



**SERPANTİN KANALLI PROTON AKTARAN MEMBRAN YAKIT
HÜCRESİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ**

Hasan GÜNÜŞEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

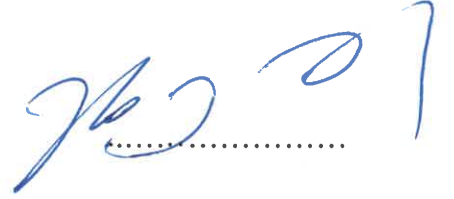
TEMMUZ 2019

Hasan GÜNÜŞEN tarafından hazırlanan “SERPANTİN KANALLI PROTON AKTARAN MEMBRAN YAKIT HÜCRESİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Veli ÇELİK

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Muhittin BİLGİLİ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 21/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, Aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hasan GÜNÜŞEN

21/09/2019

SERPANTİN KANALLI PROTON AKTARAN MEMBRAN YAKIT HÜCRESİNİN SAYISAL ÇÖZÜMÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan GÜNÜŞEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2019

ÖZET

Son yıllarda, enerji ihtiyacının artması ve enerji kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle daha verimli, daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Yakıt hücrelerinin yüksek verimlilik, yüksek akım yoğunluğu, uzun ömre sahip olmaları ve sessiz çalışmaları nedeniyle önemli bir enerji teknolojisi olduğu değerlendirilmektedir. Bu tezde, üç farklı gaz akış kanalı tasarımına sahip PEM yakıt hücresi, çok fazlı, izotermal, kararlı halde ve üç-boyutlu sayısal analiz edilmiştir. Bu amaçla, üç farklı gaz akış kanalı tasarımı (Beş kanallı serpantin tipi (5S), bir kanallı serpantin tip (1S) ve paralel-serpantinli (5PIS) modeller) üzerinde çalışılmıştır. Araştırması yapılan yakıt pilleri, $5,93 \text{ cm}^2$ aktif alana sahip olup Ansys Design Modeler programı kullanılarak üç boyutlu olarak tasarlanmıştır. Ağ yapısı oluşturulması için Icem CFD programı kullanılmıştır. Sayısal analizi, hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) programı olan ANSYS Fluent18.1 programında bulunan PEM Fuel Cell modülü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda nem oranı, reaktan oranı, hücre sıcaklığı, reaktan basıncı, gaz akış kanal genişliği ve kanal yüksekliği parametreleri sabit tutulmuştur. Analizlerde, üç farklı H_2O kütle kesri değeri kullanılmıştır. Sayısal analizde, hazırlanan gaz akış kanalı tasarımları için basınç düşüşü, sıcaklık, reaktan ve su konsantrasyonları dağılımları ve polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Aynı zamanda kanallarda hız dağılımı, sıcaklık, basınç düşümü, su içeriği ve akım yoğunluğu v.b. gibi büyüklükler incelenmiştir. Bu analizlerde anotta hidrojen ve katot tarafındaki hava reaktan gaz olarak kullanılmıştır. Üç farklı gaz akış kanalı, polarizasyon eğrileri ve sayısal analizden elde edilen veriler kullanılarak birbirleri ile karşılaştırılmış ve en iyi performansa sahip model belirlenmiştir. Bu karşılaştırma da 5S gaz akış kanalı modelinin diğer modellerden daha iyi performans gösterdiğini görülmüştür. Fakat basınç düşüşü de dikkate alındığında benzer uygulamalar için 1S tipi gaz akış kanalı modeli uygun olduğu düşünülmektedir. Bulunan analiz sonuçları literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılmış ve uygun olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : PEM yakıt pili, Gaz akış kanalı, HAD Analizi, Ansys Fluent

Sayfa Sayısı : 96

Danışman : Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

NUMERICAL SOLUTION OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL WITH SERPANTINE CHANNEL

(M. Sc. Thesis)

Hasan GÜNÜŞEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2019

ABSTRACT

In recent years, due to increasing energy demand and limited energy resources, more efficient, cleaner and renewable energy resources are being researched. Fuel cells are considered to be an important energy technology due to their high efficiency, high current density, long life and quiet operation. In this thesis, PEM fuel cells that have three different gas flow channels were analyzed as multi-phase, isothermal, steady, numerical and three-dimensional. For this purpose, three different gas flow channel design (five channel serpentine type (5S), one channel serpentine type (1S) and parallel-serpentine (5PIS) models) have been studied. The fuel cells investigated have an active area of 5.93 cm² and are designed in three dimensions by using the Ansys Design Modeler program. The ICEM CFD program was used to create the mesh structure. Numerical analysis was performed by means of the PEM Fuel Cell module in ANSYS Fluent 18.1 program, which is a computational fluid dynamics program (CFD). Humidity rate, reactant ratio, cell temperature, reactant pressure, gas flow channel width and channel height parameters were kept constant in simulations. In the analyses, three different H₂O mass fraction values have been used. In numerical analysis, pressure drop, temperature, reactant and water concentrations distributions and polarization curves were obtained for the gas flow channel designs prepared. At the same time, some magnitudes such as velocity distribution, temperature, pressure drop, water content and current density in channels and cell components have been examined. In these analyses, hydrogen in the anode side and air in the cathode side have been also used as the reactant gas. Three different gas flow channels, polarization curves and the data obtained from the numerical analysis were compared with each other and the best performance model was determined. This comparison shows that the 5S gas flow channel model performs better than other models. However, by considering the pressure drop, 1S type gas flow channel model is regarded suitable for similar applications. The results of the analysis were compared with similar studies in the literature and it has been seen that it's appropriate.

Science Code : 91411

Key Words : PEM fuel Cell, Gas flow channel pattern, CFD analysys, Ansys Fluent

Page Number : 97

Supervissor : Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sürecinde bana destek olan değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli tecrübelerinden faydalandığım sayın danışman hocam Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR'a, Dr. Öğretim Üyesi Muhittin BİLGİLİ'ye ve Araştırma Görevlisi Murat ERBAŞ'a, çalışmalarına verdikleri destekten dolayı değerli aileme ve sevgili oğlum Ahmet GÜNÜŞEN'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. PEM YAKIT HÜCRESİ.....	15
3.1. Yakıt Hücresi Tarihçesi	15
3.2. Yakıt Pili Uygulamaları	15
3.2.1. Ulaşım uygulamaları.....	15
3.2.2. Taşınabilir uygulamalar	16
3.2.3. Sabit uygulamalar	17
3.3. PEM Yakıt Pillerinin Özellikleri	18
3.4. PEM Yakıt Pili Çalışma Prensipleri.....	19
3.5. Yakıt Pili Ana Bileşenleri ve Özellikleri	20

Sayfa

3.5.1. Polimer elektrolit membran	21
3.5.2. Gaz difüzyon tabakaları	24
3.5.3. Katalizör tabaka	27
3.5.4. Bipolar plaka	28
3.5.5. PEM yakıt pili akış kanalı tasarımları.....	30
4. PEM YAKIT PİLİ TERMODİNAMIĞI	311
5. PEM YAKIT PİLİNDE POLARİZASYON EĞRİSİ	35
6. PİL ÇALIŞMA KOŞULLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	39
6.1. Çalışma Basıncı	39
6.2. Çalışma Sıcaklığı	40
6.3. Reaktanların Akış Hızı.....	40
6.4. PEM Yakıt Pillerinde Su Yönetimi.....	41
6.5. Yakıt Pili Su Baskını.....	43
6.5.1. Anot su baskını	44
6.5.2. Katot su baskını.....	45
6.5.3. Akış kanalları su baskını.....	45
7. SAYISAL ANALİZ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
7.1. Korunum Denklemleri ve Kabuller	47
7.2. Sınır Koşulları.....	49
7.3. 1S, 5PIS ve 5S Akış Kanallı PEM Yakıt Hücrelerinin Sayısal Analizi.....	51

Sayfa

7.4. Akış Kanalı Çeşitleri.....	51
7.5. Sayısal Çözüm Yöntemi	58
7.6. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Polarizasyon Eğrilerinin Değerlendirilmesi .	62
7.6.1. Aynı yönlü akış şartlarında 1S, 5PIS ve 5S yakıt pillerinin polarizasyon eğrilerinin değerlendirilmesi	62
7.6.2. Ters yönlü akış şartlarında 1S, 5PIS ve 5S yakıt pillerinin polarizasyon eğrilerinin değerlendirilmesi	65
7.7. Analiz Sonuçlarının Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması	79
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83
EKLER.....	89
EK-1. 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Anot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi	90
EK-2. 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Katot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi	94
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Yakıt hücresi bileşenlerinde çözölen denklemler ve kaynak terimleri	49
Çizelge 7.2. Sayısal model sınır şartları.....	50
Çizelge 7.3. Sayısal analizde kullanılan çeşitli parametreler ve giriş değeri.....	56
Çizelge 7.4. Yakıt pili modelinin geometrik boyutları	58
Çizelge 7.5. CL/Membran ara yüzünde katot tarafında su içeriğı dağılım değeri.....	73
Çizelge 7.6. CL/Membran ara yüzü, anot tarafında su içeriğı dağılım değeri.....	74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Ballard Firmasına ait yakıt pili	3
Şekil 3.1. PEM yakıt pili otomobil uygulaması.....	16
Şekil 3.2. PEM yakıt pili seyyar uygulaması.....	17
Şekil 3.3. PEM yakıt pili sabit uygulaması	18
Şekil 3.4. PEM yakıt pili çalışma prensibi diyagramı	19
Şekil 3.5. Kapsamlı yakıt pili şeması	21
Şekil 3.6. Çift Katman GDL'nin şematik gösterimi	27
Şekil 3.7. PEM Elektrolit, katalizör ve gaz difüzyon tabakaları.....	28
Şekil 3.8. Bipolar plaka için kaplama malzemeleri	29
Şekil 3.9. Akış kanalı tasarımına örnekler	30
Şekil 4.1. PEM yakıt hücresinin çalışma prensibinin şematik gösterimi.....	31
Şekil 5.1. PEM yakıt pili polarizasyon eğrisi	36
Şekil 6.1. Çeşitli basınçlarda yakıt pili performansı.....	39
Şekil 6.2. PEM yakıt hücresi içerisinde su iletim mekanizması	42
Şekil 6.3. Sabit hücre voltajında (0,6 V) PEM yakıt pili çalışırken tipik bir su baskını örneği.....	44
Şekil 7.1. PEM yakıt pilinin ayrıntılı görünümü.....	52
Şekil 7.2. Gaz akış kanalı deseni 2 boyutlu görünümü a) 1S, b) 5PIS, c) 5S.....	53
Şekil 7.3. Gaz akış kanalı 3 boyutlu görünümü a) 1S, b) 5PIS, c) 5S	54
Şekil 7.4. 1S tipi gaz akış kanal deseninin geometrik ölçüleri (cm).....	55
Şekil 7.5. 1S yakıt pili için 0,3 V hücre voltajında farklı mesh eleman sayılarında elde edilen akım yoğunlukları.....	59
Şekil 7.6. 5PIS yakıt pili için 0,3 V hücre voltajında farklı mesh eleman sayılarında elde edilen akım yoğunlukları	60

Şekil	Sayfa
Şekil 7.7. 5S yakıt pili için 0,3 V hücre voltajında farklı mesh eleman sayılarında elde edilen akım yoğunlukları.....	60
Şekil 7.8. Mesh işlemi yapılarak elemanlara ayrılmış 1S PEM yakıt pili	60
Şekil 7.9. Ansys fluent PEM yakıt pili sayısal model yapısı	61
Şekil 7.10. 1S yakıt hücresi için aynı yönlü akımda, 0,6 V hücre geriliminde iterasyon sayılarına göre akım yoğunlukları değişimi	61
Şekil 7.11. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin aynı yönlü giriş akışında ve %62,2 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri	62
Şekil 7.12. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin aynı yönlü giriş akışında ve %70 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri	63
Şekil 7.13. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin aynı yönlü giriş akışında ve % 80 giriş reaktan nemliliğinde polarizasyon eğrileri	64
Şekil 7.14. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin zıt yönlü giriş akışında ve %62,2 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri	65
Şekil 7.15. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin zıt yönlü giriş akışında ve % 70 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri	66
Şekil 7.16. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin ters yönlü giriş akışında ve %80 giriş reaktan nemliliğinde polarizasyon eğrileri.....	67
Şekil 7.17. H ₂ kütle kesri, aynı yönlü akışta anot tarafı, katalizör / GDL arayüzü 0.4V ve %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S.....	68
Şekil 7.18. O ₂ kütle kesri, aynı yönlü akışta katot tarafı katalizör / GDL arayüzü 0.4V ve %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S.....	68
Şekil 7.19. H ₂ O kütle kesri katot tarafı, aynı yönlü akışta, GDL / katalizör arayüzü 0.4V hücre voltajında %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S...	69
Şekil 7.20. H ₂ O kütle kesri katot tarafı, aynı yönlü akışta GDL / katalizör arayüzü 0,8 V hücre voltajında %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S	70
Şekil 7.21. Membran su içeriğinin dağılımı, aynı yönlü akışta katot tarafı, CL/ membran ara yüzeyi, 0,4V, %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S	72
Şekil 7.22. Membran su içeriğinin dağılımı, aynı yönlü akışta anot tarafı, CL/ membran ara yüzeyi, 0.4V, %70 giriş nemliliğinde, a) 1S, b) 5PIS, c) 5S	73

Şekil	Sayfa
Şekil 7.23. Akım Yoğunluğu, aynı yönlü akış, katot tarafı, GDL / katalizör arayüzü 0,4V, %70 anot giriş nemliliğinde, a) 1S, b) 5PIS, c) 5S	74
Şekil 7.24. Sıcaklık dağılımı, aynı yönlü akış, katot tarafı katalizör / membran arayüzü 0,4V, %70 anot giriş nemliliğinde, a) 1S, b) 5PIS c) 5S.....	76
Şekil 7.25. Sıcaklık dağılımı, aynı yönlü akış, katot tarafı katalizör / membran arayüzü 0.8 V hücre voltajında a) 1S, b) 5PIS, c) 5S	76
Şekil 7.26. Basınç düşümü, 0.8V hücre geriliminde.....	77
Şekil 7.27. Katot gaz akış kanalındaki reaktan akış hızları 0,8 V hücre geriliminde, a) 1S, b) 5PIS, c) 5S.....	78
Şekil 7.28. 1S yakıt pilinin aynı yönlü akışta, %62,2, %70 ve %80 reaktan nemliliğinde polarizasyon eğrileri	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Gore select membran®	23
Resim 3.2. Gaz difüzyon katmanı resmi	25
Resim 3.3. Farklı malzemelerden yapılmış bipolar plakalar	30

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
C	Derişim
°C	Santigrat Derece
cm	Santimetre
D	Kütle iletim katsayısı
E	Enerji kullanımı
F	Faraday sabiti
gr	Gram
I	Akım
J	Transfer akım yoğunluğu
kg	Kilogram
kj	Kilo jul
M	Mol
m	Kütlesel debi
mm	Milimetre
n	Tesir değeri
Pa	Paskal
R	Molar gaz sabiti
S	Kaynak terim
t	Zaman
u	Elektrokimyasal mobilete
U	Akış hızı
V	Gerilim
W	İş
Ω	Ohm
lt	Litre
T	Sıcaklığı (K)

Simgeler**Açıklamalar**

X	Mol oranı
ε	Gözeneklilik
v	Hacimsel akış oranı (Lmin^{-1})
ρ_i	Türlerin yoğunluğu i (kg.m^{-3})
σ	Faz iletkenliği ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)
Φ	Potansiyel (V)
Λ	Isı iletim katsayısı
ζ	Stokiyometrik oran
γ	Kütle kesri oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CFD	Hesaplamaalı akışkanlar dinamiği
CL	Katalizör tabakası
GDL	Gaz difüzyon tabakası
MEA	Membrane electrode assembly
MEÇ	Membran elektrot çifti
MGK	Mikro gözenekli katman
PEM	Proton aktaran membran
PEMFC	Proton aktaran membran yakıt pili
PTFE	Politeirafloetilen
UDF	Kullanıcı tanımlı fonksiyonlar

1. GİRİŞ

Doğal kaynakların hızla tükenmesi ve daha temiz bir dünya amaçlanması gibi nedenler çalışmaları temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Kullanılan petrol ve türevi yakıtlar gerek doğaya verdiği zarar açısından problem teşkil etmekte ve bu problemlerin başında petrol türevli yakıtların ekolojik dengeye verdikleri zararlar gelmektedir. Çoğu karbon içerikli bu yakıtların yanması ile açığa çıkan emisyonların zehirli olması ve bu emisyonların atmosferdeki artışı ile asit yağmurları ve sera etkisi gibi olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim bir tercih olmaktan çıkıp mecburiyet haline dönüşmüştür. Yakıt hücresi, yukarıdaki tüm gereksinimleri karşılayan en umut verici ve enerji dönüştürme teknolojisi olarak belirlenmiştir.

Çevre ve sağlıkla ilgili endişelerin yanı sıra sınırlı fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi, insanoğlunun enerji dönüşümü ve enerji üretimi için geleneksel ısı makinalarından daha verimli, daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uyumlu yeni nesil teknoloji arayışı içine girmesine neden olmuştur. Bu amaç doğrultusunda keşfedilen yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bir araçtır. Bir PEM (Proton Exchange Membrane: Proton Aktaran Membran) yakıt pili olan hücre de hidrojen gazı ve oksijen gazını reaktif olarak kullanır. Yakıt pilindeki reaksiyonun ürünleri olarak; su, elektrik ve ısı ortaya çıkar. Bunun tam tersine, İçten yanmalı motorlarda büyük gelişmeler olmasına rağmen reaksiyon sonucunda zararlı ürünler ortaya çıkarmaktadır. Bir yakıt pili için, oksijen atmosferde hazır bulunması nedeniyle, sadece hidrojeni tedarik etmeye ihtiyacımız bulunmaktadır. Yakıt pili, konvansiyonel güç kaynaklarına (içten yanmalı motorlar veya bataryalar) kıyasla birçok avantajı mevcuttur. Faydalarını saymak gerekirse:

- Yakıt pili dizel ve gaz motorlarına göre daha yüksek verimliliğe sahiptir.
- Çoğu yakıt pili içten yanmalı motorlara kıyasla daha sessiz çalışır. Bu yüzden ideal olarak hastane tarzında binalar için uygundur.
- Hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt pillerinin son ürünü su olması nedeniyle fosil yakıtların yanması ile oluşan hava kirliliğini bertaraf etmek için uygundur.
- Yakıt pili konvansiyonel yakıtlara (benzin veya gaz) ihtiyaç duymaz ve petrol üreten ülkelere olan bağımlılığın azaltılmasına yardımcı eder. Bunun sonucunda, yakıt pili üreten

Ülkelerin daha fazla enerji üretimi gerçekleşir. Bunun sonucunda, ekonomik ve siyasi bağımsızlıkları için olumlu etki oluşturur.

- Düşük sıcaklıklı yakıt pilleri (PEMFC, DMFC) düşük ısı transferine sahip olmaları nedeniyle askeri uygulamalar için uygundur.
- Yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri, yüksek nitelikli ısı işlemleriyle elektrik ürettiklerinden kojenerasyon uygulamaları (yerleşim yerleri için kombine ısı ve g uygulamaları) için uygundur.
- İşletme zamanları bataryalardan daha uzundur.
- Yakıt pilleri sürdürebilir sistemlerdir. Çünkü hareketli parçalara sahip değıldirler.

Geleceğın enerji taşıyıcısı hidrojeni elektriğ mkemmел dönüştürme kapasitesi ile yakıt pilleri, hidrojen teknolojisinde çok önemli yer edinmiştir. Başlangıçta maliyetin ikinci planda olduğu sınırlı uygulamaları olan bu tip piller, artık ısı ve elektrik üretiminde kullanılan düzenekler olmaya başlanmıştır. Bunun da ötesinde, elektrik araçlarına g sağlamada parlak bir gelecek vaat etmektedir.

Yakıt hücreleri, yakıt enerjisini bir yanma işlemi gerçekleşmeden doğrudan akıma eviren elektro-kimyasal cihazlardır. Yakıt hcreesinde kimyasal olarak depolanan enerji elektro-kimyasal bir prosesle elektrik akımına dönüştürülür. Yakıtın kimyasal enerjisi, ideal bir elektrokimyasal hücrenin içinde yakıtın oksitlenmesiyle, ısı akısı yerine elektron akısı formunu alır. Yakıt hücrelerinin temeli, yanma prosesi olmadan yakıt ve oksitleyici moleküllerinin elektro-kimyasal kombinasyonuna dayanır.

Yakıt hücrelerinin sahip olduğu bu avantajlar, teknolojisinin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi için itici güç oluşturmaktadır. Günümüzde yakıt hücrelerinin en önemli dezavantajı bütün eşitleri için aynı olan maliyettir. Farklı türleri için güçlü özellikleri ve farklı uygulamalara öncülük eden çeşitli avantajları (verimlilik, basitlik, düşük emisyon, sessiz çalışma gibi) vardır (Carcadea, Varlam, Stefanescu, Stanciu, Ionete, ve Patularu, 2009).

Yakıt hücreleri genellikle, elektrik enerjisi üretimine göre 40% daha fazla verimlilik, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verime sahiptir. Bununla birlikte, yakıt hücrelerinden atılan ısı, ısıtma amaçlı kullanılabilir. Son olarak farklı tip yakıt hücrelerinde

hidrojen, etanol, metanol ve hidrojen gibi farklı yakıtların kullanılabilmesi fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya yardımcı olmaktadır (Chen, Jia, Liu, ve Zhang, 2018).

İlk yakıt pili çalışmaları 1838 yılında Sir William Grove tarafından H_2-O_2 pili üzerinde yapılmıştır. Mazisi oldukça eski yıllara dayanan yakıt pili, ilk kez 1958 yılında NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde kullanıldığı bilinmektedir. İlk yakıt pili çalışmaları 1838 yılında Sir William Grove tarafından H_2-O_2 pili üzerinde yapılmıştır.



Şekil 1.1. Ballard Firmasına ait yakıt pili

Resimde ballard firmasına ait güç gerektiren uygulamalarda kullanılması için tasarlanan Ballard Heavy Duty Motive Modules görülmektedir. Bu modüller özellikle değişik işletme koşullarında ve hibrid elektrikli düzeylerde, geniş çapta güç gerektiren koşullarda portföy olarak müşterilerin tercihlerine sunulmuştur. Bu yakıt pili yığınlarının özellikleri; 30 kW-200 kW' a kadar güç sunabilmesi, esnek entegrasyon özelliğine sahip olması ve geniş işletme aralığında dayanıklı performanstır.

Yapılan bu çalışmanın amacı, alternatif enerji elde etme yöntemlerinden biri olan PEM yakıt hücresinin, sayısal yöntem ile analiz edilerek hücre performansını etkileyen parametrelerin incelenmesidir. Bu çalışmada üç değişik geometri üzerinde analiz

yapılmıştır. Bu analizler, 1S (bir kanallı serpantin), 5S (beş kanallı serpantin) ve 5PIS (paralel-serpantinli) kanallı yakıt pili uygulamaları üzerinde oluşturulmuştur. Bu çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yakıt pillerinin geometrileri oluşturulmuştur. En iyi performansın elde edildiği hücre boyutları daha sonra yapılan analizlerde (ağ yapısı oluşturma ve sayısal analiz) kullanılmıştır. Yakıt hücresi geometrik olarak optimize edildikten sonra; anot ve katot nemliliği, reaktan gaz giriş sıcaklığı, çalışma basıncı ve reaktan akış yönü ve çalışma parametrelerinin hücre performansına etkileri incelenerek sonuçlar polarizasyon eğrisi ve grafik üzerinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan deneysel ve sayısal çalışmalara karşılaştırılarak, oluşturulan sayısal model için doğrulama çalışması yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yakıt hücresinin verimini arttırmak için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Yakıt pilinin performansını arttırmak amacıyla, yakıt hücre elemanlarının (akım toplayıcı plakalar, gaz akış kanalları, gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası, membran) ve çalışma koşullarının düzenlenmesi gerekmektedir. Yakıt pillerinde deney maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle, sayısal analiz çalışmaları yakıt hücresini modellemek ve araştırmak için kullanılmaktadır.

Awan, Saleaam ve Basit (2018) yaptığı çalışmada, Proton değişimli yakıt pilleri (PEMFC) elektriğe alternatif bir kaynaktır. Güncel çalışma, yakıt pili performansını araştırmak için izotermal ve izotermal olmayan koşullar altında yakıt pilinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarını içermektedir. Yakıt pili performansına basınç ve sıcaklığın etkisi izotermal ve izotermal olmayan koşullar altında çalışılmıştır. PEM yakıt pili 323 K ve 1 atm basınç, izotermal şartlarda modellenmiş, tam tersine izotermal olmayan koşullarda, simülasyon 353 K ve 3 atm basınç altında çalıştırılmıştır. Sonuç olarak, akım yoğunluğu yakıt pilinin çalışma basıncı arttıkça artar, tam tersi sıcaklık arttıkça azalır.

Carcadea ve diğerlerinin (2009) yaptığı çalışmada; aynı yönlü ve ters yönlü konfigürasyonda değerlendirilen serpantin akış kanallı PEM yakıt hücresine ait 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli bu makalede sunulmaktadır. PEM Yakıt pili performansında, yakıt ve oksitleyici maddenin akış yönünün önemli etkisi olduğunu düşünülmüştür. Bu noktadan hareketle, HAD model, bu makalede kullanılan, akış tüpündeki difüzyon ve taşınım ısı ve kütle transferinin etkisini vurgulamak için PEM yakıt pilinde ters ve düz yönlü akış konfigürasyonlarının oluşturduğu büyük taşınım olaylarını açıklanmıştır.

Chen ve diğerlerinin (2018) yaptığı çalışmada; proton değişimli yakıt pili güç üretiminin ideal bir formu olduğuna vurgulanmıştır. Ancak, pil performansı dinamik yük altında güçlü bir risk içermiştir. PEM yakıt pilli bileşenlerinin rasyonel tasarımını kolaylaştırmak için dinamik yük altında güç performansını tam ve doğru olarak bilmek amaçlanmıştır. Bu makale de tam doğru bir 3D model PEM yakıt pili inşa edilmiş, sonrasında kararsız durumlarda dinamik voltaj tepkisi tam olarak hesaplanmıştır ve sonunda ılımlı dinamik tepkiyi tanımlayan faktörler tanımlanmıştır. Sonuçlar, PEM yakıt pilinin kararlı çalışmasını

temin etmek için, akım yoğunluğu değişim oranının artmasından kaçınılmasını önermekte ve ki buda PEM yakıt pilinin ömrü boyunca yararlıdır. Bu arada anot/katot basıncı 2,0 atm. çıkmıştır, H_2/O_2 katsayısı 2,0/2,5'un üstünde beslenmiştir veya anot ve katot girişi 100 % nemlilikle yeterince nemlenmiştir, bu durum PEM yakıt pilinin dinamik yüklemelere tepkisinde yeni bir dengeye ulaşmasını yardım etmiştir. Bu makalenin orijinalliği, ılımlı potansiyel faktörlerin parametrik analizi ve dinamik tepki mekanizmaları ile birlikte PEM yakıt pilini detaylı bir modeliyle bütünleşmesidir.

Dutta, Shimpalee ve Zee' nin (2001) yaptığı çalışmada; serpantinli yakıt pili numerik modelinde, kanallar arasında geçen kütle akışını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Üç boyutlu çoklu tür karışımı ile Navier Stokes eşitliği çözülmüş ve elektrokimyasal tepkimeleri kontrol hücrelerinde kaynak/alıcı terimler olarak modellenmiştir. Sonuçlar anot ve katottaki akış dağılımlarının MEA (Membran Elektrode Assembly) üzerinde kütle tüketim dağılımlarının etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Su iletimi elektro-ozmosis ve difüzyon işlemlerini yönetir. Dahası, tüm basınç düşümü bir düzenli kanal akışı için beklenenden daha azdır.

Fahruddin Ichani ve Taufany' nin (2018) yaptıkları çalışmada; PEM yakıt pili akış sahasında deflektörle gaz difüzyon tabakasında reaktan basıncını artmıştır, katalizör tabakaya reaktan transferi ve rib altından su tahliyesi de artırır ki buda pil performansını artırdığını görmüşlerdir. Bu çalışma da üçlü serpantinli akış sahasında üçgensel deflektör konfigürasyonu ile araştırmak için numerik simülasyonlar yapılmış ve deflektörsüz akış sahası yakıt pili performansı ile karşılaştırılmıştır. A-9 tabaka 14 cm² aktif alanlı PEM yakıt pili kullanılmıştır. Deflektörler tek sıralı ile çizgi halinde ve akış yönüne iki sıralı enine olarak düzenlenmiştir. Çeşitli debiler optimizasyon için uygulanmıştır. Sonuçlar deflektör konfigürasyonlu akış sahası güç yoğunluğunu %8 geliştirirken tam tersine deflektörsüz akış sahasıyla kıyaslandığında akım yoğunluğu %6 artmaktadır.

Ghanbarian ve diğerlerinin (2018) yaptığı çalışmada, yakıt pillerinin performansını maksimize etmek için bir anahtar strateji, uygun akış sahası örneğinin seçimi olduğunu belirtmişlerdir. Bu makalede, PEM yakıt pili için paralel serpantinli akış sahası için uygun tasarım geliştirilmiştir. Kanal yüksekliği ve genişliği için birçok parametre içermektedir, iki bitişik kanal arasındaki boşluk ve paralel kanalların sayıları ve serpantin dönüşlerini içermektedir, ayrıca bu dizayn parametreleri içerisindeki bütün olası akış bölgesi

konfigürasyonları belirlenmiştir. Bir sonraki adımda, altı ardışık kısıtlama filtreleri belirlenmiş ve bütün olası akış sahası konfigürasyonları zorlanmıştır. Son adımda, bir tam üç boyutlu simülasyon, kalan durum için yürütülmüştür. Simülasyon sonuçları temel alınarak, en iyi durum en düşük basınç düşümü akış sahası ile örtüşmüştür, katalizör tabakadaki en üst oksijen içeriği, katalizör tabaka içerisinde oksijen dağılımının en yüksek düzenliliği ve katalizör tabaka içerisinde üretilen yoğunlaşmanın en küçük içeriği gibi durumlar değerlendirilmiştir.

Hashemi, Rowshanzamir ve Rezakazemi (2012) yaptığı çalışma da bir tam isothermal olmayan, 3 boyutlu model, PEM yakıt piline ait düz ve serpantin akış kanallı PEM yakıt pilinin performansını araştırmak için oluşturulmuştur. Bu model, yakıt pilindeki kütle, ısı ve enerji iletimi, elektrot kinetiği önemli taşınım olaylarını içerir. Bu ters akım ve düz akım içeren örnekler hücre içindeki tüm akışlar için dikkate alınır. Oksijen ve hidrojen kütle oran dağılımları, akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımına karar verilmiştir. Aktivasyon aşırı gerilimi anot ve katot arasında sabittir. Modelleme bulguları, sabit aktivasyon aşırı gerilimiyle varsayılan simülasyonların profillerden farklı olduğunu göstermiştir. Serpantin akış kanalı, akım yoğunluğu ve sıcaklığın daha iyi dağılımına sahip olduğunu göstermiştir. Simülasyonlar literatürde bulunan deneysel verilerle kıyaslanmış model ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Kahveci ve Taymaz (2018) yaptığı çalışmada, 3 boyutlu, tek fazlı bir model, serpantin kanallı akış bölgesi Proton Değişimli Membran yakıt pilinin performansını artırmayı hedeflemişlerdir. Model, 333-353 °C sıcaklık aralığında, 1-3 atm arası basınçta, 0,3-0,6 mm arasındaki gaz difüzyon tabakasında, 10-100 % anot ve katot rölatif nemlilikte çalıştırılmıştır. Yakıt pilinin akım ve güç yoğunluğu bu çalışma koşullarında ölçülmüştür. PEM Yakıt pilinin V-I karakteristikleri giriş parametrelerinin çeşitli değerleri için sağlanmıştır. Numerik simülasyon, HAD (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) Fluent yazılımı temel alınarak gerçekleştirilmiştir. PEM Yakıt pilinin performansı, kütle taşınım direnci azalması sonucunda reaktan gazların yayılması ve kısmi basınç nedeniyle çalışma basıncının artması ile yükselir. Aşırı belirli sıcaklık olmasına rağmen yakıt pili performansı azalır. Sonuçlar, maksimum güç yoğunluğunu 0,6 GDL porozite, $RH_a = \%100$ ve $RH_c = \%10$ ve 3 atm. basınç değerinde göstermiştir. Keza simülasyon sonuçları literatürde bildirilen deneysel sonuçlarla ve yapılan deneylerin sonuçları ve model arasında iyi bir uyum göstermiştir. Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı artırılması pil performansının artırmaktadır.

GDL Porozitesi artıkça yakıt pili performansının arttığı gözlemlenmiştir. Daha yüksek poroziteli GDL tabakası katalizör tabakaya göre daha fazla gaz geçer, sırasıyla, daha fazla kimyasal tepkime oluşur ve daha iyi yakıt pili performansı ile neticelenir. Anot tarafında rölatif nemlilik artıkça, hidrojenin kütle transferi ve kimyasal tepkimesi artar. Ayrıca, membranda ki su içeriği (water content) artırır. RH_c azaldıkça, artan reaktanların içindeki oksijen derişimi artar ve katot tarafındaki su buharı azalır, sonuçta yakıt pili performansı artar.

Kerkoub, Benzaoui, Haddad ve Ziari' nin (2018) yaptığı çalışmada, $5,1 \times 5,1 \text{ cm}^2$ ve 25 kanaldan oluşan PEM yakıt pilinin performansı üzerinde akış sahasının ölçüleri ve geometrik tasarımlarının etkisi üç boyutlu HAD (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) modeli oluşturularak incelenmiş ve pratik edilmiştir. (η = kanal genişliği / kanal arası genişliği) olarak belirlenen altı kanallı ve kanallar arası boşluk oranıyla paralel, interdigitated ve serpantin kanallı üç PEM yakıt pili analiz edilmiştir. Pilin alanını korumak ve kanal sayısını sabit tutularak, kanal genişliği artırılırken kanallar arası boşluk azaltılır ve karşılaştırma amaçlı tersi de yapılmıştır. Yüksek çalışma voltajında, geometrik tasarımlar ve kanal-kanal arası genişliği oranları pil performansına az etki yaparken tam tersine düşük çalışma voltajında pil performansına önemli bir etki yapmıştır. Serpatin kanallı PEM yakıt pili en iyi performansı göstermiştir. Bu performans paralel ve interdigitated kıyaslanınca sırasıyla %4,6 ve %39,1 daha fazladır. Ek olarak, kanal genişliği azalınca ve kanallar arası genişlik artınca pil performansı da artar. Performans, kanal-kanal arası oran $2,66 / 0,25$ azaltılırsa, serpantin için %120 üzerinde, interdigitated için %45 ve paralel %23 artar. Lokal transport olayı da analiz edilmiştir. Basınç düşümü ve rib altı konveksiyon, kanal-kanal arası oran azaldıkça yükselir. Bu durum rib'lerin altında yüksek reaktan hızı ve Katalizör tabaka da homojen lokal transport olayı ile sonuçlanır ve güç yoğunluğu da artar.

Kumar ve Reddy' nin (2003) yaptığı çalışmada, bipolar/son plakanın akış sahasının şekli ve boyutlarının optimizasyonu aracılığıyla PEM yakıt pilinin performansındaki gelişimlere konsantre olunmuştur. Tek yollu serpantinli akış sahası tasarımı, anottaki hidrojen tüketiminin kanal boyutları üzerindeki çalışmalara etkisi için kullanılmıştır. Simülasyonlar $0,5 / 4 \text{ mm}$ aralığında farklı kanal genişlik / derinliğinde ve alan genişliğinde yapılmıştır. Ölçülerin her bir optimum değerleri (kanal genişliği, alan genişliği ve kanal derinliği) sağlanmıştır. Hidrojen tüketimi için (~80%), kanal genişliği, alan genişliği ve kanal derinliği için optimum ölçü değerleri sırasıyla 1.5, 0.5, ve 1.5 mm değerlerine yaklaşmıştır.

Kanal genişliklerinin etkisi üzerindeki çalışmalar üçgensel ve yarı küresel şekilli kesit alanlı olanlarda hidrojen tüketiminin anot tarafında yaklaşık %9 oranında artması ile sonuçlanmıştır. Sonuç olarak, bu şekillerin kullanımı yakıt pili verimliliğinin artmasına yol açmıştır.

Li ve Sunden (2018) yaptığı çalışmada; Havanın sınırlı soğutma kapasitesi nedeniyle, büyük ölçekli PEM yakıt pili yığınlarında genellikle soğutma suyunun soğutma plakalarının akış kanallarından dolaştırıldığı sıvı soğutma ile gerçekleştirilir. Etketif soğutma, yakıt pili performansı, dayanıklılığı ve kararlılığı için gereklidir. Simülasyon sonuçları sıcaklık düzenliliği indeksi, maksimum ve minimum sıcaklık değerleri arasındaki fark, maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık, basınç düşümü dönemleri sunulmuştur. Ek olarak, ısı akısı ve soğutma performansı üzerinde giriş reynolds sayısının etkisi çalışılmıştır. Özgün akış kanalı tasarımları hayata geçirilirken soğutma performansının önemli ölçüde iyileştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Limjeerajarus ve Nishiyama' nın (2009) yaptığı çalışmada, bir polimer elektrolit yakıt pili membran elektrotu montaj modeli katalizör tabakanın yapısal ve reaksiyon parametrelerine odaklanarak geliştirilmiştir. Bu tepkime ve yapısal parametreler platinin birim başına aktif yüzey alanı açısından oksijen tüketimini göz önüne alınarak bağımsız olarak modellenmiştir. Katalizör tabaka modelleri silindirik ikincil gözenekli yapı temel alınarak inşa edilmiştir, bu durum ilk gözenekli ölçü kullanılarak / porozimetry ile ölçülerek doğrulanmıştır. Pt/C katalizör tabakanın ilk gözeneklerinden Nafion® elektrolite penetrasyonun kısıtlandığı bulunmuştur ve böylece ilk gözeneklerdeki tepkime ve difüzyon ihmal edilebilir hale gelmiştir. Dahası, deneysel sonuçlar, aynı katalizör için, oksijen indirgenmetepkimesi aktivitesi hemen hemen sabittir, yığın ölçüsünü hesaba katmaksızın görülmüştür. Yapısal parametrelerin ve tepkime parametrelerinin yazarların iddiasını desteklemiştir. PEM yakıt pili modeli bağımsızca dikkate alınmalıdır. Geliştirilen modelle tahmin edilen pil performansı deneylerle sağlananlarla kıyaslanınca tatmin edicidir. Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen model sağlam doğrulukta kazanılan sonuçlarla oluşturulmuş ve PEM yakıt pili modellerinde kullanılmış ve gelecekte PEM yakıt pilinin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak kullanılacaktır.

Limjeerajarus, Yanagimotoa, Yamamoto, Ito ve Yamaguchi'nin (2008) yaptığı çalışmada, gaz faz sistemindeki tek hücreli polimer elektrolite sahip yakıt pili elektrot tertibatı adsorbe

edilen oksijen içeren türlerdeki miktar sıyırma voltametrisi ile ölçülmüş, adsorbe edilen miktar içindeki, sıyırma için gereken elektrik şarjının miktarı açısından dikkate alınmıştır. Çeşitli deneysel parametreler üzerindeki adsorbsiyon miktarının etkisi analiz edilmiş ve yakıt pili MEÇ bölgesi sıyırma voltametrisi için optimum koşullar önerilmiştir. Sıyırma için önerilen elektrik yükü oransal olarak yükseltile (0,7 V' dan başlayarak) lineer olarak gözlemlenmiştir. 60 °C yakıt pili sıcaklığında MEÇ bölgesinde oksijen içeren türlerin adsorbsiyon miktarı 1,0 V Potansiyelde 384 μCcm^{-2} -Pt. Hepsinden önemlisi, MEÇ bölgesinde gaz fazındaki adsorbsiyonun oksijenin kısmi basıncı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, adsorbe edilen oksijen içeren türlerin içindeki oksijenin ana kaynağının su olduğu önerilmektedir. Bu günkü metod yakıt pili MEÇ'inin elektrodu üzerinde adsorbe edilmiş türlerin oksijen içeriğinin sayısal çalışmalarına iyi bir şekilde uygulanabilir.

Liu, Yang, Cheng ve Tan yaptığı çalışmada, PEM yakıt pilinin bipolar plakasının akış sahası pil performansı üzerinde sonuca götüren bir rol oynadığını belirtmiştir. Bu çalışmada, iki dengelenmiş akı sahası ve kombine edilmiş muti-serpantin akış sahası, akış düzgünlüğü ve su çıkarma kapasiteleri araştırılmış ve hücre performansı üzerindeki etkileri anlamaya çalışılmıştır. Dengelemeli akış sahalarının rib altındaki ters akış ve akış düzgünlüğünü önemli ölçüde artırılmıştır, hatta akım yoğunluğu dağılımı açısından multi-serpantin diğeri ile kıyaslanmıştır. Dahası, kombine edilmiş multi-serpantin akış sahası ayrık akış sahası olanlara göre akım yoğunluğu daha düzgün dağılmış ve daha güçlü su çıkarma kapasitesi göstermiştir, çünkü multi-serpantin akış sahası kanalların giriş parçaları ve çıkış parçaları aynı yerde toplanmıştır.

Omeiri ve Laouar'ın (2018) yaptığı çalışmada, PEM (Proton Değişimli Membran yakıt pili) yüksek verimlilik, düşük çalışma sıcaklığı ve yüksek güç yoğunluğu sayesinde ulaşım ve sabit uygulamalar için sıfır emisyonlu alternatif bir güç kaynağı adayı olmaya ümit vadetmiştir. Ayrıca, bu sınıf enerji, optimize edildiğinde performansı geleneksel içten yanmalı motorlarla rekabetçi haline gelmiştir. Bu çalışma, farklı çalışma koşulları altında ve değişik kanal geometrileri olan PEM yakıt pilleri için üç boyutlu optimizasyon çalışmalarıdır. Süreklilik, momentum, enerji ve türlerin korunumu denklemleri, elektrotların ve gaz kanal çiftlerinin içindeki gaz karışımındaki türlerin korunumu ve akışı tarif eder ve numerik çözümünde hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu kullanılmıştır. Yakıt pili üzerinde kanal geometrilerinin ve değişik çalışma koşullarının etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, literatürdeki yayınlanan deney sonuçları ile tahmin edilen deney

sonuçları kıyaslanarak geçerliliği belirlenmiş ve iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür. Bu sonuç, yakıt pili tasarımında gelişmelere yol açmıştır.

Ramin, Sadeghifar veTorkavannejad'ın (2019) yaptığı çalışmada; proton değişimli yakıt pilinin güç yoğunluğu, bipolar plaka kanallarının boyutları ve şeklinin optimal tasarımı ile artırılabilceğini değerlendirmişlerdir. Bir novel ve trap şekilli kanal tasarımı tanıtılmış, bu çalışma, yakıt pili performansı üzerinde her bir bipolar plakanın farklı kesitlerde daha küçük alanlara sahip olmasının tesiri araştırılmıştır. Bu trap form kanalının muhtemel kapasiteleri ANSYS Fluent'in üç boyutlu isothermal olmayan modeli aracılığıyla incelenmiştir. Plaka kesitinin birkaçı darlaştırılırsa aktif alanın birim başına düşen akım yoğunluğu artmıştır. Fakat, PEM yakıt pilinin performansını maksimize edeceğimiz trap sayısında ve uzunluğunda optimum bir değeri vardır. 8 mm uzunluğundaki İki trap'lı kanallar daha yüksek akım yoğunluğu için önemli olduğunu elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Bu iki trap'lı kanallar katot katalizör tabaka içindeki oksijen ve su dağılımını da artırır ki, sonuçta pil boyunca daha az katodik aşırı gerilim oluşur. Sonuç olarak, önerilen trap şekilli kanal güç yoğunluğunu artırırken aksine üretim için konvansiyonel / klasik düz kanallar basit ve düşük maliyetlidir. Bu nedenle, yeni trap şekilli kanallar gelecek nesil PEM yakıt pilleri için ümit vaat etmektedir.

Sivertsen ve Djilali nin (2005) yaptığı çalışmada; kapsamlı isothermal olmayan, PEM yakıt pilleri için 3 boyutlu hesaplamalı model geliştirilmiş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodu ile analiz edilmiştir. Bu model paralel hesaplama izin verir, böylece büyük hesaplamalı alanlar için kararlı simülasyonlar uygulamak için alışkanlık kazandırır. Model, taşınım ve difüzyonla taşınımın nedenini açıklar ve türlerin derişimini tahmin etmememizi sağlar. Dağıtılmış ısı üretimi, katot ve anotu içeren bu model, elektrokimyasal tepkime ile ilişkilidir. Bu model ile elektrotlar ve membran' daki elektrik ve iyonik potansiyeller için çözüm yapılır, ayrıca yerel aktivasyon aşırı gerilimi kararlı hale getirilir, varsayılandan daha fazla olur, yerel akım yoğunluğu daha doğru tahmin edilir. Maksimum akım yoğunluğu, katalizörtabakadaki aktivite üzerinde derişim kayıpları aracılığıyla ohmik kayıpların baskın etkisi sonucu olarak düzenleme alanında tahmin edilir. Bir parametrik analiz, gerçekte farklı konumsal dağılımları polarizasyon eğrileri ve global akım yoğunluğu içindeki fark edilmeyen değişiklikler ile asimetric parametreler çeşitlendirilerek sağlanır. İletimdeki köklü değişiklik, ohmik' ten aktivasyon aşırı geriliminin göreceli etkisini değiştirerek akım yoğunluğunu artırıp veya azaltabiliriz.

Tenson ve Baby (2018) yaptığı çalışmada, bipolar plakası 50 cm^2 olan aktif alanlı PEM yakıt pilinin üzerinde yapılmış ve numerik çalışma sonuçları üzerinde odaklanılmıştır. Araştırmalar çeşitli çalışma şartlarında oluşturulmuştur, örneğin; farklı oksijen ve hidrojen hızlarında, çeşitli pil voltajı ve sıcaklığında. Çalışma içinde olan varsayımlar, kararlı durum, tek fazlı, laminar, sıkıştırılabilir ideal gaz, yan ürün sıvı fazda su, pil içinde transfer edilen ısı konduksiyon modunda v.b. gibidir. Boşluk miktarının kanala oranı bugünkü çalışma da 1/1'dir. Nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlar aynı çalışma koşullarında bir 50 cm^2 'lik serpantin kanallı deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Sonuçlar, kütle akış hızı ve sıcaklığının yakıt pili performansına önemli bir etki sağlandığını göstermiştir.

Velisela ve Srinivasulu (2018) yaptığı çalışmada, üç geçişli serpantin akışlı 3-D PEM yakıt pili modeli yakıt pili performansını analiz etmek için geliştirilmiştir. Simülasyonlar, ANSYS Fluent 15.0 yazılımı ile türlerin anot tarafındaki konsantrasyonları (H_2 -0.8, O_2 -0, H_2O -0.2), katot tarafındaki konsantrasyonları (H_2 -0, O_2 -0.2, H_2O -0.1) alınarak yapılmıştır. Yakıt pilinin performansı ile birlikte, anahtar parametre örneğin: basınç düşümü, hidrojen kütle kesri, oksijen kütle kesri, sıvı su aktivitesi ve membran su içeriği analiz edilmiştir. Yakıt pili düşük voltajda çalıştırıldığında, örneğin: 0.4 V, yüksek akım yoğunluğu, hidrojen ve oksijen tüketim hızı ve de su tüketim hızı artmıştır. Sonuç olarak, önerilen yakıt pili model performans karakteristiği deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir.

Velisela ve Srinivasula (2018) yaptığı çalışmada, tekli (1-S), ikili (2-S) ve üçlü (3-S) serpantin akış kanalı düzenlenmiş yakıt pili hem deneysel ve hem de nümerik olarak araştırılmıştır. İlk olarak, tam 3-D PEM yakıt pili modeli geliştirilmiş ve simülasyonlar PEM yakıt pilinde kullanılan HAD kodu ile (ANSYS Fluent) 1-S, 2-S ve 3-S akış sahali düzenlenmiş yakıt pili performansı incelenmiştir. Pil performansı ile beraber, önemli parametreler, örneğin: basınç dağılımı, hidrojen ve oksijen kütle kesri, sıvı su aktivitesi, akım yoğunluğu dağılımı ve membran su içeriği araştırılmıştır. Sonrasında, deneysel çalışma numerik tahminleri doğrulamak için 1-S, 2-S ve 3-S akış kanalı değiştirilerek bir yakıt pili ile deney yapılmıştır. Sonuçta, numerik ve deneysel olarak performans eğrileri karşılaştırılmış 1-S kanallı yakıt pili 2-S ve 3-S yakıt pilleri ile kıyaslanınca en iyi elektrokimyasal performansı gösterdiği görülmüştür.

Wang Li, Husar A., Zhou T. ve Liu H. (2003) yaptığı çalışmada, PEM yakıt pilinin

performansı üzerinde farklı işletme parametrelerinin etkisi, anot tarafında saf hidrojen ve katot tarafında hava kullanarak deneysel olarak araştırılmıştır. Çeşitli işletme sıcaklığı, farklı anot nemlendirme sıcaklığı, farklı işletme basınçları ve bu parametrelerin değişik kombinasyonları ile deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, PEM yakıt pili performansına ait çeşitli işletme parametrelerinin polarizasyon eğrisi formu üzerindeki etkisi görülmüş ve sunulmuştur. Bu parametrelerin etkisi ve aralarındaki ilişkilerin muhtemel mekanizmaları tartışılmıştır. Ek olarak, bir tam yakıt pili modeli özetlenmiş ve bu modelin sonuçları deneysel datalarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada, deneysel data ve model sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Wen, Yin, Piao, Lu, Li, ve Leng'in (2018) yaptıkları çalışmada, üzerinde metal bipolar tabaka olan Intersectant akış alanı PEM yakıt pili verimliliğini artırmak için önerilmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metodu, akış kanalının konstrüksiyonu detaylandırılarak kullanılmaktadır. Polarizasyon eğrisi, akım yoğunluğu dağılımı, oksijen dağılımı ve su kütlesi dağılımı önerilen akış alanının optimizasyonuna yardım etmek için tanıtılmıştır. PEM yakıt pili için bir test sistemi kurulmuştur. PEM yakıt pili testinin optimal işletme parametreleri önerilmiştir. Tek serpantin akış sahası, özgün akış sahasının verimliliği tahmin edilerek referans olarak verilmiştir. Sonuçlar, optimal akış sahası kanal derinliği ve intersectant akış sahası porozitesinin sırası ile 0.3 mm ve 0.5 olduğunu göstermiştir. Optimal çalışma parametreleri, deneme deneyleri örneğin: hidrojen akışı 300 ml/min, hava akışı 500 ml/min ve işletme sıcaklığı 80°C esas alınarak sağlanmıştır. İki akış alanının karşılaştırma testleri, intersectant akış sahasının performansının tekli serpantinli akış sahasından daha iyi olduğunu göstermiştir.

Zinko ve Pianko (2018) yaptığı çalışmada mikro serpantin kanallı özgün bir yakıt pili tasarımı için kullanılan Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programının kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Üç boyutlu kararlı bir modelde, momentum, ısı, türler ve yük korunumunu eşitliği ile elektrokimyasal eşitlikleri kombine bir şekilde geliştirmişlerdir. Proton Aktaran Membranlı yakıt pilinin tasarımı, elektrolit membran, anot, katot, katalizör tabaka, anot ve katot gaz difüzyon tabakası, iki kolektör ve hava -yakıt serpantin mikro kanalları içermektedir. Akım yoğunluğu ve voltajın geniş ölçekte kullanımı ile tahmin edilmiştir. Akım yoğunluğu – voltaj eğrisi ve güç karakteristikleri PEMFC tasarımı ile analiz edilerek sağlanmıştır. Bu çalışmanın geçerliliği, geliştirilen modelin PEMFC Performansının değerlendirilmesini göstermiştir. Bu çalışma, akım dağılımının eş dağılımlı

olmadığını ve akış tasarımına bağlı olduğunu dikkat çekmiştir. Ayrıca iyi bir su yönetiminin tüm PEMFC performansını temsil eden proton iletiminin su içeriğine direk bağlantılı olarak önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

3. PEM YAKIT HÜCRESİ

3.1. Yakıt Hücresi Tarihçesi

Humphry Davy yakıt pili çalışma prensibini ortaya çıkarttı. William Grove ilk yakıt pili olan gaz pilini 1839 yılında keşfetti. 1889 yılında, Charles Langer ve Ludwig Mond, Grove'un keşfini geliştirdi ve yakıt pili olarak adlandırdı. 1950' de General Elektrik Proton Değişimli Membran yakıt pilini icat etti. Francis Bacon bir 5 kW' lık alkalin yakıt pilini açıklayarak tanıttı. 1960'larda NASA uzay görevlerinde ilk kez yakıt pili kullanmaya başladı. 1970'lerde petrol krizi fosforik asit yakıt pili alternatif enerji teknolojisinin gelişmesini teşvik etti. 1980'lerde Amerika Birleşik Devletleri denizaltılarında yakıt pili kullanmaya başladı. 1990'larda büyük durağan yakıt pilleri ticari ve endüstriyel noktalar için geliştirildi. 2007' de yakıt pilleri ticari olarak satılmaya başlandı. 2008'de Honda FCX Clarify yakıt pilli elektrikli aracını kiralamaya başladı. 2009'da yerleşik yakıt pili mikro-CHP birimleri Japonya'da kullanılabilir hale geldi. Sonrasında, binlerce portatif yakıt pili batarya şarjı satıldı.

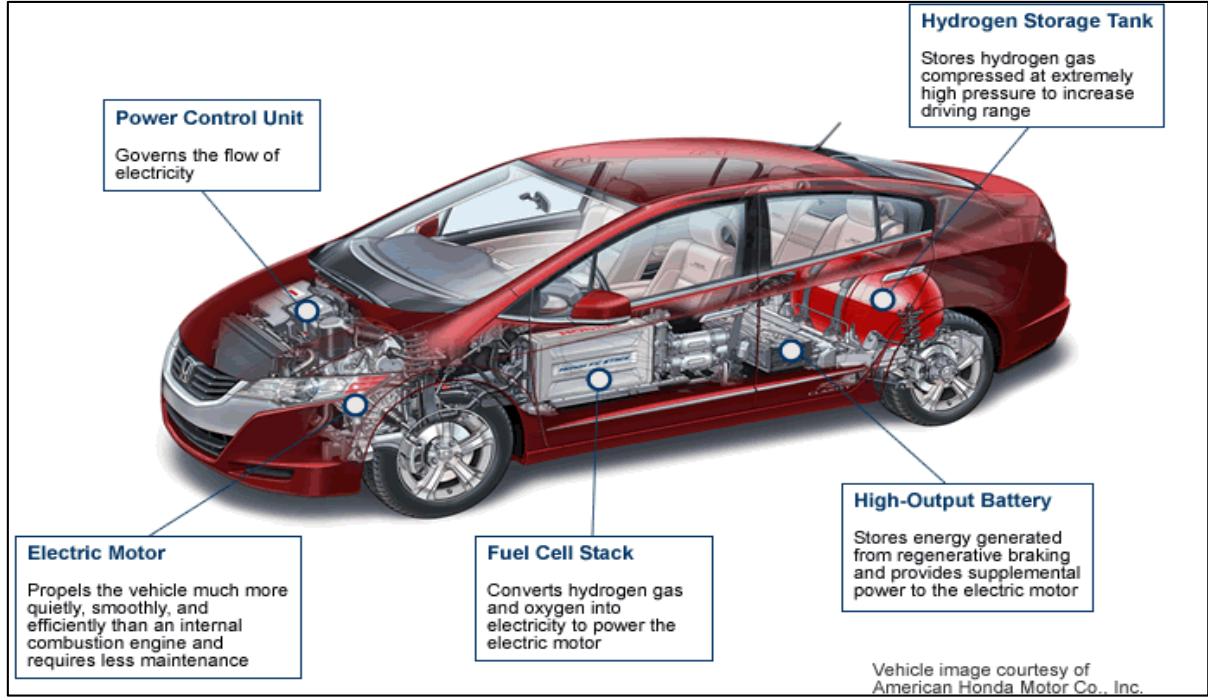
3.2. Yakıt Pili Uygulamaları

Günümüzde yakıt pilleri üç ana alanda endüstrinin hizmetine sunulmuştur; portatif güç üretimi, sabit güç üretimi ve ulaşım için güç eldesi.

3.2.1. Ulaşım uygulamaları

Günümüzde yakıt pilleri ulaşım araçlarında kullanılmaktadır. Direkt veya indirekt olarak araçlar için itici güç sağlamaktadır. Aşağıda bu uygulamalar sıralanmaktadır:

- Forklift ve diğer yük taşıyan kamyonlar. Örneğin; hava alanı bagaj kamyonu vb. gibi
- İki ve üç tekerlekli araçlar. Örneğin: skuter
- Hafif hizmet aracı. Örneğin: arabalar ve kamyonetler
- Otobüsler ve kamyonlar
- Trenler ve Tramvaylar
- Feribotlar ve daha küçük botlar
- İnsanlı küçük hava taşıtları
- İnsansız hava taşıtı ve insansız su altı araçları, örneğin, keşif uçağı



Şekil 3.1.PEM yakıt pili otomobil uygulaması

3.2.2. Taşınabilir uygulamalar

Yakıt pili günümüzde taşınacak şekilde tasarlanmış ürünler, sarj yapılabilir veya ürünlerin içine yerleştirilebilir yakıt pillerini tarif eder. Bunlar, askeri uygulamalar (seyyar askeri güç, kaymalı monte edilmiş yakıt pili jeneratörü v.b. gibi), yardımcı güç üniteleri (örneğin; eğlence ve ulaşım endüstrileri), taşınabilir ürünler (kütük budama, şaloma), küçük kişisel elektronik ürünler (mp3 oynatıcılar, kameralar v.b. gibi), büyük kişisel uygulamalar (dizüstü bilgisayar, yazıcılar, radyolar v.b. gibi), eğitim kitleri ve oyuncaklar. Bu kapsamdaki ürünlerin güçleri için, seyyar yakıt pili 5 W' tan az olmamak üzere 500 kW kadar geniş bir aralıkta hizmet vermek için geliştirilmiştir.

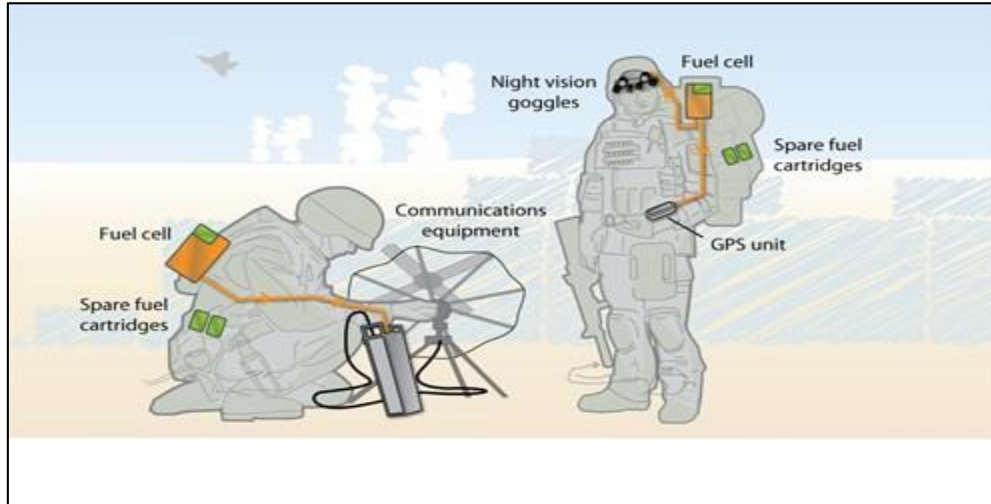
Yakıt pilleri bu tipte uygulamalar için satılmaktadır, yardımcı güç ünitesi, küçük kişisel elektronik uygulamalar, eğitim kitleri ve oyuncakları (bunlar mikro yakıt pilleri olarak sınıflandırılır). Bugün 5 W' tan daha az güç çıkış üniteleri mikro yakıt pilleri olarak ifade edilir. Küçük ve büyük kişisel elektronik cihazlar arasındaki güç farklılıkları; küçük cihazlar örneğin 3 W altında güç çeken mobil telefonlar, büyük cihazlar; dizüstü bilgisayarlar 25 W' a kadar güç kullanır.

Yardımcı güç ünitesi sistemleri en fazla güç isteyen sektördür, özellikle Avrupa'daki eğlence sektöründe DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) başarılı şekilde yayılmaktadır.

Seyyar yakıt pilleri tipik olarak batarya teknolojisinden veya PEM / DMFC teknolojilerinden faydalanmaktadır. PEM yakıt pilleri hidrojeni doğrudan kullanır, emisyon üretmez, tersine, DMFC küçük miktarda CO₂ yayar.

Seyyar uygulamalar için yakıt pillerinin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Şebekeden bağımsız çalışma
- Bataryalarla kıyaslanınca daha uzun çalışma zamanları
- Hızlı şarj olma
- Önemli ölçüde ağırlık azalması sağlanabilir (askeri operasyonlar)
- Konforlu, güvenilir ve uygulamada daha düşük işletme maliyetleri

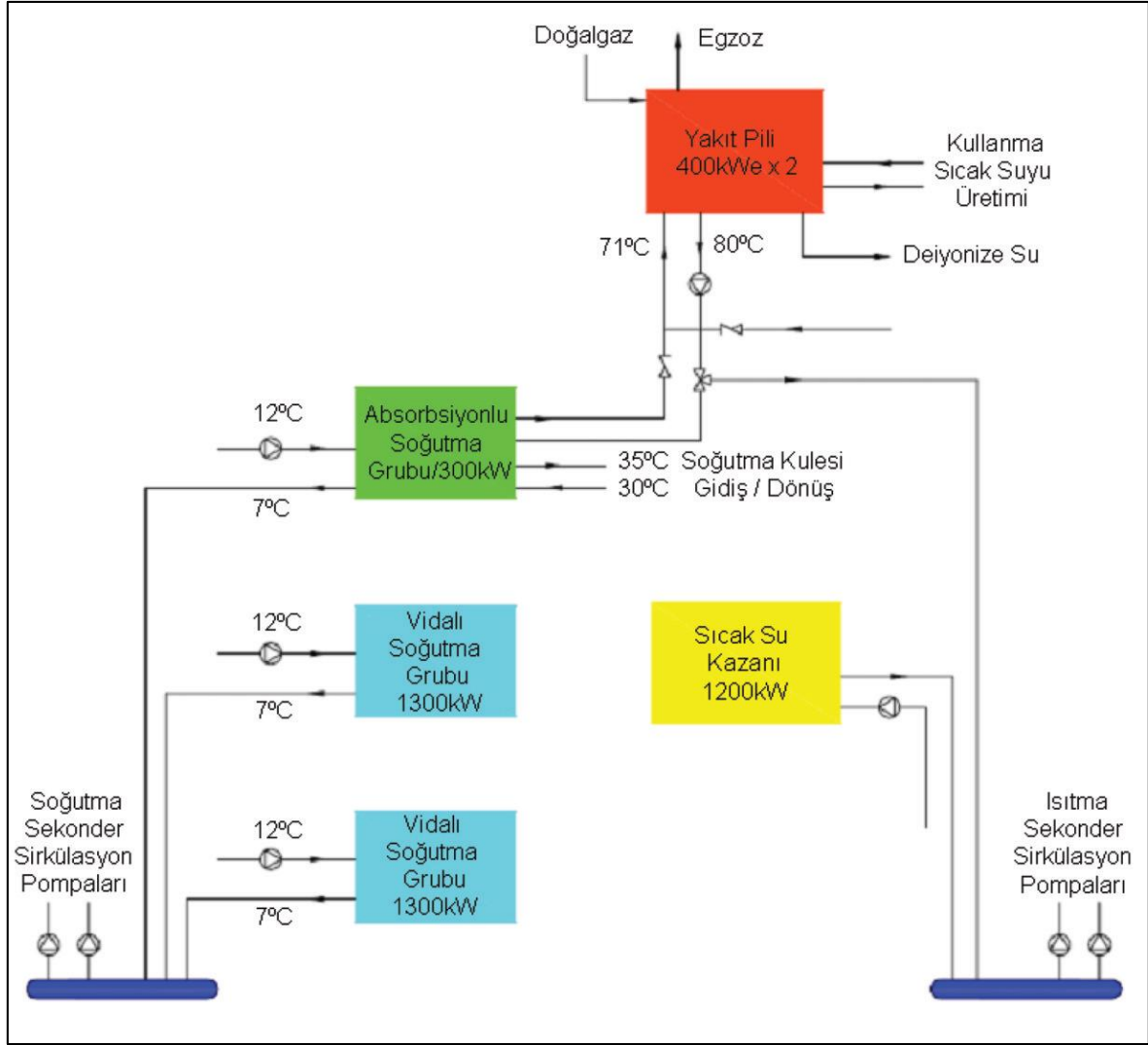


Şekil 3.2. PEM yakıt pili seyyar uygulaması

3.2.3. Sabit uygulamalar

Günümüzde yakıt pili, elektrik ve bazen ısı sağlayan ancak hareketsiz olarak tasarlanan unite olarak sabit yakıt pilleri tanımlanır. Bunlar ısı ve gücün kombine edilmesini içerir, kesintisiz güç kaynağı ve temel güç üniteleri bunlara örnektir.

Kombine ısı ve güç üniteleri 0,5 kWe ve 10 kWe arasında sınıflandırılır, PEM veya SOFC teknolojilerini kullanır ve yakıt pilleri ısıya yanısıra elektrik de üretmenin avantajını kullanır. Bu ısıyı kullanarak su ısıtılır ve tüm sistem verimliliği artırılır. Kombine ısı ve elektrik üreten kombine ünitenin verimliliği %80-95 olan yakıt pilleri çok etkili bir elektrik üreticidir. Yerleşik kombine ısı ve güç üniteleri 2010 yılında toplam 10.000 adedi evlerde olmak üzere güç ve ısıtma amacıyla geniş çapta kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 3.3. PEM yakıt pili sabit uygulaması (Başyazıcı, 2003)

3.3. PEM Yakıt Pillerinin Özellikleri

PEM yakıt pilleri seyyar, sabit, yardımcı ve otomotiv için güç sağlayan muhtemel adaylardan biridir. Erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pili sistemleri sürekli güç isteyen sistemler için oldukça uygundur, ancak düşük sıcaklıklı PEM yakıt pilleri hızlı çalışma ve düşük işletme sıcaklıkları (20-90 °C) sunar ve ayrıca seyyar ve otomotiv uygulamalar gibi geçici işletme şartlarında kullanılır (Mench, 2008: 285).

PEM yakıt pillerinin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Reaksiyona giren reaktanların basınç farklılığına olan toleransları yüksektir.
- Basit bir mekanik yapıya ve dayanıklı bir tasarıma sahiptirler.
- Elektrolit yapısı diğer yakıt pili sistemlerine göre daha güvenilirdir.
- Yüksek gerilim, akım ve güç yoğunluğuna sahiptirler.

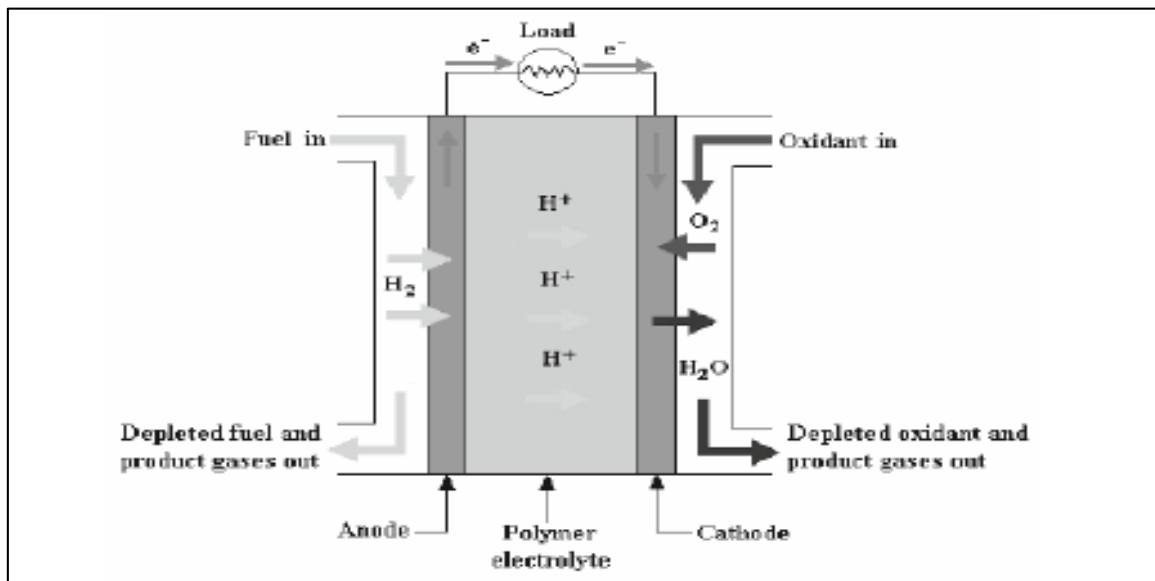
- Düşük basınçlarda başarıyla çalışabilmekte, bu durum, sistem güvenilirliğini arttırmaktadır.

PEM yakıt pillerinin dezavantajlarının aşağıda belirtilmiştir:

- Pil, fazla pahalı platinyum katalizör ile polimer bir membrandan oluşmaktadır. PEM yakıt pili sistemlerinin farklı uygulamalar ile yaygınlaşması ve konvansiyonel teknolojilerin yerine geçmesi için özellikle maliyetinin düşürülmesine ihtiyaç vardır.
- Hidrojenin saf olması gerekmektedir.
- Karbon monoksit ve sülfüre olandayanımları çok azdır.
- Reaksiyona giren reaktanların yüksek akım yoğunluğu eldesi için nemlendirilmesi önem arz eder.

3.4. PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Elektrokimyasal bir reaksiyon vasıtası ile PEM yakıt pilinde oluşan kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümüdür. Bu işlem, araçlarda yanma neticesinde elde edilen enerjinin yerini sessizce almaktadır. PEM yakıt pilinin ana elemanı, membran elektrot çifti (MEÇ) diye bilinir, her iki tarafında bulunan anot ve katot'la kontak halinde bulunan bir polimer elektrolit içerir. Membran'ın görevi ise, protonların (hidrojen iyonları) iletimidir. (Zhang, 2008: 5)



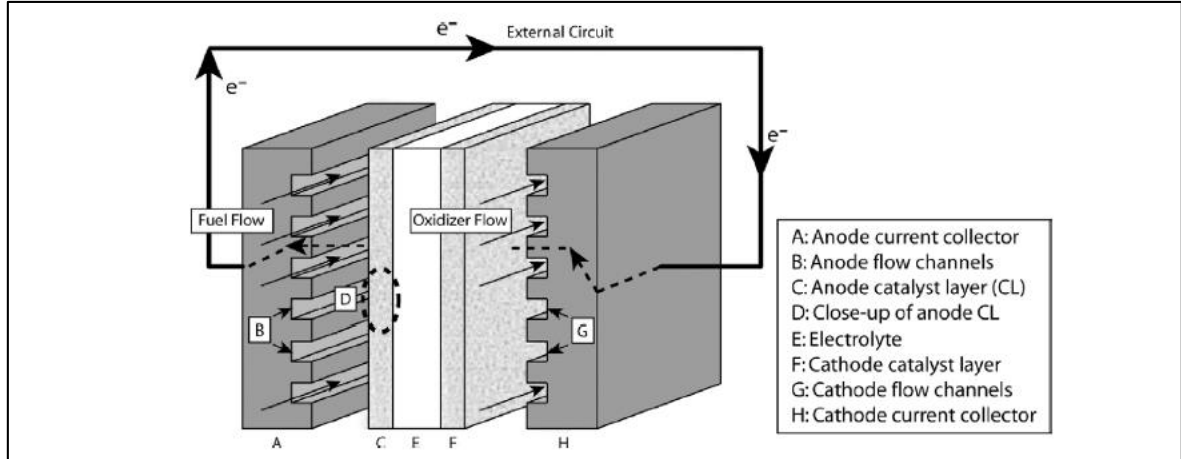
Şekil 3.4. PEM yakıt pili çalışma prensibi diyagramı (Zhang, 2008:5)

Geleneksel bataryanın tam tersine, yakıt ve oksitleyici dış kaynaktan tedarik edilir. Bu nedenle, yakıt hücresinde yakıt veya oksitleyici tükenene kadar çalışmaya devam eder. Üstte yer alan şekil 3.4.' te görüldüğü gibi, hücrenin bir tarafında anot plakasındaki akış kanalları içerisinde hidrojen dağıtılır. Hücrenin diğer tarafında, havadaki oksijen katot kanalları içerisinde dağıtılır. Anotta, hidrojen negatif yüklü elektron ve pozitif yüklü proton olmak üzere ayrışır. Pozitif yüklü proton polimer elektrolit membran içerisinde geçerek katoda ulaşır, bu esnada negatif yüklü elektronlar dış devre üzerinden seyahat ederek katoda erişir ve elektrik akımını oluşturur. Katotta, elektronlar protonlarla birleşir ve oksijen molekülleri ile birlikte saf su olarak reaksiyon ürünü olarak ortaya çıkar. Çıkan bu su molekülü hücrenin dışına atılır (Zhang, 2008: 5, 6).

Hidrojen molekülünün ayrışması platinyum katalizör kullanılırsa nispeten kolaydır. Ancak, güçlü oksijen molekülünün ayrışması zor olduğundan aktivasyon kayıplarına neden olur. Şimdiye kadar, platinyum, hala oksijen indirgenme reaksiyonu için en iyi seçenektir. Diğer bir önemli aktivasyon kaybı ise membranın proton akışına karşı gösterdiği dirençtir ki bu direnç yaklaşık 50 μm kalınlığa düşürülerek minimize edilir. Yinede, yakıt pilinin başarılı işlemesi ve yüksek güç sağlaması tüm alt sistemlere bağlıdır. Bunlar, akış kanalı tasarımı, katalizör, membran ve birçok parametreler, örneğin; sıcaklık ve nemlilik (Zhang, 2008: 6).

3.5. Yakıt Pili Ana Bileşenleri ve Özellikleri

Yakıt Pilinin kalbi bir proton ileten bir polimer membrandan oluşur. Bu membranın her iki tarafında poros elektrot bulunmaktadır. Bu elektrotlar poros özellik taşımalıdır, çünkü arkadan beslenen rektan gazlar elektrot ve membran arayüzüne ulaşmaları gerekmektedir. Bu arayüze elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleşir ve katalizör tabaka ile adlandırılır ve oldukça hassas bir katmandır. Teknik olarak katalizör tabaka membranın veya poros elektrotun bir parçası olarak bilinir. Membranın çok katmanlı eklemesi iki elektrot arasında birleştirilerek membran elektrot çifti (MEÇ) adını alır. MEÇ kollektor / seperatör plakaları arasında yer almaktadır. Kollektor plakaları elektrik akımını iletir ve geçirir. Seperatör denmesinin sebebi ise multihücre düzenlemesi içinde gazları yan hücre içerisine doğru dağıtırlar. Aynı zamanda mutihücre düzenlemesi elektriksel / fiziksel olarak katottaki bir hücre anottaki bitişik hücre ile bağlıdır ve bu yüzden bipolar plakalar olarak isimlendirilir. Bu plakalar rektan gazların akışı için yollar içerir (akış bölgesi /kanalı) ve hücrenin yapısal rijitliğini de destekler (Barbir, 2005: 73).



Şekil 3.5. Kapsamlı yakıt pili şeması (Mench, 2008: 51)

3.5.1. Polimer elektrolit membran

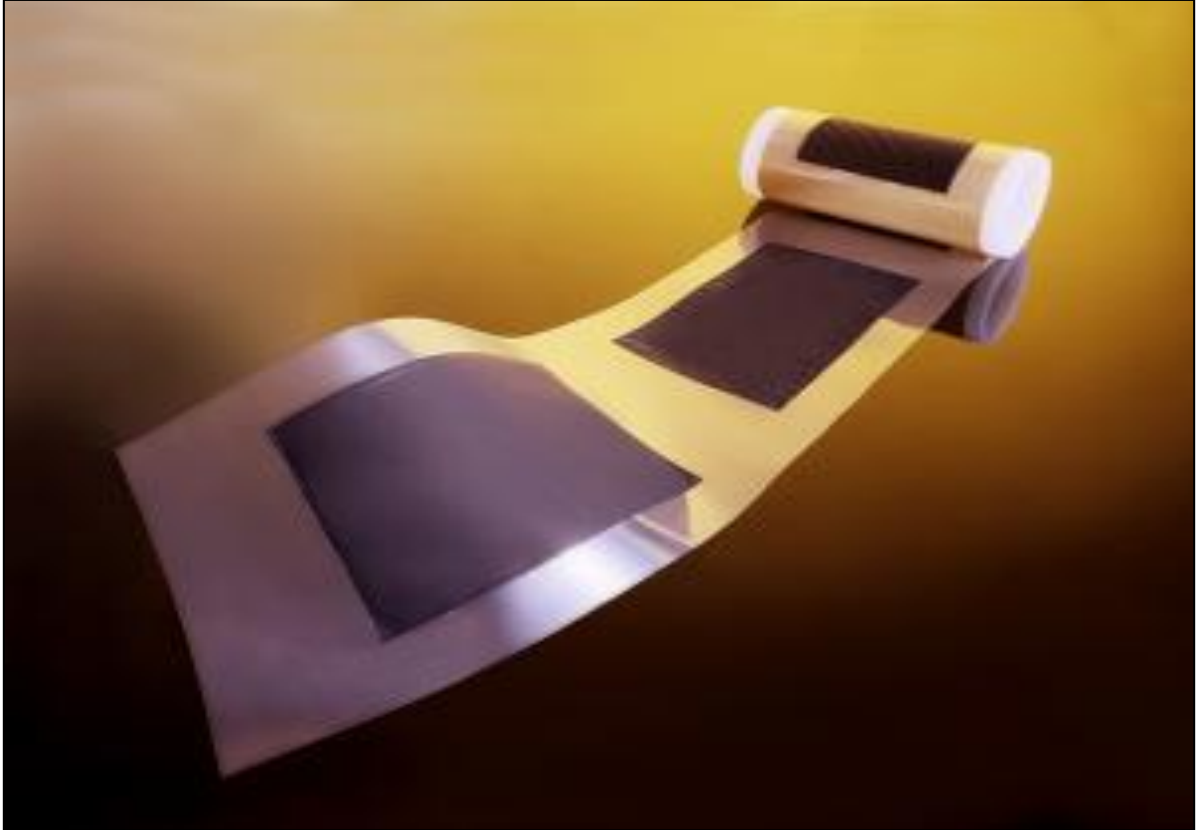
Yakıt pillerinde organik esaslı değişimli membranlar William T. Grubb tarafından 1959 yılında tasarlanmıştır. Bu ilk çaba, sonunda bugünlerdeki sistemlerde kullanılan perflorosülfonik asit polimer membranın geliştirilmesine yol açmıştır. İyon değişimli membran bir iletken yolu ile desteklerken, bu esnada reaktan gazları dağıtır. Bu malzeme bir elektriksel yalıtkandır. Sonuç olarak, iyon iletimi polimer yapı içerinden iyonik gruplar vastası ile gerçekleşir. Bu yüzeylerdeki iyon transferi, bu bölgelerle ilişkili sınırlı ve serbest su ile yüksek derecede bağımlıdır (Fuel cell Handbook 7, 2004: 6-1).

Polimer değişimli yakıt pillerine artan ilgi hem fiyat hemde performanslarının artmasına neden olmaktadır. PEM Yakıt pili MEÇ işletmesi ve laboratuvar koşullarında sabit veya ulaşım uygulamaları benzer olarak 20.000 saat sürekli olarak çalıştırıldığında bozulma oranları 4 ile 6 μ V/hr (veya yaklaşık 0,67 ile 1 % her 1000 saatte), sabit uygulamalar için bozulma oranı, yaklaşık 0.1 % her 1000 saat, genel bir kural olarak kullanılır (Fuel cell Handbook 7, 2004 :3-2).

PEM Yakıt pillerinde standart elektrolit malzemesi olarak florlanmış teflondan (fluorinated Teflon ®) 1960'ların ortalarında uzay uygulamaları için (E.I. DuPONT de Neumors tarafından imal edildi) yararlanılmış. Membran eşdeğer ağırlık (iyon değişim kapasitesinin oransal olarak tersidir) ile nitelendirilir. Tipik eşdeğer ağırlık aralığı 800 ile 1100 miliekivalen her polimerin kuru gramıdır. Bu tip geçmişte çoğu kez melt-extruded membran olarak DuPONT tarafından imal edilmiş ve Nafion® No. 117 markası altında satılmıştır. Perfulorosülfonik asit ailesi membranları fevkalade yüksek kimyasal ve termal

stabilite sergilerler ve güçlü kimyasal saldırılara (Güçlü indirgenme ve asitleri azaltma, 125 °C 'ye kadar Cl₂, H₂, ve O₂) karşı stabildirler. Nafyon, Teflon ®' a benzer olarak fulor polimer omurga içerir. Nafyon membranlar seçilmiş uygulamalarda, işletme koşullarında ve elektrokimyasal uygulamalarda uzun ömür içerir. Seçilmiş uygulamalarda ve su elektroliz sistemlerinde 50.000 saatin üzerinde yaşam ömrü göstermiştir. Dow Kimyasal Şirketi elektrolit membran üretmiştir, XUS 13204.10, polimer yapısı Nafyon'a benzerdir, ancak yarı zincir uzunluğu kısaltılması hariçtir. Sonuç olarak, membran özellikleri önemli ölçüde tesir edilmiştir, membran içindeki su etkileşimleri daha yüksek bir derece içerir. Bu, daha düşük elektrik direnci iletir ve nafyon membran'dan daha yüksek akım yoğunluğu geçirmesine izin verir. Özellikle bu durum daha ince formda kullanıldığında ortaya çıkar. Kısa yan zincir membranları kararlı ve iyi performans sergilerler. (Fuel cell Handbook 7, 2004: 6-4).

Diğer bir membran teknolojisindeki gelişme membran kalınlığı azaltılarak membran filminin mekanik dayanımını artırmak için bir iç destekleyici katman kullanımıdır. W.L. Gore tarafından imal edilen Primea 55 ve 56 seri membranlar bu iç destekli membranların örnekleridir. (Fuel cell Handbook 7, 2004: 3-4).



Resim 3.1. Gore select membran®

Membran su alımı

Polimer membranlarda proton iletimi membran yapısına ve su içeriğine fazlasıyla bağlıdır. Membrandaki su içeriği polimerin kuru ağırlığındaki suyun her gramı olarak ifade edilir veya membran içinde per sulfonik asit öbeği başına bulunan su moleküllerinin sayısı olarak ifade edilir. $[\lambda = N(H_2O) / N(SO_3H)]$ Membrandaki suyun maksimum miktarı membranda dengede olan suyun hal durumuna fazlasıyla bağlıdır. Nafyon membranlar sulfonat grup başına yaklaşık 22 su molekülü alan sıvı su ile denge halinde olduğu fark edilmiştir, aksine gaz fazında da maksimum su kullanımı sulfonat başına yaklaşık 14 su molekülüdür. (Barbir, 2005: 76)

Membran iletkenliği

Proton aktaran membranların kullanımını etkileyen en önemli membran özelliklerinden biri iletkenliktir. Bu membranların iletkenliğini değiştiren birkaç parametre vardır. Bunların en önemlileri; membranın taşıyıcı kısmı, iyon boyutu ve iyon tipidir. İletkenlik değeri en yüksek olan membranlar, hareketli olan iyonu hidrojen ve taşıyıcısı su olanlardır.

Dolayısıyla yakıt pillerinde en çok istenen membran, gerekli güç yoğunluğuna erişmek için hareketli olan iyonu hidrojen ve taşıyıcısı su olan tipteki membran elektrolitlerdir.

Membranın kimyasal dayanıklılığı

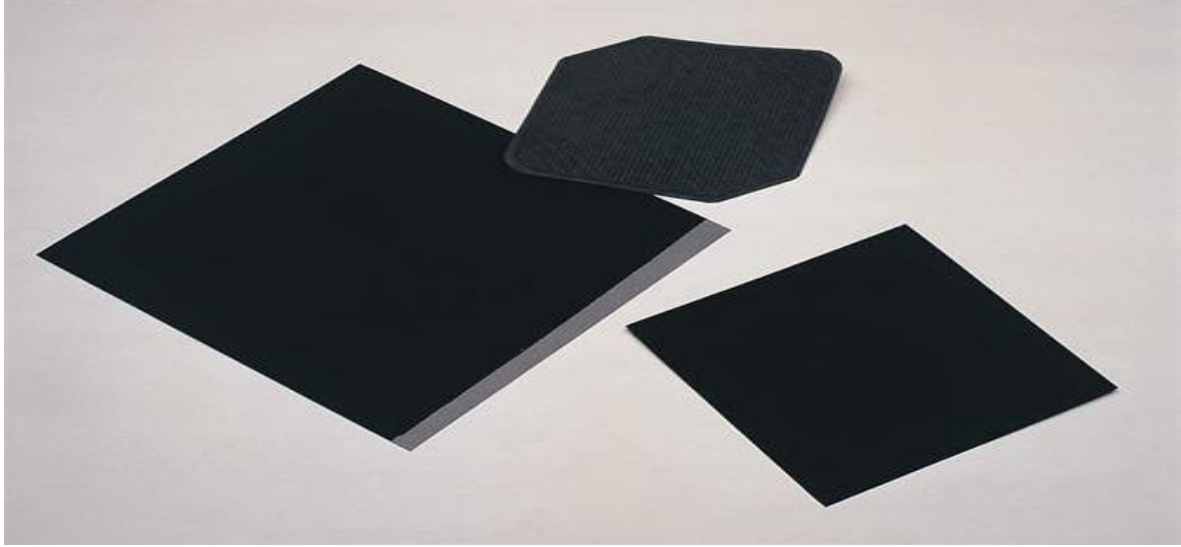
Bilimsel çalışmalarda, polimer değişimli membranların değişik kimyasal ortamlardaki dayanıklılıkları hakkındaki bilgiler fazla değildir. Yakıt hücrelerinde kullanılan membranların oksitleyici malzemelere karşı dayanımları pil ömrü için önemlidir. Yakıt hücrelerinde membran, reaktan olarak saf hidrojen kullanmayan pillerde ortaya çıkan yan ürünler (CO ve CO₂ vb. gibi) özelliğini yitirmektedir. Bunun neticesinde yakıt pillerinin kullanım süreleri azalmaktadır.

3.5.2. Gaz difüzyon tabakaları

PEM Yakıt pilin performansı GDL yapısından ve morfolojisinden önemli ölçüde etkilenir. Çünkü membran iyonik iletimin sağlanması için neme ihtiyacı vardır ve çalışma esnasında reaktanlar nemlendirilir. Fakat elektrokimyasal tepkimelerin çalışma hızı ve derecesi yüksek akım yoğunluklarında arttığı zaman, aşırı şekilde su üretimi GDL içerisinden dışarı akar, elektrodun gözeneklerini su ile doldurur ve dolayısı ile katalizör katmana geçen reaktanlar sınırlı sayıya düşer. Pil performansını artırmak için GDL içindeki gaz akış karakteristik özellikleri kritik bir önem arz eder (Celep ve Dinçer, 2016).

Hidrofobisite / hidrofilisite

Gaz difüzyon tabakasının hidrofobisitesi (su geçirmezliği) akış kanalındaki suyun çıkarılmasını etkili bir şekilde artırmalı, çünkü reaktan gazların geçişini bloke eder. Öte taraftan, Gaz difüzyon tabakasının hidrofilisitesi (su geçirgenliği) yükseldikçe membran kuruluşuna yol açar, bu durumda proton iletkenliğini azaltır (Celep ve Dinçer, 2016).



Resim 3.2. Gaz difüzyon katmanı resmi

Porozite

Küçük gözeneklerin varlığı reaktan gazların katalizör tabakadan kütle transferine büyük bir dirençe yol açar. Eğer gözenekler çok büyükse, membran aşırı su kaybı neticesinde su kaybedebilir. Bu yüzden, gözenek büyüklüğü ve yarıçapı yakıt pili performansını belirleyen iki önemli mekanik özelliktir (Celep ve Dinçer, 2016).

Elektrik iletkenliği

Gaz difüzyon tabakası hidrojeniden ortaya çıkan elektronları iletmelidir. GDL'nin elektrik iletkenliği bipolar plaka aracılığıyla akım kollektörü ve katalizör tabaka arasındaki iletilen elektronları etkili bir şekilde minimize edecek kadar yüksek olmalıdır (Celep ve Dinçer, 2016).

Termal iletkenlik

Gaz difüzyon tabakasının termal iletkenliği membran elektron çiftinden (MEÇ) ısıyı etkili bir şekilde giderecek kadar yüksek olmalıdır (Celep ve Dinçer, 2016).

Mekanik destek

Gaz difüzyon tabakası montaj esnasında oluşacak muhtemel zararlardan katalizör tabaka ve membranı korumak için mekanik destek sağlar. Membran elektrot çifti (MEÇ) tabakası arasındaki yüzey kontağını sağlar ve pil basıncı esnasında akış kanallarındaki sapmayı

engeller.

Tek katman gaz difüzyon tabakası

Tek katman GDL (Gas Diffision Layer: Gaz Difüzyon Tabakası) dokuma bir karbon bezi, karbon kâğıdı, karbon keçe ve karbon köpük içeren tipik karbon esaslı bir üründür. Karbon esaslı GDL oldukça yaygın kullanılır, çünkü (i) o, asitli ortama karşı oldukça dayanıklıdır, (ii) yüksek gaz geçirgenliği ve iyi bir elektronik iletim sağlar, (iii) basınca karşı elastiktir, (iv) metal esaslı GDL, örneğin; metal örgü, metal köpük metal ve mikroişlenmiş metal alt katman iyi bir mekanik dayanım ve geniş bir potansiyel aralığında kararlı bir biçimde uygulandı ve geliştirildi. Tek katman GDL'nin su geçirmezlik davranışı su baskınını önler ve katota oksijen geçişini kolaylaştırır (Park S. Park, Lee ve Popov, 2011).

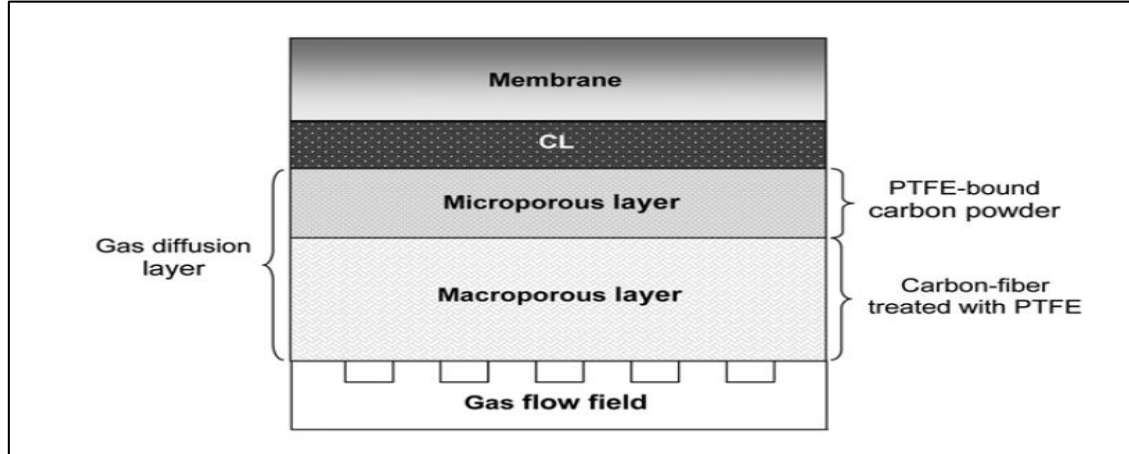
İki katman gaz difüzyon tabakası

MEÇ yapısına uyarlanarak kütle transferini sınırlayıp azaltan çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan en etkililerden bir tanesi, karbon-fiber dokuma bez veya dokuma olmayan kâğıt alt katman kullanmaktır. Bunlar, gaz difüzör ve elektrotların mekanik dayanağı ve ince bir siyah karbon toz içeren ince MGK (Mikro gözenekli katman), tipik su geçirmez ajan PTFE'nin (Politeirafloretilen) fonksiyonlarıdır. Bu MGK, katlist tabaka ve makroporos karbon altkatman arasında kontak direncini düşürür. Bu işlemi, katalizör parçacıkları geçirmeyen düz ve uniform katmanı şekillendirerek yapar. Daha önemlisi, MGK, MEÇ içindeki su yönetimini artırdığı ve yakıt pili performansını artmasıyla sonuçlandığı rapor edilmiştir (Park ve diğerleri, 2011).

Gaz difüzyon tabakası malzemeleri

Carbon blacks (CB) yakıt pillerinin ticari uygulamalarında (özellikle Vulcan XC – 72) katalizör tabakayı destekleyici olarak için geniş ölçüde kullanılmaktadır. CB grafit'in (>50 nm çapında) küreye yakın parçacıklarını içermektedir. Bunlar yaklaşık 250 nm çapında partikül büyüklükleri arasında kaybolmaktadır. Kaliteli yüzey alanı ($\sim 250 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ for Vulcan XC-72), düşük maliyet ve CB'nin kolay bulunma yakıt pili maliyetlerini düşürür (Celep ve Dinçer, 2016).

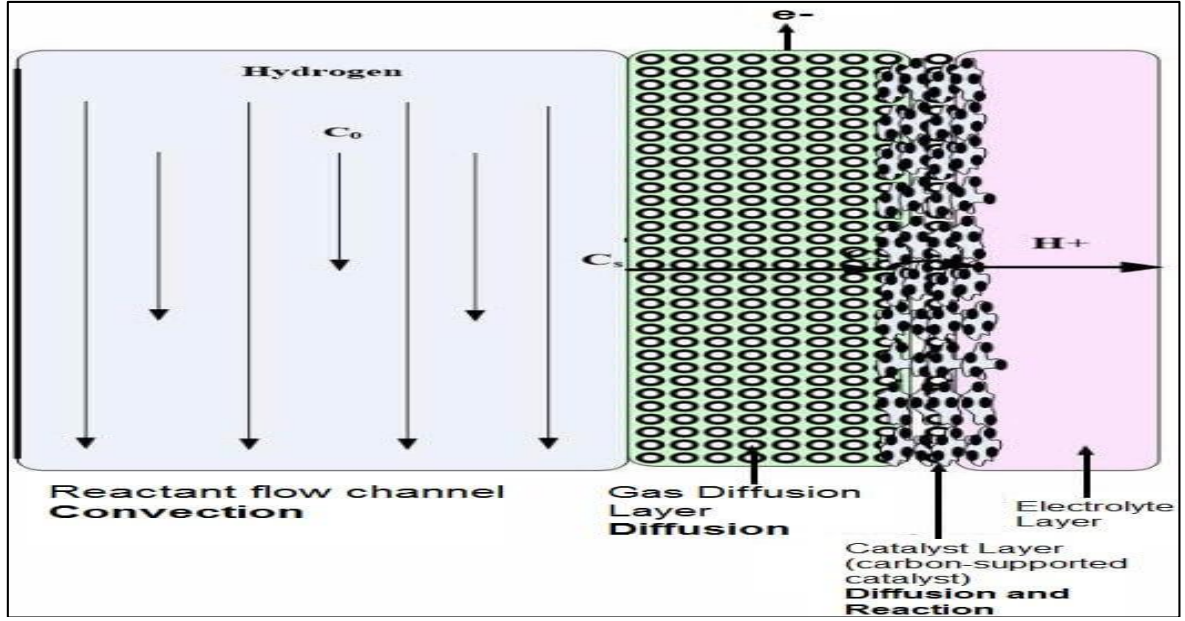
Katotta kütle transferi ve elektrik iletimini artırmak için gözenek yapısı ve ıslanabilirliğini etkili bir şekilde değiştirmek için çeşitli karbon esaslı malzemeler kullanılmıştır. Son zamanlarda, kimyasal buhar biriktirme işlemi kullanarak PTFE içermeyen MGK üretilmiştir (Park ve diğerleri, 2011).



Şekil 3.6. Çift Katman GDL'nin şematik gösterimi

3.5.3. Katalizör tabaka

Katalizör tabaka elektrokimyasal tabakanın gerçekleştiği bölümdür. Elektrotlar genellikle karbon destekli platinyum ve iyonamer' den oluşan gözenekli bir karışımdan yapılır. Katalizör tepkime için, katalizör parçacıklar hem protonik hem de elektronik iletkenlerle kontak halindedir. Katalizör bölgeye ulaşana kadar reaktanlar için yol oluşmalı ve tepkime ürünleride bu yoldan çıkış yapmalıdır. Reaktanların, katalizör ve elektrolitin kontak noktası geleneksel olarak üç faz arayüzü olarak adlandırılır. Kabul edilebilir reaksiyon hızları elde edebilmek için aktif katalizör bölgelerinin etkili alanı elektrodun geometrik alanından birkaç kat daha büyük olmalıdır. Bu nedenle, elektrotlar, üç fazlı arayüzlerin yerleştirildiği üç boyutlu bir ağ oluşturmak için gözenekli yapılır.



Şekil 3.7. PEM Elektrolit, katalizör ve gaz difüzyon tabakaları

3.5.4. Bipolar plaka

Yakıt hücrelerindeki bipolar plakalar, gaz kanalları yardımıyla yakıt pilinde reaksiyona giren hidrojen ve diğerreaktanların taşınma işlemini üstlenir. Ek olarak, yakıt pili hücreleri arasındaki elektrik kontakları ile birbirine bağlanması görevini yapar. Bipolar plakalarda mevcut olan gaz akış kanallarının tasarımı yakıt pilinin performansı için önemli parametrelerden bir tanesidir. Çünkü yakıt pilinde reaksiyona giren reaktanların homojen bir şekilde dağıtımı ve sıvı suyun çıkarılması bu gaz akış kanal konstrüksiyonları ile yakından ilgilidir (Wang ve diğerleri, 2003).

Yakıt pilleri'nin yığın kütlesi önemli bir parametredir. Çünkü, yığın kütlesi mümkün olduğunca en küçük ölçülerde (>3 mm inceliğinde) plakalardan üretilmesi istenir (Li ve Sabir, 2004).

Kaplama tipi ve malzemeler	Kaplama işlemi	Uygun bipolar tabaka malzemeleri
Altın (ön katman ihtiyacı var, altın üzeri nikel ve bakır)	Darbeli akım elektro kaplama	Al, Ti, Ni, SS
Grafit folyo tabakası	Boyama veya presleme	Al, Ti, Ni
(a) Alt katman: Ara katman için askıda grafit parçacıkları		
(b) Üst kaplama: Grafit folyo		
Grafit üst kaplama tabakası	Fiziksel buhar kaplama (FBK) veya kimyasal anotlama / yükseltgenme kaplaması	Al, Ti, Ni, SS
a) Alt katman: Titanyum üzeri Titanyum-Alüminyum-nitrat		
b) Üst kaplama: Grafit indiyum kalay oksit tabakası (Sn(In)O ₂)	Elektron ışın buharlaşması	SS
Kurşun oksit	Buhar kaplama ve püskürtmesi	SS
c) Alt katman: Kurşun		
d) Üst kaplama: Kurşun oksit (PbO/PbO ₂)		
Paslanmaz Çelik		
a) Alt katman: Cr, Ni, Mo veya Ni-P karışımı	FBK veya ABK, elektriksiz kaplama	Al, Ti, SS
b) Üst kaplama: TiN, CrN, ZrN		

Şekil 3.8. Bipolar plaka için kaplama malzemeleri (Mehta ve Cooper, 2003)

Bipolar plakalar yakıt pillerinin en önemli bileşenlerinden biridir ve daha iyi bir pil performansı eldesi için diğer hücre bileşenleri ile eş zamanlı çalışması istenir. Aşağıda, görevleri sıralanmaktadır:

- Reaktif gazları akış kanalları içerisinde elektrotlara doğru besler ve bir hücreden diğerine elektrokimyasal bağlantıyı temin eder,
- Mekanik olarak zayıf ve ince olan MEÇ tabakasını yapısal olarak destekler,
- Hücre içerisinde su iletimini kolaylaştırır,
- Soğutma plakaları olmadığı durumlarda ısı yönetimini de kolaylaştırması. (Li ve Sabir, 2004)

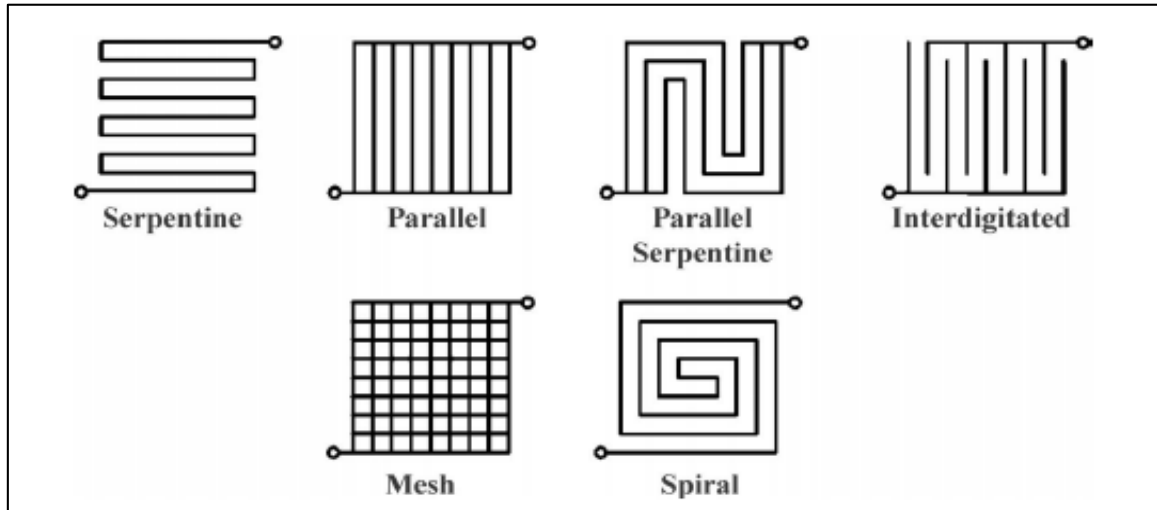
Bipolar plaka üretiminde kullanılan malzemeler, grafit, karbon kompozit polimerler, metal levhalar, esnek grafit plakalar'dır.



Resim 3.3. Farklı malzemelerden yapılmış bipolar plakalar

3.5.5. PEM yakıt pili akış kanalı tasarımları

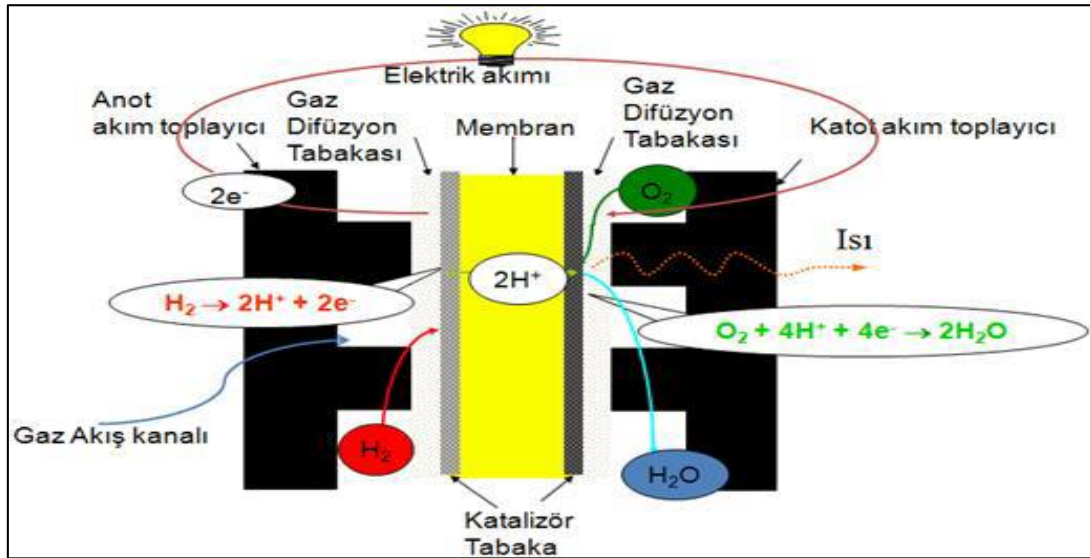
Şekil 3.9’da akış kanalı tasarım örnekleri mevcuttur. Çoğu standart yakıt hücresi tasarımları paralel ve serpantinli tasarımların birer birleşimidir. Kanal boyutunu ve paralelleştirmeyi düzeyeleyerek, kanal hızı ve basınç düşüşü dengelenebilir (Mench,2008: 328). Akış kanalı tasarımının iyileştirilmesi yakıt hücresinin performansında iyileştirilmesi anlamına gelir. Bu sayede %50’ ye kadar maliyet azaltımı gerçekleştirilebilir (Kahraman ve Orhan, 2016).



Şekil 3.9. Akış kanalı tasarımına örnekler (Mench ,2008: 328)

4. PEM YAKIT PİLİ TERMODİNAMİĞİ

Yakıt pilleri, reaktanlardan aldığı kimyasal enerjiyi direk olarak elektrokimyasal işlemler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Pillerdeki tepkimelerin neticesinde oluşan enerji, tepkime sonucu anottan katoda geçen elektron sayısı ile doğru orantılıdır. Yakıt pilindeki enerji dönüşümü, termodinamiğin birinci kanunu olan enerji korunumu ve ikinci kanunu olan entropiyle açıklanır. Anot tarafındaki gaz difüzyon tabakası hidrojenin, elektrot içindeki tepkime bölgesine ulaşmasını sağlamaktadır. Gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan protonlar, iyonik iletken membran aracılığıyla ve elektronlar ise dış devre aracılığıyla iletilir. O nedenle anot bileşenleri elektrik iletkenliğinin yanı sıra gaz geçirgenliğine sahip olmalıdır.



Şekil 4.1. PEM yakıt hücresinin çalışma prensibinin şematik gösterimi

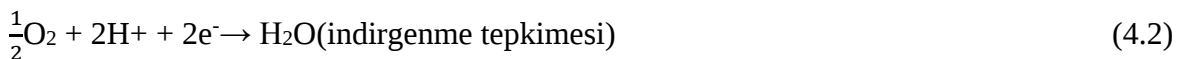
Temel tepkime

PEM yakıt pilindeki indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleri aşağıda verilmiştir.

Anot tarafında oluşan tepkime Eş. 4.1 ile ifade edilmiştir.



Katot tarafında oluşan tepkime Eş. 4.2 ile ifade edilmiştir.



Toplam tepkime Eş. 4.3 ile gösterilmiştir.



Yakıt hücresinde meydana gelen tepkime de su oluşurken, katot kısmında oluşturulan hava akımıyla oluşan su hücre dışına gönderilmektedir. Bu tepkimelerin sonucunda dış devrede elektron akımı oluşmaktadır.

Teorik yakıt pili gerilimi

Genel olarak, yakıt pilinde elektrik işi, yük ve gerilimin bir ürünüdür.

Elektriksel iş Eş. 4.4 ile verilmiştir.

$$W_{el} = q \cdot E \quad (4.4)$$

Burada,

$$W_{el} = \text{Elektrik işi (j/mol)}$$

$$q = \text{Yük (coulomb/mol)}$$

$$E = \text{Gerilim (volt)}$$

Yakıt pil tepkimesinde tükenen bir mol H_2 için transfer edilen toplam yük değeri Eş. 4.5 ile ifade edilir.

$$q = n \cdot N_{avg} \cdot q_{el} \quad (4.5)$$

Burada,

$$n = 1 \text{ molekül } \text{H}_2 \text{ başına elektron sayısı}$$

$$N_{avg} = 6,022 \times 10^{23} = \text{Avogadro sayısı (molekül/mol)}$$

$$q_{el} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ (coulomb/Elektron) tanımlar.}$$

Bir mol elektronun yükü Faraday sabiti olarak isimlendirilir.

$$F = 96,485 \text{ (coulombs/elektron- mol)}$$

Böylece elektrik iş Eş. 4.6 ile ifade edilir.

$$W_{el} = n.F.E \quad (4.6)$$

Yakıt hücresinden kazanılan yüksek elektrik enerjisi Gibbs serbest enerjisine eşittir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$W_{el} = -\Delta G \quad (4.7)$$

Böylece yakıt pilinin teorik potansiyeli aşağıdaki Eş. 4.8'deki gibi olur.

$$E = \frac{-\Delta G}{n.F} = \frac{237340}{2 \times 96485} = 1,23 \text{ Volt} \quad (4.8)$$

olarak hesaplanır. Buna göre 25 °C'de teorik olarak PEM yakıt pili potansiyel değeri 1,23 voltur (Barbir, 2005: 20).

Teorik elektriksel iş

Yakıt pilinde hidrojenin ısı değeri enerji girdisini oluşturur. Bu hidrojenden ayrılabilen en büyük enerji miktarıdır. Her kimyasal tepkimede bir miktar entropi üretilir. Bu yüzden hidrojenin üst ısı değeri elektrik enerjisi olarak faydalı işe dönüşmez. Tepkime entalpisinden veya hidrojenin ısı enerjisinden elektrik enerjisine dönüşen kısma Gibbs Serbest enerjisine karşılık gelir ve Eş. 4.9 ile verilmiştir (Barbir, 2005: 20).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4.9)$$

Entropi oluşumundan dolayı elektrokimyasal tepkime esnasında bazı tersinmez kayıplar gerçekleşir. ΔH ürünler ile tepkimeye girenlerin oluşum ısılarının farkı olarak tanımlanır. ΔS ise ürünler ile girenlerin entropi farkıdır ve Eş. 4.10 ile verilmiştir (Barbir, 2005: 20).

$$\Delta S = (S_f)_{H_2O} - (S_f)_{H_2} - \frac{1}{2} (S_f)_{O_2} \quad (4.10)$$

Sonuç olarak, 25°C'de 286,02 kJ / mol mevcut enerjinin 237,34 kJ/mol kadar kısmı elektrik enerjisine dönüştürebilir. Arta kalan kısmı da ısı enerjisine dönüşür (Barbir, 2005: 20).

Teorik yakıt pili verimi

Enerji dönüşüm cihazı verimliliği, faydalı enerji çıkışı ile enerji girişi arasındaki oran olarak ifade edilir. Yakıt pilinde, faydalı enerji çıkışı elektrik olarak üretilen enerjiye (Gibbs serbest enerjisi) karşılık gelir, enerji girişi ise hidrojenin entalpi değeridir, yani hidrojenin ısı enerjisinden elde edilir. Gibbs serbest enerjisinin hepsinin elektrik enerjisine çevrildiği varsayılırsa, alt ısı değer kullanılarak yakıt pilinin teorik verimliliği Eş. 4.11'deki gibi hesaplanır (Barbir, 2005: 61).

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-nFV}{\Delta H} = \frac{237,04}{286,02} = \%83 \quad (4.11)$$

Sonuç olarak alt ısı değer için verim %83 olarak bulunmuştur.

Verimlilik değeri hidrojenin üst ısı değeri kullanarak da ifade edilebilir. Bu durumda maksimum teorik yakıt pili verimi Eş. 4.12'deki gibi hesaplanır:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-nFV}{\Delta H} = \frac{237,04}{241,98} = \%94,5 \quad (4.12)$$

Üst ısı değer kullanıldığında verim %94,5 olarak bulunmuştur.

5. PEM YAKIT PİLİNDE POLARİZASYON EĞRİSİ

Polarizasyon eğrisi yakıt hücrelerinin (tek hücre veya yığınlar) performansını karakterize etmek için kullanılan standart elektrokimyasal bir tekniktir. Polarizasyon eğrileri ölçülerek, belli parametreler (akış hızı, sıcaklık, reaktanların bağıl hızları vb. gibi) sistematik olarak karşılaştırılır ve karakterize edilebilir. Bu eğriler, hem hücrenin hemde yığının bir bütün olarak performansı hakkında bilgi sağlar. Ancak, belirli çalışma şartları altında genel performans için faydalı bir belirleyici olmasına rağmen, hücre içi bileşenleri ile ilgili çok fazla bilgi üretememektedir. Üstelik bu eğriler hücre içinde oluşan mekanizmaları birbirinden ayırt edemezler, örneğin; su baskını, yakıt pili kuruması vb. gibi mekanizmalar tek bir polarizasyon eğrisiyle ayırt edilemez. Ayrıca, yakıt pilinde veya yığınının zamana bağlı işlemleri çözemezler.

Şekil 5.1'de I-V ile işaretlenmiş beş alanı gösteren, hidrojen-hava yakıt hücresi arasındaki tepkimenin negatif entropisi olan bir yakıt hücresi için tipik polarizasyon eğrisinin gösterimidir. Hücre voltaj-akım ilişkisini temsil eden polarizasyon eğrisi, yakıt hücresi performansının değerlendirilmesi için standart değerdir. Geometrik elektrot alanıyla ölçeklendirilen voltaj ve akım yoğunluğu tipik olarak gösterilmektedir, böylece sonuçlar farklı büyüklükteki hücreler arasında ölçeklendirilebilir. Şekil 5.1'in polarizasyon eğrisinde etiketli beş bölgeye bakılacak olursa (Mench, 2008: 121)

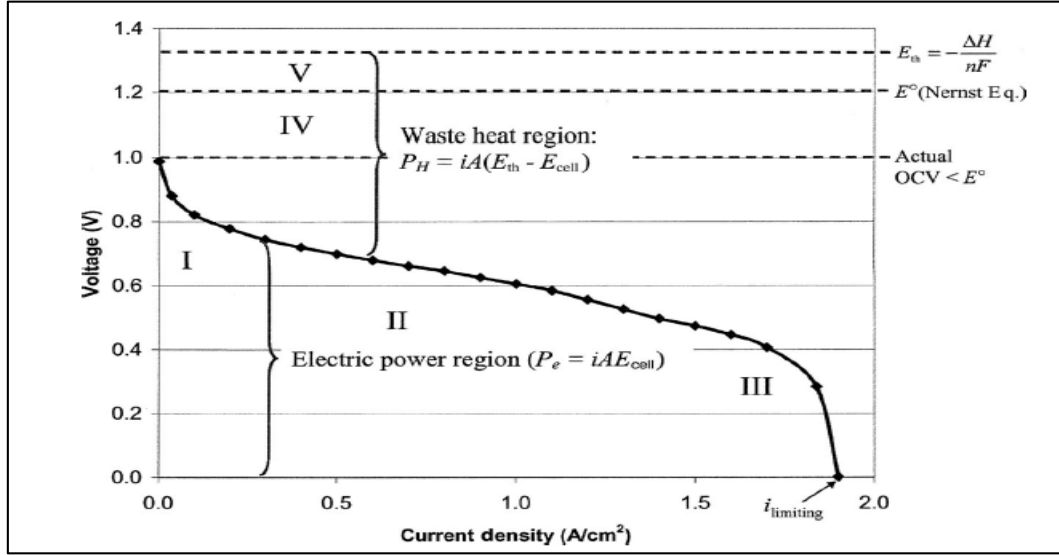
I bölgesindeki kayıplara, elektrotlarda aşırı yüklenme aktivasyonu (kinetik) hakimdir.

Bölge II'deki kayıplara, yakıt hücresinin omik polarizasyonu hakimdir. Bu, elektrolit, katalizör tabakaları, hücre ara yüzeyleri ve kontaklar boyunca meydana gelen tüm elektriksel ve iyonik iletim kayıplarını içerir (Mench, 2008: 121).

Bölge III'deki kayıplara, reaktiflerin elektrotlara kütle taşınımı sınırlamaları nedeniyle yakıt hücresinin konsantrasyon polarizasyonu hakimdir (Mench, 2008: 121).

Bölge IV'deki kayıplar, Nernst termodinamik denge potansiyelinden ayrılmayı temsil eder. Bu kayıp çok önemli olabilir ve elektrolit boyunca geçen istenmeyen türler, elektrolit boyunca elektron sızıntısından kaynaklanan iç akımlar veya diğer kirlilik veya pislikten dolayı olabilir (Mench, 2008: 121).

V bölgesindeki kayıplar, hesaplanamayan entropi değişiminin bir sonucu olarak maksimum termal voltajdan ayrılmayı temsil eder. Şekil 5.1 negatif ΔS 'li bir yakıt hücresi için gösterilmiştir. Eğer entropi değişimi pozitifse, Nernst voltajı aslında termal voltajdan daha büyüktür (Mench, 2008: 121).



Şekil 5.1. PEM yakıt pili polarizasyon eğrisi (Mench, 2008: 122)

Bir elektrokimyasal tepkimenin elektrot yüzeyindeki ilerleyiş hızı akım yoğunluğu ise elektronların serbest bırakılma veya tüketilme hızı olarak belirlenir, buda elektrik akımıdır. Akım yoğunluğu ise yüzeyin birim alan başına elektronların veya iyonların akımıdır (Barbir, 2005: 33).

Standart koşullar altında teorik PEM yakıt pili potansiyeli 1.23 V' dur. Ancak gerçek hücre potansiyel değeri teorik yakıt pili potansiyelinden genellikle daha düşüktür ve bu potansiyel açık devre voltajı (OCV) olarak tanımlanır.

PEM yakıt pili gerilim ifadesi, Eş.5.1' de verilmiştir.

$$V_{Pil} = E_{Nernst} - V_{akt} - V_{ohmik} - V_{der} \quad (5.1)$$

Burada; E_{Nernst} ; termodinamik gerilimdir. V_{akt} ; anot ve katotta oluşan aktivasyon kayıpları, V_{ohmik} ; hücre iç direncinden (geçen akımın azalmasından) kaynaklanan kayıplar, V_{der} ise derişim kayıplarıdır.

Ohmik (Direnç) Kayıpları

Ohmik kayıplar, elektrolit içindeki iyonların akışına gösterilen direnç ve elektriksel olarak iletken olan yakıt pili parçalarından geçen elektronların akışına gösterilen dirençlerden oluşur. Bu kayıplar ohm kanunu ile ifade edilir:

$$\Delta V = iR_i \quad (5.2)$$

Burada

i = Akım yoğunluğu A/cm^2

R_i = Toplam hücre iç direnci (iyonik, elektronik ve kontak dirençleri, Ω/cm^2)

R_i ' nin değerleri 0.1 ve $0.2\Omega/cm^2$ arasında değişir (Barbir, 2005: 44).

Aktivasyon polarizasyon kayıpları

Kimyasal tepkimeyi başlatmak için belirli bir miktarda gerekir. Bu olay aktivasyon polarizasyonu adı verilen doğrusal olmayan bir voltaj düşüşü meydana getirir. Bunlar hem anot hemde katot katalizör tabakasında gerçekleşir. Bununla birlikte, oksijen indirgenme tepkimesinin hızları hidrojen yükseltgenme tepkimesinden daha yavaştır ve indirgenme tepkimesi daha fazla büyüklükte aktivasyon polarizasyon kayıpları üretir. Anottaki indirgenme tepkimesi daha hızlı gerçekleşir. Sadece tek tepkime düşünülürse aktivasyon polarizasyonundan kaynaklanan voltaj düşümü Tafel denklemi ile ifade edilir (Barbir,2005: 43).

Aktivasyon kayıpları PEM yakıt pilinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisiyle doğrudan ilişkilidir. Aktivasyon enerji seviyesine ulaşmadan reaksiyon başlamaz. Aktivasyon kayıpları, aşağıda gösterilen Tafels Eş. 5.3 ile hesaplanabilir. Burada i_o , akımı ifade eder.

$$\Delta V_{akt} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_o} \right) \quad (5.3)$$

T kelvin cinsinden sıcaklıktır, R ideal gaz sabitidir, F faraday sabitidir ve α , katalizör malzemesine bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişen bir yük transfer katsayısıdır ve tepkime

arayüzündeki elektrik potansiyelindeki değişimin tepkime hızını nasıl değiştirdiğini ifade eder. Bu katsayı tepkimenin tipine ve elektrot malzemesine bağlıdır (Larminie, 2003: 50).

Derişim Kayıpları

Konsantrasyon polarizasyonu, bir reaktan elektrotta hızla tüketildiğinde, derişim gradyanları oluşturulduğunda gerçekleşir. Elektrokimyasal tepkime gerilimi reaktanların kısmi basıncı ile değişir. Katalizör yüzeyindeki reaktanların derişimi akım yoğunluğuna bağlıdır. Akım yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, yüzey derişimi o kadar düşük olur. Tükürim hızı difüzyon hızını aştığında yüzey derişimi sıfır olur. Reaktan yüzeye ulaşmadan hızlıca tüketildiği anlaşılır. Bu durumda gerçekleşen akım yoğunluğuna ‘sınır akım yoğunluğu’ denir. Bir yakıt hücresi sınırlayıcı akımdan fazlasını üretemez, çünkü katalizör yüzeyinde reaktan madde kalmamıştır. Derişim kayıpları Eş. 5.4 ile ifade edilir: (Barbir, 2005: 46)

$$\Delta V_{\text{der}} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (5.4)$$

İç akım ve atlama kayıpları

Polimer elektrot membran elektriksel olarak iletken olmamasına ve pratikte reaktan gazları geçirmemesine rağmen, çok küçük miktarda hidrojen (H₂) anottan katoda doğru yayılıma uğrar ve bazı elektronlar da membrandan kısayol bulabilir. Bu kayıplar yakıt pili çalışması esnasında önemsiz görülebilir, çünkü hidrojen geçirgenliği veya elektron atlaması hidrojen tüketim hızından veya toplam üretilen elektrik akımından birkaç mertebe daha küçüktür. Bununla birlikte, yakıt pili açık devre voltajında veya çok düşük akım yoğunluğunda çalıştırıldığında, bu kayıplar pil geriliminde çarpıcı bir etkiye sahip olabilir. Bu kayıplar eş. 5.5 ile ifade edilir: (Barbir, 2005: 42)

$$V_{\text{yakıt}} = -\frac{RT}{2\alpha F} \ln\left(\frac{i+i_0}{i_0}\right) \quad (5.5)$$

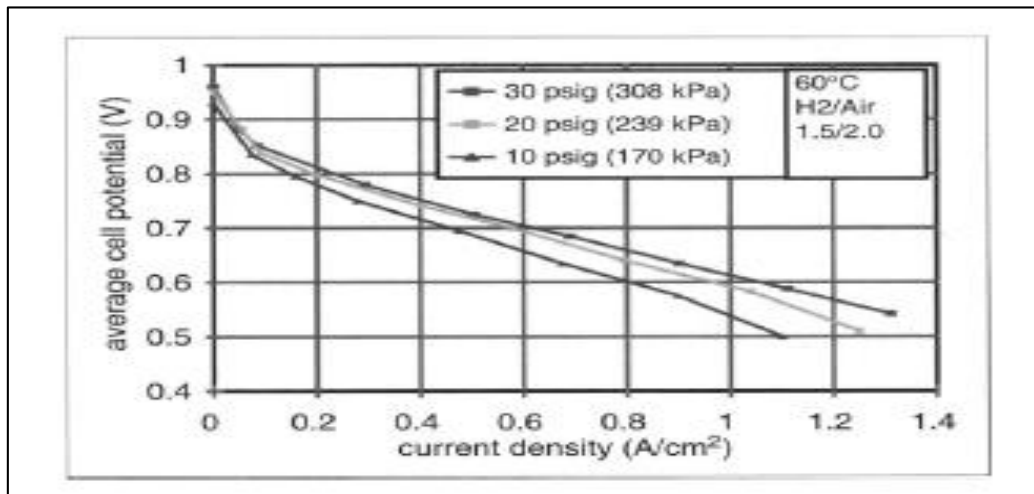
6. PİL ÇALIŞMA KOŞULLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

PEM yakıt hücresi çalışma koşulları pilin performansında önemli bir rol oynar. Bu şekilde, maksimum güç eldesi için çalışma koşullarının bilinmesi gereklidir. Akım şiddetine bağlı olarak maksimum güce erişecek işletme şartları farklıdır. Ayrıca, maksimum gücü sağlayacak işletme şartlarının optimizasyonu pil maliyetlerini düşürmek içinde önemli bir rol oynar. Çalışma basıncı, reaktanların nemlilik değeri, çalışma sıcaklığı, basınç değeri ve soğutma düzeni gibi çalışma şartları pil performansını önemli ölçüde etkiler.

6.1. Çalışma Basıncı

Yakıt pili basınçlandırılması birçok iyileştirme sorununa tipik bir örnektir. Çünkü pilin basınçlandırılması sorusunu zorlaştıran birbiriyle ilintili birçok faktör mevcuttur. Basınçlandırma ile pilin performansı artarken maliyeti de artar. Temel olarak, basınçlandırma sorunu, iyileştirilmiş performans ile azaltılmış boru hacmi, yalıtım ve ısı kaybının, kompresörün ve bununla ilişkili ekipmanın, artan parazitik yükü dengesi içerir (Fuel Cell Handbook 7, 2004: 8-46).

Bir yakıt pili ortam basıncında çalıştırılabilir veya basınçlandırılabilir. Yakıt hücresi basınç artığında bir miktar potansiyel kazanır. Ancak, sıkıştırma gücü dikkate alındığında net kazanç sorgulanabilir. Basınçlandırma konusu aynı zamanda su yönetiminin de konusudur ve bu açıdan da konu ele alınmalıdır (Barbir, 2005: 115).



Şekil 6.1. Çeşitli basınçlarda yakıt pili performansı (Barbir, 2005:116)

6.2. Çalışma Sıcaklığı

Hücre sıcaklığı, pil çalışma koşulları içerisinde önemli bir rol oynayan işletme parametrelerinden bir tanesidir. Genel olarak, daha yüksek bir çalışma sıcaklığı daha yüksek bir hücre performansı veya potansiyel değeri ile sonuçlanır. Bununla birlikte, her bir hücre tasarımı için optimal bir hücre sıcaklığı mevcuttur. Yakıt pili optimal sıcaklıkta çalıştırıldığı zaman daha iyi performans elde edilir, ancak PEM yakıt hücresinin çalışmaya başlayabilmesi için bu sıcaklığa ısıtılması gerekmez. İşletme basıncında olduğu gibi, sadece hücre performansını dikkate alarak değil, aynı zamanda ısı yönetim alt sisteminin parazitik güç gereksinimleri gibi sistem gereksinimi de dikkate alınmalıdır (Zhang, 2008: 18).

PEM yakıt hücresi sıcaklığı aşağı yukarı 200 °C civarında sınırlandırılmıştır. Korozyon ve pil ömrü kaybı bu sıcaklıktan önce önemli hale gelir (Fuel cell handbook 7: 8-48).

6.3. Reaktanların Akış Hızı

Yakıt hücresi girişindeki reaktanların akış hızı pilde tüketilen reaktanların hızından büyük veya eşit olmalıdır. Hidrojen ve oksijenin tüketim hızları (mol/s) ve suyun üretim hızı Faraday kanunu ile belirlenir: (Barbir, 2005: 118)

$$N_{H_2} = \frac{I}{2F} \quad (\text{hidrojen tüketim hızı}) \quad (6.1)$$

$$N_{O_2} = \frac{I}{4F} \quad (\text{oksijen tüketim hızı}) \quad (6.2)$$

$$N_{H_2O} = \frac{I}{4F} \quad (\text{su üretim hızı}) \quad (6.3)$$

Burada,

N= Tüketim hızı (mol/s)

F= Faraday Sabiti (C/mol)

I= Akım (A)

Stokiyometrik oran denklemleri Eş. 6.4'deki gibidir.

$$\zeta = \frac{N_{\text{giriş}}}{N_{\text{tüketim}}} = \frac{m_{\text{giriş}}}{m_{\text{tüketim}}} = \frac{V_{\text{giriş}}}{V_{\text{tüketim}}} \quad (6.4)$$

Denklemde,

N=Molar debi (mol/s)

m=Kütlesel debi (gr/s)

ζ = Stokiyometrik oran

V=Hacimsel debi (ml /s) belirtir.

Reaktanların Nemliliği

Reaktan gazlar hücre içerisine girmeden önce nemlendirilmeleri gerekmektedir. Çünkü membranlar protonik iletkenliğinin devamlılığı için suya ihtiyacı vardır. Bazı durumlarda reaktanların doymuş olmaları gerekir, ancak bazı koşullarda da anot tarafında aşırı neme ihtiyaç duyulur. Katot tarafında ise doymuş koşullardan daha az nem yeterli olabilir (Barbir, 2005: 124).

Genel olarak, hücre çalışması sırasında reaktan gazların giriş bağıl nemliliğinin %100 eşit veya az olmasına ihtiyaç duyulur. Reaktanların nemliliğinin sağlanması gerekli ve önemlidir. Çünkü membran (örneğin, nasyon) ömür ve iyi performans sürdürülebilirliği için tam olarak su tutması gerekmektedir. Membran su tutmasının tam olarak başarılması tümüyle nemlendirilmiş reaktan gaz akımlarının hem anot hemde katottan tedarik edildiği yaygın olarak kabul edilir (Zhang, 2008: 21).

6.4. PEM Yakıt Pillerinde Su Yönetimi

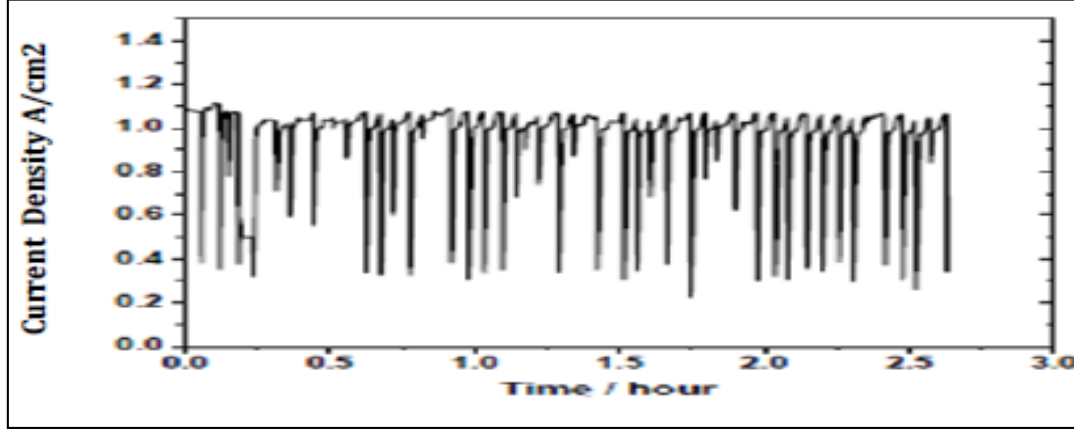
Şekil 6.2.'de yakıt hücresi ve membran elektrot çifti (MEÇ) görülmektedir. Bu MEÇ katmanı gaz difüzyon tabakaları ve içerisinde gaz akış kanallarının bulunan bipolar plakalar arasında yer almaktadır. MEÇ tabakası proton ileten bir membranla ayrılmış, iki elektrot, anot ve katottan oluşur. Anodik membran arayüzünde hidrojen elektrokimyasal olarak oksitlenir ve elde edilen protonlar membrandan iletilir. Katodik membran elektrot arayüzünde oksijen elektrokimyasal olarak oksitlenir ve su olarak ürüne dönüşür. Elde edilen su gaz kanalları boyunca ve MEÇ katmanına dik yönde taşınır. Protonlar belirli miktarda su ile çevrilidir. Böylece, protonların membrandan geçerken, bir miktar akım

Öte yandan, akış alanlarında, elektrotlarda, gaz gözeneklerinde sıvı suyun varlığı ve birikmesi, katalizör tabakadan buharlaşma, su buharı difüzyonu ve akış kanalları içerisinde gaz difüzyon tabakasına doğru sıvı suyun kılcal taşınması ile nakledilir. Sonra, sistem dışına atılır. Fazla su akış kanallarını veya gaz difüzyon / katalizör tabakalarının gözeneklerini tıkar ve ardından katalizör tabakanın aktif alanlarının da azalmasına yol açar. Bu olay ‘su baskını’ diye bilinir ve PEM yakıt hücresinin performansını sınırlayan önemli bir faktördür. Genel olarak, bir elektrotta su baskını/taşması su üretim hızının su tahliye hızından daha yüksek olmasının sonucu olan yüksek akım yoğunluğuna bağlıdır. Yine de su baskınlarının ölçüsü ve etkisi, işletme koşullarının etkileşimi, özellikle düşük gaz akış hızları / sıcaklık seviyesi veya sıvı suyun kanallardan zamanında tahliye edilmemesi ve MEÇ özelliklerine, şiddetle bağlıdır (Liu, Guo ve Ma ve arkadaşları, 2006). Üstelik her iki elektrotta su baskınları olsa bile, katot katalizör tabakasındaki su taşkını oksijenin indirgenme tepkimesiyle üretildiği yerlerde önemlidir. Sıvı suyun kanallarda birikmesi ancak su buharı ile gazın tamamıyla doyduktan sonra gözlenir. Çünkü buharlaşma su buharı taşınımı nispeten sıvı suyun taşınımına göre daha hızlıdır (genel olarak gaz difüzyon tabakası içinde kapılar mekanizma veya kanal yanındaki gazın konvektif akışı vasıtası ile sürüklenme kuvveti uygulanır) (Natarajan ve Nguyen, 2005). Öte yandan gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakadaki su taşması muhtemelen gaz kanallarında olduğundan daha önce gerçekleşir, çünkü su katalizör tabakada üretilir ve daha sonra gaz difüzyon tabakasından akış kanallarına atılır. Üstelik düşük sıcaklıklar ve yüksek gaz bağıl nemliliği ve de düşük gaz akım hızları gibi belli işletme koşulları altında oluşur (Spernjak, Prasad ve Advani, 2007). Genel olarak, kısa süreli su baskınları sonuçlarının çoğu geri dönüşümlüdür, fakat yavaş sıvı su taşıma prosesi nedeniyle akım yoğunluğundaki değişikliklere maruz kalındığında yeni kararlı hale geçmek için 30 dakikadan daha uzun bir süreye ihtiyaç duyulur (He W., Lin ve Nguyen, 2003). Dahası, aşırı sıvı sulu uzun süreli çalışma koşullarında hem MEÇ mazlemelerinin mekanik bozulmasına hemde de yerel yakıt ve oksidant azalmasına yol açabilir (Knights ve diğerleri, 2004).

6.5. Yakıt Pili Su Baskını

Su taşkını fazla suyun birikmesidir ve hem anotta hemde katotta olabilir. Su basması, özellikle katotta anlık olarak kütle taşınımının zayıf olmasına yol açmaktadır. Katalizör tabakanın aktif bölgelerinde reaktan taşıma hızını önemli ölçüde azaltır. Aşırı su gaz difüzyon tabakasındaki gözenekleri bloke eder ve böylece reaktanların katalizör tabaka

aktif bölgesine ulaşmasına engel olur, bu da reaktan gazların yetersizliğine ve hücre potansiyelinin (akım) hemen düşmesine neden olur. 0,6 V sabitlenmiş voltajda hücre akım yoğunluğunun zamana bağlı salınımı Şekil 6.3’de görülmektedir. Bu şekil bir PEM yakıt hücresinde gözlenen tipik bir taşma olayını temsil eder (Li ve diğerleri, 2008)



Şekil 6.3. Sabit hücre voltajında (0,6 V) PEM yakıt pili çalışırken tipik bir su baskını örneği

PEM yakıt pili çalışırken sıvı suyun bir ölçüde toplanmasına izin verir ve su baskını oluşturur, buda gaz akış yollarının geçici olarak kapatabilir, akım yoğunluğu sert bir şekilde düşer. Sonrasında gaz akış kanallarında ani bir basınç yükselmesi meydana gelebilir. Bu durum da fazla sıvı su aniden atılır, akım yoğunluğunda ani bir iyileşme ile neticelenir. Hücredeki sıvı suyun birikmesi ve çıkarılması hücre performansında dalgalanmalara neden olur, buda kararsız, güvenilirmez ve tutarsız hücre performansına yol açar. İlave olarak, su taşkını hücre performansını geçici olarak tehlikeye atmakla kalmaz, aynı zamanda hücre dayanıklılığında düşürür.

6.5.1. Anot su baskını

Anotta su baskını katotta olduğundan daha az gerçekleşir de düşük hidrojen akış hızları anotta çok fazla suyun kalmasına neden olur. Bu durum yakıt azlığına ve pil performansının düşmesine yol açar. Genellikle, düşük akım yoğunlukları ve düşük hücre sıcaklıkları gibi birkaç işletme koşulları anotta su baskınına neden olur. Anot su baskını, sık sık düşük akım yoğunluklarında ($0,2 \text{ A/cm}^2$), özellikle düşük reaktan hızlarında gözlemlenmiştir (Ge ve arkadaşları). Anot su taşkını yakıt gaz akışının düşük hidrasyon durumuyla katottan su geri difüzyonuyla da kaynaklanabilir. Orta değerlerde hücre sıcaklıkları ile birlikte soğutma için sıvı su enjeksiyonu ve nemlendirme anotta su taşkınına yol açabilir. Sonuç olarak, yakıt pili yığını içindeki tek bir yakıt hücresindeki su taşkını

yakıt açlığına ve karbon substrat oksidasyonuna neden olabilir ((X. Liu, Guo ve Ma, 2006) ((Sierra, Moreira ve Sebastian, 2011).

6.5.2. Katot su baskını

Genel görüş aşağıda sıralanan üç mekanizma nedeni ile su taşmasının katotta meydana gelmeye daha yatkın olduğu yönündedir:

1. Oksijen indirgenme tepkimesine bağlı su oluşumu neticesinde su üretir. Yükün veya akım yoğunluğunun artmasıyla daha fazla su üretilcektir.
2. Membran boyunca uygulanan elektrik alanının etkisi altında elektro ozmotik sürüklenme ile anottan katota protonlarla birlikte su moleküllerini çeker.
3. Taşınan suyun hızı membranın nemlendirme seviyesine bağlıdır ve yükselen akım yoğunluğu ile artar. Aşırı nemlendirilmiş reaktan gazlar ve sıvı su enjeksiyonunda su taşkınına yol açar (Nguyen ve White, 1993).

Katotta biriken su, genellikle poros elektrottan buharlaştırma, su-buhar difüzyonu ve kapılar taşınma ile gaz difüzyon tabakasından akış kanallarına veya su geri difüzyonu ile membrandan anota çıkarılır. Suyun geri difüzyonu sıvı suyun tahliye işlemine çok katkıda bulunmaz, çünkü düşük akım yoğunluklarında (0.3 A/cm^2 'den daha az) geri difüzyon, anota doğru su taşınmasına yol açan elektro ozmotik sürüklenmeye galip gelme ihtimali vardır (Nguyen ve White, 1993). Yine de katot taşkını elektro-ozmotik sürüklenme geri difüzyonu aşarak yüksek akım yoğunluğu eşliğinde katot su baskınına yol açar, bu durum katottaki su içeriğinin artışı ile sonuçlanır (Sridhar ve diğerleri, 2000). Sonuç olarak katot su taşkını daha da şiddetlenir. Buharlaşma ve su buharı difüzyonu yoluyla su çıkarılması genellikle daha yüksek pil sıcaklığında ve daha yüksek akış hızlarında gerçekleşir. Suyun vizkositesi ve yüzey geriliminde bir düşüş olduğunda, hücre dışına suyun atılmasını kolaylaştırır (Knights ve diğerleri, 2004).

6.5.3. Akış kanalları su baskını

Su taşkınları sadece katot ve anotta yer alan gözenekli elektrotlarda değil aynı zamanda akış kanallarında da bileşenlerin özelliklerinin ve çalışma koşullarının etkileşime bağlı olarak meydana gelir. Akış kanalları su baskını gözenekli elektrotlara gaz girişini de engeller ve yakıt hücresinden elde edilecek gücün eksilmesine de neden olur. Üstelik çoklu paralel kanallarda kullanıldığında kanallardan birinde taşma tıkanmayla neticelenmektedir.

Çalışan bir PEM hücresinde çıkış voltaj kayıplarının yanısıra, su taşkını karakteristik özelliklerde değişikliklere neden olabilir. Örneğin; 1. Yerel bölgede su yoğunlaşması gaz taşınımının engelenmesi nedeniyle bölgesel bir akım yoğunluğu düşümü gerçekleşebilir. 2. Bölgesel bir sıcaklık yükselmesi yoğunlaşan suyun entalpisinin salıverilmesine yol açar. Bu durum bölgesel akım yoğunluğu ve sıcaklık dağılımının beklenmedik şekilde bozulmasına neden olur. 3. Sıvı suyun gaz difüzyon tabakasında veya akış kanallarında toplanması gaz akış direncinin artmasına yol açar, bu da yakıt hücresinin girişinde ve çıkışı arasındaki basınç düşümünün artması ile neticelenir (He ve diğerleri, 2003), (Nguyen ve White, 1993).

7. SAYISAL ANALİZ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde üç boyutlu, serpantin kanallı (1S), paralel serpantinli (5PIS) ve çoklu serpantinli (5S) PEM yakıt pilleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak kararlı halde analiz işlemi yapılmıştır.

7.1. Korunum Denklemleri ve Kabuller

Yakıt hücrelerinde tepkime esansında elektrokimyasal ve fiziksel olaylar gerçekleşir. Bu olayları modellemek için enerjinin korunumu, kütle korunumu, momentum korunumu ve türlerin korunumu gibi denklemler gerekmektedir. Yakıt pili modeli geliştirirken kullanılan kabuller aşağıda sıralanmıştır (Bilgili ve Sivrioğlu, 2016).

- Gaz akışı sürekli halde, üç farklı türün bulunduğu, üç boyutlu yakıt pili modeli olarak incelenecektir.
- Bütün elektrokimyasal reaksiyonlarda, su tek fazlı, yani, gaz fazında kabul edilmektedir.
- Katalizör tabakası sadece akım geçiren yüzeyler oldukları ve hesaplamalarda ihmal edilebilecek kadar ince oldukları için katalizör tabakaların ve membranın tek bir tabaka gibi hareket edecekleri kabul edilmiştir.
- Membran su ile tamamen doyurulmuştur ve homojen bir yapıya sahip olduğu kabul edilmektedir.
- Gazlar, gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakaları boyunca yalnızca difüzyon yoluyla aktarıldığı
- Reaksiyona giren türlerin ideal gaz özelliği gösterdiği,
- Gaz difüzyon tabakaları ve akım toplayıcı tabakalardaki ohmik kayıpların ihmal edildiği kabul edilmiştir.

Model çözümünde kullanılan denklemler

Kütle korunumu denklemi Eş. 7.1' de verilmiştir. Bu denklem, kütle korunum eşitliğinin genel koşuludur, sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akışlar için geçerlidir.

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \bar{V}(\rho\varepsilon\bar{v}) = S_m \quad (7.1)$$

Burada S_m kaynak terimi, ε gözeneklilik, ρ yoğunluğu ve v akışkanın hızını ifade eder.

Momentumun korunum denklemi, Eş. 7.2' de ifade edilmiştir,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon \bar{V}) + \nabla(\rho \epsilon \bar{V}) = -\epsilon \bar{V}p + \bar{V}(\epsilon \mu \bar{V}) + S_u \quad (7.2)$$

Bu denklemde, μ moleküler viskozite, p statik basınçtır, S_u ise dış kuvvetleri gösterir.

Türlerin korunumu denklemi Eş. 7.3' de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial(\epsilon C_i)}{\partial t} + \nabla(\epsilon \bar{V} C_i) = \nabla(D_i^{\text{eff}} \nabla C_i) + S_i \quad (7.3)$$

D_i , i türünün difüzyon katsayısı, C_i , i türünün konsantrasyonunu ve S_i , türlere için kaynak terimini göstermektedir.

Gaz fazlı türe ait difüzivite, Eş. 6.4 verilmiştir.

$$D_k^{\text{eff}} = \epsilon^{1.5} D_k \quad (7.4)$$

D_k , kütle difüzivitesini ifade eder.

Enerjinin korunumu h (entalpi) değerlerine bağlı olarak Eş. 7.5' te gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon h) + \nabla(\rho \epsilon \bar{V} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (7.5)$$

Enerji korunumu denklemindeki S_h kaynak terimi ise, ohmik ısınma, suyun oluşum ısısı, elektrik işi ve suyun gizli ısısını içeren hacimsel kaynak terimlerini ifade etmektedir ve Eş 7.6.' da verilmiştir.

$$S_h = I^2 R_{\text{ohm}} + h_{\text{tepkime}} - n_{\text{an,kat}} R_{\text{an,kat}} + h_{\text{faz}} \quad (7.6)$$

Yüklerin korunumu Eş. 7.7 ile ifade edilmiştir.

$$\nabla \cdot (\sigma_e^{\text{eff}} \nabla \Phi_e) + S_\Phi = 0 \quad (7.7)$$

Burada, Φ_e membranın ya da katı faz gerilimini, σ_e^{eff} elektriksel iletkenliği gösterir. Eş. 7.7 'deki S_Φ terimi kaynak terimi, değişim akım yoğunluğu (A /m) olarak ifade edilir. Eşitlikte, σ_{eff} , efektif elektriksel iletkenlik değerini temsil eder ve membran fazı yükü denkleminde elektrot gözenekliliğini dikkate almak için Bruggman korelasyonunu vasıtasıyla verilir.

$$\sigma_e^{\text{eff}} = \varepsilon_m^{1.5} \sigma_e \quad (7.8)$$

Bu denklemde, ε_m membran faz potansiyeli için elektrot gözeneklilik değerini temsil etmektedir. Korunum denklemlerindeki her bir kaynak terimi yakıthücresindeki her bir tabakada farklı bir şekil alır (Bilgili ve Sivrioğlu, 2016).

Çizelge 7.1. Yakıt hücresi bileşenlerinde çözülen denklemler ve kaynak terimleri

Denklem Adı	Korunum Denklemleri	Kaynak Terimleri				
		Akım Toplayıcı Plaka	Akış Kanalı	Gaz Difüzyon Tabaka	Katalizör Tabaka	Membran
Tür	$\nabla(\vec{u}C_k) = \nabla(D_k^{\text{eff}}\nabla C_k) + S_k$	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = 0$	$S_k = -\frac{M_{w,k}}{nF}R$	$S_k = 0$
Katı Faz Potansiyeli	$\nabla \cdot (\sigma_{\text{sol}} \nabla \phi_{\text{sol}}) + S_{\phi, \text{sol}} = 0$	$S_{\phi, \text{sol}} = 0$	$S_{\phi, \text{sol}} = 0$	$S_{\phi, \text{sol}} = 0$	$S_{\phi, \text{sol}} = -R$	$S_{\phi, \text{sol}} = 0$
Membran Potansiyeli	$\nabla \cdot (\sigma_{\text{mem}} \nabla \phi_{\text{mem}}) + S_{\phi, \text{mem}} = 0$	$S_{\phi, \text{mem}} = 0$	$S_{\phi, \text{mem}} = 0$	$S_{\phi, \text{mem}} = 0$	$S_{\phi, \text{mem}} = R$	$S_{\phi, \text{mem}} = 0$
Enerji	$\nabla(\vec{u}h) = \nabla(k^{\text{eff}}\nabla T) + S_h$	$S_h = 0$	$S_h = 0$	$S_h = 0$	$S_h = I^2 R + h_{\text{reac.}} + \eta R_{\text{an, cat}} + h_{\text{ph.}}$	$S_h = 0$
Kütle	$\nabla(\rho \vec{u}) = S_m$	$S_m = 0$	$S_m = 0$	$S_m = 0$	$S_m = 0$	$S_m = 0$
Momentum	$\frac{1}{\varepsilon^2} \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \lambda + S_u$	$S_u = 0$	$S_u = 0$	$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$	$S_u = -\frac{\mu}{K} \varepsilon^2 \vec{u}$

7.2. Sınır Koşulları

Yakıt pilinin analizinde kullanılan sınır şartları Çizelge 7.2’ de verilmiştir. Analizlerde kullanılan anot tarafı gaz akış hızı ile katot tarafı gaz akış hızı Eş. 7.9 ve 7.10 kullanılarak hesaplanmıştır. Anot ve katot tarafı reaktanların nemliliği %100 seviyesindedir. Anot ve katot terminal yüzeylerinde sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır.

$$U_{a, \text{in}} = \zeta_a \frac{I}{n_e F} A_{\text{mea}} \frac{1}{X_{H_2}} \frac{RT_{\text{in}}}{P_{\text{in}}} \frac{1}{A_{\text{ch}}} \quad (7.9)$$

$$U_{c, \text{in}} = \zeta_c \frac{I}{n_e F} A_{\text{mea}} \frac{1}{X_{O_2}} \frac{RT_{\text{in}}}{P_{\text{in}}} \frac{1}{A_{\text{ch}}} \quad (7.10)$$

Burada,

ζ reaktan gazların stokiometrik oranı, n_e reaktanların bir molünde bulunan electron sayısı

(O₂ için 4, H₂ için 2), A_{mea} aktif alan, A_{ch} kanal kesit alanı, X oksijen ve hidrojenin mol oranını ifade etmektedir.

Reaktan gazlarının mol oranı sıcaklık ve basınca bağlıdır. Su buharı mol oranı Eş. 7.11 ile gösterilmiştir.

$$X_{H_2O} = \frac{P_{sat}(T)}{P_{in}} \quad (7.11)$$

Kuru hava içerisindeki azot/oksijen oranı (79/21) ve sıcaklık sabit kabul edildiğinde oksijen mol oranı Eş. 7.12 ile gösterilmiştir.

$$X_{O_2} = \frac{1 - X_{H_2O}}{1 + \frac{79}{21}} \quad (7.12)$$

Molar toplam 1'e eşit olduğundan azot mol oranı Eş. 7.13 ile gösterilmiştir.

$$X_{N_2} = 1 - X_{H_2O} - X_{O_2} \quad (7.13)$$

Anot tarafı hidrojen ve su buharından oluştuğundan ve toplamı 1'e olduğundan dolayı Eş. 7.14 ile hidrojen mol oranı gösterilmiştir.

$$X_{H_2} = 1 - X_{H_2O} \quad (7.14)$$

Çizelge 7.2. Sayısal model sınır şartları

Yüzey İşlevi	Fonksiyon
Anot akış kanalı girişi	Mass flow_inlet_a
Katot akış kanalı girişi	Mass flow_inlet_c
Anot akış kanal çıkışı	Pressure_outlet_a
Katot akış kanal çıkışı	Pressure_outlet_a
Anot tarafı elektrik kontağı	Terminal_a
Katot tarafı elektrik kontağı	Terminal_c

Sıcaklık, basınç ve kütle akış parametreleri ve reaktan nemi tüm modeller için sabit tutularak gaz akış kanal deseninin yakıt pili performansına olan etkisi araştırılmıştır. PEM yakıt pili analizinde kullanılan çalışma koşulları ve sınır şartları Çizelge 7.1 ve 7.2’de verilmiştir.

7.3. 1S, 5PIS ve 5S Akış Kanallı PEM Yakıt Hücrelerinin Sayısal Analizi

Bu bölümde üç boyutlu, serpantin kanallı ve izotermal olmayan PEM yakıt hücreleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak kararlı ve tek fazlı biçimde analiz edilmiştir.

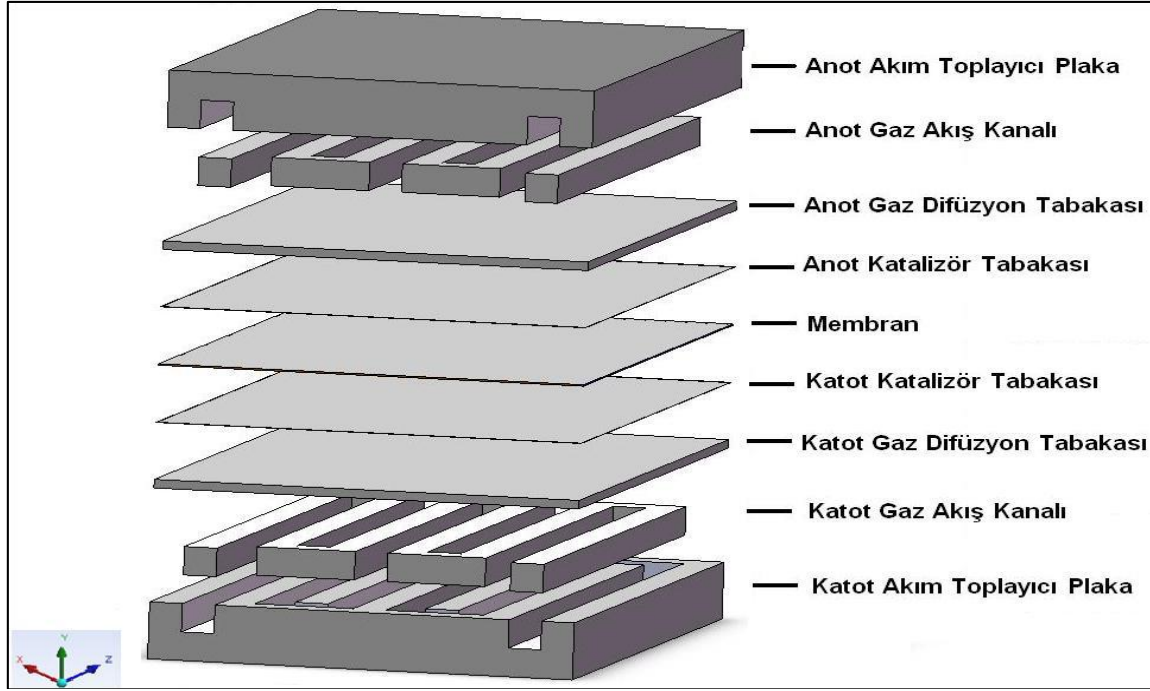
HAD yöntemi kullanılarak yakıt hücresi analiz çalışması; geometri oluşturma, ağ yapısı oluşturma ve sınır koşullarının tanımlanması, çözücü ayarlarının yapılarak analiz yapılması olmak üzere üç temel adımda gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak analiz edilmek istenen yakıt hücresi fiziksel modeli, bilgisayar destekli çizim programı “Ansys Design Modeller” aracılığıyla tasarımı yapılmıştır. Oluşturulan fiziksel model küçük boyutta elemanlara “Ansys ICEM CFD” mesh oluşturma programı ile bölünmüş ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Daha sonra son işlem olan çözüm metodları, işletme parametreleri ve yakınsama kriterini içeren çözücü ayarlarının tanımlanması “Ansys Fluent” programı aracılığıyla gerçekleştirilerek çözüm işlemine başlanmıştır. Sonra Ansys Fluent PEM Fuel Cell modülü aktifleştirilerek analizler yapılmıştır.

7.4. Akış Kanalı Çeşitleri

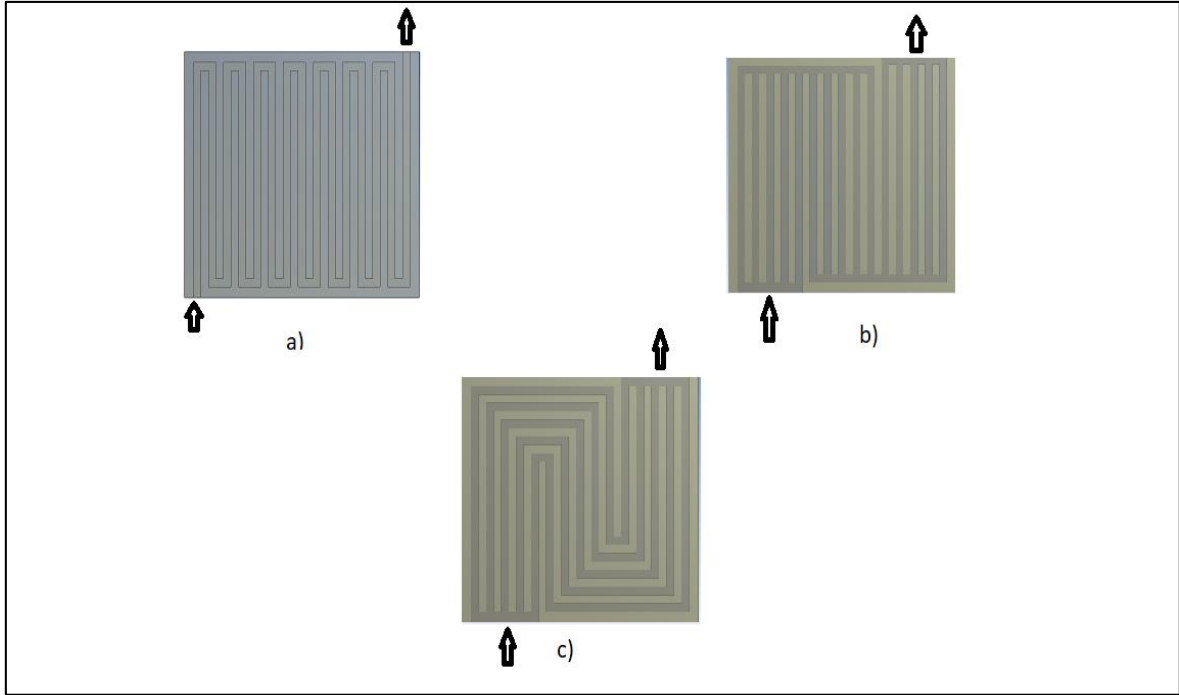
Üç farklı akış kanalı geometrik modeli gaz akış kanalı desenleri üç boyutlu çizim programı ANSYS Design Modeler yardımıyla CAD data olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan 3 farklı model Şekil 7.2. ve 7.3’de gösterilmiştir. Literatür taranarak PEM yakıt pili uygulamalarında kullanılan akış kanallarından faydalanılarak üç farklı akış kanalını içeren model oluşturulmuştur. Bu akış kanalları 1S, 5S ve 5PIS olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında 1S, 5S ve 5PIS akış kanallı yakıt pillerinde sayısal modeller geliştirilerek bu pillerin polarizasyon eğrilerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Sayısal olarak çözümlemeleri yapılan tüm yakıt pili modellerinde anot ve katotta kullanılan gaz difüzyon tabakaları, katalizör tabakaları, membran ve akım toplayıcı plakalardan oluşmuştur.



Şekil 7.1. PEM yakıt pilinin ayrıntılı görünümü

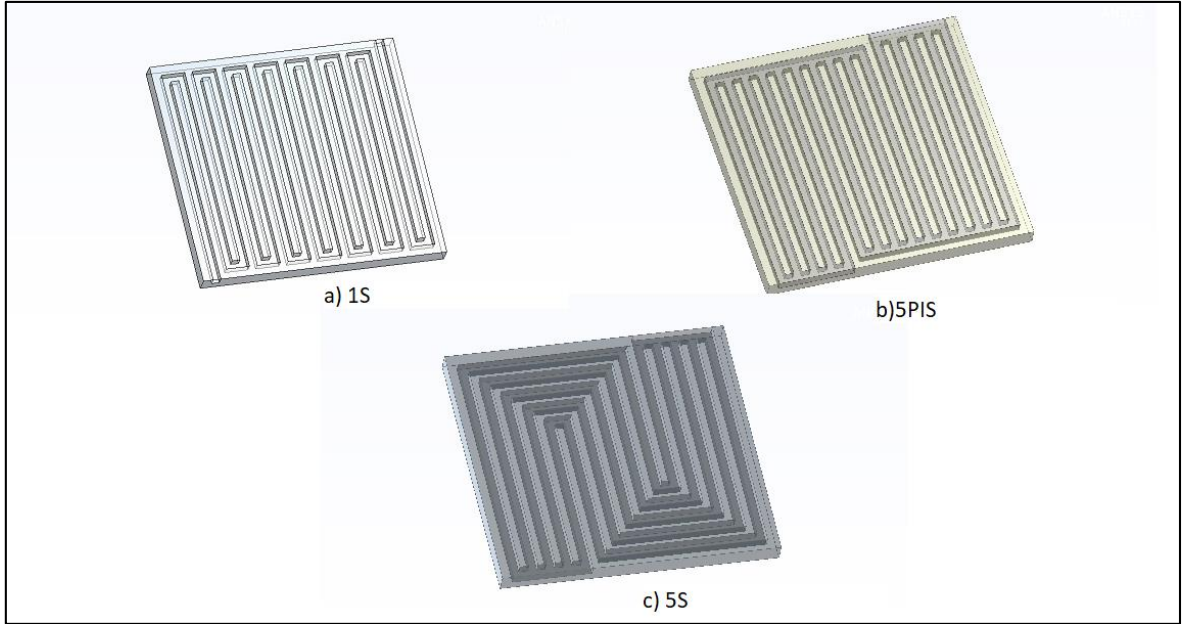
Bu çalışmada analiz edilen PEM yakıt hücresinin boyutları, (Sierra J.M., Moreira ve Sebastian, 2011) ve (Bilgili, 2011) yapmış olduğu Doktora tezindeki sayısal çalışmadan alınmış ve Çizelge 7.1’de verilmiştir. Söz konusu çalışmada verilen yakıt pili bileşenlerinin boyutları kullanılarak serpentine kanallı (1S), paralel serpantinli (5PIS) ve çoklu serpantinli (5S) PEM yakıt hücreleri oluşturulmuştur. Pillerin dış ölçüleri analiz yapılan bilgisayar kapasitesi dikkate alınarak 2,355*2,52 cm alınmıştır.



Şekil 7.2. Gaz akış kanalı deseni 2 boyutlu görünümü a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

Yakıt pilleri alt ve üst yüzeyinde akım dağıtıcı plakalar bulunmaktadır. Akım dağıtıcı plakanın bir yüzeyi hücrenin anot tabakası iken diğer taraf katot katmanıdır. Bu iki yüzey hidrojen ve oksijen için akış kanallarına sahiptir. Bu plakalar, oksijenin ve hidrojenin aktif bölgelere dağılımını sağlamaktadır. Bu dengeli dağılım nedeniyle hücre performansını ve verimini artır ve ayrıca, akımın iletilmesiyle yakıt pilinin çalışmasında önemli bir görev üstlenir.

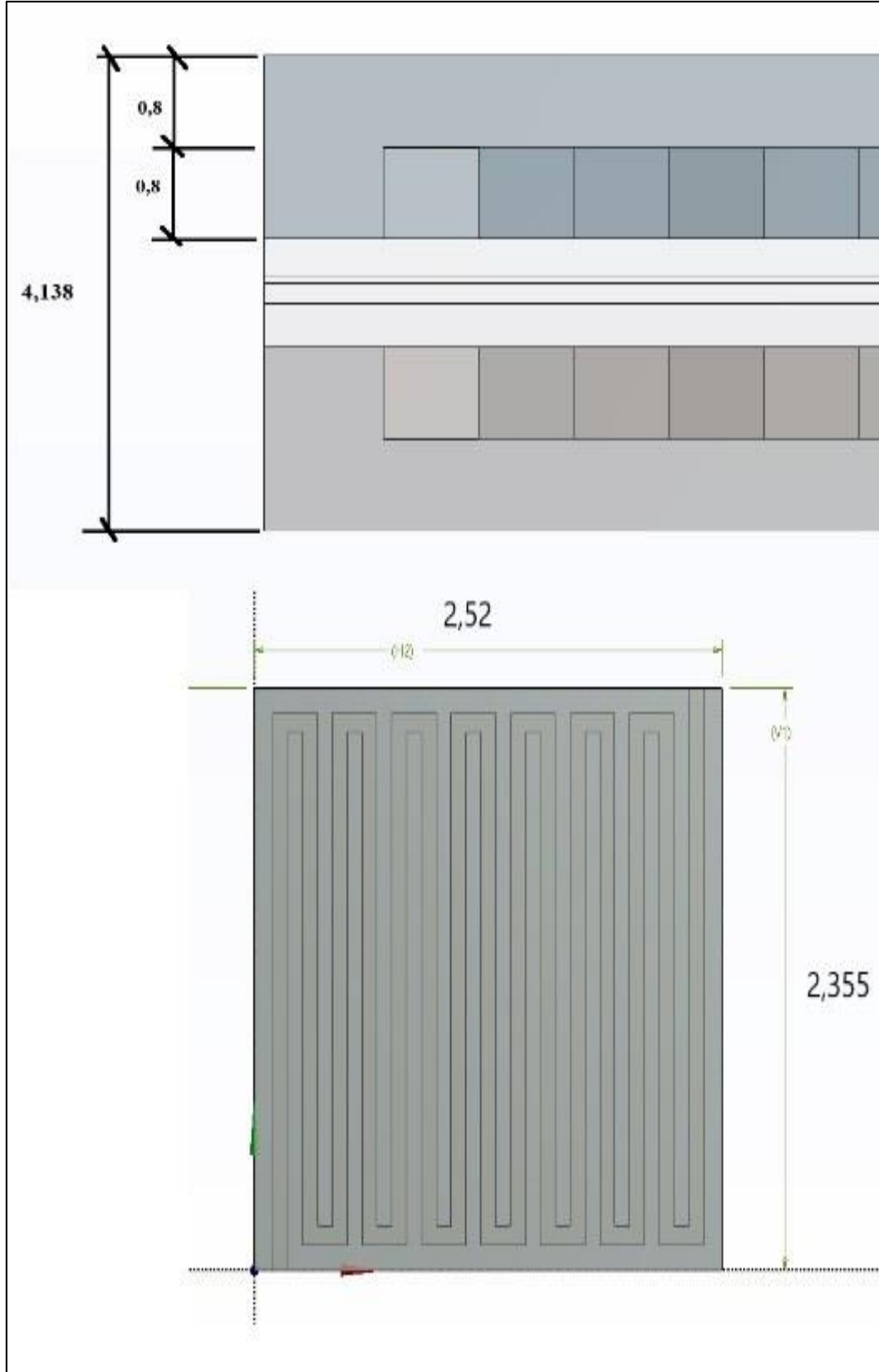
Jeon, Greenway, Shimpalee ve Van Zee, (2007) yaptığı çalışmada, HAD simülasyonları, serpantinli tek kanal, serpantinli döngüsel tek kanal, serpantinli çift kanal ve serpantinli simetrik tek kanal için performans çalışması yapmışlardır. Yüksek ve düşük giriş nemliliği çalışma koşullarında, farklı hücre voltajında aşırı gerilim, akım yoğunluğu dağılımı ve membran su içeriği dağılımları hesaplanmıştır. Yüksek giriş nemliliğinde, çift akış kanalı daha iyi polarizasyon performansı ve uniform akım yoğunluğu dağılımı tahmin edilmiş, ancak düşük nemlilikte 4 serpantin akış kanalı arasında küçük bir performans farkı mevcut olduğu görülmüştür. Aşağıda, tez çalışmasına konu olan üç yakıt pilinin akış kanalları gösterilmekte ve 3 farklı anot giriş nemliliğinde HAD analizleri yapılmıştır



Şekil 7.3. Gaz akış kanalı 3 boyutlu görünümü a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

Gaz akış kanalları, her model için akış kanalının kesit alanı sabit bir kare profil olarak modellenmiştir. Yakıt pilinin geometrik boyutları Çizelge 7.4’de detaylı olarak verilmiştir. Akış kanalları geometrik şekilleri Şekil 7.2., 7.3. ve 7.4’de gösterilmiştir.

Tez çalışmasında, Ansys Design modeller programı vasıtası ile üç adet (1S, 5PIS ve 5S) yakıt pili tasarlanmıştır. Tasarlanan her pilin akış kanalı birbirinden farklıdır. Sonrasında ağ oluşturma işlemi Ansys ICEM CFD modülünde gerçekleştirilmiş ve sınır şartları belirlenmiştir. Çalışmanın, Ansys Fluent PEM modülünde sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Çizelge 7.3’te belirtilen üç farklı giriş reaktan nemliliği (%62,2, %70 ve %80), üç farklı akış kanalına sahip yakıt pilleri için 0,3 Volt’ tan başlayarak 0,9 Volt gerilime kadar 0,1 V artırmalı analizler yapılmıştır. Bu analizler anot ve katot girişlerine göre de aynı yönlü ve zıt yönlü olarak iki defa tekrarlanmıştır.



Şekil 7.4. 1S tipi gaz akış kanal deseninin geometrik ölçüleri (cm)

Sayısal analizde kullanılan parametreler Çizelge 7.3. ile gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Sayısal analizde kullanılan çeşitli parametreler ve giriş değerleri

Parametreler / Değerler	Değer	Birim
* Anot Kütle Debisi	$1.988 \cdot 10^{-7}$	kg/s
* Katot Kütle Debisi	$8.342 \cdot 10^{-6}$	kg/s
Elektrolit İzdüşüm Alanı	0,000593	m ²
Yakıt Pili Ölçüleri	2,355*2,52	cm
Anot Referansı Akım Yoğunluğu	10000	A.m ⁻²
Anot Referansı Mol Konsantrasyonu	1	kmol.m ⁻³
Anot Konsantrasyon Değeri	0.5	-
Anot Aktarım Katsayısı	1	-
Katot Referansı Akım Yoğunluğu	20	A / m ²
Katot Referansı Mol Konsantrasyonu	1	kmol /m ³
Katot Konsantrasyon Değeri	1	-
Katot Aktarım Katsayısı	1	-
Açık Devre Voltajı	0.977	V
GDL' in Isıl İletkenliği	1.6	W / m.K
Katalizör Tabakası Isı İletkenliği	2	W /m.K
Bipolar Plakanın Isıl İletkenlik	20	W /m. K

Çizelge 7.3. (devam) Sayısal analizde kullanılan çeşitli parametreler ve giriş değerleri

GDL' in Elektriksel İletkenliği	2500	1/ohm.m
Katalizör Tabakası Elektriksel İletkenliği	2500	1/ ohm.m
Bipolar Plakanın Elektriksel İletkenliği	22000	1/ ohm.m
Kontak Açısı Anot / Katot	165	°
Anot / Katot Yüzey Hacim Oranı	7600000 /1.01x10 ⁷	1 / m
Membran Eşdeğer Ağırlık	790	kg / kmol
Giriş Sıcaklığı	343	K
Çalışma Basıncı	1	bar
H ₂ O kütle kesri Anot	62.2, 70, 80	%
H ₂ O kütle kesri Katot	10.344, 14, 21	%
Anot Stokiyometrisi	1.5	-
Katot Stokiyometrisi	3.5	-
GDL' in Elektriksel İletkenliği	2500	1/ohm.m

* EK 1' de hesaplanışı verilmiştir.

Çizelge 7.4. Yakıt pili modelinin geometrik boyutları

Fiziksel Boyutlar	1S	5PIS	5S	Birim
Kanal derinliği	0,8	0,8	0,8	mm
Kanal genişliği	0,8	0,8	0,8	mm
Akış kanalı kesit alanı	0,64	0,64	0,64	cm ²
Yakıt pili aktif alanı	5,93	5,93	5,93	cm ²
Akım toplama plakası kalınlığı	0,8	0,8	0,8	mm
Difüzyon tabakası kalınlığı	0,33	0,33	0,33	mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0,05	0,05	0,05	mm
Membran kalınlığı	0,178	0,178	0,178	mm
Toplam yakıt pili kalınlığı	4,138	4,138	4,138	mm

7.5. Sayısal Çözüm Yöntemi

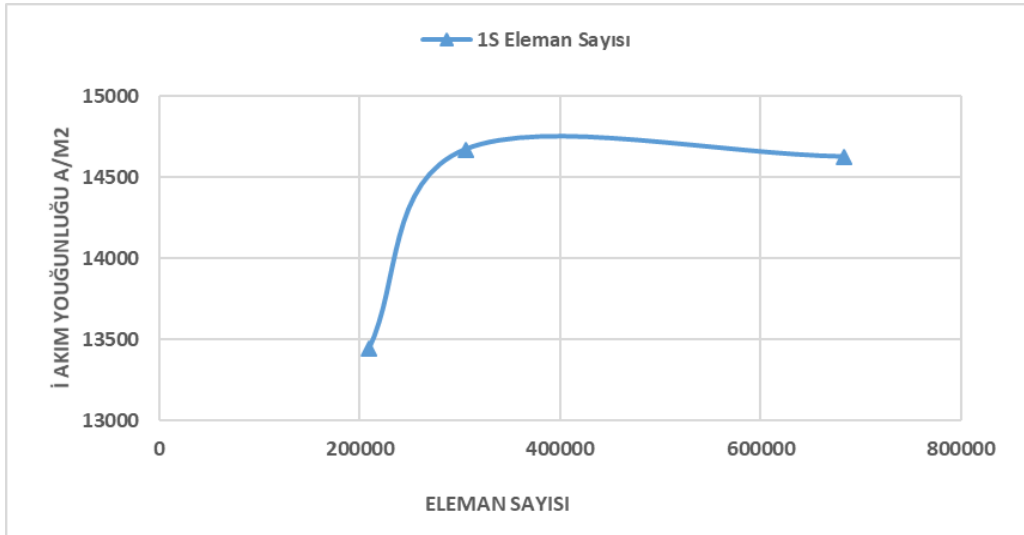
Ansys fluent programı genellikle akış, ısı ve kütle transferi, türbülans hesaplamaları, kimyasal reaksiyonlar ve çok fazlı akış modellemesi için kullanılır (Ansys Manuel, 2018).

Ansys Fluent, ayrık çözüm algoritmasını kullanan bir çözücüdür. Korunum eşitlikleri sırasıyla ayrı ayrı çözülmektedir. Modelleme de kullanılan eşitlikler doğrusal değildir, ancak birbirine bağlıdır. Çözüm döngüsünü birkaç kez birleştirerek, yakınsak bir çözüm elde edilir. Tez çalışmasında eşitliklerin ayrıştırılması için birinci ve ikinci dereceden ayrıştırma yöntemi kullanılmıştır. Ansys Fluent PEM yakıt pili modülü kullanılmıştır. Çözüm algoritması olarak SIMPLE kullanılmıştır. Bu çözücü modellenmiş yakıt pili çözümlemelerinde ayrık eşitliklerin çözümü için kullanılır. Ayrıca, Standart basınç ve akış için çözümler sunar.

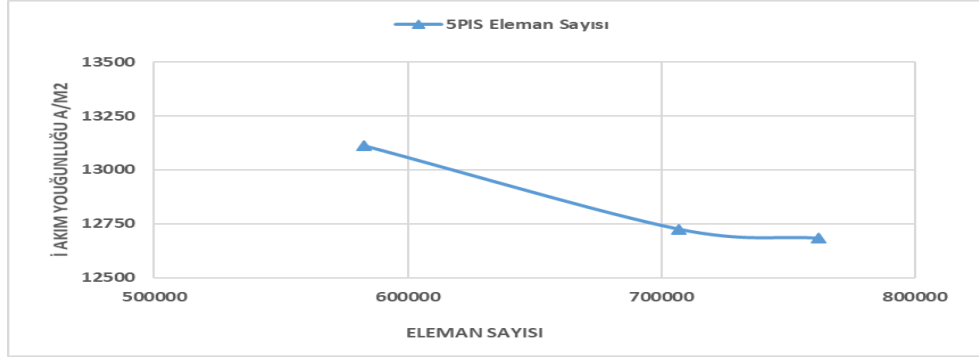
Sayısal çalışmada, 7 farklı potansiyel fark için akım yoğunluğu değeri bulunmuştur. PEM yakıt pilinde 7 farklı potansiyel fark değeri için polarizasyon eğrilerini çizdirilmiştir. Her bir polarizasyon eğrisini elde etmek için gerekli süre yaklaşık 330 dakika olarak sürmüştür. Sayısal analiz problemini çözümünde; 8 çekirdek ve 2,6 GHz'de 16 GB RAM belleği olan dizüstü bilgisayar kullanılmıştır.

ICEM CFD’ de yapılan mesh işlemi ve mesh bağımsızlık kriteri

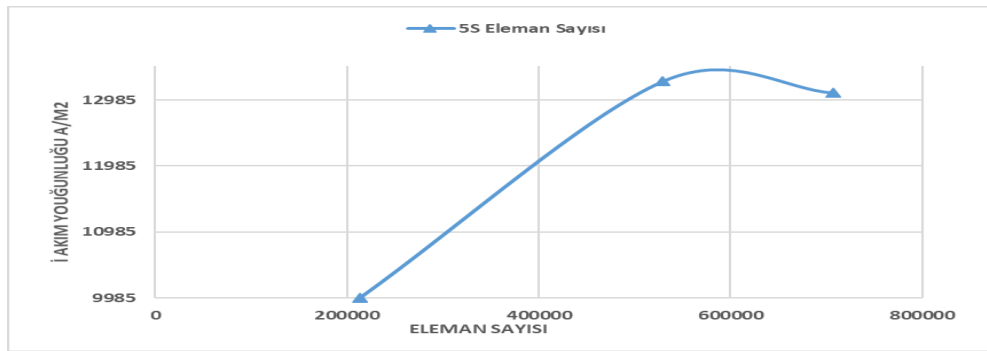
PEM yakıt pili geometrileri Ansys Design Modeler’de elde edildikten sonra Mesh işleminin yapılması için Icem CFD programı kullanılmıştır. Ansys Mesh programı yakıt pili ağ yapısını oluşturmada yetersiz kalması nedeni ile Icem CFD programı aracılığı ile mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu programda mesh işlemi yapıldıktan sonra 1S, 5S ve 5PIS yakıt pilleri için asgari eleman sayıları elde edildi ve Çizelge 7.5’ te sunuldu. Asgari eleman sayıları bulunmasına ek olarak mesh bağımsızlığını belirlemek amacıyla iki mesh işlemi daha yapılarak farklı eleman sayıları için mesh dosyası oluşturuldu. Bu oluşturulan mesh dosyaları ile Ansys Fluent PEM Fuel Cell modülünde çözüldü ve akım yoğunlukları değerleri elde edilip mesh bağımsızlığı test edildi.



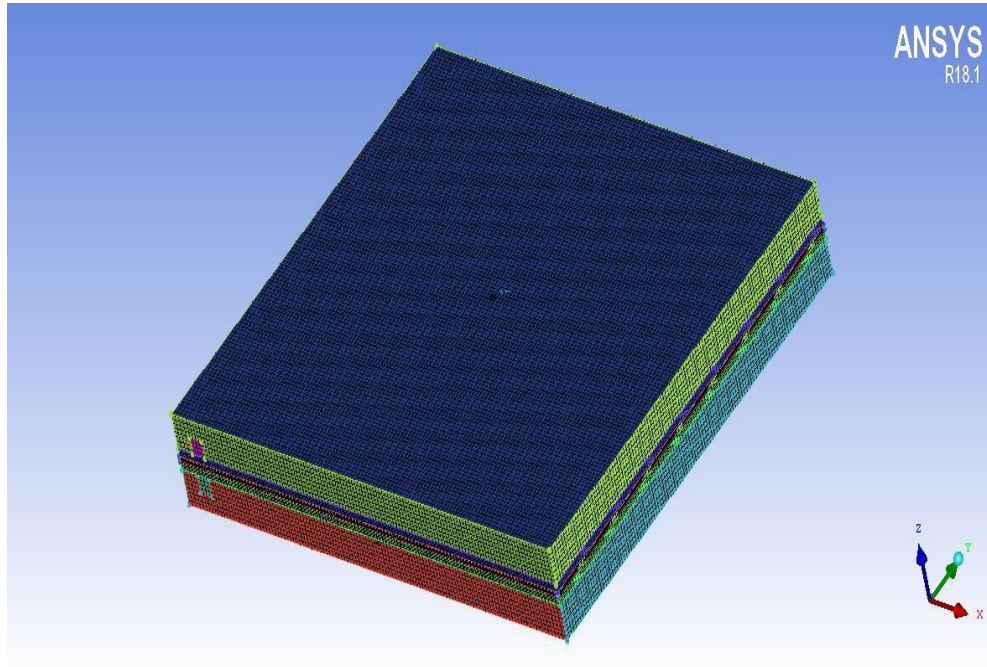
Şekil 7.5. 1S yakıt pili için 0,3 V hücre voltajında farklı mesh eleman sayılarında elde edilen akım yoğunlukları



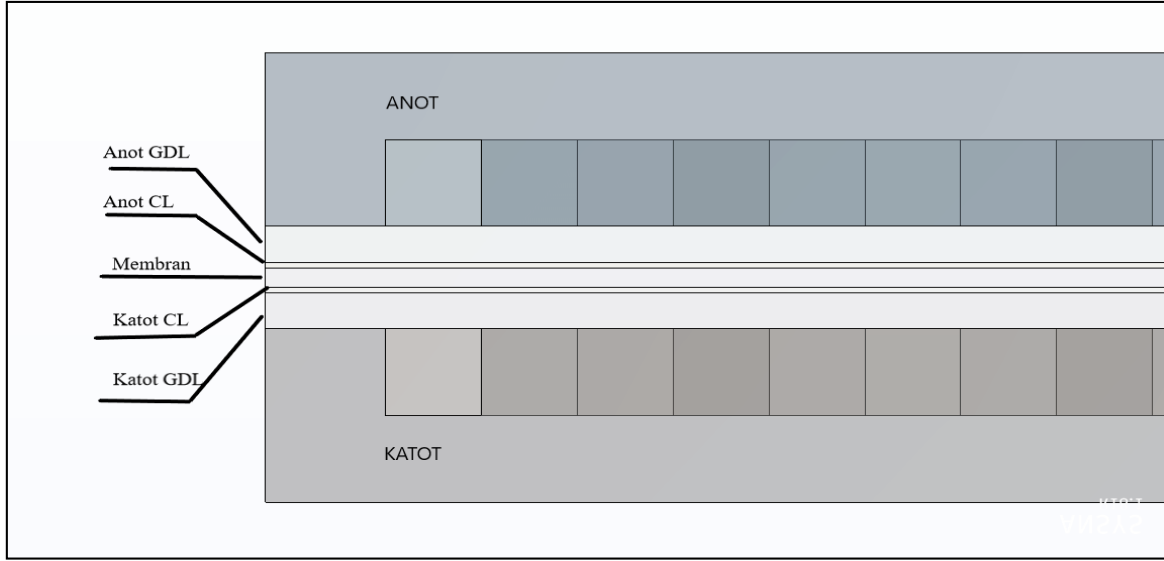
Şekil 7.6. 5PIS yakıt pili için 0,3 V hücre voltajında farklı mesh eleman sayılarında elde edilen akım yoğunlukları



Şekil 7.7. 5S yakıt pili için 0,3 V hücre voltajında farklı mesh eleman sayılarında elde edilen akım yoğunlukları



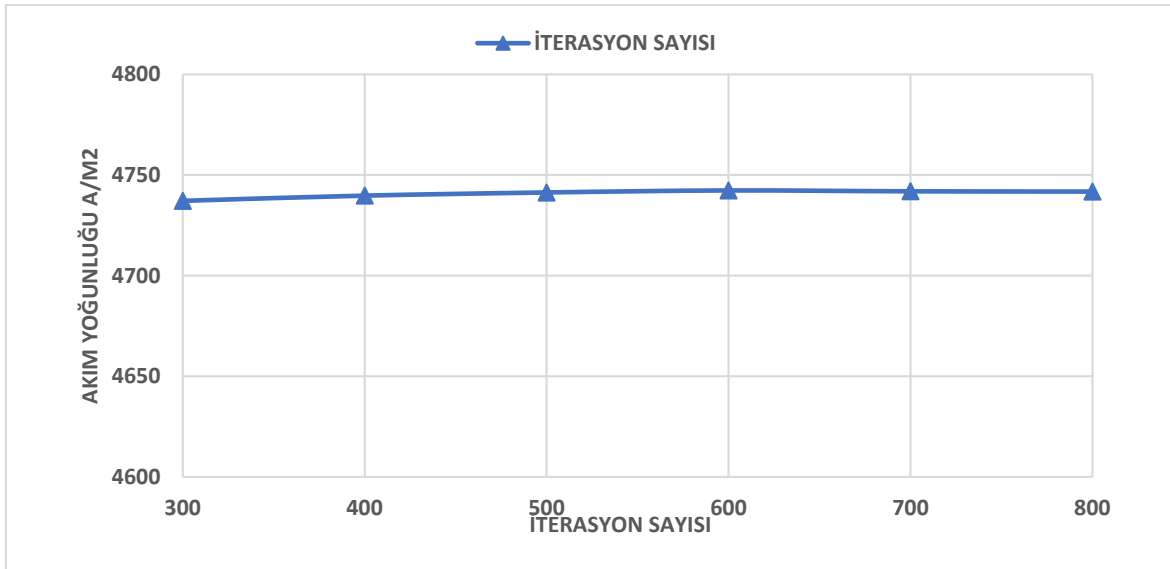
Şekil 7.8. Mesh işlemi yapılarak elemanlara ayrılmış 1S PEM yakıt pili



Şekil 7.9. Ansys fluent PEM yakıt pili sayısal model yapısı

İterasyon bağımsızlık testi

Fluent çözümünün 300 iterasyondan sonra yakınsadığı düşünülebilir. Enerji kalıntısının 10^{-9} değerinin altında ve diğer kalıntıların 10^{-3} değerinin altında olduğundan bu iterasyon sayısının çözüm için yeterli olduğu değerlendirilmiştir.



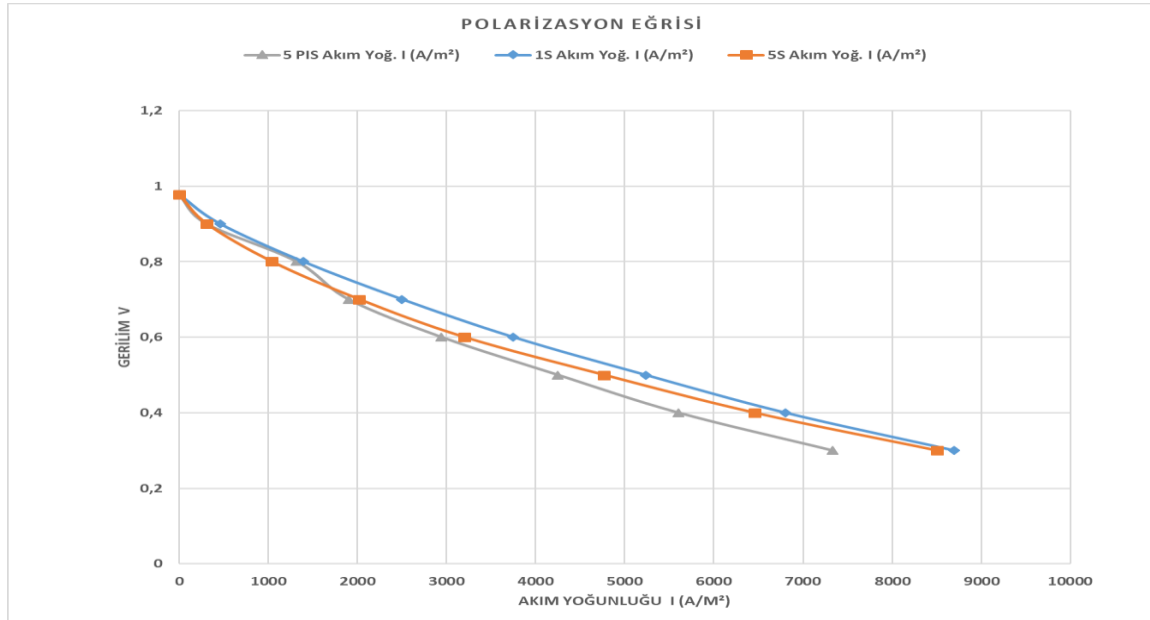
Şekil 7.10. 1S yakıt hücresi için aynı yönlü akımda, 0,6 V hücre geriliminde iterasyon sayılarına göre akım yoğunlukları değişimi

7.6. Analiz Sonuçlarından Elde Edilen Polarizasyon Eğrilerinin Değerlendirilmesi

1S, 5S ve 5PIS PEM yakıt pilleri için Fluent PEM yakıt pili modülü aracılığıyla elde edilen polarizasyon eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz sonucu aynı yönlü akış (anot giriş ve katot girişi aynı tarafta) ve ters akış ile (anot girişi ve katot girişi ters tarafta) olarak incelenmiştir. Ayrıca, üç farklı anot giriş nemliliği verilerek polarizasyon eğrileri değerlendirilmiştir.

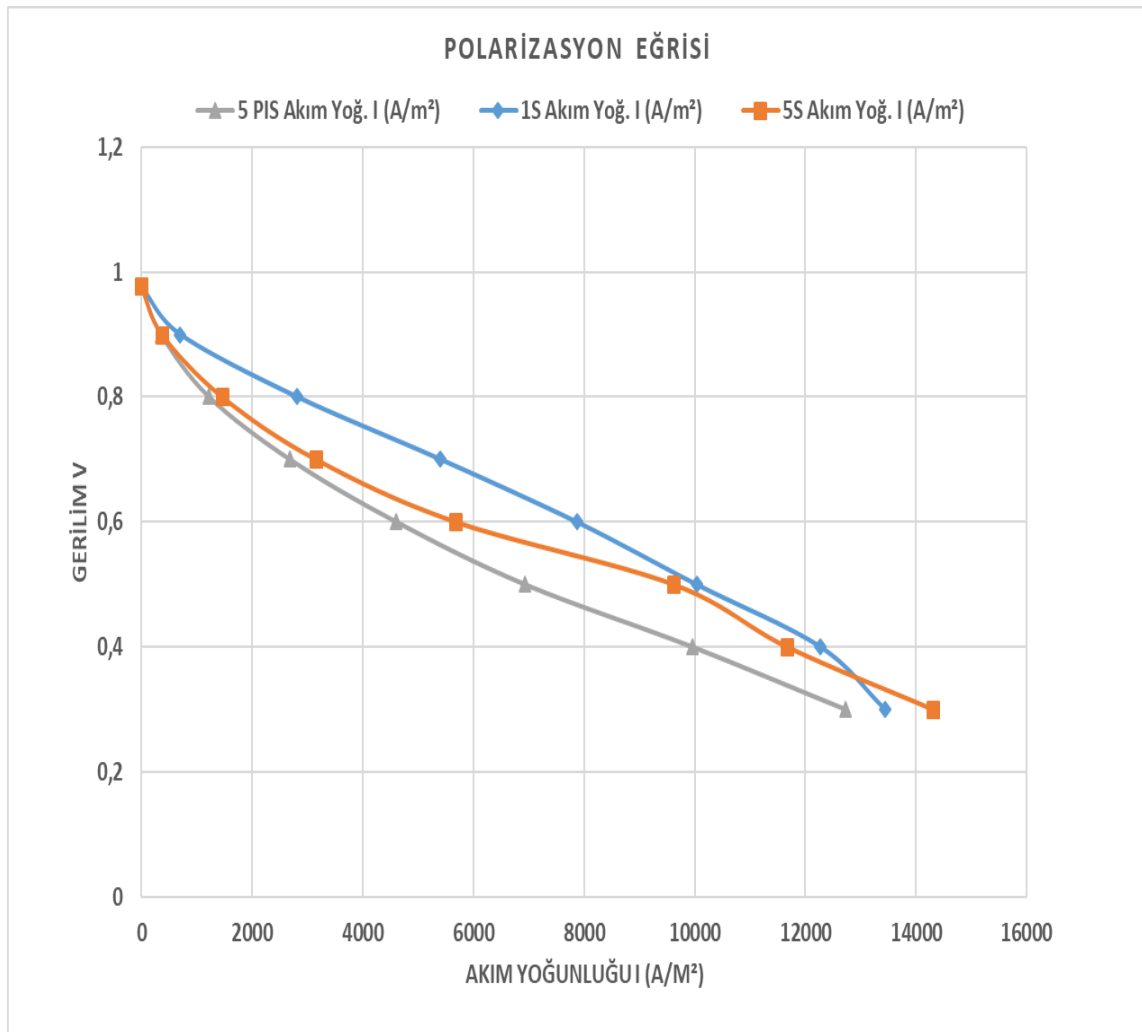
7.6.1. Aynı yönlü akış şartlarında 1S, 5PIS ve 5S yakıt pillerinin polarizasyon eğrilerinin değerlendirilmesi

Şekil 7.11.'de mevcut Polarizasyon eğrileri değerlendirildiğinde, yakıt pili polarizasyon eğrilerinin yüksek potansiyel bölgesinde birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini söyleyebiliriz. Potansiyel değerleri düştükçe, 1S tip gaz akış kanalı deseni, üç farklı kanal geometrisi arasında en iyi sonucu vermiştir. Gaz akış kanalları içerisinde 5PIS tipi gaz akış kanalı ise görüldüğü gibi yüksek akım yoğunluğu bölgesinde en kötü polarizasyon eğrisine sahiptir. 5S tip akış kanalı geometrisi de akış kanalları içerisinde ortalama bir performans değeri göstermiştir. 0,3 V değerinde, 1S yakıt pili 5PIS' a göre %16,3, 5S yakıt piline göre ise %2,3 daha iyi akım yoğunluğu değeri üretmiştir.



Şekil 7.11. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin aynı yönlü giriş akışında ve %62,2 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri

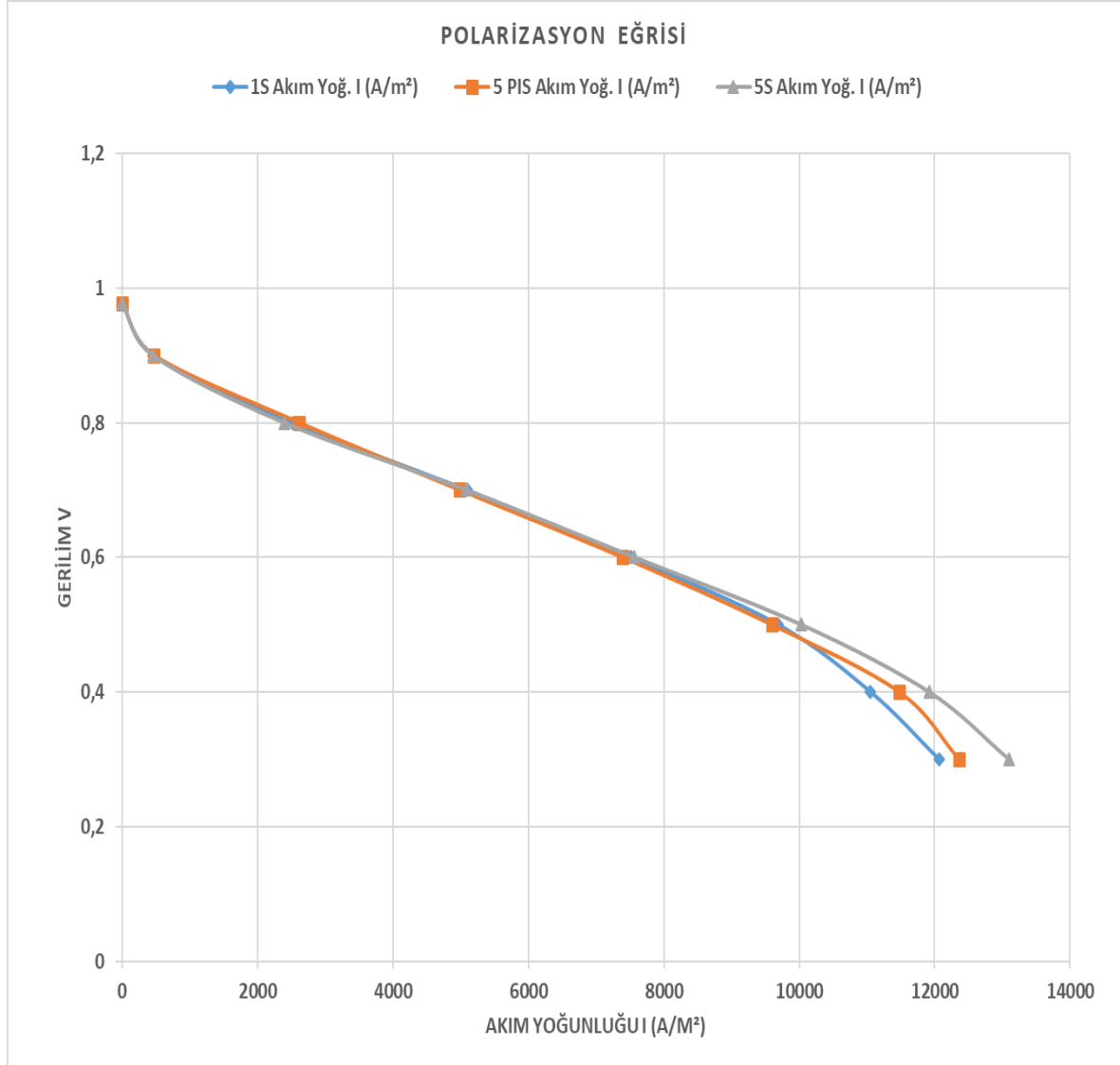
Şekil 7.12.'de bulunan polarizasyon eğrileri incelendiğinde, yakıt pili polarizasyon eğrilerinin yüksek potansiyel bölgesinde birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini söyleyebiliriz. 0,8 V Potansiyel değerinden itibaren 0,4 V değerine kadar 1S tipi gaz akış kanalı deseni, üç farklı kanal geometrisi arasında en iyi sonuca ulaşmıştır. Ancak, 0,3 V potansiyel değerine kadar ikinci en iyi sonucu veren 5S yakıt pili 0,3V değerinde en iyi sonucu vermiştir. Bu voltajda 1S yakıt pili ikinci ve 5PIS yakıt pili en düşük değeri vermiştir. 0,3 V değerinde, 5S yakıt pili 5PIS' a göre %12,4, 1S piline göre ise %6,3 daha iyi akım yoğunluğu değeri gerçekleştirmiştir.



Şekil 7.12. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin aynı yönlü giriş akışında ve %70 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri

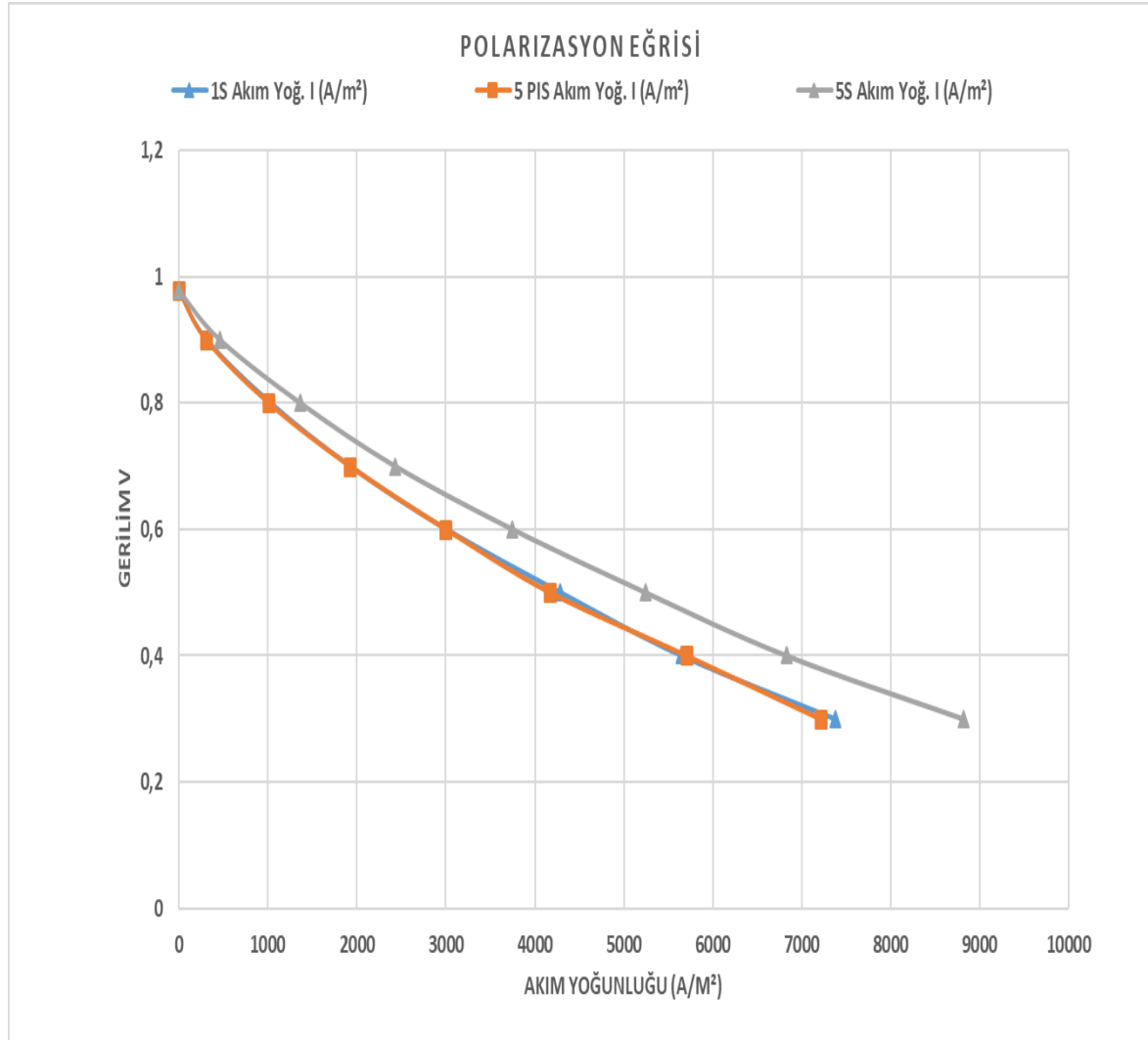
Şekil 7.13.'de görülen sayısal analiz araştırıldığında, yakıt pili polarizasyon eğrilerinin yüksek potansiyel bölgesinde birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 0,9 V Potansiyel değerinden itibaren 0,5 V değerine kadar birbirine yakın değerler vermiştir. Bu değerden 0,3 V değerine kadar 5S yakıt pili en büyük, 5PIS yakıt pili orta ve 1S yakıt pili

en düşük değerine ulaşmıştır. 0,3 V değerinde, 5S yakıt pili 1S yakıt piline göre %8,5 daha iyi akım yoğunluğu değerine sahip olmuştur.



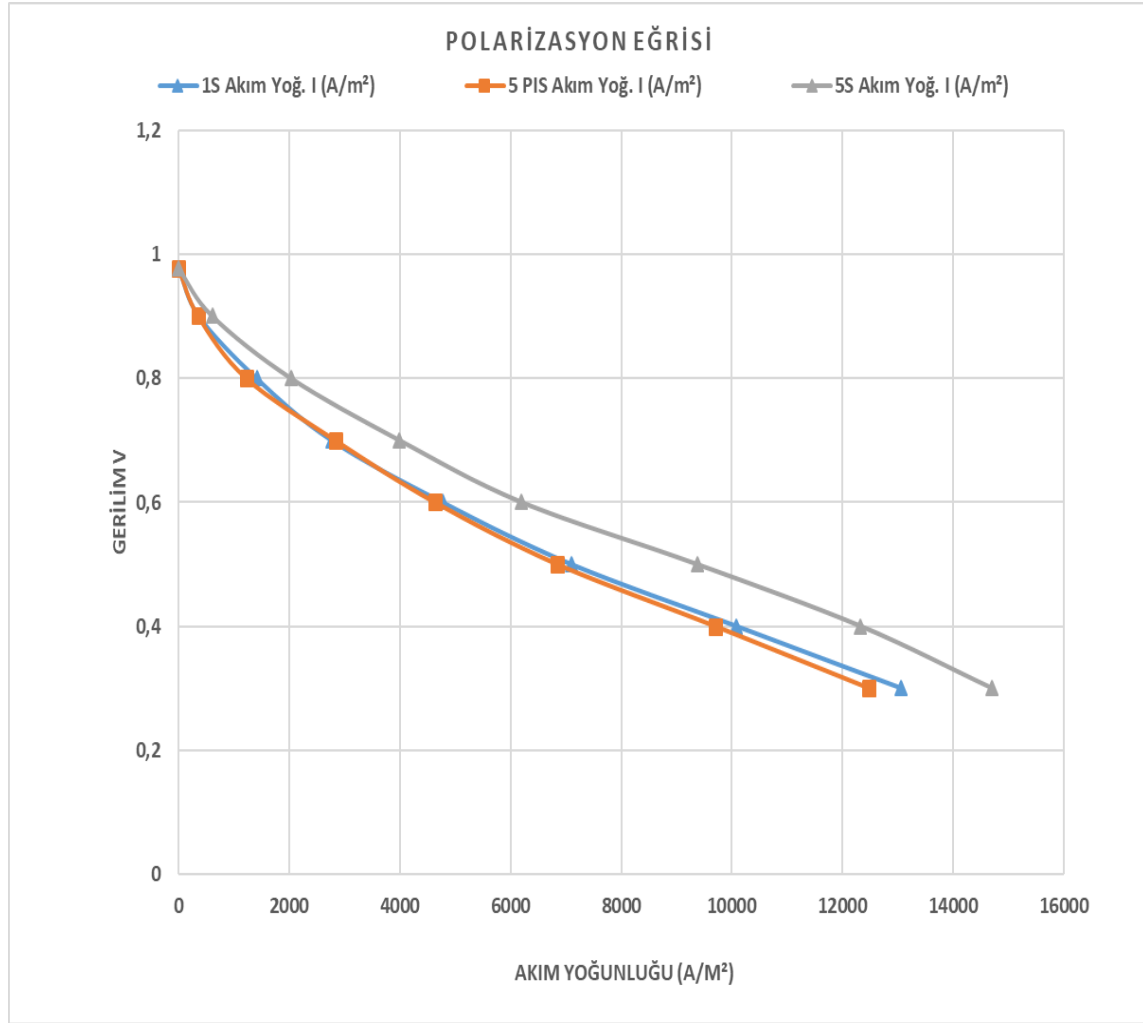
Şekil 7.13. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin aynı yönlü giriş akışında ve %80 giriş reaktan nemliliğinde polarizasyon eğrileri

7.6.2. Ters yönlü akış şartlarında 1S, 5PIS ve 5S yakıt pillerinin polarizasyon eğrilerinin değerlendirilmesi



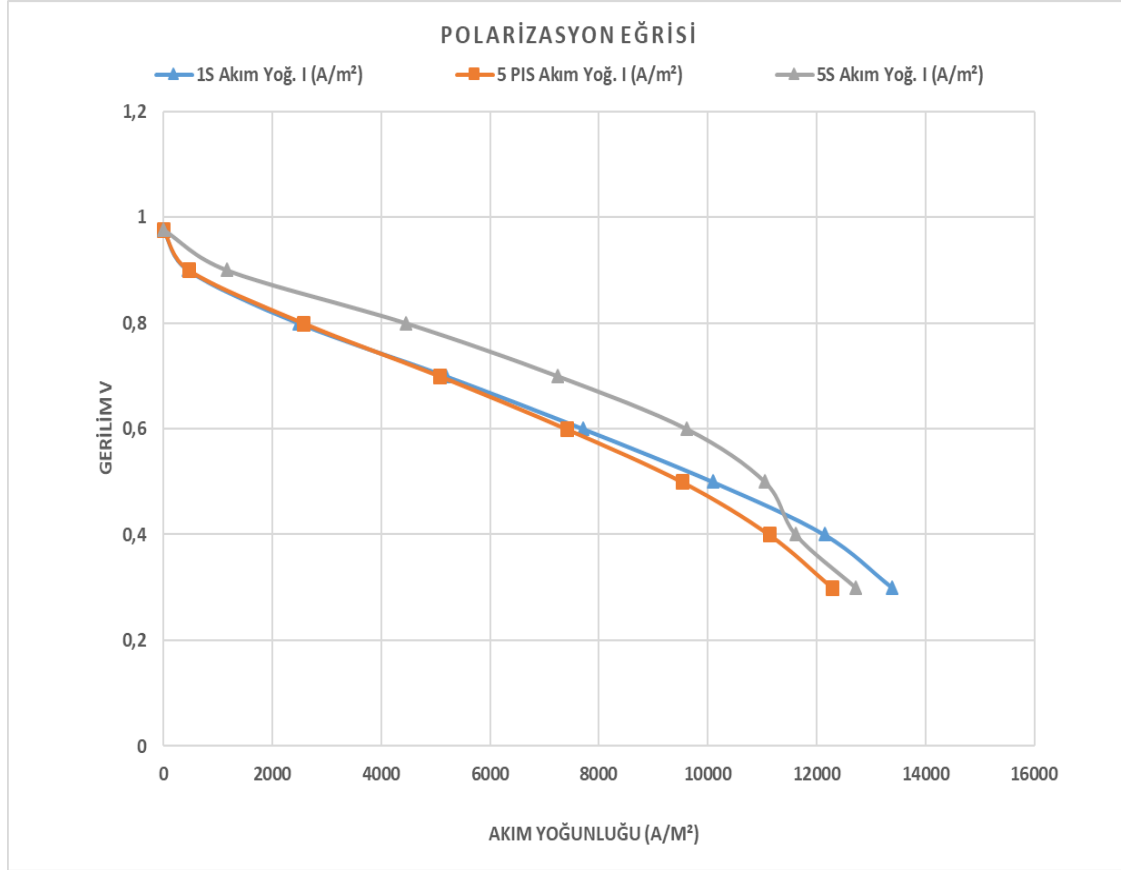
Şekil 7.14. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin zıt yönlü giriş akışında ve %62,2 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri

Şekil 7.14.'de bulunan eğriler değerlendirildiğinde, yakıt pili polarizasyon eğrilerinin 0,9 V potansiyel bölgesinde birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini görebiliriz. 0,9 V Potansiyel değerinden itibaren 0,3 V değerine kadar 1S ve 5PIS polarizasyon eğrileri birbirine yakın değerlere ulaşmıştır. Ancak, 5S polarizasyon eğrisi yaklaşık 0,85 V değerinden 0,3 V değerine kadar pili en yüksek değeri vermiştir. 0,3 V değerinde, 5S yakıt pili 5PIS yakıt piline göre %19,6 daha iyi akım yoğunluğu değerine sahip olmuştur.



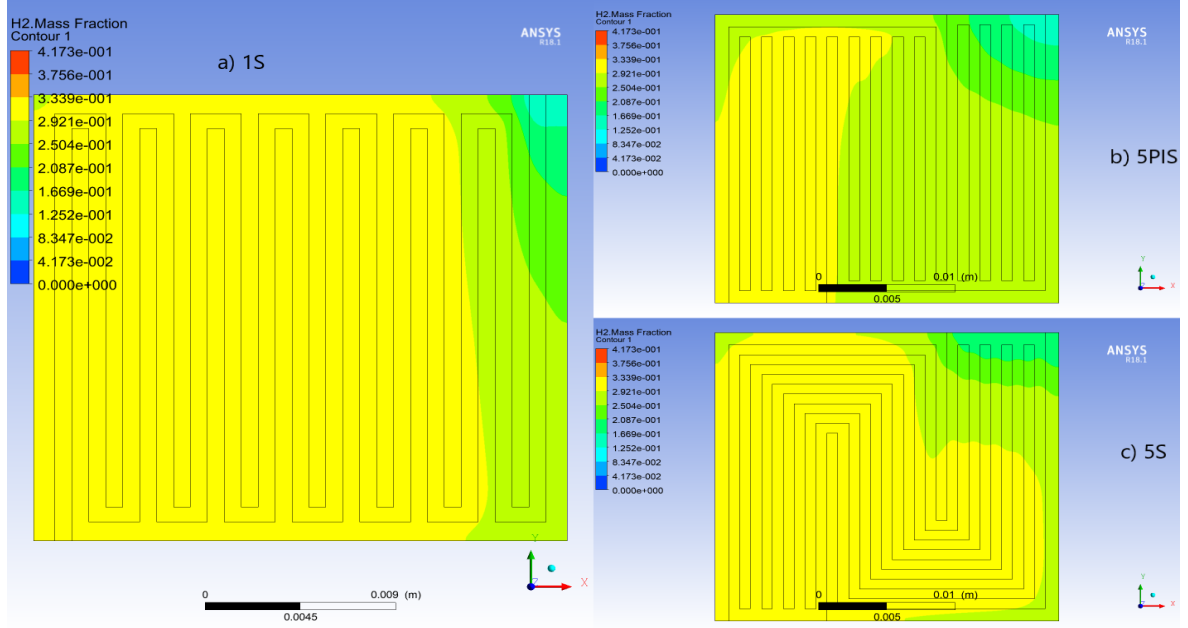
Şekil 7.15. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin zıt yönlü giriş akışında ve %70 reaktan giriş nemliliğinde polarizasyon eğrileri

Şekil 7.15.'de mevcut analizler değerlendirildiğinde, yakıt pili polarizasyon eğrilerinin 0,9 V potansiyel bölgesinde birbirlerine yakın sonuçlar almıştır. 0,9 V Potansiyel değerinden itibaren 0,3 V değerine kadar 1S ve 5PIS polarizasyon eğrileri birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Ancak, 5S polarizasyon eğrisi 0,9 V değerinden 0,3 V değerine kadar pili en yüksek değeri almıştır. 0,3 V değerinde, 5S yakıt pili 1S yakıt piline göre %12,6, 5PIS piline göre %17,75 daha iyi akım yoğunluğu değerine ulaşmıştır.

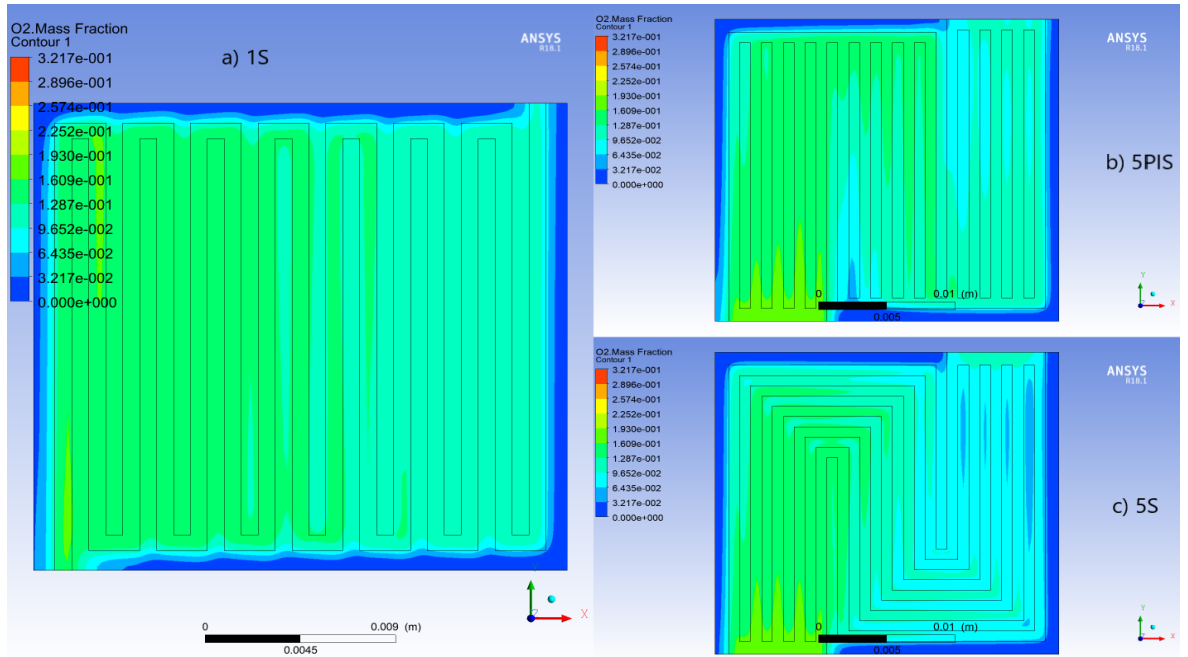


Şekil 7.16. 1S, 5S ve 5PIS kanallı yakıt pillerinin ters yönlü giriş akışında ve %80 giriş reaktan nemliliğinde polarizasyon eğrileri

Şekil 7.16.'da bulunan polarizasyon grafikleri araştırıldığında, yakıt pili polarizasyon eğrilerinin 0,9 V potansiyel bölgesinde birbirlerine yakın sonuçlar verdiğini söyleyebiliriz. 0,9 V Potansiyel değerinden itibaren 0,5 V değerine kadar 1S ve 5PIS polarizasyon eğrileri birbirine yakın değerler vermektedir. 0,9-0,5 V aralığında 5S eğrisi diğerlerinden daha iyi çözümler üretmiştir. Ancak, 0,5 V değerinden 0,3 V arasında, 5S ve 5PIS eğrileri birbirine yakın değerler üretmeye başlarken 1S polarizasyon eğrisi diğerlerine göre en üstte akım değeri üretmiştir. 0,3 V değerinde 1S yakıt pili 5PIS yakıt piline göre %9, 5S piline göre ise %5,3 daha iyi akım yoğunluğu değerine ulaşmıştır.



Şekil 7.17. H₂ kütle kesri, aynı yönlü akışta anot tarafı, katalizör / GDL arayüzü 0.4V ve %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

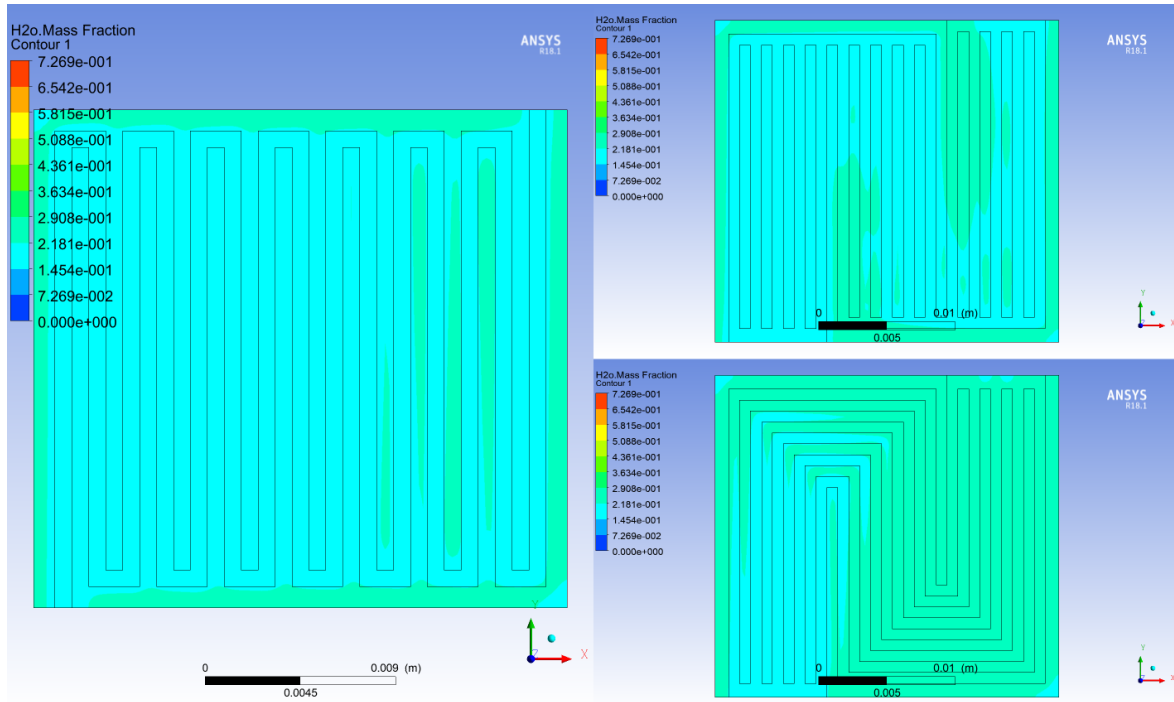


Şekil 7.18. O₂ kütle kesri, aynı yönlü akışta katot tarafı katalizör / GDL arayüzü 0.4V ve %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

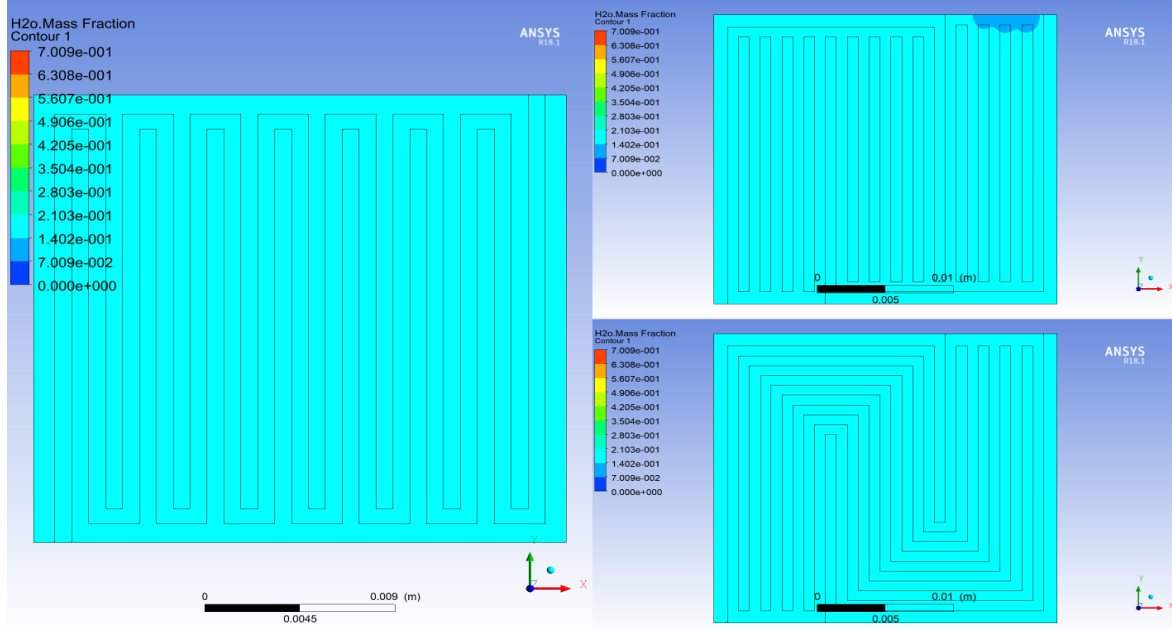
H₂ ve O₂ stokiyometrik değerleri arttıkça yakıt pili kanallarında daha fazla basınç düşüşü olur. Oksijenin miktarı arttıkça katotta su baskını azalır. Katot ve anot kanallarında bağıl nemlilik arttığında basınç düşüşü artar, bu esnada katot kanallarında su baskınında önemli oranda artış olur. Bunun neticesinde, membranda bozulma meydana gelir. Reaktan gazlar

kanallarda eşit dağıtılamaz ve yakıt pili üzerinde negatif bir etki oluşabilir. Ayrıca, yakıt pili performansında da düşme meydana gelir. Bu sorunlarla başa çıkmak için en uygun reaktan besleme hızı ve kanal tasarımı yapılmalıdır (He ve Choe, 2009).

Şekil 7.17 ve 7.18’de oksijen ve hidrojen reaktan gazlarının hücre içerisinde dağılımları gösterilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarından elde ettiğimiz polarizasyon eğrilerinden de görüleceği üzere 0,4 V değeri için 1S yakıt pili daha homojen reaktan dağılımı elde edilirken 5S ve 5PIS tipi modellerde belli bölgelerde reaktanların yoğunlaştığı görülmektedir. Reaktan yoğunlaşması düşük voltaj ve yüksek akım üreten bölgelerde görüldüğü için pil performansını olumsuz etkileyen faktörlerden biridir.



Şekil 7.19. H₂O kütle kesri katot tarafı, aynı yönlü akışta, GDL / katalizör arayüzü 0.4V hücre voltajında %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S



Şekil 7.20. H₂O kütle kesri katot tarafı, aynı yönlü akışta GDL / katalizör arayüzü 0,8 V hücre voltajında %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

PEM yakıt pili katot tarafında GDL / katalizör arayüzü, 0,4 V ve 0,8 V hücre voltajı için H₂O kütle kesri sırasıyla Şekil 7.19 ve 7.20’de gösterilmiştir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi, akış kanalı boyunca su üretimi, oksijen kütle akışının (Şekil 7.18) zıt olduğu bölgelerde meydana gelmiştir. 0,4 V ve 0,8 V geriliminde 1S gaz akış kanal modeli diğer modellere göre daha iyi bir polarizasyon eğrisine sahiptir. 0,4 V hücre voltajında 1S yakıt pili 5PIS yakıt piline göre %23,2 daha fazla, 5S piline göre ise %5,2 daha iyi akım üretmiştir. 0,4 V hücre potansiyelinde üretilen su miktarı, hücre potansiyeli 0,8 V’ dan çok daha fazladır. Bu sonuçtan, PEM yakıt pillerinde düşük voltaj değerlerinde daha fazla su ürettiği sonucu çıkarılabilir.

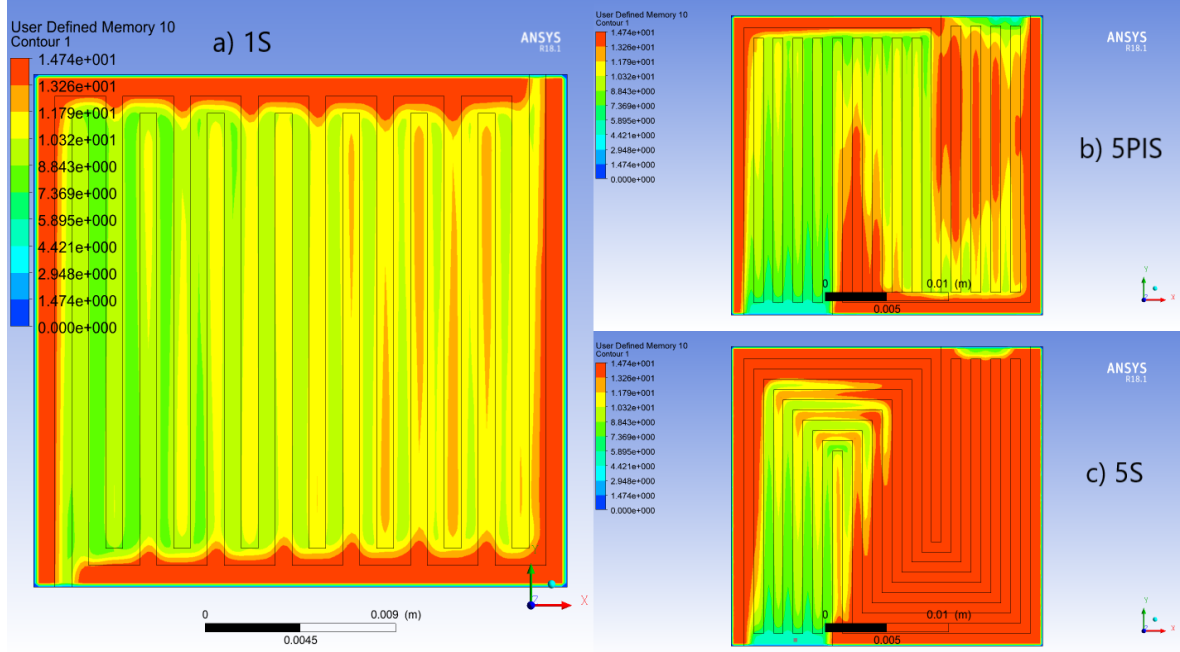
Düzgün dağılmayan akım dağılımı yakıt pillerinde lokal aşırı ısınmaya yol açmakta ve pil ömrünü azalmasına neden olmakta ve beklendiğinden daha az güç elde edilmesine yol açmaktadır. Bu konu su baskını ile tecrübe edildiğinde yakıt pilleri için kritik bir öneme haizdir. Katotta giriş nemlilik değerini artırdığımızda ortalama akım yoğunluğu değeride artarken yakıt pili su baskınına karşı duyarlı hale gelir. Anot bağıl nemliliğini artırdığımızda da benzer sonuçları elde ederiz. Yakıt hücresi yüksek çalışma şartlarında işletildiğinde akım yoğunluğunun artmasına ve su baskının azalmasına yol açabilir. Ek olarak katot stokiyometrisini artırdığımızda su baskının önleyebiliriz, ancak ortalama akım yoğunluğu hemen hemen sabit kalır. Daha yüksek anot stokiyometrisi ile çalışıldığında daha yüksek akım yoğunluğu değeri elde ederiz. Ancak daha yüksek

duyarlılıkta katot su baskını ile sonuçlanabilir (Jamekhorshid, Karimi, Noshadi ve Jahangiri, 2010).

Yakıt pili kanalındaki sıvı su davranışları ve dağılımları kanal içerisinde farklılık göstermektedir. Ayrıca, bu çeşitlilik pil kanalının boyutlarına ve işletme şartlarına bağlı olarak değişir. Akış kanalındaki sıvı su dağılımları, reaktan iletimini ile PEM yakıt pili performansını önemli ölçüde etkiler.

İdeal su yönetimi yüksek performans sağlanması için PEM yakıt pillerinde kritik bir önem haizdir. İyonik iletim için membranın hidratlanması gerekmektedir. Yüksek su içeriği yüksek membran iletimi anlamına gelir, buda daha iyi iyonik iletim sağlanmasına yol açar. Diğer taraftan su, hem katalizör tabakada hemde gaz difüzyon tabakasında gözeneklerin dolmasına ve kütle iletiminde direnç yol açar. Daha az su içeriği reaktan akışında daha az direnç yol açar. Açıkcası su, tartışmalı bir rol oynar, bu nedenle hassas bir denge gerekmektedir (Qi ve Kaufman, 2002).

1S tip akış kanalı modeli su kütle kesri dağılımında diğer modellere göre daha homojen dağılım gösterirken, diğer modeller de Şekil 7.21.'de görüldüğü gibi daha yüksek su içeriği olan bölgelere sahip olduğu tespit edilmiştir. Aşırı suya doymuş alanlarda da su taşması meydana gelebilir. Bu durum, reaktanların membran yüzeyine ulaşmasını engelleyebilir. Membrandaki su azlığıda, membran yüzeyinde kuruluğa neden olabileceği gibi aynı zamanda hücre performansını da düşürür.



Şekil 7.21. Membran su içeriğinin dağılımı, aynı yönlü akışta katot tarafı, CL/ membran ara yüzeyi, 0,4V, %70 anot giriş nemliliğinde a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

Yakıt pillerinin ticarileşmesi sadece daha düşük fiyat ile değil dayanaklılığının ve su yönetiminin optimize edilerek pil performansının artmasıyla sağlanır. Membran kuruluğu ve su basması arasında ince bir dengenin nasıl kurulacağı, çeşitli değişkenlere bağlıdır, örneğin: reaktan nemlendirmesi, akış kanalı katmanı, gaz difüzyon tabakası (GDL) ve mikro poros katmanının ıslak ve yapısal özellikleri (Ji ve Wei, 2009).

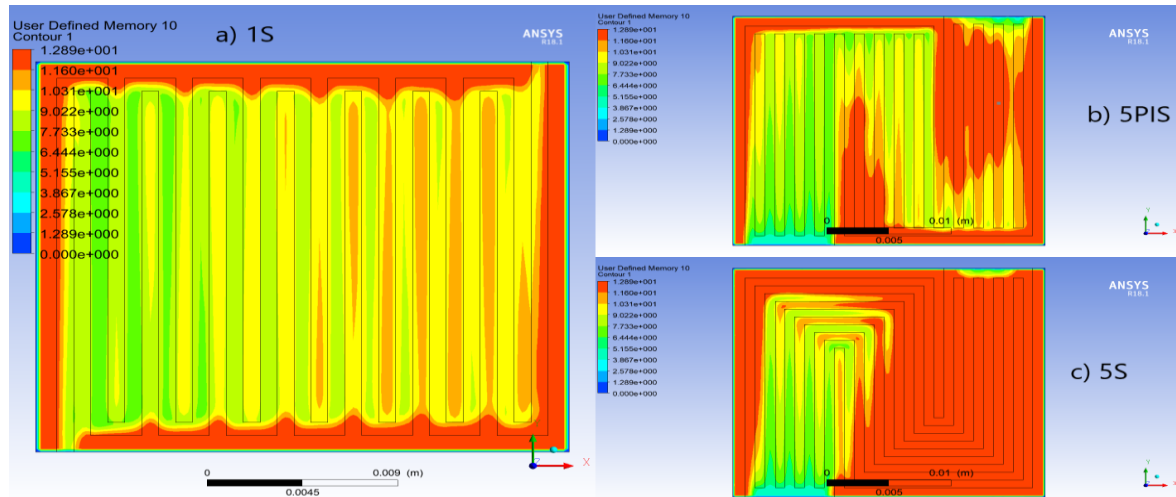
Yakıt pilinde Membran elektron çiftinde (MEÇ), özellikle membran tam olarak sıvı su ile doluyken water content (su içeriği) değerinin maksimum değeri 14'ten daha fazladır, bu değerde yoğunlaşmış su buharı ile denge halindedir. Bu nedenle yakıt hücrelerinde sıvı su oluşmasına önlemek için su içeriği değerini 14' ün altında tutulması istenir. Yüksek su içeriği değeri (14'ten fazla) yüksek proton iletimine yol açmasına rağmen katalizör tabaka ve gaz difüzyon tabakasında su baskını ile neticelenebilir. Bu sebeple pil çalışması esnasında su içeriği değerinin 14 aşmaması gerekir (Limjeerajarus ve Charoen-amornkitt, 2015) (Springer, Zawodzinski ve Gottesfeld, 1991).

Çizelge 7.5.'de, 1S, 5PIS ve 5S pillerinde, Şekil 7.21'deki membran' lar üzerinde Ansys Fluent CFD post programı probe özelliği ile aracılığıyla değerler elde edilmiştir.

Çizelge 7.5. CL/Membran arayüzünde katot tarafında su içeriği dağılım değerleri

Yakıt pili	En Küçük Su İçeriği Değeri	En Büyük Su İçeriği Değeri
1S Tip	8,88	13,94
5PIS Tip	5,30	12,96
5S Tip	4,95	13,74

Çizelge 7.5.'de görüldüğü gibi, katot tarafında CL/ Membran arayüzünde, su içeriğinin en yüksek ve en düşük değerleri incelenen yakıt pilleri için verilmiştir. Fluent CFD post programından elde edilen bu verilere göre pillerde su taşkını riski bulunmadığını söyleyebiliriz. 1S ve 5S pillerinde su içeriklerinin birbirine yakın olduğu, 5PIS yakıt pilinin su içeriğinin biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Su içeriğinin daha düzgün dağılımı daha iyi bir pil dayanımına yol açması bilinmektedir. Birçok araştırmacı uniform bir su içeriği eldesi için çeşitli akış kanalı geliştirmeyi denemişlerdir (Shimpalee ve Van Zee, 2007) (Manso, Marzo, Garmendia, Barranco ve Lorenzo, 2011).



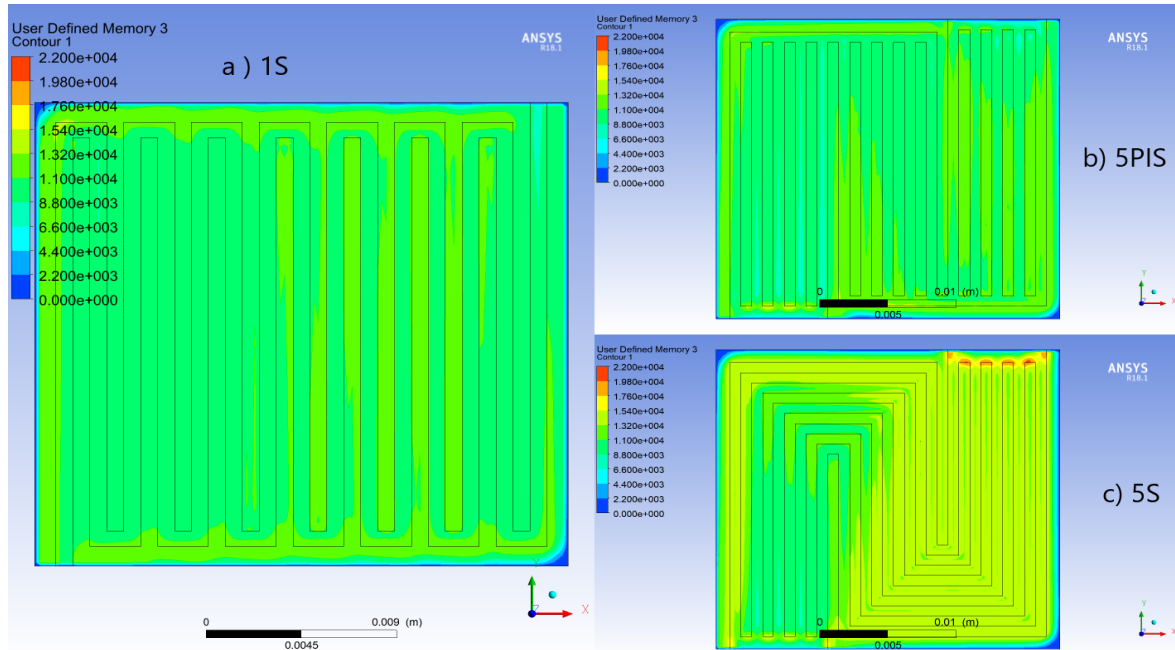
Şekil 7.22. Membran su içeriğinin dağılımı, aynı yönlü akışta anot tarafı, CL/ membran arayüzü, 0.4V, %70 giriş nemliliğinde, a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

Çizelge 7.6.'da 1S, 5PIS ve 5S pillerinde, Şekil 7.22.'deki membran' lar üzerinde Ansys Fluent CFD post programı probe özelliği kullanılarak değerler elde edilmiştir.

Çizelge 7.6. CL/Membran arayüzü, anot tarafında su içeriği dağılım değerleri

Yakıt pili	En Küçük Su İçeriği Değeri	En Büyük Su İçeriği Değeri
1S Tip	7,24	13,46
5PIS Tip	5,00	13,28
5S Tip	4,56	13,45

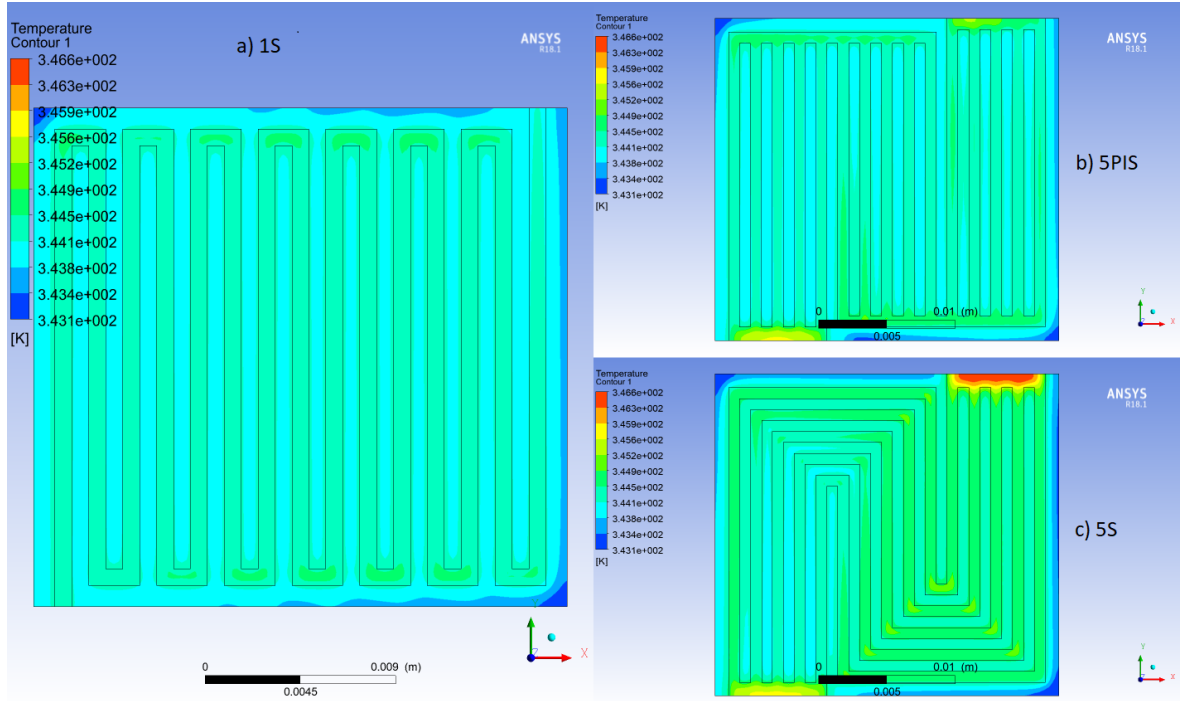
Çizelge7.6.'da anot tarafında CL/ Membran arayüzünde, su içeriğinin en yüksek ve en düşük değerleri verilmiştir. Fluent CFD post programından elde edilen bu verilere göre pillerde su taşkını olasılığı bulunmadığını söyleyebiliriz. 1S ve 5S pillerinde su içeriklerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Su içerik değerleri çok düşük veya çok yüksek olduğunda protonların taşınması zorlaşmaktadır. Anot tarafında yüksek su içeriği olduğunda, daha düşük elektro-osmotik sürüklenme etkisi ile akım düşmesine yol açar. (Shimpalee ve Van Zee, 2007)



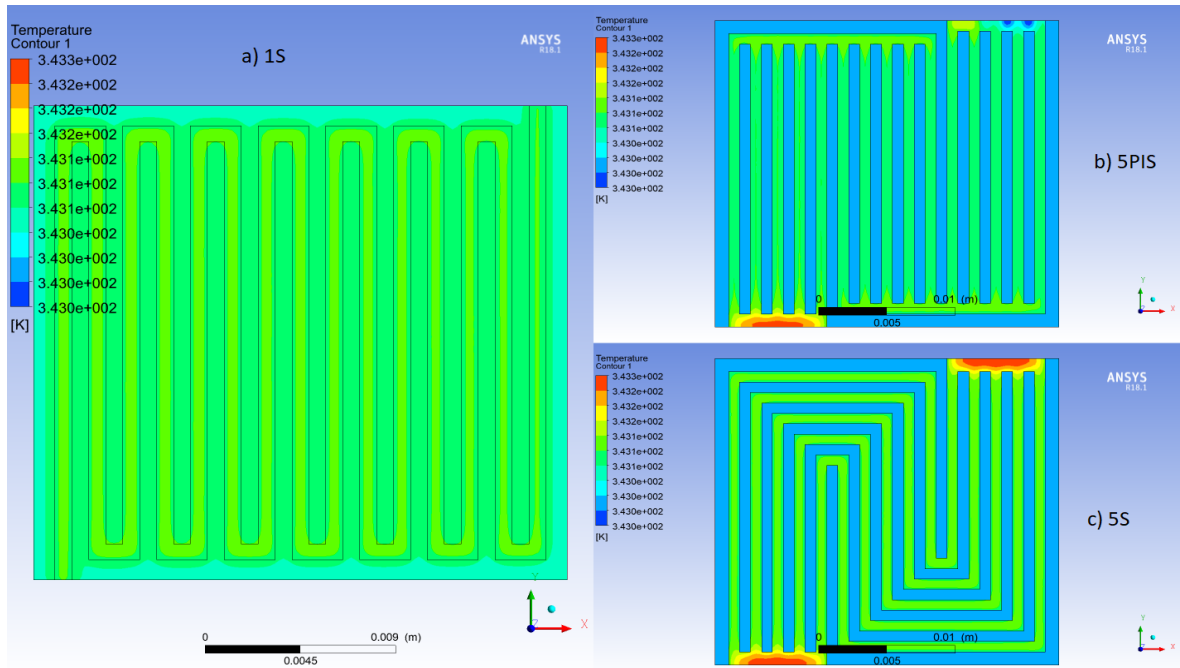
Şekil 7.23. Akım Yoğunluğu, aynı yönlü akış, katot tarafı, GDL / katalizör arayüzü 0,4V, %70 anot giriş nemliliğinde, a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

Düzgün dağılmayan akım dağılımı yakıt pillerinde lokal aşırı ısınmaya yol açmakta ve pil ömrünü azalmasına neden olmakta ve beklendiğinden daha az güç elde edilmesine yol açmaktadır. Bu konu su baskını ile tecrübe edildiğinde yakıt pilleri için kritik bir öneme

haizdir (Jamekhorshid ve diğerkleri, 2010). Şekil 7.23' te 1S yakıt pilinde akım yoğunluğu diğerk yakıt pillerine göre daha düzgün dağılım gösterdiği söylenebilir. 5PIS pili, 5S piline göre akım yoğunluğu dağılımının daha düzgün olduğu görölmektedir. 5S pilinde çıkış bölgesinde küçük bir alanda akım yoğunluğu değerknde artış görölmektedir. Bu bölgenin küçük olması nedeniyle yakıt pilinin dayanımını çok fazla etkilemeyeceği düşünölmektedir.



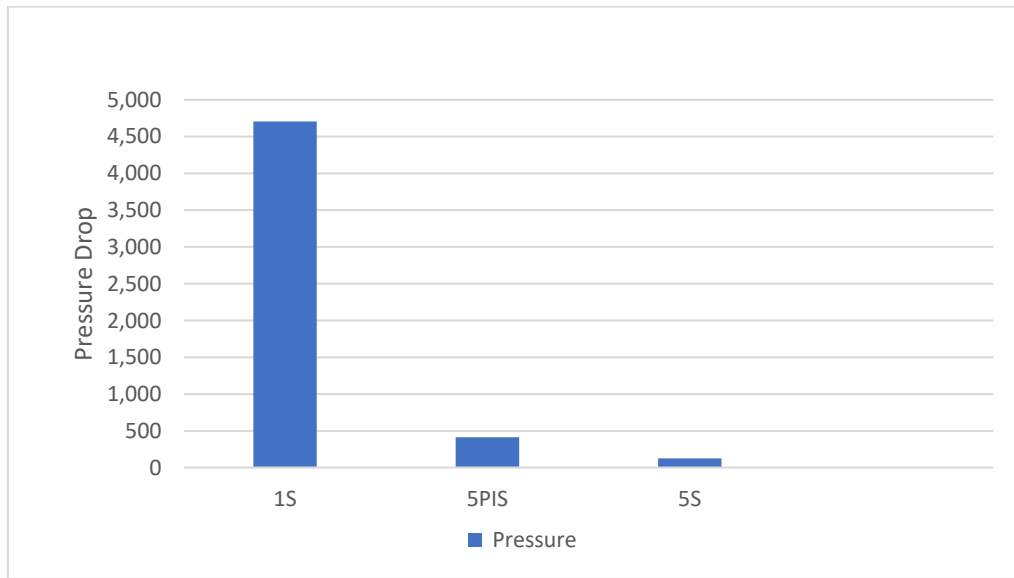
Şekil 7.24. Sıcaklık dağılımı, aynı yönlü akış, katot tarafı katalizör / membran arayüzü 0,4V, %70 anot giriş nemliliğinde, a) 1S, b) 5PIS c) 5S



Şekil 7.25. Sıcaklık dağılımı, aynı yönlü akış, katot tarafı katalizör / membran arayüzü 0.8 V hücre voltajında a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

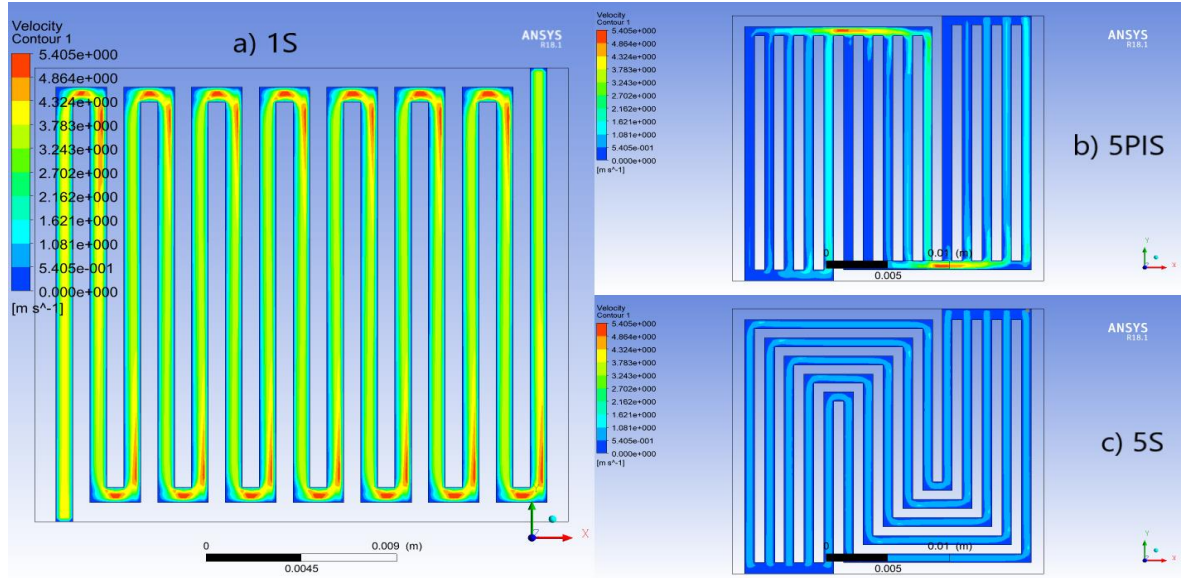
Sıcaklık, yakıt pilleri için en önemli işletme parametrelerinden bir tanesidir. PEM yakıt pilleri yaklaşık olarak 50 °C ile 80 °C arasında çalıştırılır. Wang ve arkadaşlarına (2003) göre, yakıt pili sıcaklığını 50°C ile 90 °C arasında değerlendirmişlerdir. Sıcaklık arttıkça, kütle taşınımının iyileştiğini, artan sıcaklığın etkisiyle yayılma yeteneğinin arttığını ve bu

sayede akım yoğunluğu değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Şekil 7.24. ve 7.25' de görüldüğü üzere, yakıt pilleri sıcaklık dağılımı homojen bir yapıya sahiptir. Membran üzerinde görülebilen aşırı sıcaklık farklılıkları, artan mekanik streslere, yerel aşırı ısınmanın sonucu olarak PEM yakıt pilinin ömrünün kısılmasına neden olur. Membran dayanıklılığını artırmak için membran üzerindeki sıcaklık farklılıkları 5°C'nin altında olması istenir (Pasaogullari, Mukherjee, Wang ve Chen 2006). Şekil 7.25' de mevcut yakıt pillerinde Ansys Fluent CFD post probe özelliği kullanılarak membran yüzeyindeki sıcaklık farkı ölçülmüş ve 0,26 °C civarında olduğu görülmüştür.



Şekil 7.26. Basınç düşümü, 0.8V hücre geriliminde

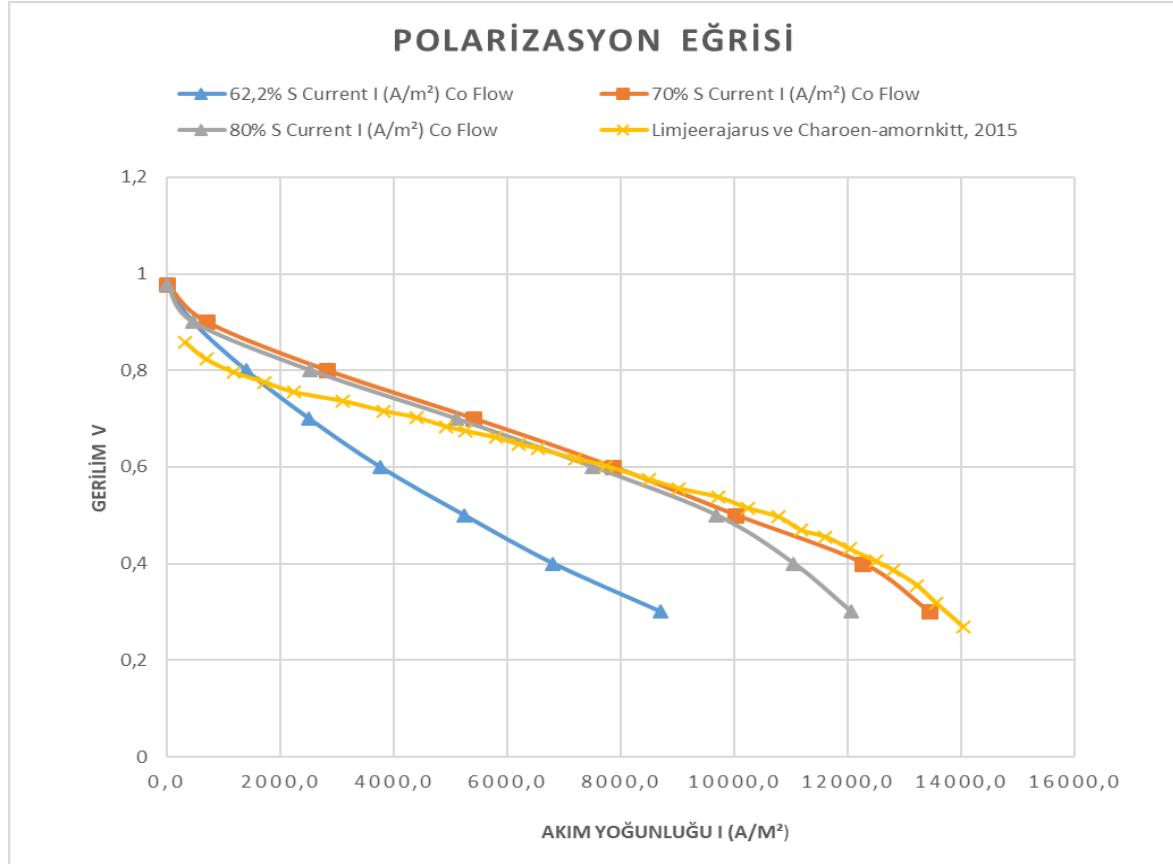
Polimer elektrodlu yakıt pili sistem tasarımında basınç düşümü en önemli noktalardan biridir. Çünkü tüm sistem performansını etkileyen reaktan akışı için gereken güç belirlenir. Basınç düşümü, kanal sayısı az olduğunda artış gösterir. PIS akış kanalları multi kanal 5S akış kanalı ile kıyaslandığında biraz daha fazla basınç düşümü üretir. ((Limjeerajarus ve arkadaşları, 2015) Şekil 7.26.'da görüleceği üzere 1S kanalında yakıt düşümü 5PIS ve 5S kanalına göre oldukça fazladır. 5PIS, 5S kanalına göre daha fazla basınç düşümü üretmektedir.



Şekil 7.27. Katot gaz akış kanalındaki reaktan akış hızları 0,8 V hücre geriliminde, a) 1S, b) 5PIS, c) 5S

Akış kanalı tasarımının hızlar üzerinde etkisinin olduğunu söyleyebiliriz. PIS akışında her köşede artan hız reaktanların köşelerde farklı kanallardan tek kanalda birleşmelerinden kaynaklanmaktadır. Akış kanalı tasarımının reaktan hızlarına etkisi kanal sayısı fazlalaştıkça artar. Çünkü kanal sayısı arttığında kanallardaki hızlar oldukça düşer. (Limjeerajarus ve arkadaşları, 2015). Şekil 7.27’ de görüleceği üzere reaktan hızları 5PIS ve 5Spillerinde düşükken 1Syakıt pilinde yüksek ve homojen olduğu görülmektedir. Ayrıca, 5PIS yakıt pilinde 1 ve 2. köşede reaktanların hızları artmıştır. 5S yakıt pil kanalında hızlar aşağı yukarı aynı seviyede seyretmektedir. Reaktanların hızlarını artırdığımızda hücrede oluşan sıvı suyun tahliyesine yardımcı olur. Ayrıca, su baskını olasılığını da düşürür. Neticede, yakıt pili performansında da artış görülür.

7.7. Analiz Sonuçlarının Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması



Şekil 7.28. 1S yakıt pilinin aynı yönlü akışta, %62,2, %70 ve %80 reaktan nemliliğinde polarizasyon eğrileri

Limjeerajarus ve arkadaşlarının (2015) çalışmasında, yaklaşık 5 cm² alanı olan mikro PEM yakıt pili, altı farklı akış kanalı tasarlanarak numerik olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada Ansys Fluent yazılımı vasıtasıyla farklı akış kanalı konfigrasyonlarının ve kanal sayısının sistem performansına etkisi sistematik olarak çalışılmıştır. Akış kanalı konfigrasyonunun PEM yakıt pili performans ve taşınım davranışlarına önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Bizim çalışmamızda incelediğimiz yakıt pilleri alanı 5,93 cm²' dir. Bu bağlamda, Limjeerajarus ve arkadaşlarının (2015) incelediği yakıt pillerine yakın alana sahiptir. Bu makalede şekil 4' te yer alan deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve elde ettiğimiz polarizasyon eğrilerine yakın değerler aldığı görülmüştür. Şekil 7.28' de deney sonuçlarından elde edilen eğri ile %70 reaktan nemliliğindeki eğriye oldukça yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak sayısal analiz ile elde edilen polarizasyon eğrisinin deney sonuçları ile uyumlu olduğunu söyleyebiliriz.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde temiz ve sürekli enerji kaynaklarına olan ihtiyaç sürekli artmaktadır. Yakıt pilleri bu ihtiyacı gelecekte karşılayabilme kapasitesi olan enerji kaynaklarından biridir. Bu bağlamda yakıt pillerinin kullanım alanları ve önemi yapılan çeşitli uygulamalar ile artmaktadır.

Çalışmada öncelikle yakıt pilleri hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Yakıt pillerinin çalışması esnasında oluşan kayıplar ve yakıt pili çalışma koşulları ayrıntılı olarak incelenerek performans kayıplarının nedenleri açıklanmıştır. Yakıt pillerinde performans kriteri olarak polarizasyon (akım-gerilim) eğrileri yakıt pili karakteristiği hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bir yakıt pilinde hücrelerin birleştirilmesi ve yakıt pilinin çalışabilmesi için pek çok alt parçadan ve sistemden oluşması gerekir. Bu alt parçalar ve sistemlerin görev ve özellikleri açıklanmıştır. Bu parça ve sistemlerin yakıt pili performansına dönük olan olumlu ve olumsuz özellikleri vurgulanmıştır. Yakıt pilinin sağlıklı çalışabilmesi için yakıt pilinin hangi bölümlerden meydana gelmesi gerektiği belirtilmiştir. Yakıt pillerinde kritik öneme sahip su yönetimi ve baskını konularında bilgiler verilmiş ve bu konunun yakıt pili performansına etkileri anlatılmıştır.

Tez çalışmasında, Ansys Design modeler programı vasıtası ile üç adet (1S, 5PIS ve 5S) yakıt pili tasarlanmıştır. Tasarlanan her pilin akış kanalı birbirinden farklıdır. Sonrasında ağ oluşturma işlemi Ansys ICEM CFD modülünde gerçekleştirilmiş ve sınır şartları belirlenmiştir. Çalışmanın, Ansys Fluent PEM modülünde sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda üç farklı giriş reaktan nemliliği (%62,2, %70 ve %80), üç farklı PEM yakıt pili için 0,3 Volt' tan başlayarak 0,9 Volt gerilime kadar 0,1 V artırmalı analizler yapılmıştır. Bu analizler anot ve katot girişlerine görede aynı yönlü ve zıt yönlü olarak iki defa tekrarlanmıştır.

Bu çalışmada, farklı geometride akış kanallarının hücre performansı üzerindeki etkileri, basınç düşüşü, sıcaklık dağılımları, reaktan konsantrasyonları ve su içeriği dağılımları sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalarda üç farklı gaz akışı modeli için polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Sayısal analiz ile elde edilen polarizasyon eğrileri, literatürde yer alan sonuçlarla kıyaslanmış ve değerlendirilmiştir.

Elde edilen analiz sonuçlarına göre, akış kanalı tasarımının hücre performansını hem olumlu veya olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. Polarizasyon eğrilerinden 5S gaz akış kanalı deseninin en iyi akım yoğunluğu değerine ulaştığı görülmüştür. Bununla birlikte, 1S akış kanalı tasarımı en yüksek basınç düşüşünü göstermiştir. 5PIS akış kanalı tasarımı ise en düşük basınç düşümünü göstermiştir. Çalışmada, su yönetimi ve taşkını açısından incelenen pillerde bir problem görülmemiş ve bu konunun yakıt pili performansında önemli ve oldukça hassas bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, yakıt pilleri içerisinde, 5S akış kanalı tasarımının daha yüksek akım yoğunluğu ve polarizasyon değerlerine sahip olması ve daha düşük bir basınç düşüşüne sahip olması nedeniyle tavsiye edilmektedir. Tüm değerlendirmeler dikkate alındığında 5S modeli PEM yakıt pili uygulamaları için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Önemi her geçen gün artan yakıt pili ve teknolojileri üzerine olan çalışmaların artarak devam etmesi ve pratik uygulama yapılarak üretim teknolojisinin geliştirilmesi ülkemiz ekonomisine ve sanayisine büyük katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Authayanun, S., Pothong, W., and Ngamsai, K. (2014). Effect of water transport on the electrical performance of PEM fuel cell. *Energy Procedia*, 61, 1553–1556.
- Awan, A., Saleem, M., and Basit, A. (2018). *Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell by using ANSYS Fluent*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Petronas, Malaysia.
- Barbir, F. (2005). *Pem Fuel Cell: Theory and Practice* (first edition). Croatia: Academic Press, 20, 33, 35, 42, 43, 44, 46, 61, 73, 76, 116, 118, 124, 115.
- Başyazıcı, İ.U. (2011) Yakıt Pili Teknolojisinin Ticari Binalarda Kullanabilirliğinin Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Değerlendirilmesi, *Sablon*, 10(24), 19-35.
- Bilgili, M. (2011). *Akış Kanalları İçerisindeki Yarı Silindirik Blokların Pem Yakıt Pili Performansına etkisinin Üç Boyutlu Analizi*, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37-38.
- Bilgili, M. ve Sivrioğlu, M. (2016). Pem Yakıt Pilinin Değişik Membran Elektrot Çifti Kalınlıklarında Ve Farklı Çalışma Basıncı Koşullarında Üç Boyutlu Sayısal Analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*. 31(1), 51-63
- Carcadea, E., Varlam, M., Stefanescu, I., Stanciu, V., Ionete, R. E. and Patularu, L. (2009). The Influence On Performance Of A Pem Fuel Cell. *Progress of Cryogenics and Isotopes*, Separation Volume 12, 84–90.
- Celep, K. C. ve Dincer K. (2016). *An Overview of the Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel: How Its Nano-structural Characteristics Affect Performance*. *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Antalya.
- Chen, H., Jia, S., Liu, B., and Zhang, T. (2018). Numerical Simulation of the Power Performance a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Under Dynamic Loading Conditions. *IEEE Access*, 6, 67992–68000.
- Dutta, S., Shimpalee, S., and Zee, J. W. V. (2001). Numerical Prediction of Mass Exchange Between Cathode and Anode Channel in a Pem Fuel Cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 2029-2042.
- EG&G Technical Services, Inc. (2004). *PemFuel Cell Handbook* (Seventh edition). USA: ANSI / CSA, 3-2, 6-4, 3-4, 8-46, 8-48.

- Fahrudin, A., Ichsani, D., and Taufany, F. (2018). Improving PEM fuel cell performance using in-line triangular baffles in triple serpentine flow field. *MATEC Web of Conferences*, Indonesia.
- Ge, S., and Wang, C. (2007). Liquid Water Formation and Transport in the PEFC Anode, *Journal of The Electrochemical Society*, 154 (10) B998 -B1005
- Ghanbarian, A., Kermani, M. J., Scholta, J., and 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.
- Hashemi, F., Rowshanzamir, S., and Rezakazemi, M. (2012). CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields. *Mathematical and Computer Modelling*, 55(3–4), 1540–1557.
- He, W., Lin, G., and Nguyen, T. Van. (2003). Diagnostic Tool to Detect Electrode Flooding in Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells. *AIChE Journal*, 49(12), 3221–3228.
- He, J., Choe, S.-Y. and Hong C.-O. (2009). *Analysis of Pressure Drop and Water Flooding of Two-Phase Flow Along Channels For A Pem Fuel Cell System. Proceedings of ASME Seventh International Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference*, California, USA.
- Hickner, M. A., Fujimoto, C. H., and Cornelius, C. J. (2006). Transport in sulfonated poly (phenylene)s: Proton conductivity, permeability, and the state of water. *Polymer* 47, 4238–4244.
- Jamekhorshid, A., Karimi, G., Noshadi, I., and Jahangiri, A. (2010). Current Distribution and Cathode Flooding Prediction in a PEM Fuel Cell. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, Vol:4, No:2, 157–165.
- Jeon, D. H., Greenway, S., Shimpalee, S. Ā., and Zee, J. W. Van. (2008). The effect of serpentine flow-field designs on PEM fuel cell performance. *International Association for Hydrogen Energy*, 33, 1052–1066.
- Ji, M., and Wei, Z. (2009). A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Energies*, 1057–1106.
- Stumper, J., Löhr, M., and Hamada, S. (2005). Diagnostic tools for liquid water in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 143, 150–157.

- Kahraman, H., and Orhan, M. F. (2017). Flow field bipolar plates in a proton exchange membrane fuel cell: Analysis and modeling. *Energy Conversion and Management*, 133, 363–384.
- Kahveci, E. E., and Taymaz, I. (2018). Assessment of single-serpentine PEM fuel cell model developed by computational fluid dynamics. *Fuel*, 51–58.
- Kerkoub, Y., Benzaoui, A., Haddad, F., and 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.
- Knights, S. D., Colbow, K. M., St-pierre, J., and Wilkinson, D. P. (2004). Aging mechanisms and lifetime of PEFC and DMFC. *Journal of Power Sources*, 127 127, 127–134.
- Kumar, A., and Reddy, R. G. (2003). Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 113(1), 11–18.
- Larminie, J. and Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained 2nd Edition*. England, John Wiley & Sons Ltd, 50.
- Li, H., Tang, Y., Wang, Z., Shi, Z., Wu, S., Song, D., Mazza, A. (2008). A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 178, 103–117.
- Li, S., and Sundén, B. (2018). Numerical study on thermal performance of non-uniform flow channel designs for cooling plates of PEM fuel cells. *Numerical Heat Transfer*, 74(1), 917–930.
- Li, X., and Sabir, I. (2005). Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 359–371.
- Limjeerajarus, N., and Charoen-amornkitt, P. (2015). Effect of different flow field designs and number of channels on performance of a small PEFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 7144–7158.
- Limjeerajarus, N., Nishiyama, Y., Ohashi, H., Ito, T., and Yamaguchi, T. (2009). Modeling for PEFC MEAs based on reaction rate on Pt surface and microstructures of catalyst layers. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, (42)8, 616–631.
- Limjeerajarus, N., Yanagimoto, T., Yamamoto, T., Ito, T., and Yamaguchi, T. (2008). Quantitative analysis of oxygen-containing species adsorbed on the Pt surface of a

- polymer electrolyte fuel cell membrane electrode assembly electrode using stripping voltammetry. *Journal of Power Sources*, 185(1), 217–221.
- Liu, H. C., Yang, W. M., Cheng, L. S., and Tan, J. (2018). Numerical Analysis of Different Multi-serpentine Flow Fields for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Fuel Cells*, 18(2), 173–180.
- Liu, X., Guo, H., and Ma, C. (2006). Water flooding and two-phase flow in cathode channels of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 156, 267–280.
- Lu, Y., and Reddy, R. G. (2010). Performance of micro-PEM fuel cells with different flow fields. *Journal of Power Sources*, 195, 503–508.
- Natarajan, D., and Nguyen, T. V. (2005). Current Distribution in PEM Fuel Cells. Part 1 Oxygen and Fuel Flow Rate Effect. *AIChE Journal*, 51(9), 2587–2598.
- Nguyen, T. V, and White, R. E. (1993). A Water and Heat Management Model for Proton Exchange. membrane Fuel Cells. *Jornal Electrochemistry Society*, (140)8, 2176-2186
- Manso, A. P., Marzo, F. F., Mujika, M. G., Barranco, J., and Lorenzo, A. (2011). Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 6795–6808.
- Mehta, V., and Cooper, J. S. (2003). Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources*, 114, 32-53.
- Mench, M. (2008). *Fuel Cell Engines*. USA, John Wiley & Sons Inc, 24, 31, 51, 121, 122, 285, 328.
- Omeiri, D., and Laouar, A. (2018). Three Dimensional Simulations of Transport Phenomena in a Single Phase Isothermal Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Procedia Computer Science*, 130, 736–743.
- Park, S., Lee, J., and Popov, B. N. (2012). A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 5850–5865.
- Pasaogullari U., Mukherjee P.P., Wang C-Y. and Chen K.S. (2008). Anisotropic Heat and Water Transport in a PEFC Cathode Gas Diffusion Layer. *Journal of the Electrochemical Society*, 154(8), B823-B834

- Qi, Z., and Kaufman, A. (2002). Improvement of water management by a microporous sublayer for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 109, 1–9.
- Ramin, F., Sadeghifar, H., and Torkavannejad, A. (2019). Flow field plates with trap-shape channels to enhance power density of polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 1151–1160.
- Shimpalee, S., and Zee, J. W. Van. (2007). Numerical studies on rib and channel dimension of flow-field on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 842–856.
- Sierra, J. M., Moreira, J., and Sebastian, P. J. (2011). Numerical analysis of the effect of different gas feeding modes in a proton exchange membrane fuel cell with serpentine flow-field. *Journal of Power Sources*, 196, 5070–5076.
- Sivertsen, B. R., and Djilali, N. (2005). CFD-based modelling of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 141, 65–78.
- Springer, T. E., Zawodzinski, T. A., and Gottesfeld, S. (1993). Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. *Journal Electrochem. Society*, (138)8, 2334–2342.
- Spornjak, D., Prasad, A. K., and Advani, S. G. (2007). Experimental investigation of liquid water formation and transport in a transparent single-serpentine PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 170, 334–344.
- Tenson, T.J., and Rajesh B. (2018). Numerical investigations on a proton exchange membrane fuel cell of active area 50 cm². *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 396(1), 012056.
- Sridhar, P., Perumal, R., Rajalakshmi, N., Raja, M., and Dhathathreyan, K. S. (2001). Humidification studies on polymer electrolyte membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 101, 72–78.
- Velisala, V., and 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.
- Wang, L., Husar, A., Zhou, T., and Liu, H. (2003). A parametric study of PEM fuel cell performances. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 1263–1272.
- Dong-hui W., Lin-zhi Y., Zhong-yu P., Cong-da Lu, Li, G., and Qiao- hui L. (2018). Performance investigation of proton exchange membrane fuel cell with intersectant flow field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 775–787.

Zhang J. (2004). *Electrocatalysts and Catalyst Layers Fundamental and Application*. Canada: Springer, 5, 6, 18, 21, 23.

Zinko, T., Pianko-oprych, P., and Jaworski, Z. (2018). Three- Dimensional Computational Fluid Dynamics Modelling of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell With a Serpentine Micro Channel Design. *Chemical and Process Engineering*, 39(2), 143–154

EKLER

EK-1. 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Anot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi

1. Anot Mol Oranlarının Belirlenmesi

Su Buharı Mol oranı: $x_{H_2O,in} = \frac{P_{H_2O}}{P_{in}}$

70°C, doymuş su buharı basıncı $P_{sat}=31,202$ kPa

$P_{in}= 2$ bar

$$X_{H_2O} = \frac{P_{sat}(T)}{P_{in}}$$

$$X_{H_2O} = \frac{P_{sat}(T)}{P_{in}} = \frac{31202}{200000} = 0,156$$

$$X_{O_2,in} = \frac{1 - 0,155}{1 + \frac{79}{21}} = 0,17724$$

$$X_{H_2} = 1 - X_{H_2O}$$

$$X_{H_2} = 1 - 0,156 = 0,844$$

$$X_{N_2} = 1 - X_{H_2O} - X_{O_2}$$

$$X_{N_2} = 1 - 0,156 - 0,17724$$

$$X_{N_2} = 0,66676$$

2. Anot Gaz Kanalı Giriş Hızlarının ve Hacimsel Debinin Belirlenmesi

$$U_{a,in} = \zeta_a \frac{I}{n_e F} A_{mea} \frac{1}{x_{H_2}} \frac{RT_{in}}{P_{in}} \frac{1}{A_{ch}}$$

$$U_{a,in} = 1,5 * \frac{10000}{2 * 96847} * 0,000593 * \frac{1}{0,844} * \frac{8,314 * 343}{202650} * \frac{1}{0,8 * 0,8 * 10^{-6}} = 1,196 \text{ m/s}$$

EK-1. (Devam) 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Anot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi

$\dot{U}_{a,in}$ =Hacimsel debinin hesaplanması

$$\dot{U}_{a,in} = U_{a,in} * A_{ch,in}$$

$$\dot{U}_{a,in} = 1,196 * 0,8^2 * 10^{-6}$$

$$\dot{U}_{a,in} = 7,657 * 10^{-7} m^3/s$$

3. Katot Gaz Kanalı Giriş Hızlarının (Hacimsel Debinin) Belirlenmesi:

$$U_{c,in} = \zeta_c \frac{I}{n_e F} A_{mea} \frac{1}{X_{O_2}} \frac{RT_{in}}{P_{in}} \frac{1}{A_{ch}}$$

$$U_{c,in} = 3,5 * \frac{10000}{4 * 96847} * 0,000593 * \frac{1}{0,17745} * \frac{8,314 * 343}{202650} * \frac{1}{0,8 * 0,8 * 10^{-6}} = 6,6396 m/s$$

$$\dot{U}_{c,in} = U_{c,in} * A_{ch,in}$$

$$\dot{U}_{c,in} = 6,6396 * 0,8^2 * 10^{-6}$$

$$\dot{U}_{c,in} = 4,249 * 10^{-6} m^3/sn$$

Anot Girişi Kısmi basınçlarının hesaplanması:

$$T=70\text{ }^{\circ}\text{C için } P_{H_2O}=31.202\text{ Pa}$$

$$P_{H_2}=P - P_{H_2O}$$

$$P_{H_2} = 202.650 - 0,8 * 31.202 = 177.688,4\text{ Pa}$$

4. Anot Nem Oranı

$$W = \frac{P_{H_2O} * V / R_{H_2O} * V}{P_{H_2} * V / R_{H_2} * V} = \frac{R_{H_2}}{R_{H_2O}} \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} = 8,396 \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}}$$

EK-1. (Devam) 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Anot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi

$$P_{H_2O} = \phi * P_{H_2O,Sat}$$

$$P_{H_2O} = 0,80 * 31.202 = 24.961,6 \text{ Pa}$$

$$W = 8,936 \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} = 8,936 \frac{24.961,6}{202.650 - 24.961,6} = 1,255$$

5. Özgül Hacimler Cinsinden Nem Oranı

$$\frac{1}{V_{an}} = \frac{1}{V_{H_2}} + \frac{1}{V_{H_2O}}$$

$$V_{H_2O} = \frac{R_{H_2O} * T}{P_{H_2O}} = \frac{0,4615 \text{ kJ/kg} * 343}{31.202 * 0,80} = 6,342 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{H_2} = \frac{R_{H_2} * T}{P_{H_2}} = \frac{4,124 \text{ kJ/kg} * 343}{202.650 - 31.202 * 0,80} = 7,961 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{1}{V_{an}} = \frac{1}{7,961} + \frac{1}{6,342}$$

$$V_{an} = 3,847 \text{ m}^3/\text{kg}$$

6. Anot Giriş Kütle Oranının Belirlenmesi

$$\dot{U}_{an} = \dot{m}_{an} * V_{an}$$

$$\dot{m}_{an} = \frac{7,648 * 10^{-7}}{3,847}$$

$$\dot{m}_{an} = 1,988043 * 10^{-7} \text{ kg/sn}$$

EK-1. (Devam) 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Anot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi

7. Anot Giriş Kütle Oranları

$$\dot{m}_{an} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{H_2O}$$

$$\dot{m}_{an} = \dot{m}_{H_2} + W * \dot{m}_{H_2}$$

$$W = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{H_2}}$$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{an}}{W + 1}$$

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{1,998043 * 10^{-7}}{1,255 + 1}$$

$$\dot{m}_{H_2} = 8,8605 * 10^{-8} \text{ kg/sn}$$

$$\dot{\gamma}_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{an}} = \frac{8,8605 * 10^{-8}}{1,998043 * 10^{-7}} = 0,4435 \quad \dot{\gamma}_{H_2O} = 0,5565$$

EK-2. 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Katot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi

1. Katot Girişi

$\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{N_2}$: Katot girişindeki kütle toplamı

$$T=343 \text{ K} \quad P_{H_2O} = 31.202 \text{ kPa}$$

$$\Phi = \%80 \quad P_{H_2O} = 0,80 * 31.202 = 24,9616 \text{ kPa}$$

$$P_c = P - P_{H_2O} = 177.688,4 \text{ Pa}$$

$$W_c: \text{ katot tarafı nem oranı} = \frac{P_{H_2O} * V / R_{H_2O} * T}{P_c * V / R_c * T} = 0,622 * \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} = 0,622 * \frac{24.961,6}{177.688,4} =$$

$$w = 0,08738 \text{ kg } H_2O / \text{kg Hava}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{V_{kat}} &= \frac{1}{V_{hava}} + \frac{1}{V_{H_2O}} V_{hava} = \frac{R_{an} * T}{P_{an}} = \frac{0,2869 \text{ kJ/kgK} * 343}{177,6884} V_{hava} \\ &= 0,553816 \text{ m}^3 / \text{kg} \end{aligned}$$

$$V_{H_2O} = \frac{R_{H_2O}}{P_{H_2O}} = \frac{0,4615 \text{ kJ/kgK} * 343}{24,9616} = 6,3415 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\frac{1}{V_{ca}} = \frac{1}{V_{hava}} + \frac{1}{V_{H_2O}} = \frac{1}{0,553816} + \frac{1}{6,3415} V_{ca} = 0,509335 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$\dot{U}_{kat} = u_{c,in} * A_{ch,in} = 6,6396 \text{ m/sn} * 0,8 * 0,8 * 10^{-6} \text{ m}^2 = 4,249 * 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{sn}$$

$$\dot{m}_{kat} = \frac{\dot{U}_{kat}}{v_{kat}} = \frac{4,249 * 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{sn}}{0,509335 \text{ m}^3 / \text{kg}} = 8,342 * 10^{-6} \text{ kg} / \text{sn}$$

2. Katot Girişindeki Kuru Havanın Debisi

$\dot{m}_{hava}$: Katot girişindeki kuru havanın debisi

EK-2. (Devam) 1S, 5S ve 5PIS Akış Kanallı PEM Yakıt Pilleri İçin Katot Giriş Kütle Oranlarının Belirlenmesi

$$\dot{m}_{kat} = \dot{m}_{hava} + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{hava} + W * \dot{m}_{hava} \quad W = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{hava}}$$

$$\dot{m}_{kat} = \dot{m}_{hava} + W * \dot{m}_{hava}$$

$$\dot{m}_{Hava} = \frac{\dot{m}_{kat}}{W + 1} = \frac{8,342 * 10^{-6}}{0,08738 + 1} = 7,6716 * 10^{-6} \text{ kg/sn}$$

$$\dot{\gamma}_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{kat}} = \frac{\dot{m}_{kat} - \dot{m}_{hava}}{\dot{m}_{kat}} = \frac{8,342 * 10^{-6} - 7,6716 * 10^{-6}}{8,342 * 10^{-6}} = 0,0804$$

$$\dot{N}_{hava} = \frac{\dot{m}_{hava}}{M_{hava}} = \frac{7,6716 * 10^{-6} \text{ kg/sn}}{28,964 \text{ kg/kmol}} = 2,649 * 10^{-7} \text{ kmol/sn}$$

$$\dot{N}_{O_2} = \%21 * 2,649 * 10^{-7} = 5,5629 * 10^{-8} \text{ kmol/sn}$$

$$\dot{m}_{O_2} = 32 \text{ kg/kmol} * 5,5629 * 10^{-8} \text{ kmol/sn} = 1,78 * 10^{-6} \text{ kg/sn}$$

$$\gamma_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{cat}} = \frac{1,78 * 10^{-6} \text{ kg/sn}}{8,342 * 10^{-6} \text{ kg/sn}} = 0,2134$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜNÜŞEN, Hasan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum Tarihi ve Yeri : 26.12.1970- Ankara
 Medeni Hali : Bekar
 Telefon : 0505 590 00 40
 E-mail : hasan.gunusen@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Ün. Makine Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	YTÜ Makine Mühendisliği	1998
Lise	Yıldırım Beyazıt Lisesi	1988

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003- Halen	KOSGEB	KOBİ Uzmanı
2001- 2002	MEKRA Lang Gmbh	İmalat Mühendisi
1998- 2000	NA-ME A.Ş.,	İmalat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Kitap Okumak, Boks, Whin Chun, Escrima, Doğa Sporları Yapmak ve yüzmek.



GAZİ GELECEKTİR..