendiğinde; en büyük farkın özellikle çıkış manifoldunun ters yönünde mavi renkle görülen düşük konsantrasyon bölgelerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Şekil 4.14 b' de görüldüğü gibi ara rezervuarlı akış alanında neredeyse 0 konsantrasyona sahip bölgelerin oluşmadığı tespit edilmiştir. İki akış alanı arasındaki performans farkının madde difüzyonu kapasitesi ve su yönetimi anlamında daha iyi anlaşılabilmesi için; Çizelge 4.1' de her iki akış alanı için verilmiş olan GDT hacmindeki ortalama sıvı su aktivitesi, GDT-BPP ara yüzeyindeki ortalama oksijen ve su konsantrasyonu, değerlerinin incelenmesi faydalı olacaktır.

Çizelge 4.1. 4 kanallı serpantin ve ara rezervuarlı akış alanlarının GDT-BPP ara yüzeyinde 0,4 V, 1 atm ve 45°C koşullarındaki özellikler tablosu

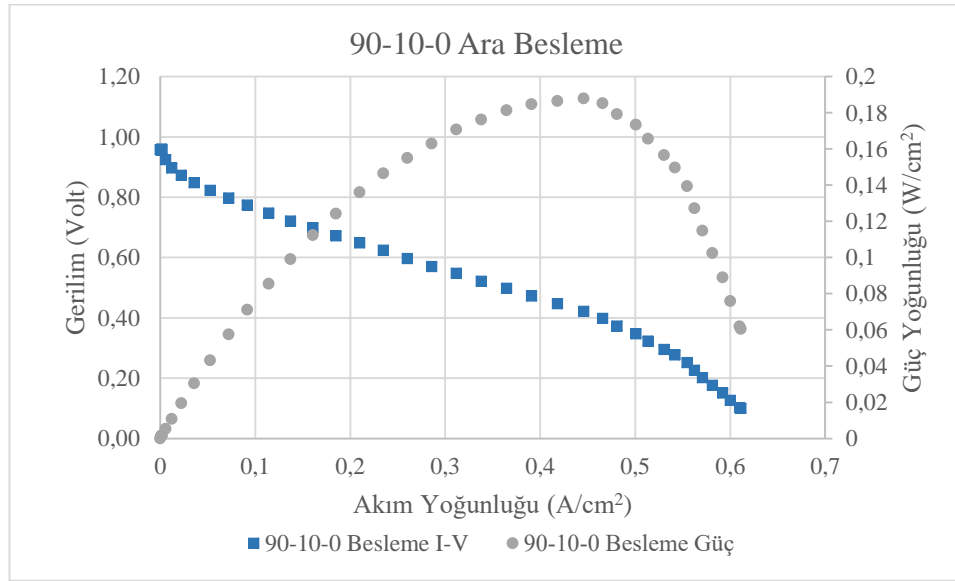
Özellikler	4 Kanal Serpantin	Ara Rezervuarlı
Ortalama O ₂ yoğ. @GDT-BPP Ara Yüzey	0,1408	0,2039
Ortalama H ₂ O yoğ. @GDT-BPP Ara Yüzey	0,3619	0,3434
Ortalama Akım Yoğ Akısı @ GDT-BPP Ara Yüzey (A/m ²)	8156,026	10392,8
GDT içinde ortalama sıvı su aktivitesi	1,89	1,74

Çizelge 4.1'deki çizelgede de görüleceği gibi GDT-BPP ara yüzeyinde oksijen konsantrasyonunun ara rezervuarlı akış alanında daha yüksekken 4 kanallı serpantin akış alanında daha düşük olması ara rezervuarlı akış alanı tasarımının reaktant dağıtım konusunda daha üstün olduğunu göstermektedir. Öte yandan GDT-BPP ara yüzeyindeki su konsantrasyonu, 4 kanallı serpantinde ara rezervuarlı akış alanına göre daha yüksektir. Bu durumda ara rezervuarlı akış alanının daha etkin su tahliye performansına sahip olduğu çıkarımı yapılabilecekken; su miktarları arasındaki farkı pilin sunduğu akım üretiminden bağımsızlaştırmak için GDT-BPP ara yüzeyindeki elektrik akımı akısının yüzey ortalaması kontrol edilmiştir. Ara rezervuarlı akış alanında GDT-BPP ara

yüzeyindeki elektrik akımı akısının 4 kanallı serpantin akış alanındakinden daha büyük olmasına rağmen su konsantrasyonunun düşük olması, ara rezervuarlı akış alanının su tahliyesindeki üstünlüğü hipotezini doğrulamaktadır. Öte yandan katot tarafı GDT hacmi içindeki ortalama sıvı su aktivitesi terimi ele alındığında ara rezervuarlı akış alanı ile birlikte kullanılan GDT hacmindeki sıvı su aktivitesinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum ara rezervuarlı akış alanının daha etkin su tahliyesi sağlayabildiğini doğrular niteliktedir.

4.3. Ara Beslemeli Dört Kanallı Serpantin Akış Alanının Simetrik Besleme Düzenindeki Performans Özellikleri

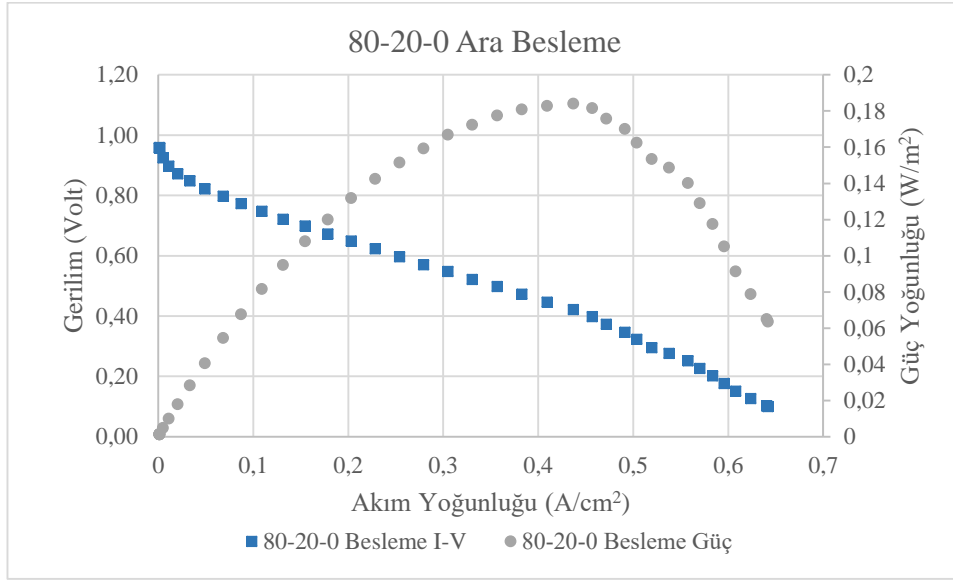
Ara beslemeli akış alanında reaktantların hem anot hem de katot tarafından aynı konumdaki besleme noktalarından aynı debi oranlarında beslenmesi simetrik besleme düzeni olarak adlandırılmaktadır. Toplam reaktant debisinin %90'lık kısmının birinci besleme noktasından, %10'luk kısmın ikinci ara besleme noktasından sisteme verilmesi ile kurulan 90-10-0 ara besleme düzenine sahip pilin Akım yoğunluğu-Güç yoğunluğu ve Akım yoğunluğu-Gerilim grafikleri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. 90-10-0 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri.

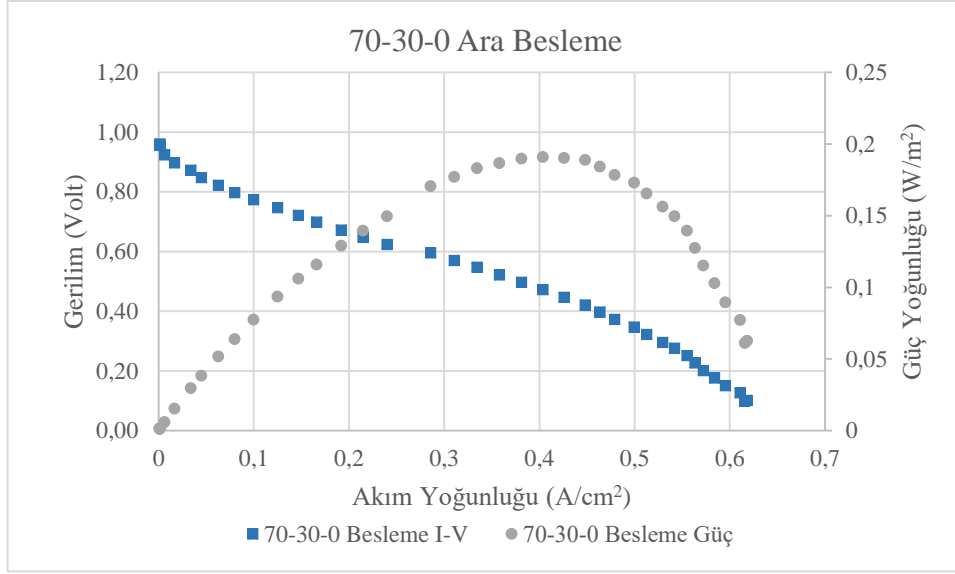
90-10-0 simetrik ara besleme düzenine sahip pilde maksimum güç yoğunluğu 0,421 volt gerilim ve 0,446 A/cm² akım yoğunluğunda 0,188 W/cm² olarak ölçülmüştür. Bu değer ara rezervuarlı akış alanından elde edilen değerden yaklaşık %9,8 oranında daha yüksektir.

Simetrik ara besleme prosedürlerinden bir diğeri; ana reaktant girişinden başlayarak birinci ve ikinci ara besleme noktalarından yapılan 80-20-0 besleme düzenidir. Şekil 4.16'da 80-20-0 besleme düzenine ilişkin Akım yoğunluğu–Güç yoğunluğu ve Akım yoğunluğu–Gerilim grafikleri verilmiştir.



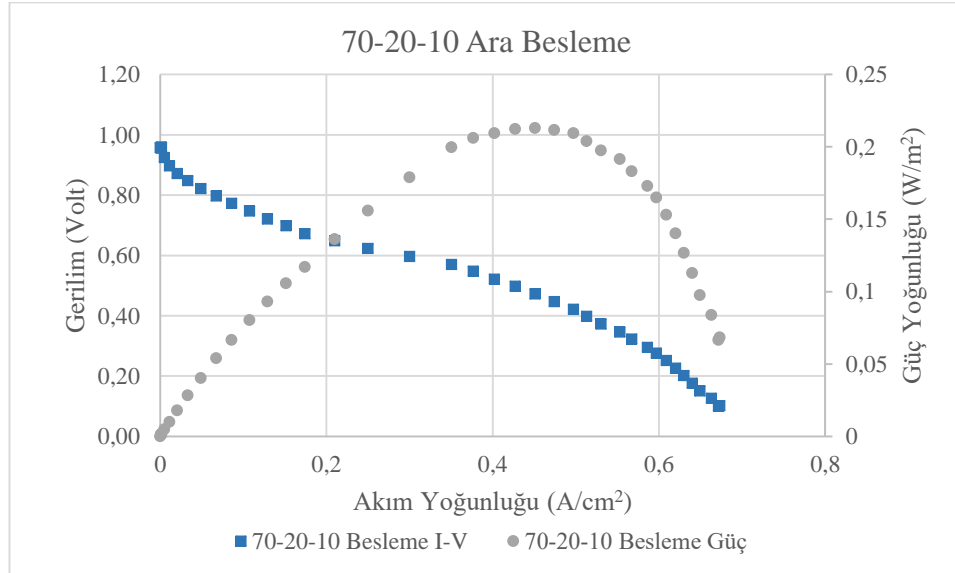
Şekil 4.16. 80-20-0 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

80-20-0 ara besleme düzeninde reaktant gönderilerek test edilen ara beslemeli yakıt pilinin maksimum güç değeri, 0,42 volt gerilim değeri civarında 0,184 W/cm² olarak ölçülmüştür. Toplam reaktant debisinin %30 luk bölümünün ana girişten toplam akış - uzunluğunun 1/3'ü kadar uzakta olan ilk ara beslemeden yakıt piline gönderildiği koşul, 70-30-0 ara besleme olarak adlandırılmıştır. 70-30-0 ara besleme koşullarına ait performans eğrileri Şekil 4.17' de verilmiştir. Bu durumda maksimum güç 0,404 A/cm² akım yoğunluğunda 0,191 W/cm² olarak ölçülmüştür.



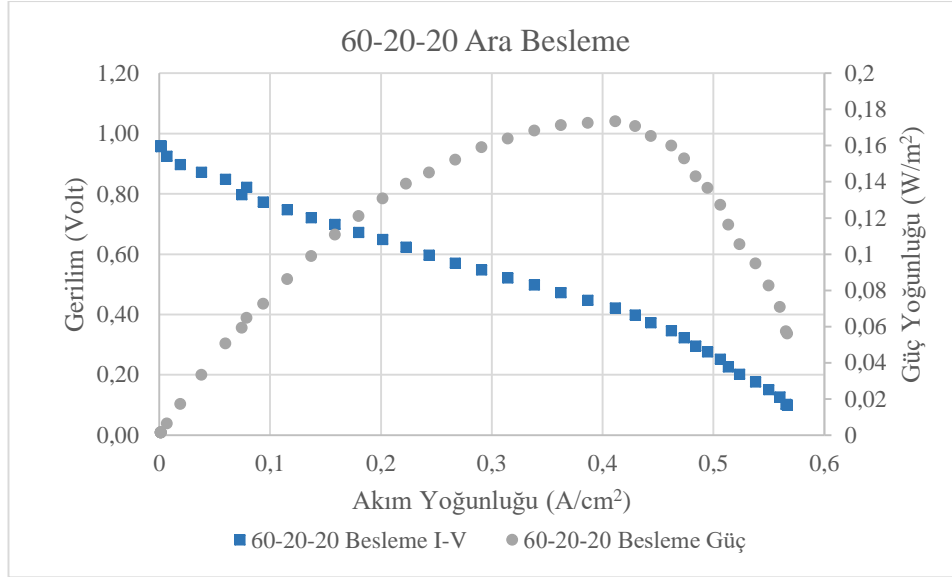
Şekil 4.17. 70-30-0 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

Uygulanan simetrik ara besleme rejimlerinin diğeri 70-20-10 reaktant besleme düzenidir. Bu düzende özellikle serpantin akış alanında rastlanan çıkışa yakın bölgedeki konsantrasyon kayıplarını önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.18’ de 70-20-10 simetrik besleme koşullarındaki yakıt pili performans eğrileri verilmiştir. Bu akış düzeninde maksimum güç yoğunluğu 0,45 A/cm² akım yoğunluğunda 0,213 W/cm² olarak ölçülmüştür.



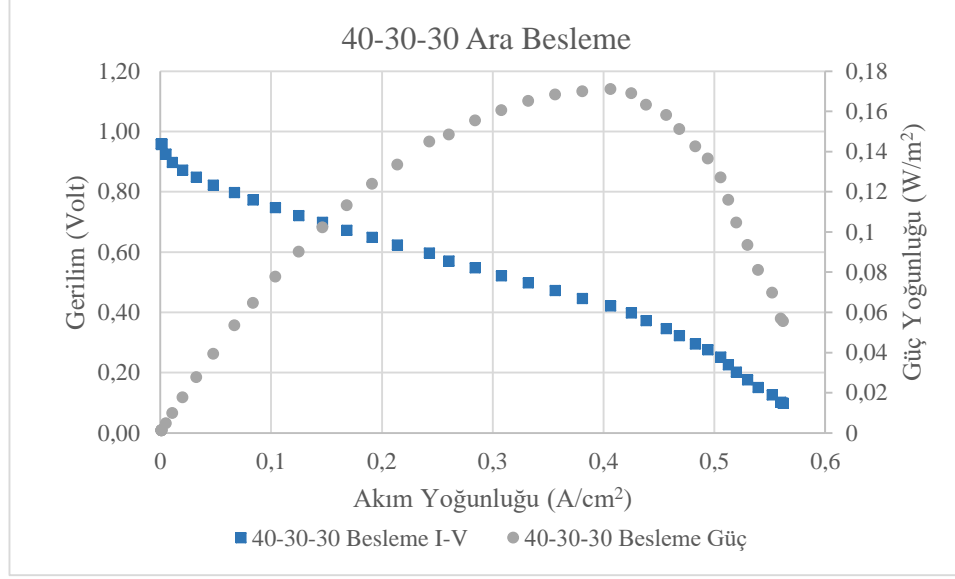
Şekil 4.18. 70-20-10 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

Simetrik besleme düzenlerinden diğeri 60-20-20 ara besleme rejimidir. Bu rejimde yakıt pilinin ana girişinden beslenen reaktant debisi toplam debinin %60'ına kadar düşürülürken; geri kalan debi iki ara besleme noktasından eşit şekilde beslenmiştir. Performans eğrileri Şekil 4.19'da verilen 60-20-20 ara besleme düzeninde pilden elde edilen maksimum güç yoğunluğu $0,173 \text{ W/cm}^2$ olurken bu değer $0,411 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğu seviyesinde elde edilmiştir.



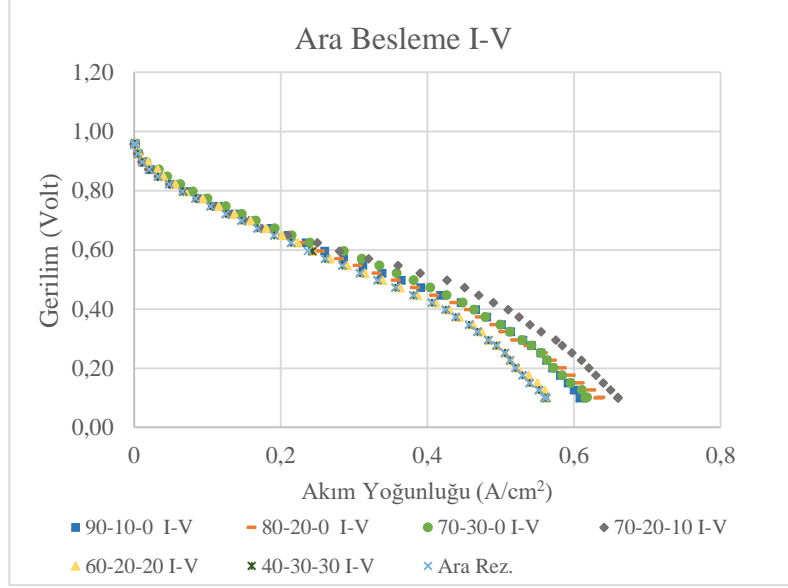
Şekil 4.19. 60-20-20 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

Simetrik ara besleme düzeni seçeneklerinin sonuncusu 40-30-30 ara besleme rejimidir. Bu rejim ana girişten beslenen reaktant debisinin toplam debinin %50'sinden küçük olduğu koşulu değerlendirmek için test matrisine dahil edilmiştir. Şekil 4.20' de verilen deneysel performans eğrileri incelendiğinde; maksimum güç yoğunluğu olan $0,18 \text{ W/cm}^2$ 'ye $0,46 \text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda ulaşıldığı tespit edilmiştir.

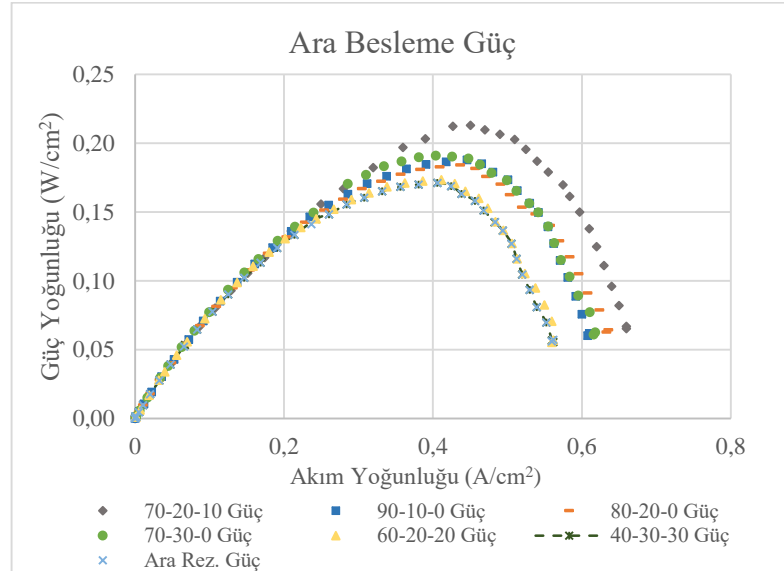


Şekil 4.20. 40-30-30 oranında simetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

Simetrik ara besleme rejimlerini birlikte ele almak aradaki performans farkı ve ara besleme koşullarının pil performansı üzerine etkilerinin daha net anlaşılmasında faydalı olacaktır. Farklı ara besleme rejimlerinde 1 Atm basınç, 45 °C pil sıcaklığı koşulları altında yakıt pilinin akım-gerilim eğrileri Şekil 4,21 a' da ve akım-güç eğrileri ise Şekil 4.21 b' de verilmiştir. 60-20-20 besleme oranı ve 40-30-30 besleme oranı ile işletilen pil performansı, pilin 100-0-0 besleme oranı ile işletildiği durum olan ara rezervuarlı akış alanının performansına göre belirgin bir fark oluşturmamıştır. 80-20-0, 90-10-0 ve 70-30-0 ara besleme oranları ile işletilen pil performansı; ara rezervuarlı pil performansına göre sıra ile %7,5, %9,8 ve %11,5 oranında daha yüksek maksimum güç çıkışı sunmuştur. Çeşitli ara besleme rejimleri arasında 70-20-10 ara besleme rejiminde işletilen yakıt plinden elde edilen maksimum güç çıkışı, ara rezervuarlı akış alanından elde edilen değerden %24 oranında daha yüksektir. Deneysel ölçümlerde ilk göze çarpan sonuç, çıkış manifolduna yakın ara besleme noktasından yapılan besleme oranının, giriş manifolduna yakın olan ara besleme noktasından yapılan yaklaşması durumunda çok noktadan ara besleme rejiminin belirgin verim artışı sağlamayacağıdır. Öte yandan, giriş manifoldundan başlayarak ikinci ara besleme noktasına kadar kademeli olarak azalan besleme debileri kullanılması halinde ara besleme rejimi ile belirgin performans artışları elde edilebileceği anlaşılmıştır.



a



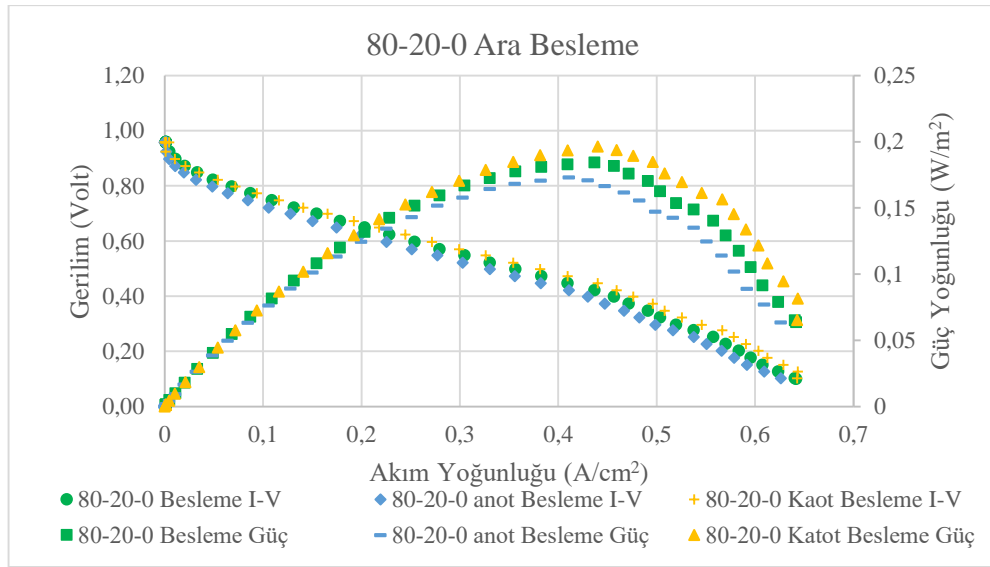
b

Şekil 4.21. Farklı simetrik ara besleme oranında pile ait akımyoğunluğu-gerilim (a) ve akım yoğunluğu-güç grafikleri (b)

4.4. Ara Beslemeli Dört Kanallı Serpantin Akış Alanının Asimetrik Besleme düzenindeki Performans Özellikleri

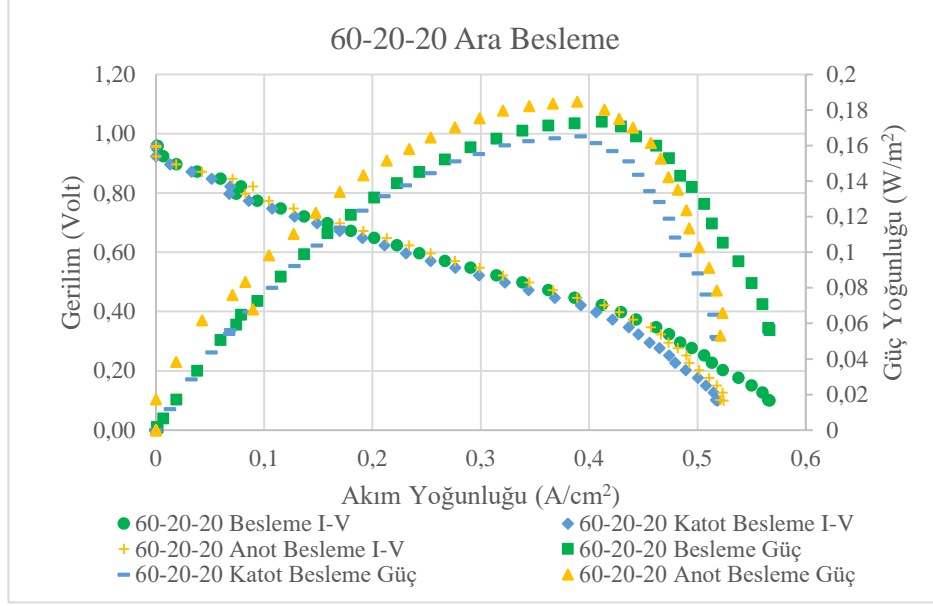
Ara besleme işleminin pilin sadece anot, sadece katot yada her iki taraftan simetrik olarak beslenmesi durumunda farklı pil performansları ortaya çıktığı görülmüştür. Asimetrik besleme işlemi, akış düzeninin farklı koşullardaki performans çıktılarını daha geniş bir alanda tanımlayabilme imkanı tanımıştır. Şekil 4.21' de 80-20-0 besleme oranında her iki

tarafından simetrik, sadece katottan asimetric ve sadece anottan asimetric besleme koşulları altındaki performans eğrileri verilmiştir. 80-20-0 oranındaki ara besleme işleminin sadece katot tarafında geręekleřtirilirken anot tarafında reaktantların tamamının ana girişten pile gönderilmesi durumunda; maksimum güç çıkışı simetrik beslemeye göre %6,7 oranında daha yüksektir. Öte yandan katot tarafındaki besleme oranı kademelendirilmeden sadece anot tarafındaki reaktantların 80-20-0 oranında kademelendirilmesi halinde; maksimum güç çıkışının simetrik beslemeye göre %5,9 oranına daha düşük olduğu gözlenmiştir. Akışın katot tarafında kademelendirilmesinin performans üzerine etkilerinin daha baskın olduğu grlmştir.



şekil 4.21. 80-20-0 oranında simetrik ve asimetric ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

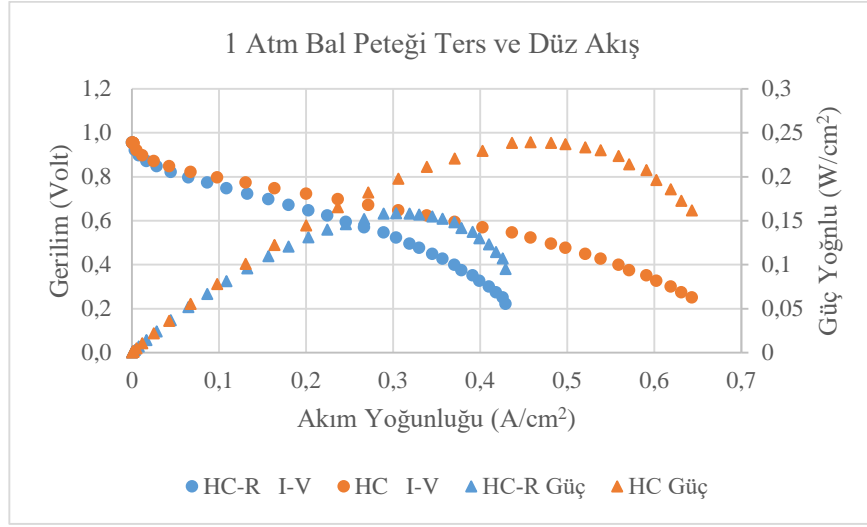
şekil 4.22' de 60-20-20 besleme oranının simetrik ve asimetric uygulamalarına ait performans eğrileri verilmiştir.60-20-20 oranında asimetric katot beslemesi yapıldığında maksimum güç yoğunluğunun simetrik beslemeye göre %4,7 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan asimetric anot beslemesi yapıldığı koşullarda güç yoğunluğunun simetrik beslemeye göre %6,6 oranında daha yüksek çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.22. 60-20-20 oranında simetrik ve asimetrik ara besleme düzeninde pil performans eğrileri

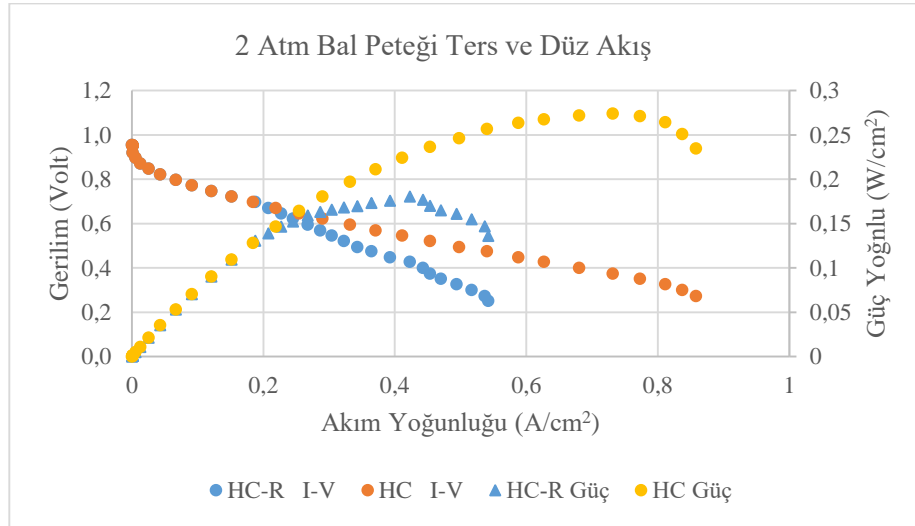
4.5. Bal Peteği Akış Alanı Performans Özellikleri

Bal peteği akış alanının 1 atm işletme basıncı ve 45 °C pil sıcaklığı altında ters akışlı ve düz akışlı olarak yapılan performans testlerinin sonucu Şekil 4.23' te grafik olarak verilmiştir. Düz akış rejiminde maksimum güç çıkışı yaklaşık 0,239 W/cm² olarak 0,481 A/cm² akım yoğunluğunda elde edilmiştir. Ters akış rejiminde maksimum güç çıkışı yaklaşık 0,158 W/cm² olarak 0,303 A/cm² akım yoğunluğunda elde edilmiştir. Bu durumda ters akış düzenine sahip bal peteği akış alanının düz akış rejiminde çalışma durumundakine göre yaklaşık %51 oranında daha düşük performans sağladığı görülmüştür. Grafik üzerinde HC düz akış rejimini temsil ederken HC-R terimi ters akış düzenini temsil etmektedir.



Şekil 4.23. Düz akışlı ve ters akışlı bal peteği akış alanının 1 atm basınç ve 45 °C sıcaklık koşullarındaki akım-gerilim ve akım-güç eğrileri

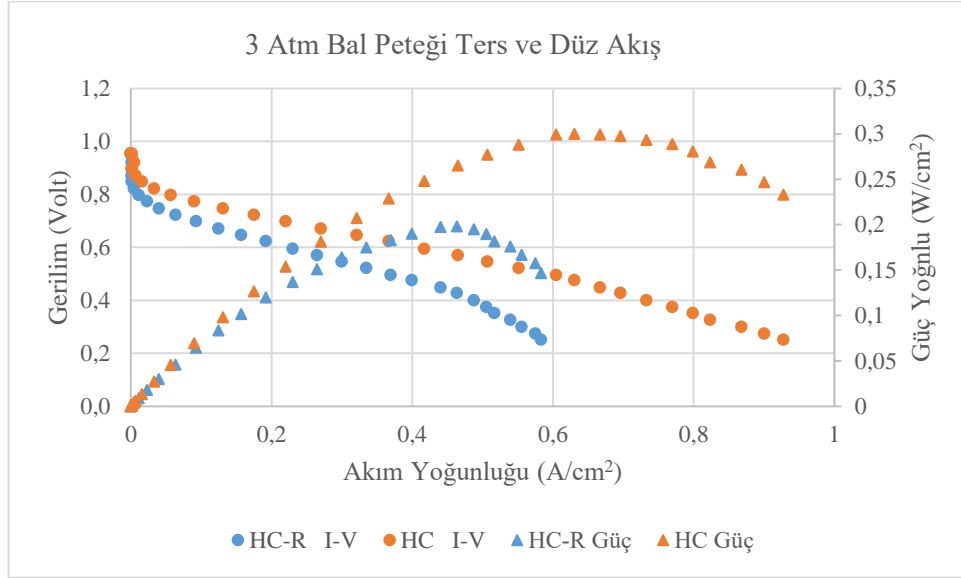
2 atm işletme basıncı ve 45 °C pil sıcaklığı altında yapılan bal peteği akış alanı performans testlerine ait grafik Şekil 4.24' te verilmiştir. Düz akış halinde maksimum güç çıkışı 0,179 W/cm² olarak ölçülürken; ters akışlı düzende 0,156 W/cm² olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.24. Düz akışlı ve ters akışlı bal peteği akış alanının 2 atm basınç ve 45 °C sıcaklık koşullarındaki akım-gerilim ve akım-güç eğrileri

Şekil 4.25' te düz ve ters akış düzenine göre 3 atm basınç ve 45 °C sıcaklıkta işletilen bal peteği akış alanına ait Akım yoğunluğu-Gerilim ve Akım yoğunluğu-Güç eğrileri

verilmiştir. Düz akış düzeninde maksimum güç $0,299 \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilirken ters akış düzeninde maksimum güç değeri $0,197 \text{ A/cm}^2$ olarak elde edilmiştir.

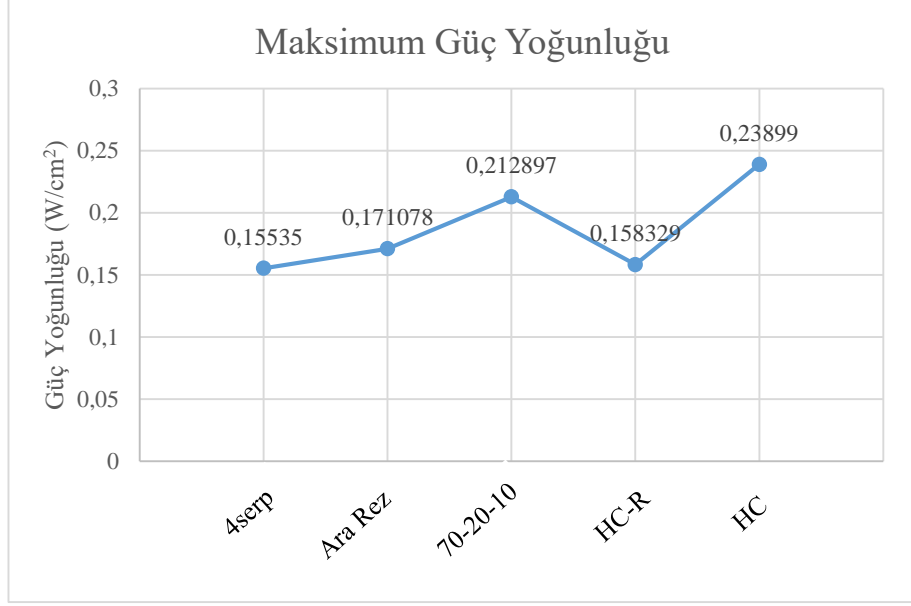


Şekil 4.25. Düz akışlı ve ters akışlı bal peteği akış alanının 3 atm basınç ve 45 °C sıcaklık koşullarındaki akım-gerilim ve akım-güç eğrileri

Bal peteği akış rejimleri arasında düz akışlı akış rejiminin bütün işletme basıncı koşullarında en yüksek güç yoğunluğu değerini sunduğu tespit edilmiştir. Öte yandan işletme basıncının artması ile birlikte hem düz hem de ters akış rejiminde yakıt pili performansının Nernst etkileri ile arttığı gözlemlenmiştir.

4.6. Akış Alanları ve Performans Özelliklerinin karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında ele alınan 4 kanallı serpantin, ara rezervuarlı, ara beslemeli ve bal peteği akış alanlarının performans özellikleri ele alınmıştır. Şekil 4.26' da verilen 1 atm basınç ve 45 °C sıcaklık altında akış alanlarından elde edilen maksimum güç yoğunluğunun akış alanı tiplerine göre dağılımını gösteren grafik verilmiştir. Buna göre en düşük iki güç yoğunluğu 4 kanallı serpantin akış alanı ve ters akışlı bal peteği akış alanında sırayla $0,155 \text{ W/cm}^2$ ve $0,158 \text{ W/cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Aynı koşullarda ara beslemeli akış düzenine geçildiğine maksimum güç yoğunluğu çıkışı $0,171 \text{ A/cm}^2$ değerine yükselmiştir. En yüksek performansın elde edildiği düz akışlı bal peteği akış düzeninde ise maksimum güç çıkışı $0,238 \text{ W/cm}^2$ değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.26. 4 kanallı serpantin, ara rezervuarlı, ara beslemeli ve bal peteği akış alanlarının maksimum güç değerleri.

Dört kanallı serpantin akış alanı yüksek debideki reaktantların kanal içinde düşük hızlarla sürülmesine olanak tanıdığı için; yerel kayıpların düşürülmesinde katkı sağlayan ve endüstriyel olarak kullanıma sahip bir akış alanı düzenidir. Ancak bu akış düzeninde de çıkışa yakın bölgede oluşan konsantrasyon kaybı ve kanallar arasındaki aşırı konsantrasyon farkı engellenememiştir. Bu nedenle Ara beslemeli akış alanı geliştirilmiştir. Serpantin akış alanı kökeninden yola çıkılarak geliştirilen ara rezervuarlı akış alanının, kanallar arası basınç farkının giderilmesinde katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca kanallar içinde oluşan sıvı su damlacıklarının bir araya toplanarak daha büyük su kütleleri haline getirilmesi ve bu sayede akışla birlikte kanal dışına sürülme performansı yine ara rezervuarlı akış alanı ile sağlanmıştır. Buna karşın ara rezervuarlı akış alanı çıkışa yakın bölgedeki konsantrasyon kayıpları için geliştirmeye muhtaçtır. Ara rezervuarlı akış alanının gelişmiş formu olarak ara beslemeli akış alanı geliştirilmiştir. Bu sayede konsantrasyon kaybı yoğun olan bölgeye reaktant beslenerek hem konsantrasyon yükseltilmiş hem de su tahliye performansı geliştirilmiştir. Bal peteği akış alanı iç içe geçişli tip akış alanı orijininde geliştirilmiş olup bütün aktif yüzey boyunca dengeli reaktant dağıtımını sunmuştur. Akış kanallarının köken, amaç ve geliştirme stratejisi gibi özellikleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 4 kanallı serpantin, ara rezervuarlı, ara beslemeli ve bal peteği akış alanlarının karşılaştırma tablosu.

Tasarımın Adı	Köken	Amaç	Strateji	Tasarımın Güçlü Yönleri	Tasarımın Gelişime Açık Yönleri	Tasarım Görseli
4 Kanallı Serpantin (Referans Geometri)	Serpantin	Akış uzunluğu boyunca basınç kayıplarını azaltmak	Toplam debiyi tek kanal yerine çoklu kanallardan sürerek akışkan hızını düşürmek	Yüksek debi de düşük basınç kaybıyla çalışmaya imkan tanınması	Kanallar arası basınç farkının azlığı nedeniyle omuz altı konveksiyonun düşmesi	
Ara Rezervuarlı	Serpantin	Akış kanalları arasındaki ve girişten çıkışa aşırı konsantrasyon farkını dengelemek	Akış kanallarını belli aralıklarla bir rezervuar içinde bir araya getirerek konsantrasyonu dengelemek	Girişten çıkışa konsantrasyon farkı azaltılmıştır	Çıkışa yakın bölgede biriken suyun tahliyesi için destek debi ihtiyacı	 
Ara Beslemeli	Serpantin	Girişten çıkışa debiyi düzenli dağıtmak	Toplam debiyi akış uzunluğu boyunca farklı bölümlerden parçalı olarak vermek	Çıkışa yakın bölgede su tahliye performansı artmıştır. Çıkışa yakın bölgedeki konsantrasyon kayıpları giderilmiştir.	Ara besleme debilerinin güç ihtiyacına göre optimize edilmesi gerekmektedir.	
Bal Peteği	İç içe geçişli tip	Aktif yüzey boyunca homojen reaktant dağıtımı	Aktif yüzey normalinde doğrultusunda çok noktadan reaktant enjeksiyonu oluşturmak.	Girişten çıkışa eş basınçlı reaktant dağılımı sağlamıştır.	Bal peteği boyutları optimize edilmelidir.	

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Artan çalışma sıcaklığının, hücrenin güç çıkışı üzerinde olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, özellikle pilin düşük akım yoğunluğunda ve basınçta çalışması sırasında, katotun nemlendirilmemesinin, çalışma sıcaklığının ve düşük su üretiminin birleşik etkisine bağlı olarak omik direnci artırdığı gözlenmektedir. Membran kuruması özellikle 1 atm işletme basıncı 0,2 A/cm² akım yoğunluğunda belirgin olarak gözlenmiştir. Bütün koşullar içinde, düşük elektrokimyasal aktivasyon ve akıntı nedeniyle kimyasal olarak aktif alana ulaşması engellenen reaktant akışı nedeniyle taşıt uygulamalarında sık karşılaşılabilecek 20 °C pil sıcaklığında en düşük sınırlayıcı akım yoğunluğu ölçülmüştür. Bu çalışmadaki ve literatürdeki deneysel sonuçlarına göre, pilin 40°C' nin altındaki düşük çalışma sıcaklıklarında nemlendirme olmadan çalıştırılabileceği düşünülmektedir. Çalışmada literatürle uyumlu olarak, yakıt pilinin düşük sıcaklıklarda işletilirken düşük akım yoğunluklarında çalıştırılması durumunda akıntı etkilerine maruz kalmadan kullanılabilmesi belirlenmiştir. Çalışma sıcaklığının işletme basıncı ile birlikte yükseltilmesinin; kurumaya veya su akıntısına maruz kalmadan kullanılabilen uygun bir çalışma rejimi olabileceği tespit edilmiştir. Öte yandan, özellikle ek bileşen fazlalığı istenmeyen otomotiv uygulamaları gibi yakıt pili uygulamalarında nemlendirmenin sadece anot tarafında yapılarak kullanılmasının mümkün olduğu tespit edilmiştir. Pilin atmosfer basıncından daha yüksek işletme basınçlarında çalıştırılacağı durumlarda su akıntısından kaçınmak için; pil sıcaklığının da basınca göre optimize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Ara rezervuarlı akış alanı reaktantların GDT yüzeyi boyunca daha etkin bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak düşük reaktant konsantrasyonuna sahip alanlar oluşmasını engellemiştir. Çok kanallı akış alanlarında yada uzun tekil kanallarda kanallar arasında yada kanalın başından sonuna kadar reaktant konsantrasyonu aşırı ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Ara rezervuarlı akış alanında kanalların belli aralıklarla bir araya toplandıktan sonra yeniden dağıtılmasının daha dengeli reaktant dağılımını desteklediği anlaşılmıştır. Uzun kanal boylarında Ara rezervuarlı akış alanı sayesinde reaktantların yakıt pili içinde daha dengeli bir dağılıma kavuşturulması sayesinde; katot tarafında oluşan suyun daha etkili bir şekilde tahliye edildiği anlaşılmaktadır.

Ara beslemeli akış alanlarının pil içinde daha dengeli reaktant dağılımı sağlamanın yanında kanal içi su tahliye özelliklerini de güçlendirdiği görülmüştür. Öte yandan ara

besleme işleminin simetrik ve asimetric yapılmasının performans üzerine etkileri besleme oranları ve bölgeleri ile sıkı bir ilişki içindedir. Bu nedenle besleme oranları, besleme bölgeleri ve simetrik yada asimetric besleme rejimleri değişkenler olacak şekilde, işletme parametreleri optimize edilerek ele alınmalıdır.

Bal Peteği akış alanının bütün tasarımlar arasında en yüksek güç çıkışına sahip olan model olduğu anlaşılmıştır. Bal peteği akış alanı ile; omuz altı konveksiyon hareketlerinin artırılmış olması maksimum güç çıkışını artırırken çıkış kanal kesitin düşük olması su tahliyesini güçlendirmiştir. Bal peteği akış alanında akışkanın iç havuzdan giriş yaparak dış havuzdan sistemi terk edecek şekilde planlanan doğru akıştaki performansı diğer tasarımlar içinde en yüksek performansın alındığı işletme şekli olarak belirlenmiştir. Buna karşın reaktantların dış havuzdan giriş yaparak GDT tabakasından geçtikten sonra iç havuzu terk ettiği ters akışlı düzende maksimum güç çıkışı belirgin bir şekilde daha düşük çıkmıştır. Bu nedenle Bal Peteği akış alanının düz akışlı olarak işletilmesinin daha faydalı olacağı anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Amemiya, K. 2008.** *US20100075186A1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20100075186/fr>
- Asadzade, M., Shamloo, A. 2017.** Design and simulation of a novel bipolar plate based on lung-shaped bio-inspired flow pattern for PEM fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 41(12):, 1730–1739. <https://doi.org/10.1002/er.3741>
- Atyabi, S. A., Afshari, E. 2019.** Three-dimensional multiphase model of proton exchange membrane fuel cell with honeycomb flow field at the cathode side. *Journal of Cleaner Production*, 214:, 738–748. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.293>
- Awin, Y., Dukhan, N. 2019.** Experimental performance assessment of metal-foam flow fields for proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, 252:, 113458. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113458>
- Baik, K. D., Seo, I. S. 2018.** Metallic bipolar plate with a multi-hole structure in the rib regions for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Applied Energy*, 212:, 333–339. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.12.057>
- Bao, Z., Niu, Z., Jiao, K. 2019.** Numerical simulation for metal foam two-phase flow field of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12):, 6229–6244. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.01.086>
- Barbir, F. 2005.** *PEM fuel cells : theory and practice*, Elsevier Academic. Retrieved from https://books.google.com.tr/books/about/PEM_Fuel_Cells.html?id=Bxe4vNbwyW8C&redir_esc=y
- Biyikoglu, A., Oztoprak, H. 2012.** Enhancement of cell characteristics via baffle blocks in a proton exchange membrane fuel cell. *Sadhana*, 37(2):, 207–222. <https://doi.org/10.1007/s12046-011-0056-y>
- Chen, S., Zhang, X., Liu, H. 2017.** Effect of pressure difference between adjacent channels in an adjustable flow field in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7):, 4667–4672. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.10.164>
- Chen, T., Xiao, Y., Chen, T. 2012.** The Impact on PEMFC of Bionic Flow Field with a Different Branch. *Energy Procedia*, 28:, 134–139. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2012.08.047>
- Choi, K.-S., Kim, B.-G., Park, K., Kim, H.-M. 2012.** Flow control of under-rib convection enhancing the performance of proton exchange membrane fuel cell. *Computers & Fluids*, 69:, 81–92. <https://doi.org/10.1016/J.COMPFLUID.2012.08.018>
- Chowdhury, M. Z., Akansu, Y. E. 2017.** Novel convergent-divergent serpentine flow fields effect on PEM fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40):, 25686–25694. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.04.079>
- Chowdhury, M. Z., Timurkutluk, B. 2018.** Transport phenomena of convergent and divergent serpentine flow fields for PEMFC. *Energy*, 161:, 104–117. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.07.143>
- Cooper, N. J., Smith, T., Santamaria, A. D., Park, J. W. 2016.** Experimental optimization of parallel and interdigitated PEMFC flow-field channel geometry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(2):, 1213–1223. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.11.153>
- Darwin, C. 1859.** *The origin of species by means of natural selection, or, The*

- preservation of favoured races in the struggle for life., London :, : John Murray.,
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.87916>
- Dhahad, H. A., Alawee, W. H., Hassan, A. K. 2019.** Experimental study of the effect of flow field design to PEM fuel cells performance. *Renewable Energy Focus*, 30:, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.05.002>
- Dingrong BaiJean-Guy ChouinardDavid Elkaïm 2004.** *US7524575B2*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US7524575B2/en>
- Dong-Hui, W., Lin-Zhi, Y., Zhong-Yu, P., Cong-Da, L., Gang, L., Qiao-Hui, L. 2017.** A novel intersectant flow field of metal bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 41(14):, 2184–2193. <https://doi.org/10.1002/er.3779>
- Fan, L., Niu, Z., Zhang, G., Jiao, K. 2018.** Optimization design of the cathode flow channel for proton exchange membrane fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 171:, 1813–1821. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.06.111>
- Fly, A., Butcher, D., Meyer, Q., Whiteley, M., Spencer, A., Kim, C., Shearing, P. R., Brett, D. J. L., Chen, R. 2018.** Characterisation of the diffusion properties of metal foam hybrid flow-fields for fuel cells using optical flow visualisation and X-ray computed tomography. *Journal of Power Sources*, 395:, 171–178. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2018.05.070>
- Fly, A., Meyer, Q., Whiteley, M., Iacoviello, F., Neville, T., Shearing, P. R., Brett, D. J. L., Kim, C., Chen, R. 2019.** X-ray tomography and modelling study on the mechanical behaviour and performance of metal foam flow-fields for polymer electrolyte fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(14):, 7583–7595. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.01.206>
- Fouquet, N., Doulet, C., Nouillant, C., Dauphin-Tanguy, G., Ould-Bouamama, B. 2006.** Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements. *Journal of Power Sources*, 159(2):, 905–913. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.035>
- Frappé, E., De Bernardinis, A., Bethoux, O., Candusso, D., Harel, F., Marchand, C., Coquery, G. 2011.** PEM fuel cell fault detection and identification using differential method: Simulation and experimental validation. *EPJ Applied Physics*, 54(2):. <https://doi.org/10.1051/epjap/2011100277>
- G Hinds 2004.** Performance and Durability of PEM Fuel Cells: A Review. NPL Report DEPC-MPE 002.
- Gao, Y. 2012.** *US20090214929A1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20090214929>
- Ghanbarian, A., Kermani, M. J. 2016.** Enhancement of PEM fuel cell performance by flow channel indentation. *Energy Conversion and Management*, 110:, 356–366. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.12.036>
- Ghanbarian, A., Kermani, M. J., Scholta, J., Abdollahzadeh, M. 2018.** Polymer electrolyte membrane fuel cell flow field design criteria – Application to parallel serpentine flow patterns. *Energy Conversion and Management*, 166:, 281–296. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.04.018>
- Ghasemi, M., Ramiar, A., Ranjbar, A. A., Rahgoshay, S. M. 2017.** A numerical study on thermal analysis and cooling flow fields effect on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38):, 24319–24337. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.036>

- Griffith, K. R., Rock, J. A. 2002.** Flow Channels for Fuel Cell. .
[https://doi.org/10.1074/JBC.274.42.30033.\(51\)](https://doi.org/10.1074/JBC.274.42.30033.(51))
- Gu, Wenbin; Fly, Gerld; Mathias, M. 2004.** *US20050181264A1*. Retrieved from
<https://patents.google.com/patent/US20050181264A1/en>
- Gülzow, E., Schulze, M., Wagner, N., Kaz, T., Reissner, R., Steinhilber, G., Schneider, A. 2000.** Dry layer preparation and characterization of polymer electrolyte fuel cell components. *Journal of Power Sources*, 86(1):, 352–362.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(99\)00451-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(99)00451-6)
- Guo, N., Leu, M. C., Koylu, U. O. 2014.** Bio-inspired flow field designs for polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36):, 21185–21195. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.10.069>
- Guyton, A.C.; Hall, J. E. 2011.** *Guyton and Hall textbook of medical physiology / John E. Hall.* Retrieved from
https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=qyfRDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=guyton+%26+hall&ots=r16I88Ddfi&sig=tLC4Fm9rHvWgXcEYAMCa4nT0iUo&redir_esc=y#v=onepage&q=guyton%26hall&f=false
- Heidary, H., Kermani, M. J., Dabir, B. 2016.** Influences of bipolar plate channel blockages on PEM fuel cell performances. *Energy Conversion and Management*, 124:, 51–60. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.06.043>
- Heidary, H., Kermani, M. J., Prasad, A. K., Advani, S. G., Dabir, B. 2017.** Numerical modelling of in-line and staggered blockages in parallel flowfield channels of PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4):, 2265–2277. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.10.076>
- Imbrioscia, G. M., Fasoli, H. J. 2014.** Simulation and study of proposed modifications over straight-parallel flow field design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16):, 8861–8867. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.11.079>
- Jamekhorshid, A., Karimi, G., Li, X. 2009.** Current distribution in a polymer electrolyte membrane fuel cell under flooding conditions. *Proceedings of the 7th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering, and Technology 2009 : Proceedings of the 7th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering, and Technology 2009, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection: , 387–393.* <https://doi.org/10.1115/FuelCell2009-85155>
- Jeffrey Allan Rock 1998.** *US6099984A*. Retrieved from
<https://patents.google.com/patent/US6099984A/en>
- Ji, M., Wei, Z. 2009a,** November 17. A review of water management in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energies, Molecular Diversity Preservation International: , 1057–1106.* <https://doi.org/10.3390/en20401057>
- Ji, M., Wei, Z. 2009b,** November 17. A review of water management in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Energies, MDPI AG: , 1057–1106.* <https://doi.org/10.3390/en20401057>
- Ju, H., Wang, C.-Y., Cleghorn, S., Beuscher, U. 2005.** Nonisothermal Modeling of Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(8):, A1645. <https://doi.org/10.1149/1.1943591>
- Kang, H. C., Jum, K. M., Sohn, Y. J. 2019.** Performance of unit PEM fuel cells with a leaf-vein-simulating flow field-patterned bipolar plate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(43):, 24036–24042. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.07.120>
- Karthikeyan, M., Karthikeyan, P., Muthukumar, M., Magesh Kannan, V.,**

- Thanarajan, K., Maiyalagan, T., Chae-Won Hong, Jothi, V. R., Sung-Chul Yi** 2019. Adoption of novel porous inserts in the flow channel of pem fuel cell for the mitigation of cathodic flooding. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.151>
- Karthikeyan, P., Vasanth, R. J., Muthukumar, M.** 2015. Experimental investigation on uniform and zigzag positioned porous inserts on the rib surface of cathode flow channel for performance enhancement in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(13):, 4641–4648. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.01.175>
- Kerkoub, Y., Benzaoui, A., Haddad, F., Ziari, Y. K.** 2018. Channel to rib width ratio influence with various flow field designs on performance of PEM fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 174:, 260–275. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.08.041>
- Kim, Jinyong, Luo, G., Wang, C.-Y.** 2017. Modeling two-phase flow in three-dimensional complex flow-fields of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 365:, 419–429. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.09.003>
- Kim, Junbom, Lee, S., Srinivasan, S., Chamberlin, C. E.** 1995. Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an Empirical Equation. *Journal of The Electrochemical Society*, 142(8):, 2670. <https://doi.org/10.1149/1.2050072>
- Kim, M., Kim, C., Sohn, Y.** 2018. Application of Metal Foam as a Flow Field for PEM Fuel Cell Stack. *Fuel Cells*, 18(2):, 123–128. <https://doi.org/10.1002/fuce.201700180>
- Kim, Mansu, Jung, N., Eom, K., Yoo, S. J., Kim, J. Y., Jang, J. H., Kim, H. J., Hong, B. K., Cho, E.** 2014. Effects of anode flooding on the performance degradation of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 266:, 332–340. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.092>
- Kulikovsky, A. A.** 1999. Modeling the Cathode Compartment of Polymer Electrolyte Fuel Cells: Dead and Active Reaction Zones. *Journal of The Electrochemical Society*, 146(11):, 3981. <https://doi.org/10.1149/1.1392580>
- Larminie, J., Dicks, A.** 2003. *Fuel Cell Systems Explained*, West Sussex, England, . <https://doi.org/10.1002/9781118878330>
- Lee, J., Gundu, M. H., Lee, N., Lim, K., Lee, S. W., Jang, S. S., Kim, J. Y., Ju, H.** 2019. Innovative cathode flow-field design for passive air-cooled polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stacks. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.07.128>
- Li, W., Zhang, Q., Wang, C., Yan, X., Shen, S., Xia, G., Zhu, F., Zhang, J.** 2017. Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEMFCs. *Applied Energy*, 195:, 278–288. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.03.008>
- Li, X.** 2005. Diversification and localization of energy systems for sustainable development and energy security. *Energy Policy*, 33(17):, 2237–2243. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.05.002>
- Li, X., Sabir, I.** 2005a. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(4):, 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.019>
- Li, X., Sabir, I.** 2005b. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(4):, 359–371.

<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2004.09.019>

- Li, X., Sabir, I., Park, J. 2007.** A flow channel design procedure for PEM fuel cells with effective water removal. *Journal of Power Sources*, 163(2):, 933–942. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.015>
- Lim, B. H., Majlan, E. H., Daud, W. R. W., Rosli, M. I., Husaini, T. 2017.** Numerical analysis of modified parallel flow field designs for fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14):, 9210–9218. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.03.189>
- Liu, H.-C., Yan, W.-M., Soong, C.-Y., Chen, F. 2005.** Effects of baffle-blocked flow channel on reactant transport and cell performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 142(1–2):, 125–133. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2004.09.037>
- Liu, H., Li, P., Juarez-Robles, D., Wang, K., Hernandez-Guerrero, A. 2014.** Experimental Study and Comparison of Various Designs of Gas Flow Fields to PEM Fuel Cells and Cell Stack Performance. *Frontiers in Energy Research*, 2:, 2. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00002>
- Liu, Y., Zhang, J.-H., Gao, X.-B., Wu, X.-J., Yu, J., Chen, J.-F., Bian, S.-Z., Ding, X.-H., Huang, L. 2014.** Correlation between blood pressure changes and AMS, sleeping quality and exercise upon high-altitude exposure in young Chinese men. *Military Medical Research*, 1(1):, 19. <https://doi.org/10.1186/2054-9369-1-19>
- Lucas, S. J. E., Burgess, K. R., Thomas, K. N., Donnelly, J., Peebles, K. C., Lucas, R. A. I., Fan, J. L., Cotter, J. D., Basnyat, R., Ainslie, P. N. 2011.** Alterations in cerebral blood flow and cerebrovascular reactivity during 14 days at 5050 m. *Journal of Physiology*, 589(3):, 741–753. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.192534>
- Mascha, E. 1904.** Uber die Schwungfedern. *Z. Wiss. Zool.*, 77:, 606–651.
- Mazumder, S., Cole, J. V. 2003.** Rigorous 3-D Mathematical Modeling of PEM Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(11):, A1510. <https://doi.org/10.1149/1.1615609>
- Montie, Greg; Redlich, Bruce Rodney; Leger, D. E. 2005.** *US20080213648A1*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20080213648>
- Moore, L. G., Charles, S. M., Julian, C. G. 2011,** August 31. Humans at high altitude: Hypoxia and fetal growth. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, Elsevier: , 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2011.04.017>
- Naeije, R. 2010.** Physiological adaptation of the cardiovascular system to high altitude. *Progress in Cardiovascular Diseases*, 52(6):, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.pcad.2010.03.004>
- Nguyen, T. V 1993.** A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(8):, 2178. <https://doi.org/10.1149/1.2220792>
- Nonobe, Y. 2017.** Development of the fuel cell vehicle mirai. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 12(1):, 5–9. <https://doi.org/10.1002/tee.22328>
- Pablo Martin Belchor, Paloma Barbieri, Gabriel Benetti, Evandro Mathias, Mayra Klein, João Bottin, Deyse Suman Carpenter, Maria Madalena Camargo Forte 2015.** Use of Fractals Channels to Improve a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance. *Journal of Energy and Power Engineering*, 9(8):. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2015.08.006>
- Pien M. Shyhing; Warshay, M. 2008.** *US8313870B2*. Retrieved from

<https://patents.google.com/patent/US8313870B2/en>

- Rahimi-Esbo, M., Ranjbar, A. A., Ramiar, A., Alizadeh, E., Aghaee, M. 2016.** Improving PEM fuel cell performance and effective water removal by using a novel gas flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4):, 3023–3037. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.11.001>
- Ralph, T. R. 2006a.** “Principles of Fuel Cells.” *Platinum Metals Review*, 50(4):, 200–201. <https://doi.org/10.1595/147106706X158789>
- Ralph, T. R. 2006b.** “Principles of Fuel Cells.” *Platinum Metals Review*, 50(4):, 200–201. <https://doi.org/10.1595/147106706X158789>
- Ruan, H., Wu, C., Liu, S., Chen, T. 2016.** Design and simulation of novel flow field plate geometry for proton exchange membrane fuel cells. *Heat and Mass Transfer*, 52(10):, 2167–2176. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1737-6>
- Sajid Hossain, M., Shabani, B. 2018.** Experimental study on confined metal foam flow passage as compact heat exchanger surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 98:, 286–296. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2018.09.002>
- Sajid Hossain, M., Shabani, B., Cheung, C. P. 2017.** Enhanced gas flow uniformity across parallel channel cathode flow field of Proton Exchange Membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(8):, 5272–5283. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.042>
- Santamaria, A. D., Bachman, J., Park, J. W. 2013.** Design strategy for a polymer electrolyte membrane fuel cell flow-field capable of switching between parallel and interdigitated configurations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(14):, 5807–5812. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.01.084>
- Soong, C. Y., Yan, W. M., Tseng, C. Y., Liu, H. C., Chen, F., Chu, H. S. 2005.** Analysis of reactant gas transport in a PEM fuel cell with partially blocked fuel flow channels. *Journal of Power Sources*, 143(1–2):, 36–47. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2004.11.055>
- St-Pierre, J., Wilkinson, D. P., Knights, S., Bos, M. L. 2000.** Relationships between water management, contamination and lifetime degradation in PEFC. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 3(2):, 99–106. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.457.781&rep=rep1&type=pdf>
- Tong, S., Bachman, J. C., Santamaria, A., Park, J. W. 2013.** Experimental investigation on a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) parallel flow field design with external two-valve regulation on cathode channels. *Journal of Power Sources*, 242:, 195–201. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2013.05.018>
- Um, S., Wang, C.-Y., Chen, K. S. 2000.** Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 147(12):, 4485. <https://doi.org/10.1149/1.1394090>
- US20100261087A1 2009.** Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20100261087A1/en>
- VARRO, M. T., GUETZ, G., KEIL, H. 1929.** *Rerum Rusticarum Libri III*, Lipsiae. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=ieEmzAEACAAJ>
- Vazifeshenas, Y., Sedighi, K., Shakeri, M. 2019.** Heat transfer in PEM cooling flow field with high porosity metal foam insert. *Applied Thermal Engineering*, 147:, 81–89. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.10.069>
- Velisala, V., Srinivasulu, G. N. 2018.** Numerical Simulation and Experimental

- Comparison of Single, Double and Triple Serpentine Flow Channel Configuration on Performance of a PEM Fuel Cell. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(3):, 1225–1234. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2813-7>
- Wang, C.-T., Hu, Y.-C., Zheng, P.-L. 2010.** Novel biometric flow slab design for improvement of PEMFC performance. *Applied Energy*, 87(4):, 1366–1375. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2009.05.039>
- Wang, X.-D., Duan, Y.-Y., Yan, W.-M., Peng, X.-F. 2008.** Effects of flow channel geometry on cell performance for PEM fuel cells with parallel and interdigitated flow fields. *Electrochimica Acta*, 53(16):, 5334–5343. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2008.02.095>
- Wang, Y., Wang, S., Wang, G., Yue, L. 2018.** Numerical study of a new cathode flow-field design with a sub-channel for a parallel flow-field polymer electrolyte membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4):, 2359–2368. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.11.172>
- Wang, Y., Yue, L., Wang, S. 2017.** New design of a cathode flow-field with a sub-channel to improve the polymer electrolyte membrane fuel cell performance. *Journal of Power Sources*, 344:, 32–38. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.01.075>
- Wawdee, P., Limtrakul, S., Vatanatham, T., Fowler, M. W. 2015.** Water transport in a PEM fuel cell with slanted channel flow field plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(9):, 3739–3748. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2015.01.037>
- Weger, H., Weger, M., Klaas, M., Schröder, W. 2017.** Features of owl wings that promote silent flight (Vol. 7), Royal Society of London. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2016.0078>
- Wilson, M. S. 1993.** Surface Area Loss of Supported Platinum in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(10):, 2872. <https://doi.org/10.1149/1.2220925>
- Wood, D. L., Yi, J. S., Nguyen, T. V 1998.** Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, 43(24):, 3795–3809. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(98\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(98)00139-X)
- Wu, Y., Cho, J. I. S., Neville, T. P., Meyer, Q., Ziesche, R., Boillat, P., Cochet, M., Shearing, P. R., Brett, D. J. L. 2018.** Effect of serpentine flow-field design on the water management of polymer electrolyte fuel cells: An in-operando neutron radiography study. *Journal of Power Sources*, 399:, 254–263. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2018.07.085>
- Xu, X., Yang, W., Zhuang, X., Xu, B. 2019.** Experimental and numerical investigation on effects of cathode flow field configurations in an air-breathing high-temperature PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(45):, 25010–25020. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.07.237>
- Yan, W. M., Chen, F., Wu, H. Y., Soong, C. Y., Chu, H. S. 2004.** Analysis of thermal and water management with temperature-dependent diffusion effects in membrane of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 129(2):, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.028>
- Zawodzinski, T. A. 1993.** A Comparative Study of Water Uptake By and Transport Through Ionomeric Fuel Cell Membranes. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(7):, 1981. <https://doi.org/10.1149/1.2220749>
- ZIEHL-ABEGG Germany -Owl wing. .

EKLER

EK 1 Özgeçmiş

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Erman ÇELİK
Doğum Yeri ve Tarihi : Çemişgezek / 11.11.1986
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Elazığ Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine
Mühendisliği Anabilim Dalı Termodinamik Bilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Teknotasarım A.Ş. 2008-2010

Von Karman Institute for Fluid Dynamics (Kısa dönem
stajyer 3 ay) 2010

Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği
Bölümü 2010- devam ediyor.

İletişim (e-posta) : ecelik@firat.edu.tr

Yayımları

:

Çelik, E., & Karagöz, İ. (2020). Polymer electrolyte membrane fuel cell flow field designs and approaches for performance enhancement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 234(8), 1189–1214. <https://doi.org/10.1177/0957650919893543>

Küpelı, S., Çelik, E., Karagöz, İ. 2020. Three dimensional modelling and parametric analysis of a PEM fuel cell with a serpentine flow channel. ISPEC 6th International Conference on Engineering & Natural Sciences, 24-26 January, Harran University, Sanliurfa.