T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PEM Tipi Yakıt Hücresi Reaktant Akış Kanallarının Üç Boyutlu Modellenmesi

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail ÖZGÜN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KAHRAMAN

Mayıs 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PEM Tipi Yakıt Hücresi Reaktant Akış Kanallarının Üç Boyutlu Modellenmesi

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail ÖZGÜN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 18/05/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KAHRAMAN	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. Emrah BULUT	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

İsmail ÖZGÜN

07/05/2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin KAHRAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi yönden her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN ..... **i**
TEŞEKKÜR ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
KISALTMALAR ..... **v**
SİMGELER ..... **vi**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **x**
ÖZET ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiii**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2.
YAKIT HÜCRELERİ **4**
2.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi 4
2.2. Yakıt Hücreleri Nedir ve Nasıl Çalışır? 5
2.3. Yakıt Hücrelerinin Çeşitleri 6
2.3.1. Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücreleri 7
2.3.1.1. Elektrolit (Membran) 9
2.3.1.2. Gaz difüzyon tabakası (GDL) 9
2.3.1.3. Elektrotlar 10
2.3.1.4. Bipolar plakalar 11
2.3.1.5. Sonlandırıcı plakalar 12
2.3.1.6. Akım toplayıcılar 12
2.3.1.7. Contalar 12
2.3.2. Alkali yakıt hücreleri 12
2.3.3. Fosforik asit yakıt hücreleri 13
2.3.4. Katı oksit yakıt hücreleri 14
2.3.5. Eriyik karbonat yakıt hücreleri 16
2.3.6. Doğrudan metanol yakıt hücreleri 17
2.4. Yakıt Hücresi Kayıpları 18
2.4.1. Aktivasyon kayıpları 19
2.4.2. Dirençsel (ohmik) kayıplar 19
2.4.3. Konsantrasyon kayıpları 20

BÖLÜM 3.
LİTERATÜR TARAMASI.....21

BÖLÜM 4.
PEM YAKIT HÜCRESİ MODEL TANIMI 25
4.1. Modelde Yapılan Kabuller.....25
4.2. Kütlenin Korunum Denklemi.....25
4.3. Momentumun Korunum Denklemi 25
4.4. Enerjinin Korunum Denklemi.....26
4.5. Türlerin Korunum Denklemi 26
4.6. Yüklerin Korunması 27
4.7. Elektrokimyasal Denklemler.....27
4.7.1. Isı Kaynağı 30
4.7.2. Suyun Oluşumu ve Taşınması.....30
4.7.3. Özellikler.....31

BÖLÜM 5.
PEM YAKIT HÜCRESİ MODELİ.....33
5.1. Geometri Oluşturma 33
5.2. Ağ Yapısı (Mesh) Oluşturma 37
5.3. Sınır Şartları 38
5.4. Çözüm Algoritması ve Çözücü Ayarları 40

BÖLÜM 6.
SONUÇLAR.....44
6.1. Sayısal Analizin Yakınsama Kriteri 44
6.2. Polarizasyon Eğrileri 45
6.3. Akım Yoğunluğu Dağılımları 46
6.4. Basınç Dağılımları.....48
6.5. Hız Dağılımları.....49
6.6. Sıcaklık Dağılımları.....50
6.7. Reaktant Gaz Dağılımları 51
6.7.1. Hidrojen dağılımı 52
6.7.2. Oksijen dağılımı 53
6.8. Su Yönetimi 56
6.8.1. Katot kanallarında su dağılımı 56
6.8.2. Membranda su içeriği dağılımı 58

BÖLÜM 7.
ÖNERİLER.....61

KAYNAKLAR.....62

KISALTMALAR

PEM	: Polimer elektrolit membran, proton değişim membran
MEA	: Membran elektrot grubu
PEMFC	: Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri
AFC	: Alkali yakıt hücreleri
PAFC	: Fosforik asit yakıt hücreleri
SOFC	: Katı oksit yakıt hücreleri
MCFC	: Eriyik karbonat yakıt hücreleri
DMFC	: Doğrudan metanol yakıt hücreleri
ZAFC	: Çinko hava yakıt hücreleri
PCFC	: Protonik seramik yakıt hücreleri
HOR	: Hidrojen oksidasyon reaksiyonu
BFC	: Biyolojik yakıt hücreleri
GDL	: Gaz difüzyon tabakası
KOH	: Potasyum hidroksit
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
ANN	: Yapay sinir ağı
URF	: Gevşeme faktörü (under relaxation factor)

SİMGELER

$R_{an,cat}$: Anot ve katotta oluşan gerilim kayıpları

V_{oc} : Açık devre voltajı

p : Akışkan basıncı

i : Akım yoğunluğu

j_{an}^{ref} : Anot referans akım yoğunluğu

η_{akt} : Aktivasyon kayıpları

$[H_2]_{ref}$: Anot referans mol konsantrasyonu

$[O_2]_{ref}$: Anot referans mol konsantrasyonu

γ_{an} : Anot konsantrasyon üssü

α_{an},α_{cat} : Anot ve katot transfer katsayısı

$\eta_{an,cat}$: Anot ve katotta transfer olan akım

X_{H_2O} : Buhar molar kesri

P_{sat} : Doyma basıncı

i_0 : Denge akım yoğunluğu

η_{ohm} : Dirençsel (ohmik) kayıplar

R : Direnç

ϕ : Elektriksel potansiyel

σ : Elektriksel iletkenlik

S_e : Enerji kaynak terimi

$\emptyset_m$: Elektrolit faz potansiyeli

α : Elektron transfer katsayısı

K_m^{eff} : Elektrolit fazında elektrik iletkenlik

e^- : Elektron

n : Elektron sayısı

D_{eff}^{ij} : Efektif gaz türlerinin yaygınlığı

F : Faraday sabiti

J_w^{diff} : Geri difüzyon akısı

r_s : Gözenek engel üssü

ε : Gözeneklilik

x_i : Gaz türlerinin kütle kesri

Ag : Gümüş

ε_{GDL} : GDL gözenekliliği

D_i^0 : H_2 , O_2 , H_2O referans diffüzitesi

$V_{hücre}$: Hücre potansiyeli

$S_\emptyset$: Hacimsel transfer akımını temsil eden kaynak terimi

v : Hız vektörü

OH^- : Hidroksit iyonu

H^+ : Hidrojen iyonu

H_2 : Hidrojen molekülü

k : Isı iletim katsayısı

R : İdeal gaz sabiti

p_c : Kılcal basınç

ϕ_{sol} : Katı faz potansiyeli

K_s^{eff} : Katı fazda elektrik iletkenlik

k_s : Katı matrisin ısı iletim katsayısı

$c_{p,s}$: Katı matrisin özgül ısı kapasitesi

ρ_s : Katı matrisin yoğunluğu

c_p : Karışımın ortalama özgül ısı kapasitesi

S_m : Kütle kaynak terimi

CO : Karbonmonoksit

CO_2 : Karbondioksit

η_{kon} : Konsantrasyon kayıpları

j_{cat}^{ref} : Katot referans akım yoğunluğu

γ_{cat} : Katot konsantrasyon üssü

ε_{CL} : Katalizör tabakası gözenekliliği

$LiAlO_2$: Lityum alüminyum oksit

Li : Lityum

ρ_m : Membran yoğunluğu

σ_{mem} : Membran iyonik iletkenliği

ϕ_{mem} : Membran faz potansiyeli

CH_4 : Metan

M_m : Membran eşdeğer ağırlığı

β : Membran protonik iletim katsayısı

ω : Membran protonik iletim üssü

ω , β : Model sabitleri

S_M : Momentum kaynak terimi

K : Mutlak geçirgenlik

Ni : Nikel

α_d : Ozmotik sürüklenme katsayısı

O_2 : Oksijen molekülü

K : Potasyum

Pt/Ru : Platin/Rutenyum

h_{reac} : Reaksiyonların net entalpisi

T_0 : Referans sıcaklık

P_0 : Referans basınç

T : Sıcaklık

V_l : Sıvı hızı

Na : Sodyum

P_{wv} : Su buhar basıncı

a : Su aktivitesi

h_L : Suyun entalpi değişimi

λ : Su içeriği

H_2O : Su

s : Suyun hacim kesri

ζ : Spesifik aktif yüzey alanı

$S_{s,i}$: Türlerin kaynak terimi

μ : Viskozite

i_L : Yakıt hücresinden çekilebilecek maksimum akım

[ ] : Yerel tür konsantrasyonu

r_w : Yoğunlaşma oranı

ρ : Yoğunluk

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 5.1 : Modelde kullanılan yakıt hücrelerinin boyutları 34
Tablo 5.2 : Süreklilik bölge tiplerinin tanımı. 38
Tablo 5.3 : Sınır bölgesi tanımlamaları. 39
Tablo 5.4 : Sayısal analizde kullanılan elektrokimyasal parametreler. 42
Tablo 5.5 : Sayısal analizde kullanılan sınır şartları. 43

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Daha düşük ısıtma değerlerine dayalı olarak çeşitli yakıtlar için özgül enerji (kütle başına enerji veya gravimetrik yoğunluk) ve enerji yoğunluğu (hacim başına enerji veya hacimsel yoğunluk) karşılaştırması. 2
Şekil 2.1 : Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi. 4
Şekil 2.2 : Yakıt hücresinin şematik gösterimi. 5
Şekil 2.3 : Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresi şematik gösterimi 8
Şekil 2.4 : Elektrodun iç yapısı. 11
Şekil 2.5 : Alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi. 13
Şekil 2.6 : Fosforik asit yakıt hücresinin şematik gösterimi. 14
Şekil 2.7 : Katı oksit yakıt hücresinin şematik gösterimi 15
Şekil 2.8 : Eriyik karbonat yakıt hücresinin şematik gösterimi 17
Şekil 2.9 : Yakıt hücresi kayıpları …. 18
Şekil 4.1 : ϕ_{sol} ve ϕ_{mem} elektrik potansiyeli için FLUENT'de kullanılan sınır şartları. 28
Şekil 5.1 : Tek kanallı bir yakıt hücresinin şematik gösterimi 34
Şekil 5.2 : Solidworks programında oluşturulan akış kanal geometrileri; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) yaprak damar yapısıve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 35
Şekil 5.3 : Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım. 36
Şekil 5.4 : Murray kanununa göre oluşturulan kanal tasarımının geometrik boyutları 36
Şekil 5.5 : Mesh işlemi yapılmış serpantin tasarıma sahip PEM yakıt hücresi. 37
Şekil 5.6 : Mesh işlemi yapılmış yaprak tasarıma sahip PEM yakıt hücresi 38
Şekil 5.7 : Yaprak tasarım modeli üzerindeki sınır şartları. 40
Şekil 5.8 : Çözüm algoritmasının akış diyagramı. 41
Şekil 6.1 : 300 iterasyon uygulanan yaprak modelinin kalıntı (residuals) değerleri .. 44
Şekil 6.2 : Serpantin, yaprak ve murray kanuna göre oluşturulan yaprak tasarımlarının farklı hücre voltajlarında elde edilen performans verileri .. 46
Şekil 6.3 : 0,75 V hücre voltajında katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 47
Şekil 6.4 : 0,45 V hücre voltajında katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 48
Şekil 6.5 : 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki basınç dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 49
Şekil 6.6 : 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki hız dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 50

Şekil 6.7 : 0,75 V hücre voltajında katot katalizör tabakası/membran arayüzü sıcaklık dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....51
Şekil 6.8 : 0,75 V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....52
Şekil 6.9 : 0,45 V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....53
Şekil 6.10 : 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....54
Şekil 6.11 : 0,45 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....55
Şekil 6.12 : 0,75 V hücre voltajında katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyon dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....57
Şekil 6.13 : 0,45 V hücre voltajında katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyon dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.....58
Şekil 6.14 : 0,75 V hücre voltajında membrandaki su içeriği dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 59
Şekil 6.15 : 0,45 V hücre voltajında membrandaki su içeriği dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım 60

PEM TİPİ YAKIT HÜCRESİ REAKTANT AKIŞ KANALLARININ ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ

ÖZET

Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücreleri, yüksek enerji verimlilikleri ve daha az çevre kirliliği oluşturması gibi avantajları sebebiyle ilgi görmeye başlamıştır. PEM yakıt hücrelerinde bipolar plakalar üzerinde yer alan gaz akış kanalları, reaktant gaz dağılımını ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan suyu hücreden atılmasını sağlamaktadır. Akış kanal tasarımı yakıt hücresi performansı açısından önemli bir yere sahiptir ve bu konuda literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmada reaktant gaz dağılımının daha homojen olduğu ve su tahliye kabiliyetinin daha iyi olduğu bir akış kanal tasarımı geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu konuda doğadan esinlenerek bir yaprak tasarım ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım modelleri literatürde sıkça karşılaşmakta olduğumuz serpantin tasarım modeli ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma Ansys FLUENT programı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 4 cm^2 aktif alana sahip olan yakıt hücresi modelleri için farklı hücre voltajlarında (0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V) analizler gerçekleştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Hücre içerisindeki basınç, hız, sıcaklık, akım yoğunluğu, reaktant gaz dağılımları, reaksiyon sonucu oluşan suyun membran ve katot kanallarındaki dağılımları incelenmiştir. Oluşturulan bu üç tasarımın düşük akım yoğunluklarında yaklaşık olarak aynı performanslara sahip oldukları görülmüştür. Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımın 0,8 mA/cm^2 gibi yüksek akım yoğunluklarında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Buradan murray kanununa göre oluşturulan bu yaprak tasarımın su tahliye kabiliyetinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda akış kanal uzunluğunun büyük olmasının hücre performansını kötü yönde etkilediği görülmüştür. Bu çalışmada akış kanal optimizasyonunun PEM yakıt hücrelerinin yüksek akım yoğunluğu değerlerinde su yönetiminin iyileştirilerek konsantrasyon kayıplarının azaltılmasıyla performanslarının artacağını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: PEM Yakıt Hücreleri, Akış kanal tasarımı, HAD

THREE DIMENSIONAL MODELING OF PEM TYPE FUEL CELL REACTANT FLOW CHANNELS

SUMMARY

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells have begun to attract attention due to their advantages, such as high energy efficiency and less environmental pollution. Gas flow channels located on bipolar plates in PEM fuel cells allow the distribution of reactant gas and the removal of water formed as a result of electrochemical reactions from the cell. Flow channel design has an important place in terms of fuel cell performance, and many studies on this topic are included in the literature. In this study, an attempt was made to develop a flow channel design in which the reactant gas distribution is more homogeneous and the water discharge capability is better. In this regard, a leaf design inspired by nature and leaf design models created according to murray's law have been compared with the serpentine design model, which we often encounter in the literature. The study was carried out by Computational Fluid Dynamics (HAD) method using Ansys FLUENT program. In the study, the results were examined by analyzing different cell voltages (0.45V, 0.55V, 0.65V, 0.75V, 0.85V) for fuel cell models with an active area of 4 cm^2. Pressure, velocity, temperature, current density, reactant gas distributions, the distribution of water formed as a result of the reaction in the membrane and cathode channels were studied. These three designs were found to have approximately the same performance at low current densities. The leaf design created by Murray's law was found to perform better at high current densities such as 0.8 mA/cm^2. From here, it is concluded that this leaf design, created according to murray's law, has a better ability to drain water. At the same time, large flow channel length was found to have a bad effect on cell performance. In this study, flow channel optimization showed that PEM fuel cells would improve their performance by improving water management at high current density values and reducing concentration losses.

Keywords: PEM fuel cells, flow channel design, CFD

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılmakta olan petrol kökenli yakıtların yenilenebilir enerji kaynağı olmamasının yanında çevreye vermiş olduğu zarar düşünüldüğünde alternatif enerji kaynakları arayışını kaçınılmaz hale getirmektedir. Bunun yanında dünya nüfusundaki artış, sanayileşme ve enerjiye olan ihtiyacın artması fosil kökenli yakıtların yetersizliliğine ve hızla azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların yanmasıyla açığa çıkan zararlı gazların doğaya salınması doğanın dengesinin bozulmasına, küresel ısınma, sera etkisi, iklimsel bozulmalar gibi çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Hidrojen, dünyada en çok bulunan elementlerden biridir. Basitliğine ve bolluğuna rağmen, hidrojen dünyada nadiren gaz halinde bulunur.

Hidrojen, bir yakıt hücresinde tüketildiğinde atık olarak sadece su oluşan temiz bir yakıttır. Hidrojen, doğal gaz, nükleer enerji, biyokütle, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilir. Bu nitelikler, onu ulaşım ve elektrik üretimi uygulamaları için çekici bir yakıt seçeneği haline getirmektedir. Ulaşım araçlarında, evlerde, taşınabilir güç için ve daha birçok uygulamada kullanılabilir bir alternatif haline gelmektedir.

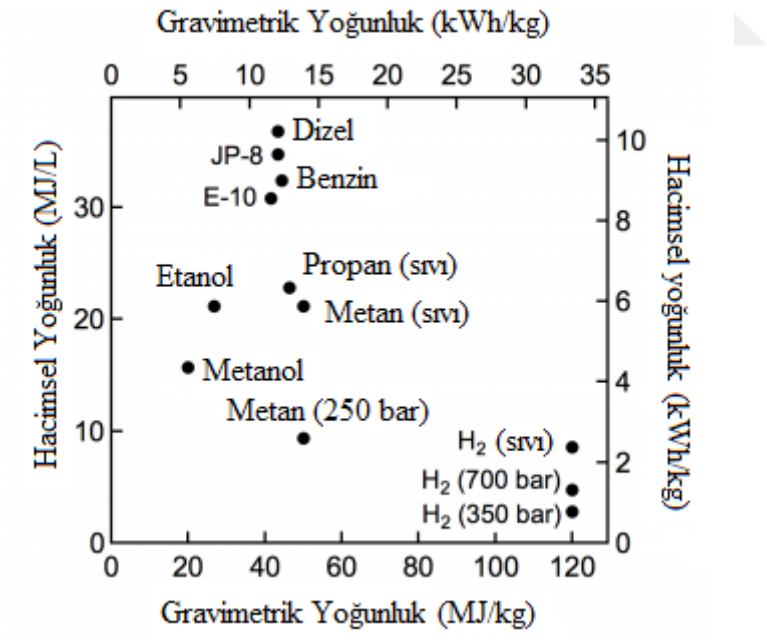
Hidrojen çevremizde bol miktarda bulunur. Su (H_2O), hidrokarbonlar (metan, CH_4) ve diğer organik maddelerde bulunduğu gibi. Hidrojeni yakıt olarak kullanmanın zorluklarından biri, onu bu bileşenlerinden verimli bir şekilde ayırabilmektir. Günümüzde hidrojen yakıtı birkaç yöntemle üretilebilmektedir. Günümüzde en yaygın yöntemler doğal gaz reformu (ısıl işlem) ve elektrolizdir. Diğer yöntemler arasında güneş enerjisiyle çalışan ve biyolojik süreçlerle üretilen yöntemler bulunur.

Şu anda, hidrojeni çıkarmak için yüksek sıcaklıktaki buharı doğal gazla birleştiren buhar reformu, Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilen hidrojenin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Hidrojen ayrıca elektroliz yoluyla sudan da üretilebilir. Bu yöntemde enerji ihtiyacı daha yoğundur, ancak rüzgar veya güneş gibi yenilenebilir

enerji kullanılarak ve diğer enerji üretim türleriyle ilişkili zararlı emisyonlardan kaçınarak yapılabilir. Kütle bazında, hidrojenin enerji içeriği benzinin yaklaşık üç katıdır (hidrojen için 120 MJ/kg, benzin için 44 MJ/kg.), hacim bazında ise bu durumun tersi söz konusudur (sıvı hidrojenin yoğunluğu 8 MJ/L iken benzinin yoğunluğu 32 MJ/L). Binek araçlarda sürüş menzilini karşılamak için 5 ila 13 kg hidrojenin depo edilebilmesi yeterli olacaktır [1].

Hidrojenin üretiminin aksine depolanması ve taşınması daha maliyetli ve çok tehlikelidir. Hidrojenin depolanması, sabit güç, taşınabilir güç ve ulaşım gibi uygulamalarda hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin kullanılması ve ilerlemesini etkileyecek en önemli faktörlerdendir.

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi yüksek yoğunluklu hidrojenin depolanması, sabit ve taşınabilir uygulamalar için bir zorluktur ve taşınması çok zahmetlidir. Halihazırda mevcut olan depolama seçenekleri, tipik olarak hidrojeni gaz halinde depolayan büyük hacimli sistemleri gerektirir.



Şekil 1.1 Daha düşük ısıtma değerlerine dayalı olarak çeşitli yakıtlar için özgül enerji (kütle başına enerji veya gravimetrik yoğunluk) ve enerji yoğunluğu (hacim başına enerji veya hacimsel yoğunluk) karşılaştırması [1].

Bununla birlikte, yakıt hücresi ile çalışan araçlar, hidrojenin araca hızlı ve kolay bir şekilde dolumunun yapılması ve uzun yolda araca yetecek kadar yakıtın depo edilebilmesi gerekmektedir. Gereken büyük depolama hacimlerinin daha büyük araçlar için pek sıkıntılı bir durum olarak görülmeyebilir, ancak binek araçlar için yeterli hidrojen depolanması halen sorun olmaktadır.

Bir yakıt hücresinde hidrojen enerjisi, yüksek verimlilik ve düşük güç kayıpları ile doğrudan elektriğe dönüştürülür. Hidrojen, bu nedenle, diğer kaynaklardan üretilen enerjiyi taşımak, depolamak ve iletmek için kullanılan bir enerji taşıyıcısıdır.

Yakıt hücreleri, enerji ve çevre sorunlarına alternatif bir çözüm olarak görülmektedir. Yüksek dönüşüm verimliliği, kompakt yapıda olmaları ve emisyon problemlerinin olmaması gibi avantajları yakıt hücrelerini, içten yanmalı motorlara ve portatif uygulamalarda akülerin ve pillerin yerini alabilecek bir teknoloji haline getirmiştir. Yakıt hücresi çeşitleri arasında, proton değişim membranı (PEM) yakıt hücresi düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek verimleriyle daha fazla dikkat çekmektedir [2].

Bir yakıt hücresinin ana problemlerinden biri, katot reaksiyonu tarafından üretilen sudur, çünkü oksijenin gaz difüzyon katmanından katalizör yüzeyine geçişini engeller. Bununla birlikte, su oksijen akışı ile uzaklaştırılır. Ayrıca, bir PEM yakıt hücresi, elektrik güç çıkışına benzer bir miktar atık ısı üretir, böylece enerji verimliliğini yaklaşık % 50 ile sınırlar. Bu ısı esas olarak üç nedenden dolayı üretilir: elektrokimyasal reaksiyonlar, ohmik ısıtma ve su yoğunlaşması [3].

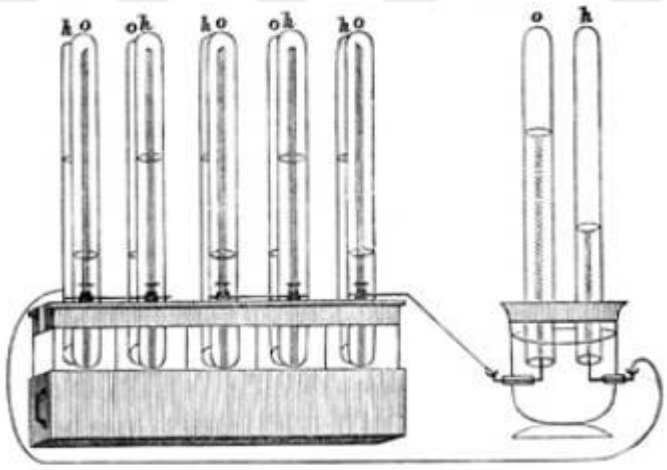
Yakıt hücrelerinde akış alanı tasarımı yakıt hücresinin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Mevcut araştırma sonuçları göstermektedir ki, uygun akış alanı tasarımının yakıt hücresi performansını önemli ölçüde artırabilir aynı zamanda da reaktant gaz dağılımının da homojen olmasını buna bağlı olarak da hücre içerisinde oluşabilecek direncin de az olmasını sağlayacaktır [4].

Bu çalışmada da daha önceki yapılmış çalışmalar doğrultusunda yakıt hücresi performansını iyileştirebilmek ve uygun akış alanı tasarımını elde etmek amacıyla sayısal modelleme yöntemiyle serpantin ve doğadan esinlenerek modellenen yaprak tasarımının karşılaştırması yapılmıştır.

BÖLÜM 2. YAKIT HÜCRELERİ

2.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi

Yakıt hücreleri ilk olarak 19. yüzyılın sonunda geliştirilmeye başlanmıştır. İlk yakıt hücresi uygulaması Apollo uzay pragramı için 1960'larda yapılmıştır ve günümüzde de yakıt hücreleri uzayla ilgili yapılan projelerde kullanılmaya devam etmektedir. 1839 yılında Sir William Grove seyreltik sülfirik asit çözeltisine batırılmış iki platin elektrottan meydana gelen bir düzenekte hidrojen ve oksijen oluşumunu gözlemlemiştir (Şekil 2.1). Daha sonraki çalışmalarında Grove, önceki çalışmasında kullandığı düzenekten elli tanesini bir araya getirerek hazırladığı yeni düzenekte daha fazla akım elde etmeyi başarmıştır [5].



Şekil 2.1 : Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi [5].

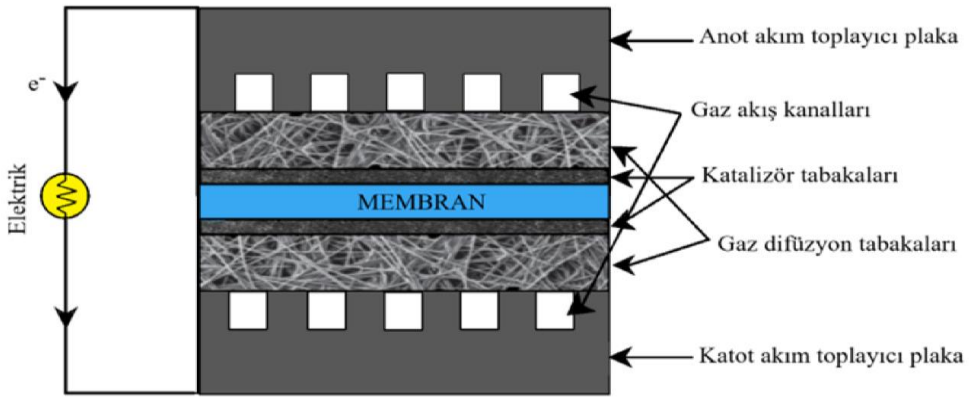
Yakıt hücresi ifadesi ilk olarak 1889'da Ludwig Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un yaptığı çalışmalar esas alınarak oluşturulmuştur. Mond ve Langer geliştirdikleri yakıt hücresinde, oksijen kaynağı olarak havayı ve hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1.5 W güç sağlayarak, %50 çalışma verimliliğini elde etmişlerdir. 1894 yılında Friedrich Wilhelm Ostwald kömür esaslı yakıtlarla çalışan elektrokimyasal bir hücre hazırlamıştır. 1932 yılında F. Thomas

Bacon ilk olarak başarılı bir yakıt hücresi geliştirmiştir. 1952 yılında Bacon ve çalışma arkadaşları 5 kW sağlayan bir yakıt hücresi meydana getirmişlerdir. Aynı dönemde Harry K. Ihring 20 beygir güce sahip yakıt hücresiyle çalışan traktör tasarlamıştır [5].

PEM yakıt hücreleri, 1960'lı yıllarda, General Electric'de Thomas Grubb ve Leonard Niedrach'ın çalışmaları neticesinde bulunmuştur. "United States Navy's Bureau of Ships (Elektronics Division)" ve "The United States Army Signal Corps" şirketleri birlikte küçük bir yakıt hücresi geliştirdiği zaman, General Electric 1960'lı yılların ortalarında başarılarını duyurmuşlardır. Hücre, su ve lityum hidrat karışımının üretmiş olduğu hidrojen ile çalışmaktaydı. Bu yakıt karışımı, kullanımı sonrasında çevreye zarar vermeyen ve kullanımı kolay metal kap içerisinde tutuluyordu. Hücre küçük ve taşınabilirdi, fakat pilatin katalizörü pahalıydı [6].

2.2. Yakıt Hücreleri Nedir ve Nasıl Çalışır?

Yakıt hücreleri yakıt ve oksitleyicinin elektrokimyasal reaksiyonu sonucu elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Yakıt hücresi reaksiyonu elektrolizin ters reaksiyonu olarak tanımlanabilir ve reaksiyon sonucu doğru akım üretilmektedir. Yakıt hücreleri, elektrokimyasal reaksiyonlar ile elektrik üretmeleri yönünden piller ve akülere benzemektedirler fakat açığa çıkardıkları enerji, piller ve akülerdekinin aksine içerisinde depo edilen enerji ile sınırlı değildir. Yakıt hücreleri, gerekli yakıt ve oksitleyici (hava) sağlandığı sürece sürekli enerji üretimi yapabilen sistemlerdir. Şekil 2.2'de bir yakıt hücresi ve çalışması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.2: Yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Yakıt hücreleri temel olarak; elektrolit ve bu elektrolitin tüm yüzeyiyle temas halinde olan gözenekli yapıya sahip anot ve katot elektrotlarından oluşmaktadır. Elektrotların arasında elektrolit (membran) yer alır. Hücrenin anot (negatif) tarafına (elektroduna); gaz yakıt, katot (pozitif) tarafına (elektroduna); hava ya da oksijen gönderilir. Hücreye gönderilen yakıt ve oksijenin reaksiyona girmesiyle anot ve katot elektrotları arasındaki potansiyel fark elektron transferi oluşur ve elektrik akımı üretilir. Bu elektrokimyasal reaksiyon sonucu su, ısı ve karbon içerikli bir yakıt kullanılması durumunda karbondioksit oluşmaktadır. Yakıt hücrelerinde anot-elektrolit-katot birleşiminden oluşan yapıya "Membran Elektrot Grubu-Membrane electrode assembly (MEA)" denilir. Yakıt hücrelerinde meydana gelen gerilim 1 Volt'un altında olduğundan birden fazla yakıt hücresi bir araya getirilerek, daha yüksek gerilim değerleri elde edilebilmektedir. Anot, katot ve elektrolitten meydana gelen yakıt hücrelerinde yakıt ve oksijen akışını yönlendiren, hücreye mekanik destek sağlayarak bir arada tutan, hücreler arasında bağlantıyı oluşturan yakıt hücresi bileşenleri vardır. Hücreler arasında bağlantı anot ve katot elektrotlarıyla temas halinde olan "Akım Toplayıcı Plakalar (bipolar plakalar)" ile sağlanır. Bipolar plakaların malzemesi olarak genellikle; ısıl ve elektriksel olarak iletken, mekanik dayanıma sahip ve kimyasal olarak kararlı yapıları sebebiyle grafit malzeme kullanılmaktadır. Grafitin bu avantajlarının yanında işleme güçlüğü ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle çelik ve benzeri metal içerikli malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yakıt hücrelerinde reaktant akış kanalları da bipolar plakalar üzerinde bulunmaktadır. Reaktant akış kanalları farklı şekillerde tasarlanabilmektedir. Yakıt hücrelerinde reaksiyon oluşum hızını arttırmak için katalizörler kullanılır. Bu katalizörler, yakıt hücresi tipine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle anot ve katot elektrotlarıyla temas halinde katalizörler kullanılır [7].

2.3. Yakıt Hücrelerinin Çeşitleri

Günümüzde birçok yakıt hücresi türü araştırılmaktadır. Yakıt hücreleri kullanılan yakıtın türüne, elektrolit tipine, çalışma sıcaklığına vb. göre sınıflandırılmaktadır. En yaygın olarak rastlanan yakıt hücresi çeşitleri şunlardır:

1. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFC)
2. Alkali Yakıt Hücreleri (AFC)

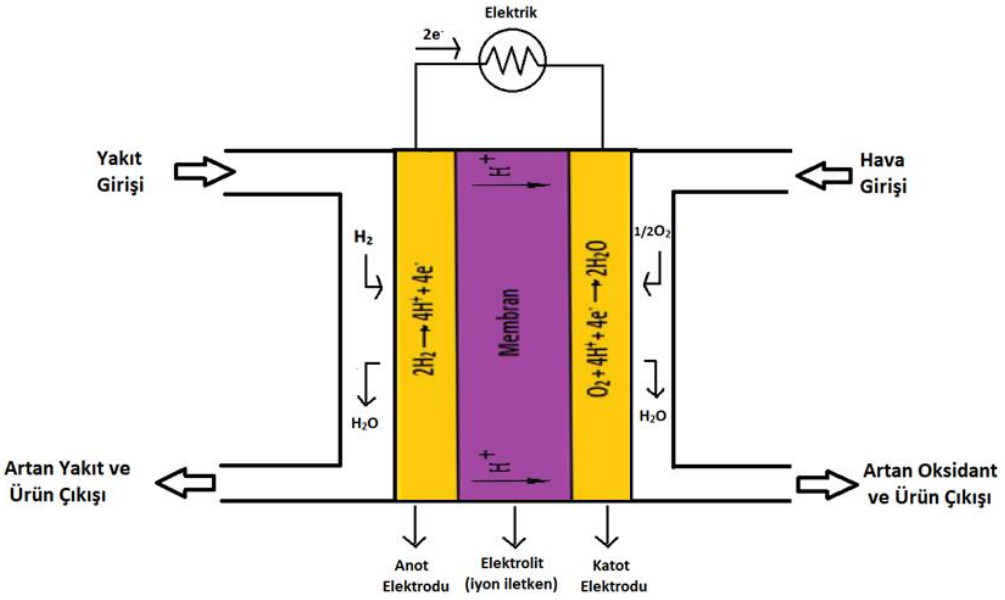
3. Fosforik Asit Yakıt Hücreleri (PAFC)
4. Katı Oksit Yakıt Hücreleri (SOFC)
5. Eriyik Karbonat Yakıt Hücreleri (MCFC)
6. Doğrudan Metanol Yakıt Hücreleri (DMFC)

Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri doğrudan metanol yakıt hücreleri ile kullanılan yakıt dışında oldukça benzerdirler. Bunların dışında literatürde aşağıdaki yakıt hücresi çeşitleri de görülmektedir:

1. Çinko Hava Yakıt Hücreleri (ZAFC)
2. Protonik Seramik Yakıt Hücreleri (PCFC)
3. Biyolojik Yakıt Hücreleri (BFC)
4. Doğrudan Bor Hidrür Yakıt Hücreleri
5. Metal Hidrür Yakıt Hücreleri
6. Formik Asit Yakıt Hücreleri
7. Doğrudan Etanol Yakıt Hücreleri
8. Rejeneratif Yakıt Hücreleri

2.3.1. Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücreleri

Polimer elektrolit membran (proton değişim membranı) yakıt hücreleri, düşük ağırlıkları ve az yer kaplamalarının yanında yüksek güç yoğunluğu sağlarlar. Bir PEM yakıt hücresinin, negatif yüklü bir elektrot (anot), pozitif yüklü bir elektrot (katot) ve bir elektrolit (membran) temel yapısını oluşturur. Hidrojen anotta protonlarına (H^+) ayrışır ve sadece protonların geçişine izin veren elektrolitten geçerek katoda taşınır, elektronlar ise harici bir devre ile katoda taşınır. Katot kısmına da aynı şekilde hava gönderilir. Katotta oksijen, proton ve elektronlar reaksiyona girerek suyu oluştururlar. Elektronlar harici devreden geçerek elektrik üretmiş olurlar. PEM yakıt hücresinin elemanları ve gerçekleşen reaksiyonlar Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresi şematik gösterimi.

PEM yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir;

Anot reaksiyonu: $H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e^-$ (2.1)

Katot reaksiyonu: ${}^1/_2\, O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O$ (2.2)

Toplam reaksiyon: $H_2 + {}^1/_2\, O_2 \leftrightarrow H_2O$ (2.3)

Yakıt hücresi içerisinde elektrokimyasal reaksiyonların yanı sıra reaktant gaz akışı, sıvı suyun taşınımı ve kütle taşınım işlemleri de gerçekleşir. Bu olayların gerçekleşmesi ile iki önemli problem ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerden ilki yakıt hücresi içerisinde oluşan suyun yönetimi ve ikinci olarak ise kütle transferi olaylarıdır. PEM yakıt hücrelerinde elektrolitin iyonik iletkenliğinin sağlanması için nemli olması gerekmektedir. Membranın su içeriği; anottan katoda membran üzerinden protonların geçmesine bağlı olarak suyun sürüklenmesi, katotta oluşan suyun (membranın tamamen nemli olduğu durumlar için) geri difüzyonu ve suyun rektant gaz akışının etkisiyle ters tarafa difüzyonuna bağlıdır. İyi bir yönetim olmadığı durumda yakıt hücresinde bir dengesizlik oluşur ve bu da membranın kuruması veya elektrotların su içerisinde kalmasına neden olabilir.

Genel olarak bir PEM yakıt hücresinin bileşenleri şunlardır;

- Elektrolit (membran)
- Gaz difüzyon tabakası
- Elektrotlar
- Bipolar plakalar
- Akım toplayıcılar
- Sonlandırıcı plakalar
- Contalar

2.3.1.1. Elektrolit (Membran)

PEM yakıt hücrelerinde kullanılan elektrolitin en önemli işlevi, anot kısmında hidrojenin reaksiyonu sonucu oluşan hidrojen protonlarının katot tarafına geçişine izin vermek ve elektronların geçişini engellemektir. Bu sebeple membranın proton (iyon) iletkenliği iyi olmalı, anot ve katot tarafındaki gazların birbirine karışmaması gerektiği için gaz geçirgenliği olmamalı ve yakıt hücresi içerisinde çalışabilecek şekilde de dayanıklı olması gerekmektedir. Ayrıca membranın iyon iletkenliğinin iyi olabilmesi için nemli olması gerekir. Eğer membran yeteri kadar nemlendirilmezse iç direnç artar. Membranın nemlendirilmesi amacıyla hücre içerisinde elektrokimyasal reaksiyon sonucu üretilen suyun dışında, anot kısmına gönderilen hidrojenin harici bir nemlendirici kullanılarak nemlendirilmesi sağlanmaktadır.

Yakıt hücrelerinde membran olarak perfluorokarbon esaslı iyon değiştirici membranlar kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan elektrolit malzemesi Nafion'dur. Dupont firması tarafından geliştirilen bu malzemenin birçok çeşidi bulunmakla birlikte en yaygın kullanılanı Nafion®'dur.

2.3.1.2. Gaz difüzyon tabakası (GDL)

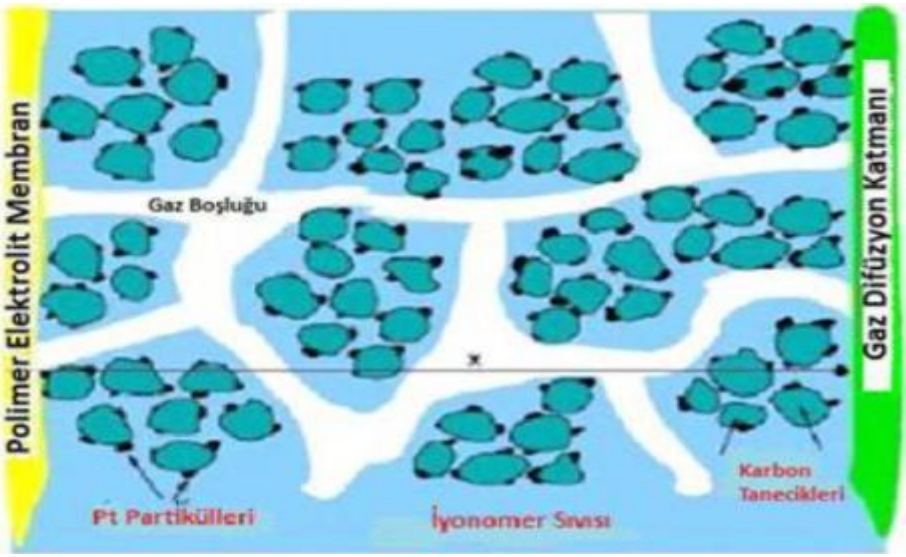
Gaz difüzyon tabakaları bipolar plaka ile katalist tabaka arasında bulunmaktadır. PEM yakıt hücrelerinde gözenekli gaz difüzyon tabakası, reaktant gazların anot ve

katot yüzeyine homojen dağılımını sağlarlar. Bunun yanında reaksiyon sonucu üretilen suyun elektrot yüzeylerinden tahliyesini sağlarlar. Ayrıca membran için mekanik destek sağlar. Gaz difüzyon tabakası malzemesinden beklenen özellikler ise, elektrik iletkenliği ve ısıl iletkenlik, gözeneklilik ve düşük maliyettir. En yaygın olarak kullanılan GDL malzemesi karbon kumaş veya karbon kağıttır. Gözenekli ve gaz geçirgen yapıda olduklarından hidrofobik (su sevmez) yapıdadırlar.

2.3.1.3. Elektrotlar

Elektrokimyasal reaksiyonlar anot ve katot katalizör yüzeyleri üzerinde gerçekleşmektedir. PEM yakıt hücreleri çalışma sıcaklıkları düşük olduğundan aktivasyon kayıplarını azaltarak yeterli reaksiyon seviyesine ulaşabilmesi amacıyla elektrotlar değerli materyalleri içerisinde bulundurmaktadır. Elektrotların içerdiği bu değerli materyaller nedeniyle elektrot tasarımında ana amaç düşük metal içeriğine ulaşmaktır. Bu nedenle ince film elektrotları alternatif olarak görülmektedir. İnce film elektrodu Nafion bağlı olarak proton iletkenliği iyi olduğundan hücre performansını iyileştirir. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi ince film elektrodu, karbon parçacıkları üzerinde bulunan küçük platinyum parçacıklarından oluşan ve proton iletimini sağlamak amacıyla gözenekli bir yapıya sahip olan katmandan oluşmaktadır. Elektrotların kalınlığı mikrometre derecesinde çok ince bir yapıdadır. Sahip oldukları platinyum içerikleri ise 0,1–0,4 mg/cm^2 arasında değişmektedir [8].

Elektrot yüzeylerinde reaksiyonların gerçekleşebilmesi için, katalizör parçacıklarının protonik ve elektronik iletkenlerle temas edebilmesi gerekmektedir. Ayrıca reaktantların katalizör yüzeyine ulaşabilmesi ve reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin hücrreden uzaklaştırılması amacıyla gözenekli bir yapıya sahip olması gerekir. Yakıt hücresi elektrotları/katalizörleri molekülleri protonlara ve elektronlara ayırmada çok iyi olmalı, geniş yüzey alanına sahip olmalı ve maliyetleri düşük olmalıdır. Bu gereksinimlerden en önemliside reaktantları proton ve elektronlarına ayırmada daha etkili olan düşük maliyetli bir katalizör tercih etmektir.



Şekil 2.4 : Elektrodun iç yapısı [8].

2.3.1.4. Bipolar plakalar

PEM yakıt hücrelerinde bipolar plakalar üzerinde yer alan gaz akış kanalları reaktant gazların aktif bölge yüzeyine dağılmasını ve reaksiyon sonucu oluşan suyun tahliyesini sağlarlar. Bunun yanı sıra soğutucu sıvı kanalları da yine bipolar plakalar üzerinde yer almaktadır.

Günümüzde grafit ve kompozitleri temas dirençlerinin az olması ve korozyona karşı dirençli olmaları nedeniyle bipolar plaka malzemesi olarak tercih edilmektedir. Ancak grafit kırılgan ve gaz geçirgenliği yüksek bir malzemedir. Bunun yanında işlenmesi ve seri imalatı da zor olan malzemelerdir. Alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum gibi malzemeler daha az maliyetle ve seri imalata uygunluğu bakımından PEM yakıt hücreleri bipolar plakalarında kullanılabilecek malzemelerdendir. Metal esaslı malzemeler; mekanik olarak daha dayanıklı olması, gaz geçirgenliklerinin az olması, karbon esaslı malzemelere göre daha düşük maliyet ve seri üretime uygunluk gibi avantajlara sahiptirler. Ancak metal esaslı malzemelerin bipolar plakalarda kullanılması durumunda metal malzemenin yakıt hücrelerindeki asidik ve nemli ortamın sebep olduğu korozyona karşı dayanıklı olmaması, PEM yakıt hücresinin performansının düşmesine neden olan pasif tabakanın oluşumu ve bipolar plaka yüzeyinden koparak elektrolit ve katalizör tabakasına zarar veren metal iyonlarının oluşumu dezavantaj oluşturmaktadır [9].

Çoğu zaman yakıt hücrelerinin soğutulması için gerekli olan soğutucu yüzeyler bipolar plaka üzerinde yer almaktadır. Kullanılan soğutucu akışkan (hava ya da su) bu yüzeylerden geçirilerek yakıt hücresinin soğutulması sağlanır. Yakıt hücresi verimi için bipolar plakaların temas direncinin az olması, elektriksel iletkenliğinin ise yüksek olması tercih edilmektedir.

2.3.1.5. Sonlandırıcı plakalar

Yakıt hücrelerinde en dışda bulunan sonlandırıcı plakaların ana görevi tüm hücreleri bir arada tutarak sistemin mekanik bütünlüğünü sağlamak ve homojen sıkıştırma basıncı sağlamaktır. Bu sebeple sonlandırıcı plakların rijitliği ve mekanik dayanımı oldukça önemlidir. Aynı zamanda korozyona karşı da dirençli olmaları gerekmektedir.

2.3.1.6. Akım toplayıcılar

PEM yakıt pillerinde akım toplayıcılar sonlandırıcı plakalar ile bipolar plakalar arasında yer alırlar. Akım toplayıcı plakların PEM yakıt hücresi sistemindeki görevi hücreden elde edilen akımın toplanıp iletilmesidir. Bu sebeple akım toplayıcı plakalar elektrik iletkenliği iyi olan bakır, alüminyum vb. farklı iletken metallerden üretilebilir.

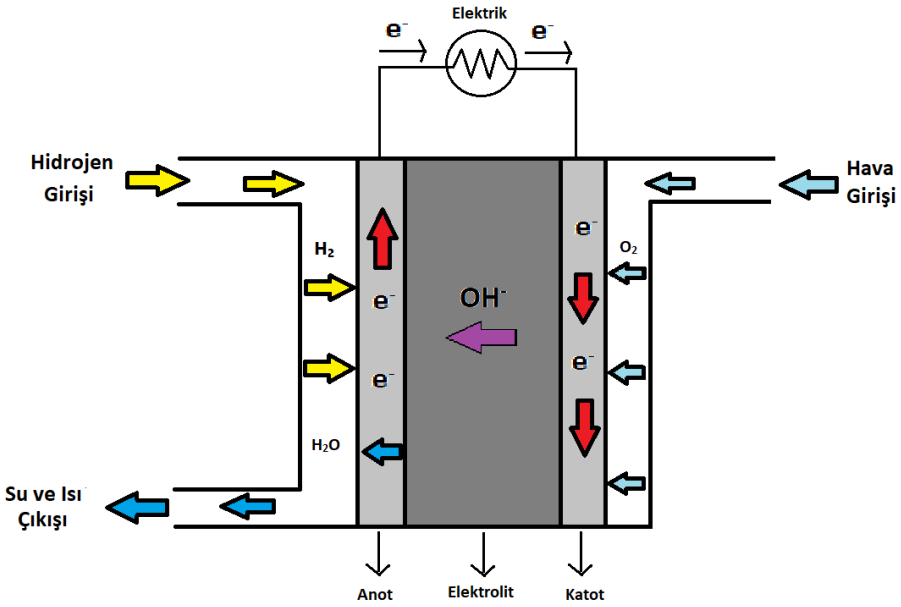
2.3.1.7. Contalar

Yakıt hücrelerinde sızdırmazlığı sağlamak amacıyla contalar kullanılmaktadır. Genellikle kullanılmakta olan conta malzemesi teflon ve slikondan oluşmaktadır. Contalar sızdırmazlığın yanı sıra sıcaklığa ve kimyasal etkilere karşı da dayanıklı olması gerekmektedir.

2.3.2. Alkali yakıt hücreleri

İlk olarak geliştirilen yakıt hücresidir. Uzay uygulamaları için NASA tarafından kullanılmıştır. Alkali yakıt hücrelerinde elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılır. Çalışma sıcaklıkları yaklaşık 80°C'dir ve verimleri %70'lere kadar ulaşabilmektedir. Alkali yakıt hücrelerinde katalizör olarak anot kısmında Ni ve katot kısmında ise Ag kullanılmaktadır. Bu yakıt hücrelerinde güç üretimi düşüktür. Alkali yakıt hücrelerinin gövdesinde bulunan maddelerin oksitleyici özelliği

karbondioksite karşı biraz duyarlıdır. Bunun nedeni ise karbondioksitin kimyasal özelliğinden dolayı elektrolitte bulunan potasyum hidroksit ile reaksiyona girmekte ve elektroliti tüketmekte ve akımın geçtiği elektrotları çok fazla olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 2.5'de alkali yakıt hücresi şematik olarak gösterilmiştir [10].



Şekil 2.5 : Alkali yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Alkali yakıt hücresi anot ve katot kısmında gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir;

Anot reaksiyonu: $H_2 + 2(OH)^- \leftrightarrow 2H_2O + 2e^-$ (2.4)

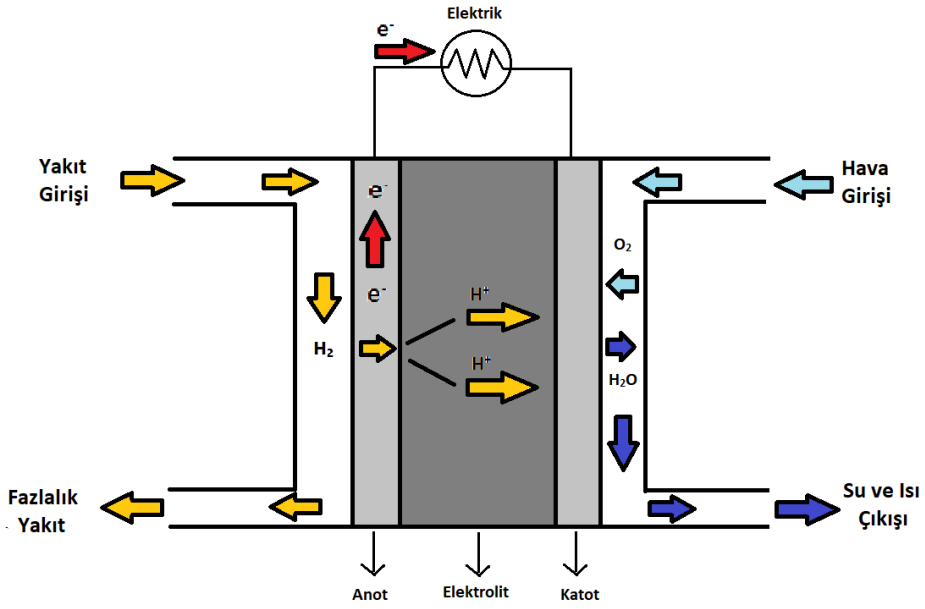
Katot reaksiyonu: ${}^1/_2\, O_2 + H_2O + 2e^- \leftrightarrow 2(OH)^-$ (2.5)

Toplam reaksiyon: $H_2 + {}^1/_2\, O_2 \leftrightarrow H_2O$ (2.6)

2.3.3. Fosforik asit yakıt hücreleri

Fosforik asit yakıt hücrelerinde elektrolit olarak fosforik asit kullanılmaktadır. Bu yakıt hücresinde kömür gazı, doğal gaz, LPG gibi yakıtlar kullanılmaktadır. Bu yakıt hücreleri daha çok güç santralleri ve yerinde kojenerasyon üniteleri uygulamalarında kullanılmaktadır. Çalışma sıcaklıkları 150-220 °C arasındadır. Fosforik asit yakıt hücrelerinde soy-metal katalizörler kullanmak gerekmektedir. Bu dezavajlarının yanında elektrolit olarak fosforik asit kullanımı çok iyi ısıl ve kimyasal kararlılık

sağlamaktadır. Düşük çalışma sıcaklıklarında fosforik asidin iyonik iletkenliği daha zayıftır. Fosforik asit yakıt hücreleri doğal gazdan elektrik üretimi için çok uygundur ve enerji verimleri yüksektir. Şekil 2.6' da PAFC şematik olarak görülmektedir [11].



Şekil 2.6 : Fosforik asit yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Fosforik asit yakıt hücresi anot ve katot kısmında gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir;

Anot reaksiyonu: $H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e^-$ (2.7)

Katot reaksiyonu: $^1/_2\, O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O$ (2.8)

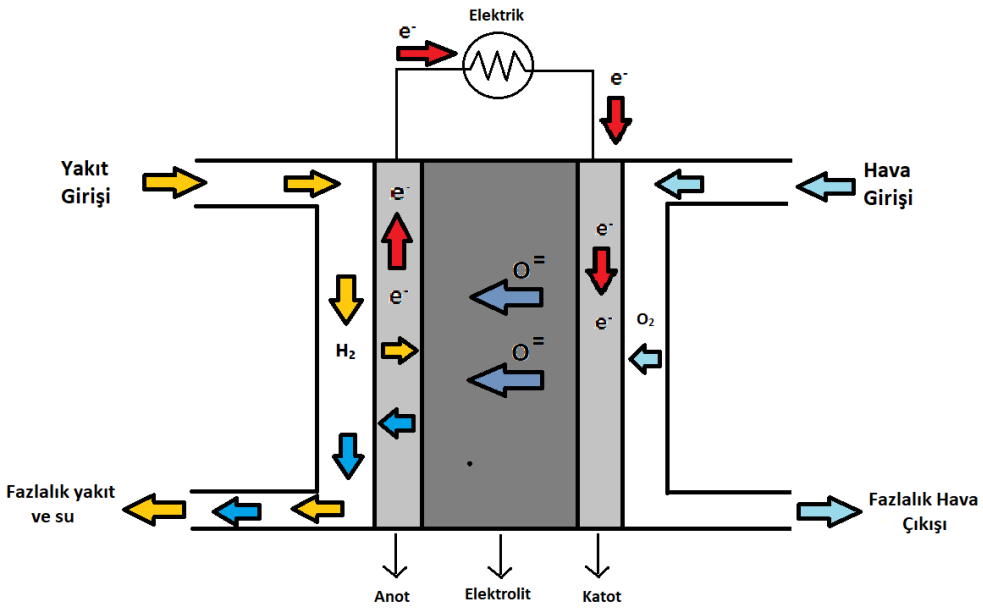
Toplam reaksiyon: $H_2 + {}^1/_2\, O_2 \leftrightarrow H_2O$ (2.9)

2.3.4. Katı oksit yakıt hücreleri

Katı oksitli yakıt hücreleri yaklaşık 1000 °C sıcaklıkta çalışırlar. SOFC'lerin çalışma verimleri % 60'a yaklaşmaktadır. Katı oksit yakıt hücreleri (SOFC), genellikle büyük güç üretim sistemlerinde kullanılan yakıt hücresi çeşididir. Şekil 2.7'de SOFC şematik olarak görülmektedir.

Katı oksit yakıt hücreleri şu şekilde çalışır; anot elektroduna gönderilen hidrojen elektrolitin içeriğinde bulunan oksijen iyonları ile reaksiyona girmesi sonucu su ve

elektrik akımı oluşmaktadır. Elektronlar dış devre yoluyla katot katot tarafına geçer. Bu elektronlar katot elektroduna gönderilen oksijen (O_2) gazı ile reaksiyona girmesiyle O^{2-} iyonlarına dönüşürler. Açığa çıkan bu O^{2-} iyonları elektrolitten geçerek anot tarafına geçerler. Bu yakıt hücreleri yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip olduğundan (~1000°C), düşük sıcaklıklarda çalışan yakıt hücrelerindeki gibi pahallı katalizörlerin kullanımına ihtiyaç yoktur. Reaktant gaz akışı sağlandığı sürece elektrik enerjisi üretilmektedir. Bu yakıt hücrelerinde elektrolit malzemesi olarak, zirkonyum oksit, seryum oksit, bizmut oksit gibi katı oksit bileşiğini içeriğinde bulunduran malzemeler kullanılmaktadır [12].



Şekil 2.7 : Katı oksit yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Katı oksit yakıt hücresi anot ve katot kısmında gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir;

Anot reaksiyonu: $H_2 + O^{2-} \leftrightarrow H_2O + 2e^-$ (2.10)

Katot reaksiyonu: $^1/_2\, O_2 + 2e^- \leftrightarrow O^{2-}$ (2.11)

Toplam reaksiyon: $H_2 + {}^1/_2\, O_2 \leftrightarrow H_2O$ (2.12)

2.3.5. Eriyik karbonat yakıt hücreleri

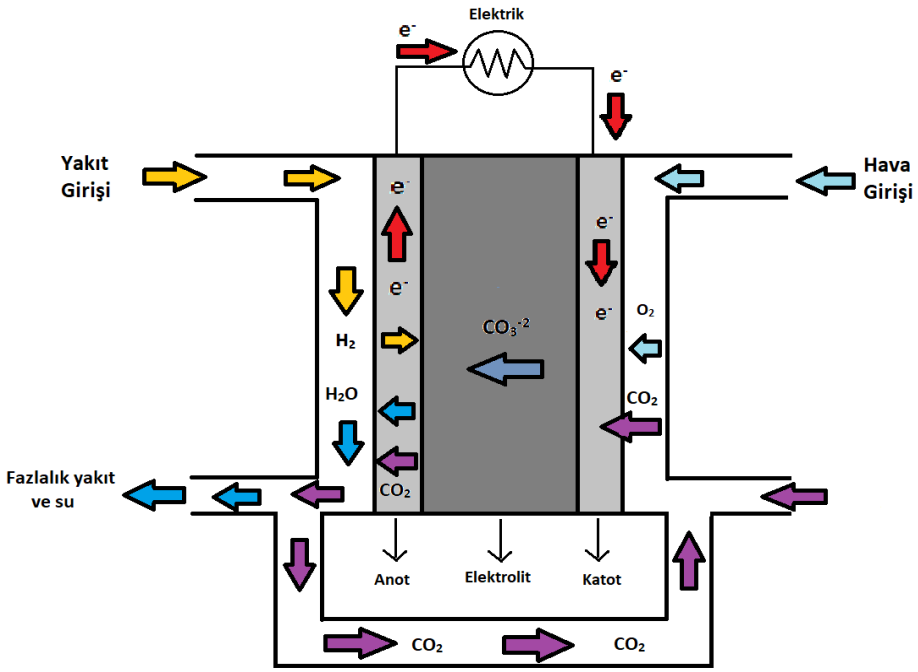
Eriyik karbonatlı yakıt hücreleri sabit uygulamalı güç üretim sistemlerinde kullanım için daha uygundur. Elektrolit olarak alkali (Li, Na, K) karbonat karışımları kullanılmaktadır. Bu yakıt hücrelerinde elektrolit gözenekli ve kimyasal olarak kararlı $LiAlO_2$ seramik matrisin içinde tutulur. Yüksek çalışma sıcaklıklarına sahip olduklarından (600-700 °C) pahallı katalizörlerin kullanımına gerek yoktur. Anot katalizörü olarak Ni-Cr, katot katalizörü olarak ise Li-Ni oksit kullanılmaktadır. Eriyik karbonatlı yakıt hücrelerinin verimi %60'a ulaşmaktadır. Eriyik karbonatlı yakıt hücrelerinde diğer yakıt hücrelerindeki gibi, hücre dışında yakıt dönüşüm ünitelerine gerek duymazlar. Yüksek çalışma sıcaklıkları sayesinde yakıtın hücre içinde hidrojene dönüşümü sağlanabilir. MCFC'ler CO zehirlenmesine ve diğer etkilere karşı dayanıklıdır. Bu yakıt hücrelerinde en önemli dezavantaj ise yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle hücre elemanlarının ömrünün kısa olmasıdır [13]. Şekil 2.8'de MCFC şematik olarak görülmektedir. Bu şekilde de görüldüğü gibi anot kısmında oluşan karbondioksit (CO_2) gazı bir sistemle tekrar katot kısmına gönderilerek tekrar kullanılıyorsa buna iç dönüşümlü eriyik karbonat yakıt hücresi denilir. Diğer yakıt hücrelerinde olduğu gibi atmosfere salınıyorsa dış dönüşümlü eriyik karbonat yakıt hücresi denilir.

Eriyik karbonat yakıt hücresi anot ve katot kısmında gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir;

Anot reaksiyonu: $H_2 + CO_3^{2-} \leftrightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ (2.13)

Katot reaksiyonu: $^1/_2\, O_2 + CO_2 + 2e^- \leftrightarrow CO_3^{2-}$ (2.14)

Toplam reaksiyon: $H_2 + {}^1/_2\, O_2 + CO_2 \leftrightarrow H_2O + CO_2$ (2.15)



Şekil 2.8 : Eriyik karbonat yakıt hücresinin şematik gösterimi.

2.3.6. Doğrudan metanol yakıt hücreleri

Yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen kullanılması halinde yüksek verim elde edilebilmekte ancak hidrojenin hacimsel olarak enerji yoğunluğunun az olması, taşıma ve depolama problemlerinin olması farklı yakıt arayışlarına sebep olmaktadır. Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde yakıt olarak metanol, elektrolit olarak da PEM yakıt hücreleri ile aynı elektrolit membran kullanılmaktadır. Metanolün yakıt hücrelerinde kullanımı normal şartlarda sıvı olması sebebiyle depolama kolaylığı sağlarken, yakıt hücrelerinin kullanım alanını da genişletmiş olur. Bu yakıt hücrelerinde kullanılan yakıt dışında çalışma şekli PEM yakıt hücreleri ile aynıdır. Hidrojen yerine, metanol ve su karışımı doğrudan yakıt olarak kullanılır. Anot kısmına gönderilen metanol Pt/Ru katalizör tabakasında elektronlarına ayrılarak iyon geçirgen membrandan protonlar katot kısmına geçerler. Negatif yüklü elektronlar ise dış devre yoluyla katot tarafına geçerler. Bu şekilde elektron hareketinin yarattığı

potansiyel fark elektrik akımı elde edilmesini sağlar. Katot kısmında hidrojen ve oksijen biraraya gelerek suyu oluştururlar [14].

Doğrudan metanol yakıt hücresi anot ve katot kısmında gerçekleşen reaksiyonlar şöyledir;

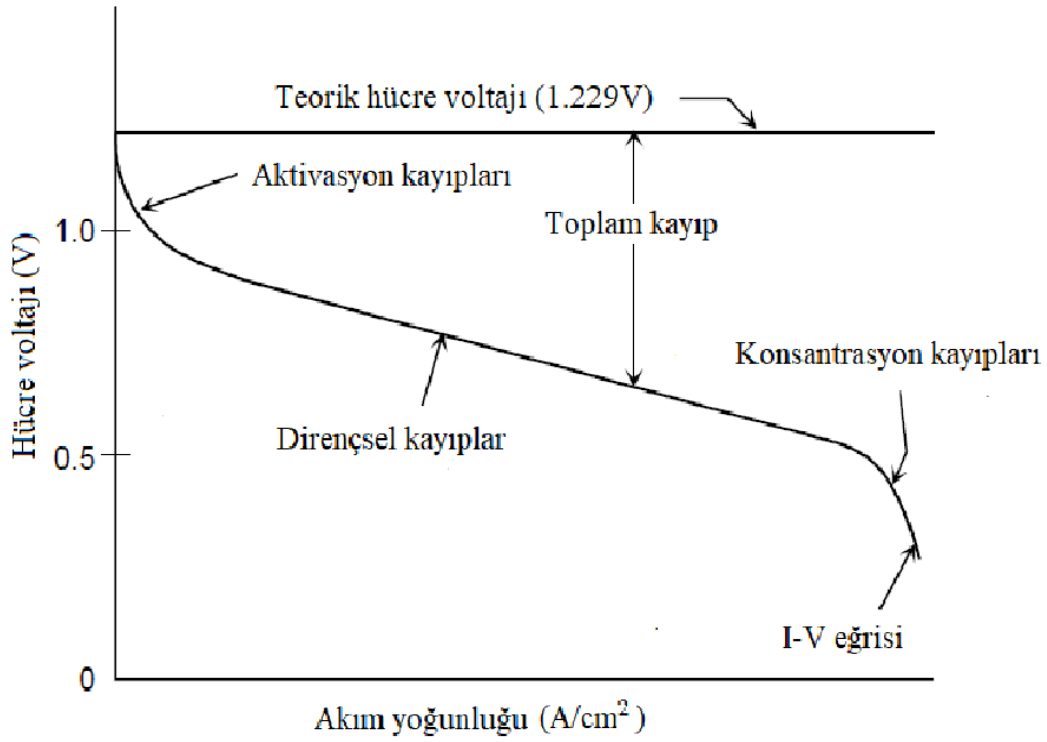
Anot reaksiyonu: $CH_3OH + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ (2.16)

Katot reaksiyonu: $6H^+ + {}^3/_2\, O_2 + 6e^- \leftrightarrow 3H_2O$ (2.17)

Toplam reaksiyon: $CH_3OH + {}^3/_2\, O_2 \leftrightarrow\ 2H_2O + CO_2$ (2.18)

2.4. Yakıt Hücresi Kayıpları

Yakıt hücrelerinde gerçek hücre potansiyeli tersinmez etkiler nedeniyle Şekil 2.9'da gösterildiği gibidir. Yakıt hücresinde gerçekleşen bu kayıplar; aktivasyon kayıpları (η_{akt}), dirençsel (ohmik) kayıplar (η_{ohm}) ve konsantrasyon kayıpları (η_{kon}) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.9: Yakıt hücresi kayıpları [15].

Aktivasyon kayıpları düşük akım yoğunluğunda daha yoğundur. Aktivasyon kayıpları elektrokimyasal etkiler nedeniyle oluşan kayıplardır. Dirençsel kayıplar hücre bileşenleri, temas dirençleri ve proton-elektron iletimi sırasında oluşan direnç yüzünden meydana gelen kayıplardır. Konsantrasyon kayıpları, kütle transferinin neden olduğu kayıplardır. Bu kayıplar, hücre reaksiyon bölgelerine yeterli reaktant akışı sağlamanın zorlaştığı yüksek akımlarda daha belirgin hale gelir.

2.4.1. Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon kayıpları, elektrot yüzeyindeki elektrokimyasal reaksiyon hızının yavaşlamasından kaynaklanan kayıplardır. Elektrot yüzeylerinde reaksiyonların gerçekleşmesi için aktivasyon enerjisine ihtiyaç vardır (η_{akt} > 50-100 mV). Yani, aktivasyon kayıpları doğrudan elektrokimyasal reaksiyonların hızları ile ilişkilidir. Aktivasyon kayıplarına bağlı voltaj düşüşü Tafel eşitliği (Denklem 2.19) ile ifade edilmektedir.

$$\eta_{akt} = \frac{\mathrm{R\,T}}{\alpha\,\mathrm{n\,F}} \ln \frac{i}{i_0} \tag{2.19}$$

Burada R ideal gaz sabiti, T sıcaklık, α elektron transfer katsayısı, n elektron sayısı, F Faraday sabiti, i akım yoğunluğu, i_0 denge akım yoğunluğudur.

2.4.2. Dirençsel (ohmik) kayıplar

Dirençsel kayıplar iyonların elektrolitten ve elektronların elektrotlardan geçişi sırasında oluşan dirençleri ifade etmektedir. Elektrolitte daha yoğun olan bu kayıplar, elektrotlar arası mesafeyi azaltarak ve elektrolitin iyonik iletkenliğini arttırarak azaltılabilir. Elektrolit ve elektrotlar Ohm yasasına uyduğundan, dirençsel kayıplar (Denklem 2.20) şu şekilde ifade edilebilir:

$$\eta_{ohm} = i\,R \tag{2.20}$$

Burada i, hücreden geçen akım ve R, toplam hücre direncidir. Toplam hücre direnci (denklem 2.21)'de görüldüğü gibidir:

$$R = R_{temas} + R_{iyonik} + R_{elektronik} \tag{2.21}$$

2.4.3. Konsantrasyon kayıpları

Yakıt hücresi elektrotlarında elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin reaktant gaz akışını etkilemesiyle başlangıç konsantrasyonunun korunamamasına bağlı olarak potansiyel kaybı oluşur ve bu kayıp konsantrasyon (kütle transfer) kaybı olarak ifade edilir. Reaktant gazların elektrot gözeneklerinde yavaş yayılması, reaktantların ve reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin elektrolitin içine veya dışına difüzyonu konsantrasyon kayıplarını artıran etkenlerdendir. Konsantrasyon kayıpları (Denklem 2.22) şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{kon} = \frac{\mathrm{R\,T}}{\mathrm{n\,F}} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \tag{2.23}$$

Burada i_L yakıt hücresinden çekilebilecek maksimum akım değeridir.

BÖLÜM 3. LİTERATÜR TARAMASI

Yakıt hücrelerinin geleceği üzerinde önemli bir yere sahip olan akış alanı tasarımı konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. PEM yakıt hücrelerindeki akış alanı tasarımı reaktant gazların hücre içerisinde homojen bir şekilde dağılımasını ve reaksiyon sonucunda oluşan suyun dışarıya atılmasını sağlayarak yakıt hücresi performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

Jinhua Dong ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmaya göre bir polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücresinde reaktant gazların dağılımı ve hücre içerisinde bulunan suyun direnci, akış alanı yapısından ve giriş ve çıkış arasındaki toplam mesafeden etkilendiğini bu nedenle, akış kanalı tasarımının, yakıt hücrelerinin performansına belli bir dereceye kadar etilediğini ileri sürmüşlerdir. Burada, biyo-inspirasyon ilkesine ve Murray yasasına dayanarak, yeni bir akış kanalı yapısı (yaprak modeli) oluşturmuşlar ve oluşturdukları modeli sayısal olarak incelemişlerdir. Basınç ve sıcaklık dağılımları da karşılaştırılmıştır. Yapmış oldukları çalışmadaki yeni akış kanalı yapısı sadece reaktant gaz dağılımının homojenliğini arttırmakla kalmamış, aynı zamanda akış kanallarındaki basınç düşüşünü de azaltmış ve yeni yapıya sahip yakıt hücresinin çıkış gücünü, paralel akış alanına sahip yakıt hücresine kıyasla aynı geometrik özellikte ve aynı koşullar altında %114 artırmıştır [16].

Nannan Guo ve arkadaşlarına göre biyolojik sistemlerde bulunan dallanma yapıları, besinleri sistem içinde verimli bir şekilde dağıtan optimum bir düzene sahiptir. Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücrelerinin akış alanları, bitkiler ve hayvanlardaki besin taşıma sistemlerine benzer işlevler sunduğundan, benzer bir yapıya sahip akış alanlarının, reaktantların taşıma verimliliğini optimize etmesi ve yakıt hücresi performansını iyileştirmesi beklenmektedir. Yapılan çalışmada ağaç yaprağının damar yapısından esinlenen bir akış alanı tasarımı geliştirilmiştir. Biyolojik dolaşım sistemlerinde bulunan optimum konfigürasyonu tanımlayan Murray yasası, farklı akış kanalı genişliklerini belirlemek için kullanılır. Murray

yasasına göre oluşturulan tasarım, sabit kanal genişliğine sahip bir tasarımla karşılaştırılmış bu tasarımlar hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, bitki yaprağından esinlenerek oluşturulan modelde yakıt hücresi performansını geleneksel tasarımlara kıyasla % 20-25 oranında önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir [17].

Youcef Kerkoub ve arkadaşları akış alanı 5.1×5.1 cm^2 alana sahip 25 kanaldan oluşan PEM yakıt hücrelerinin performansı üzerindeki etkisini araştırmak için üç boyutlu (CFD) bir model hazırlamışlardır. Serpantin, interdigitated (yönlendirmesiz) ve paralel olmak üzere bu üç tasarımı kanal-kaburga genişliği (iki kanal arasındaki mesafe) oranını (η=kanal genişliği/kaburga genişliği) değiştirerek analiz etmişlerdir. Hücrenin alanını ve kanal sayısını sabit tutmak için, kanalın genişliği arttırıldığında, kaburgaların genişliği azaltılmıştır. Yüksek çalışma voltajında, geometrik tasarımlar ve kanal-kaburga genişliği oranları hücre performansı üzerinde çok az etki ederken, düşük çalışma voltajında hücre performansını önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Serpantin tasarıma sahip PEM yakıt hücresi daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, kanal genişliğinin azaltılması ve kaburga genişliğinin arttırılması hücre performansını artırmıştır. Yerel taşınım olayları da analiz edilmiş olup basınç düşüşü ve kaburga altında konveksiyon, kanal-kaburga genişliği oranının azalmasıyla artmış, bu da net güç yoğunluğunu arttırdığı gözlemlenmiştir [18].

H. Kahraman ve A. Çoban yapmış oldukları deneysel çalışmada polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEM) akış alanını ağaç yapraklarının damarlarından esinlenerek tasarlamış ve yakıt hücresi performansına etkisini incelemişlerdir. Yeni tasarımla basınç düşüşünde azalma ve gazların homojen dağılımını gözlemlemişlerdir. Akış kanallarının boyutlarını, Murray yasasına göre oluşturmuşlardır. Gaz akışını gaz difüzyon tabakasına yönlendirmek amacıyla yarı silindirik engeller kanal içerisine konulmuş ve bu engellerin etkisi yüksek akım değerlerinde gözlenmiştir. Hücre performansı ve akım yoğunluğu–sıcaklık dağılımı analizi, standart serpantin tasarımına kıyasla %42.1'e kadar performans artışı elde edilmiştir. Önerilen tasarım ile akım ve sıcaklık dağılımlarının homojenliği de sağlanmıştır [19].

Mehmet Seyhan ve arkadaşları çalışmalarında 25 cm^2 aktif alanlı PEM yakıt hücresinde sinüzoidal dalgaya sahip serpantin akış kanalının performansı üzerindeki etkileri farklı akış hızlarında, 0.25 mm'den 0.75 mm'ye değişen üç farklı genişlikte ve

üç farklı hücre çalışma sıcaklığında araştırmışlardır. Bu belirtilen deneysel parametrelere göre Yapay Sinir Ağı (ANN) kullanılarak hidrojen ve hava akış hızı, yakıt hücresi sıcaklığı, kanal genişliğinin yakıt hücresi performansına etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, en düşük genişliğe sahip modelin geleneksel serpantin kanalına kıyasla %20.15'e kadar maksimum güç çıkışını artırdığını göstermiştir [20].

J.M. Sierra ve arkadaşları, boru şeklindeki plakalara sahip bir PEM yakıt hücresi modeli üzerinde üç boyutlu sayısal bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, bir yakıt hücresindeki silindirik geometriye (serpantin, interdigitated ve düz kanallar) sahip üç akış alanının performans değerlendirmesini incelemişlerdir. Bu tasarımlar ile sadece geleneksel tasarımların dikdörtgen akış alanları ile sergilediği basınç kayıplarını azaltmak için değil, aynı zamanda yakıt hücresi katot kısmında meydana gelen taşıma süreçlerini de iyileştirmeyi düşünmüşlerdir. Sayısal sonuçlar, silindirik kanal konfigürasyonlarının, akış yolundaki açının kademeli olarak azaltılması ve kanalın bükülmesi nedeniyle hücredeki basınç kayıplarını azalttığını, böylece sıvı suyun gaz difüzyon katmanlarından atılmasını kolaylaştırdığını ve bunun da katalizör katmanlarının üçlü faz sınırında yüksek bir oksijen konsantrasyonunu teşvik ettiğini göstermiştir. Ayrıca, sayısal sonuçlar polarizasyon eğrileri ve benzer tasarımlar için rapor edilen literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar, boru şeklindeki plakalara uygulanan geleneksel akış alanı tasarımlarının, diğerlerinin yanı sıra üniform basınç ve akım yoğunluğu dağılımları gibi dikdörtgen tasarımlara göre bazı avantajlara sahip olduğunu göstermiştir, bu nedenle taşınabilir uygulamalarda yakıt hücresi tasarımları için düşünülebildiğini ileri sürmüşlerdir [21].

S.O. Obayopo ve arkadaşları, reaktant gaz dağılımını iyileştirmeyi amaçlayan kanal akışında enine yerleştirilmiş pim kanatçıkları olan bir PEM yakıt hücresi akış alanını ve reaktif gaz dağılımını analiz etmek için sayısal bir çalışma yapmışlardır. Pim kanadı parametrelerinin, Reynolds sayısının, gaz difüzyon tabakasının (GDL) gözenekliliğinin reaktant gaz dağılımı üzerindeki etkisi ve kanal uzunluğu boyunca basınç düşüşü araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kanal akışındaki bir pim kanadı ekinin yakıt hücresi performansını önemli ölçüde artırdığını ve söz konusu yakıt hücresi modeli için yakıt kanalı boyunca optimum basınç düşüşü için pim kanadı geometrilerinin elde edildiğini savunmuşlardır [22].

Jason P. Kloess ve arkadaşları, yaprak tasarımı ve akciğer tasarımı olarak iki yeni akış kanalı tasarımı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu tasarımlar, mevcut

serpantin ve interdigitated (yönlendirmesiz) desenlerin avantajlarını doğadan ilham alarak birleştirmişlerdir. Sayısal simülasyondan, yaprak veya akciğer tasarımında girişten çıkışa, mevcut serpantin ve interdigitated akış modellerinden daha düşük bir basınç düşüşü olduğu bulunmuştur. Gaz difüzyon tabakasına akış difüzyonunun yeni akış kanalı desenleri ile daha düzgün olduğu bulunmuştur. Hem yaprak hem de akciğer tasarımı, önceki tasarımlara göre maksimum güç yoğunluğunda %30'a varan gelişmeler göstermiştir [23].

BÖLÜM 4. PEM YAKIT HÜCRESİ MODEL TANIMI

4.1. Modelde Yapılan Kabuller

Bu çalışmada kullanılan yakıt hücresi modelinde aşağıdaki kabuller göz önünde bulundurularak analizler yapılmıştır:

- Reaksiyona giren türler ideal gaz özelliğine sahiptir.
- Sistem kararlı yapıdadır.
- Reaktant gaz akışının laminer ve sıkıştırılamaz olduğu kabul edilmiştir.
- Membranın, katalizör ve gaz difüzyon tabakasının izotropik ve homojen olarak kabul edilir.
- Yakıt hücresi bileşenlerinde ohmik (dirençsel) potansiyel düşüş ihmal edilmiştir.

4.2. Kütlenin Korunum Denklemi

Yakıt hücresi akış kanallarındaki reaktant akışı, kanalların geometrisine bağlıdır. Ancak ana denklemler kanal geometrisinden bağımsızdır. Sıvı akışı, difüzyon, faz değişimi ve elektrokimyasal reaksiyonlar için kütlenin korunum denklemi (Denklem 4.1) şöyledir [24]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = S_m \qquad (4.1)$$

Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), v hız vektörü (ms^{-1}), S_m kütle kaynak terimi ve

∇: $\frac{d}{d_x} + \frac{d}{d_y} + \frac{d}{d_z}$ del operatörüdür.

4.3. Momentumun Korunum Denklemi

Momentumun korunum denklemi Denklem 4.2'de verilmiştir [24].

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = -\nabla p + \nabla.(\mu \nabla v) + S_M \quad (4.2)$$

Burada p akışkan basıncı (Pa), μ viskozite ($kgm^{-1}s^{-1}$), S_M momentum kaynak terimidir. Momentum kaynak terimi yakıt hücresinin her bölgesinde farklılık göstermektedir.

4.4. Enerjinin Korunum Denklemi

Yakıt hücrelerinde enerji denkleminin korunumunu çözerek hücre içindeki sıcaklık değişimlerini hesaba katmak önemlidir. Yakıt hücresindeki herhangi bir alan için enerji korunum denklemi (Denklem 4.3)'te verilmiştir [25].

$$\left(\rho c_p\right)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\rho c_p\right)_{eff} (v.\nabla T) = \nabla.\left(k_{eff} \nabla T\right) + S_e \quad (4.3)$$

Burada c_p karışımın ortalama özgül ısı kapasitesi ($J\ kg^{-1}K^{-1}$), T sıcaklık (K), k ısı iletim katsayısı ($W\ m^{-1}K^{-1}$), S_e enerji kaynak terimidir.Enerji kaynak terimi, reaksiyon sonucu oluşan ısıyı, direnç kaynaklı ısıyı ve faz değişimi sırasında açığa çıkan ısıyı içermektedir. $(\rho c_p)_{eff}$ ve k_{eff} sırasıyla (Denklem 4.4) ve (Denklem 4.5)'teki gibidir.

$$\left(\rho c_p\right)_{eff} = (1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s} + \varepsilon \rho c_p \quad (4.4)$$

$$k_{eff} = -2k_s + \left[\frac{\varepsilon}{2k_s + k} + \frac{1-\varepsilon}{3k_s}\right]^{-1} \quad (4.5)$$

Burada ρ_s , $c_{p,s}$,k_s katı matrisin sırasıyla yoğunluğunu, özgül ısı kapasitesini ve ısı iletim katsayısını ifade eder.

4.5. Türlerin Korunum Denklemi

Gaz fazı için türlerin korunum denklemi (Denklem 4.6) şöyledir [25];

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho x_i)}{\partial t} + \nabla.(v \varepsilon \rho x_i) = \left(\nabla.\rho D_i^{eff} \nabla x_i\right) + S_{s,i} \quad (4.6)$$

Burada x_i gaz türlerinin kütle kesri, i=1,2,3…..,N (örneğin hidrojen için i=1, oksijen için i=2, su buharı için i=3 gibi), D^{eff} gözenekliliğin bir fonksiyonudur, $S_{s,i}$ türlerin kaynak terimidir.

4.6. Yüklerin Korunması

Akım aktarımı ile ilgili yüklerin korunum denklemi (Denklem 4.7) ve (Denklem 4.8)'de verilmiştir [26].

Elektrik akımı için;

$$\nabla.(K_s^{eff}\nabla\emptyset_s) = S_{\emptyset s} \tag{4.7}$$

İyonik akım için;

$$\nabla.(K_m^{eff}\nabla\emptyset_m) = S_{\emptyset m} \tag{4.8}$$

Burada K_s^{eff} katı fazda elektrik iletkenlik (S cm^{-1}), K_m^{eff} elektrolit fazında elektrik iletkenlik (S cm^{-1}), $\emptyset_s$ katı faz potansiyeli (V), $\emptyset_m$ elektrolit faz potansiyeli (V), $S_\emptyset$ hacimsel transfer akımını temsil eden kaynak terimi ifade etmektedir.

4.7. Elektrokimyasal Denklemler

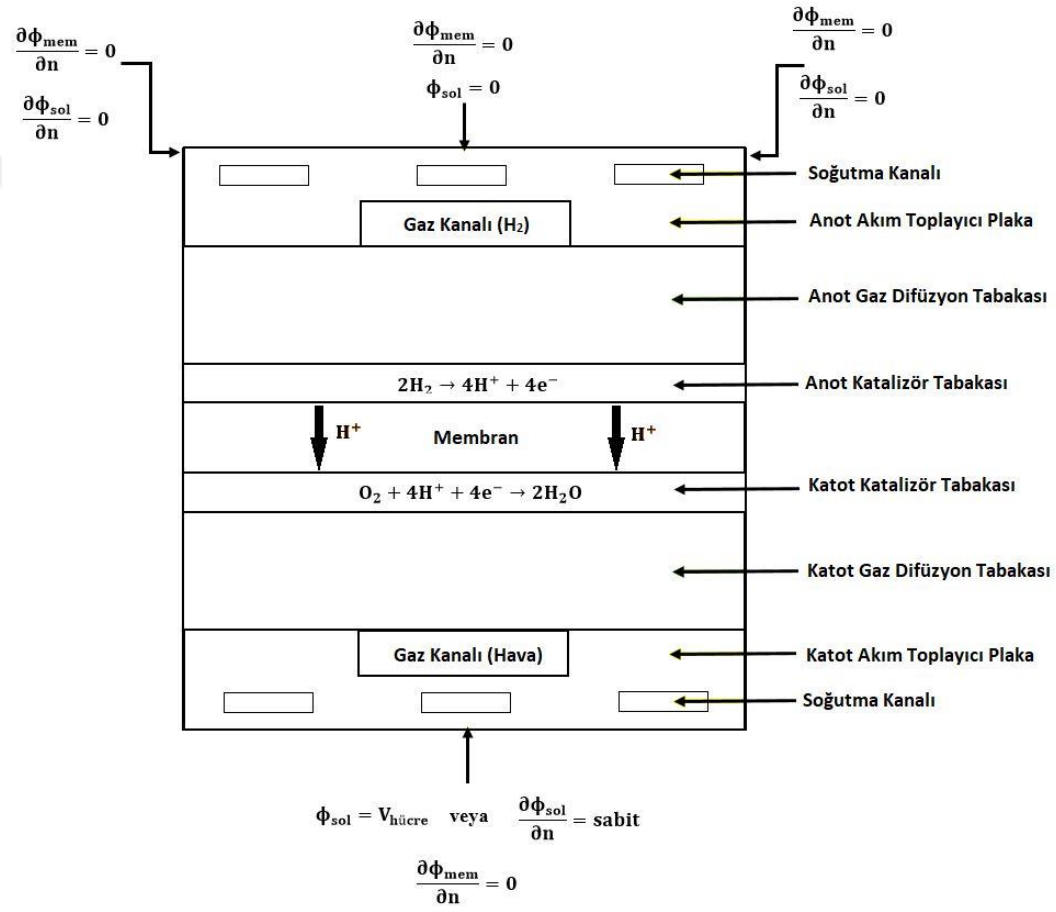
Elektrokimyasal modellemenin temelini anot ve katot reaksiyon oranlarının hesaplanması oluşturmaktadır. Bu elektrokimyasal reaksiyonların temeli olan yüzey aşırı potansiyeli de katı ve elektrolit (membran) faz potansiyeli arasındaki farktan doğar. Elektrokimyasal reaksiyonların hızı anot ve katot katalizör tabakalarında hesaplanmaktadır. Ansys FLUENT programında yer almakta olan PEM yakıt hücresi ve elektroliz modelinde, iki elektrik potansiyel denklem çözülmektedir; bir potansiyel denklem (Denklem 4.9) katalizör tabakasında, gözenekli elektrotta ve akım toplayıcılarda (katı bileşenlerde elektron transferi sırasında oluşan potansiyel) çözülür, diğer potansiyel denklem (Denklem 4.10) elektrolit (iyonik transfer sırasındaki potansiyel) tabakasında çözülmektedir [27].

$$\nabla.(\sigma_{sol}\nabla\emptyset_{sol}) + R_{sol} = 0 \tag{4.9}$$

$$\nabla.(\sigma_{mem}\nabla\emptyset_{mem}) + R_{mem} = 0 \tag{4.10}$$

Burada σ elektriksel iletkenlik (1/ohm-m), ϕ elektriksel potansiyel (V), R hacimsel transfer akımı (A/m^3)'dır.Aşağıda yer alan (Şekil 4.1)'de ϕ_{sol} ve ϕ_{mem} değerlerini çözmek için kullanılan sınır şartları gösterilmiştir.

Dış sınır içerisinden elektrik akımı geçenler ve geçemeyenler olarak ikiye ayrılmaktadır. Yakıt hücresi modelinde dış sınırlardan herhangi bir proton (H^+) kaybı yaşanmadığı varsayıldığından ϕ_{mem} (membran faz potansiyeli) için tüm dış sınırlarda "sıfır akı" sınır koşulu vardır. ϕ_{sol} (katı faz potansiyeli), anot akım toplayıcının üst sınırında ve diğer dış sınırlarda "sıfır akı", katot akım toplayıcının alt sınırında hücre potansiyeli "$V_{hücre}$" olarak alınır.



Şekil 4.1: ϕ_{sol} ve ϕ_{mem} elektrik potansiyeli için FLUENT'de kullanılan sınır şartları [28].

(Denklem 4.9) ve (Denklem 4.10)'de elde edilen değerler veya hacimsel geçiş akımları, sadece katalizör tabakasında sıfır değildir ve şu şekilde hesaplanır:

Katı faz için; anot tarafında $R_{sol} = - R_{an} (<0)$, katot tarafında $R_{sol} = + R_{cat} (>0)$

Membran fazı için; anot tarafında $R_{mem} = + R_{an} (>0)$, katot tarafında $R_{mem} = - R_{cat} (<0)$

Bunun yanı sıra (denklem 4.9) ve (denklem 4.10), Butler-Volmer denklemi (Denklem 4.11 ve Denklem 4.12) ile de tanımlanabilir [29].

$$R_{an} = \left(\zeta_{an} j_{an}^{ref}\right)\left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}}\right)^{\gamma_{an}}\left(e^{\alpha_{an}F\eta_{an}/RT} - e^{-\alpha_{cat}F\eta_{an}/RT}\right) \quad (4.11)$$

$$R_{cat} = \left(\zeta_{cat} j_{cat}^{ref}\right)\left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}}\right)^{\gamma_{cat}}\left(-e^{\alpha_{an}F\eta_{cat}/RT} + e^{-\alpha_{cat}F\eta_{cat}/RT}\right) \quad (4.12)$$

Burada j^{ref} aktif yüzey alanı referans akım yoğunluğu (A/m^2), ζ spesifik aktif yüzey alanı (1/m), [ ] yerel tür konsantrasyonu (kmol/m^3), $[\ ]_{ref}$ yerel tür konsantrasyonu referans değeri (kmol/m^3), γ konsantrasyon üssü, α transfer katsayısı (boyutsuz), F Faraday sabiti (9,65.10^{-7} C/kmol)'dir.Butler-Volmer denkleminin basitleştirilmiş hali Tafel denklemi (Denklem 4.13 ve Denklem 4.14) ile ifade edilir [30].

$$R_{an} = \left(\zeta_{an} j_{an}^{ref}\right)\left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}}\right)^{\gamma_{an}}\left(e^{\alpha_{an}F\eta_{an}/RT}\right) \quad (4.13)$$

$$R_{cat} = \left(\zeta_{cat} j_{cat}^{ref}\right)\left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}}\right)^{\gamma_{cat}}\left(-e^{\alpha_{an}F\eta_{cat}/RT}\right) \quad (4.14)$$

Butler-Volmer denklemi FLUENT'in yakıt hücresi modelinde katalizör tabakası içerisinde transfer edilen akımları hesaplamak için kullanılır.Bu denklemlerde yer alan η, aktivasyon kaybı olarak da bilinen yüzey aşırı potansiyelidir. η_{an} (Denklem 4.15) değeri katı ve membran potansiyelleri arasındaki farkdan oluşur. η_{cat} (Denklem 4.16) değeri ise katı ve membran potansiyellerinden açık devre voltajının "V_{oc}" çıkarılmasıyla elde edilir [31].

$$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem} \quad (4.15)$$

$$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{OC} \quad (4.16)$$

4.7.1. Isı Kaynağı

Yakıt hücrelerinde daha önce de bahsedildiği üzere bazı tersinmez olayların oluşumuna bağlı olarak reaktantların kimyasal enerjilerinin tümü elektrik enerjisine dönüştürülemez. Enerji denklemi (entalpi denklemi) buna bağlı olarak şöyle ifade edilir [32]:

$$S_h = h_{reac} - R_{an,cat}\eta_{an,cat} + \mathrm{I}^2 R_{ohm} + h_L \tag{4.17}$$

Burada h_{reac} elektrokimyasal reaksiyonların net entalpisi, $R_{an,cat}\eta_{an,cat}$ anot ve katotta oluşan gerilim kayıplarını ve transfer olan akımı, $\mathrm{I}^2 R_{ohm}$ ohmik direnç kaynaklı ısıyı, h_L suyun entalpi değişimini ifade etmektedir.

4.7.2. Suyun Oluşumu ve Taşınması

PEM yakıt hücreleri düşük sıcaklıklarda (<100 ^{o}C) çalışmalarına bağlı olarak sıvı su hücre içerisinde bulunabilir.Suyun hücre içerisindeki varlığı membranı nemli tutarken, reaktant gaz dağılımını ve yayılma hızını, reaksiyon oluşum hızını ve bunlara bağlı olarak hücre performansını olumsuz etkiler. FLUENT'de suyun oluşumu ve transferi doymuş su modeli kullanılarak çözümlenir. Bu çözümlemede, sıvı su oluşumu ve transferi su doygunluğu (s) için (Denklem 4.18)'deki korunum denklemi ile verilmiştir. Bu denklem faz değişimi (yoğuşma/buharlaşma), kılcal difüzyon ve yüzey gerilimi gibi farklı fiziksel süreçleri modeller [33].

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l s)}{\partial t} + \nabla.\left(\rho_l \overrightarrow{V_l} s\right) = r_w \tag{4.18}$$

Burada l indisi sıvı suyu, r_w yoğunlaşma oranını, ε gözenekliliği ve s ise suyun hacim kesrini ifade eder. V_l ise sıvı hızını ifade eder ve akış kanallarındaki gaz hızına eşit olduğu varsayılır. Direncin yüksek olduğu gözenekli bölgelerde, kılcal difüzyon teriminin kullanılması, (Denklem 4.18)'deki eşitliğin (Denklem 4.19)'daki gibi ifade edilmesini gerektirir [33].

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_l s)}{\partial t} + \nabla.\left(\rho_l \frac{Ks^3}{\mu_l}\frac{dp_c}{ds}\nabla s\right) = r_w \tag{4.19}$$

Burada p_c sıvı fazına bağlı kılcal basınç ve K mutlak geçirgenliği ifade etmektedir.

4.7.3. Özellikler

- **Gaz fazlı türlerin difüzyonu**

Gaz fazlı türlerin yaygınlığı, seyreltik yaklaşım yöntemi kullanılarak (Denklem 4.20)'deki gibi hesaplanmaktadır [34].

$$D_i = \varepsilon^{1,5}(1-s)^{r_s} D_i^0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\gamma_p} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\gamma_t} \quad (4.20)$$

Burada D_i^0, P_0 ve T_0 referans basınç ve sıcaklık değerlerinde kütle difüzyonunu ifade eder; γ_p, γ_t ve r_s (gözenek engel üssü) değerleri ise PEM kullanıcı tanımlı fonksiyonu (UDF/user-defined functions) olup $P_{0=}$ 101325 Pa, T_0 = 300 K, $\gamma_p = 1.0$, $\gamma_t = 1.5$, r_s= 2.5 şeklinde tanımlıdır. Gaz fazlı tür yayınımını FLUENT'in yakıt hücresi modeli (denklem 4.20)'ye ek olarak gözenekli ortamın pürüzlülüğünü de hesaba katan çok bileşenli bir difüzyon yöntemi içerir ve (Denklem 4.21)'deki gibi hesaplanır.

$$D_{eff}^{ij} = \varepsilon^{1.5} D^{ij} \quad (4.21)$$

Burada D_{eff}^{ij} efektif gaz türlerinin yaygınlığı, ε gözenekliliği, D^{ij} çok bileşenli difüzyon yöntemi kullanılarak hesaplanan gaz türlerinin kütle yayılımını ifade eder.

- **Membran iyonik iletkenliği**

PEM yakıt hücresi modelinde membran iyonik iletkenliği (Denklem 4.22)'deki eşitlik ile ifade edilmektedir [35].

$$\sigma_{mem} = \beta(0.514\lambda - 0.326)^{\omega} e^{1268\left(\frac{1}{303}-\frac{1}{T}\right)} \quad (4.22)$$

Burada λ su içeriği, ω ve β model sabitleridir. Su içeriği (Springer ve arkadaşlarının hesapları kullanılarak) şu şekilde hesaplanır [35]:

$$\lambda = 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (a < 1) \quad (4.23)$$

$$\lambda = 14 + 1.4(a-1) \quad (a > 1) \quad (4.24)$$

Burada a su aktivitesidir ve şu şekilde hesaplanır [35]:

$$a = \left(\frac{P_{wv}}{P_{sat}}\right) + 2s \quad (4.25)$$

Burada P_{wv} su buhar basıncıdır ve (denklem 4.26) ile, P_{sat} ise doyma basıncıdır ve atm cinsinden (Denklem 4.27) ile hesaplanır [35].

$$P_{wv} = X_{H_2O} P \tag{4.26}$$

Bu denklemde X_{H_2O} buhar molar kesri ve P yerel basınçdır.

$$\log_{10} P_{sat} = -2.1794 + 0.02953(T - 273.17) - 9.1837 \times 10^{-5}(T - 273.17)^2 + 1.4454 \times 10^{-7}(T - 273.17)^3 \tag{4.27}$$

- **Ozmotik sürüklenme katsayısı**

Ozmotik sürüklenme katsayısı (Denklem 4.28)'deki eşitlik ile ifade edilir.

$$\alpha_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \tag{4.28}$$

- **Geri difüzyon akısı**

$$J_w^{diff} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{H_2O} D_l \nabla \lambda \tag{4.29}$$

Burada ρ_m membran yoğunluğu ve M_m membran eşdeğer ağırlığıdır. D_l ise membran su yaygınlığı olup şu şekilde (Denklem 4.30) hesaplanır:

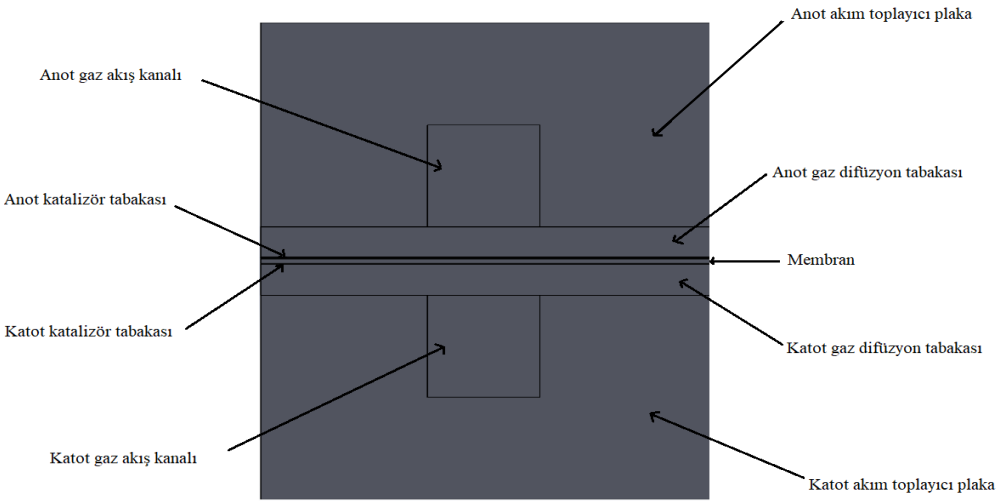
$$. D_l = f(\lambda) e^{2416\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)} \tag{4.30}$$

BÖLÜM 5. PEM YAKIT HÜCRESİ MODELİ

Yakıt hücrelerinde bipolar plakalar üzerinde yer alan ve reaktant gazların dağılımını, reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin hücreden atılmasını sağlayan akış kanal tasarımları yakıt hücresi performansını etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Bu çalışmada da bu konuyla ilgili olarak serpantin tasarım, doğadan esinlenerek oluşturulan yaprak tasarım ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım modeli farklı çalışma koşullarında Ansys FLUENT 19.0 ® programında analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanımı; kütle, enerji ve ısı taşınımı, elektrokimyasal reaksiyonlar ve potansiyel alanlar gibi yakıt hücresi içerisinde gerçekleşen birçok olayın bir yakıt hücresinin üretilmeden maliyetleri ortadan kaldırarak geliştirilmesini sağlar. Yapılan çalışmada yakıt hücresi modelleri 0,45 V, 0,55 V, 0,65 V, 0,75 V ve 0,85 V hücre voltajlarında ve belirlenen çalışma şartlarında çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde de bununla ilgili olarak yapılan çalışmanın detayları açıklanmıştır.

5.1. Geometri Oluşturma

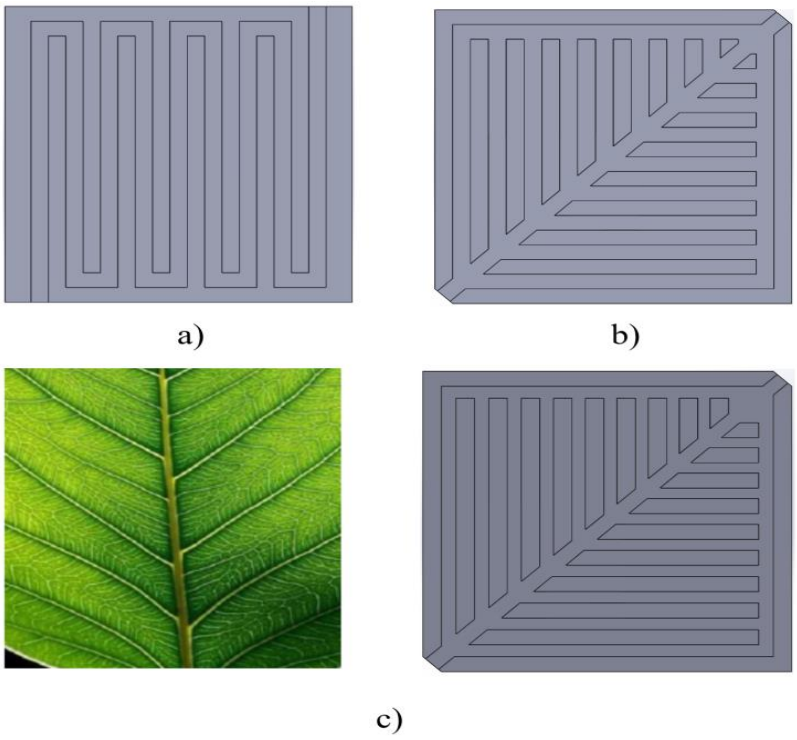
Bipolar plakalar üzerinde bulunan akış kanalı tasarımları ve yakıt hücresinin bileşenleri SOLIDWORKS CAD programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometriler literatürde sıkça karşılaşmış olduğumuz serpantin tasarım, doğadan esinlenerek oluşturulan yaprak tasarım ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım modelinden oluşmaktadır. Yaprak tasarım, akış kanal geometrisinin yapısından kaynaklı olarak Şekil 5.2'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Şekil 5.1'de modellenen yakıt hücrelerine ait geometrik boyutları daha sade görebilmek amacıyla tek kanallı bir yakıt hücresi modeli üzerinde yakıt hücresinin bileşenleri gösterilmiştir. Modelde kullanılan yakıt hücresi boyutları Tablo 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.2'de oluşturulan geometriler ve bir bitki yaprağındaki damar yapısı görülmektedir.



Şekil 5.1: Tek kanallı bir yakıt hücresinin şematik gösterimi.

Tablo 5.1: Modelde kullanılan yakıt hücrelerinin boyutları.

	Değer	Birim
Akım toplayıcı plaka kalınlığı	2	mm
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0,3	mm
Katalizör tabakası kalınlığı	0,01	mm
Membran kalınlığı	0,05	mm
Akış kanalı genişliği	1	mm
Akış kanalı derinliği	1	mm
Yakıt hücresi toplam kalınlığı	4,67	mm
Aktif alan (serpantin tasarım)	4	cm^2
Aktif alan (yaprak tasarım)	3,992	cm^2



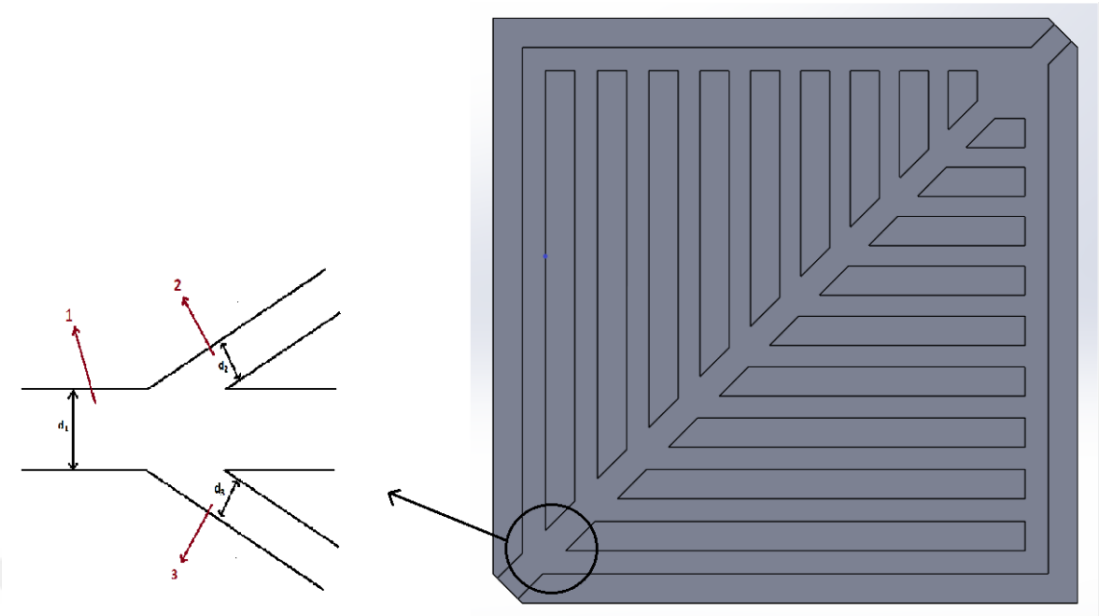
Şekil 5.2: Solidworks programında oluşturulan akış kanal geometrileri; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) yaprak damar yapısıve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

- **Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımın detayları**

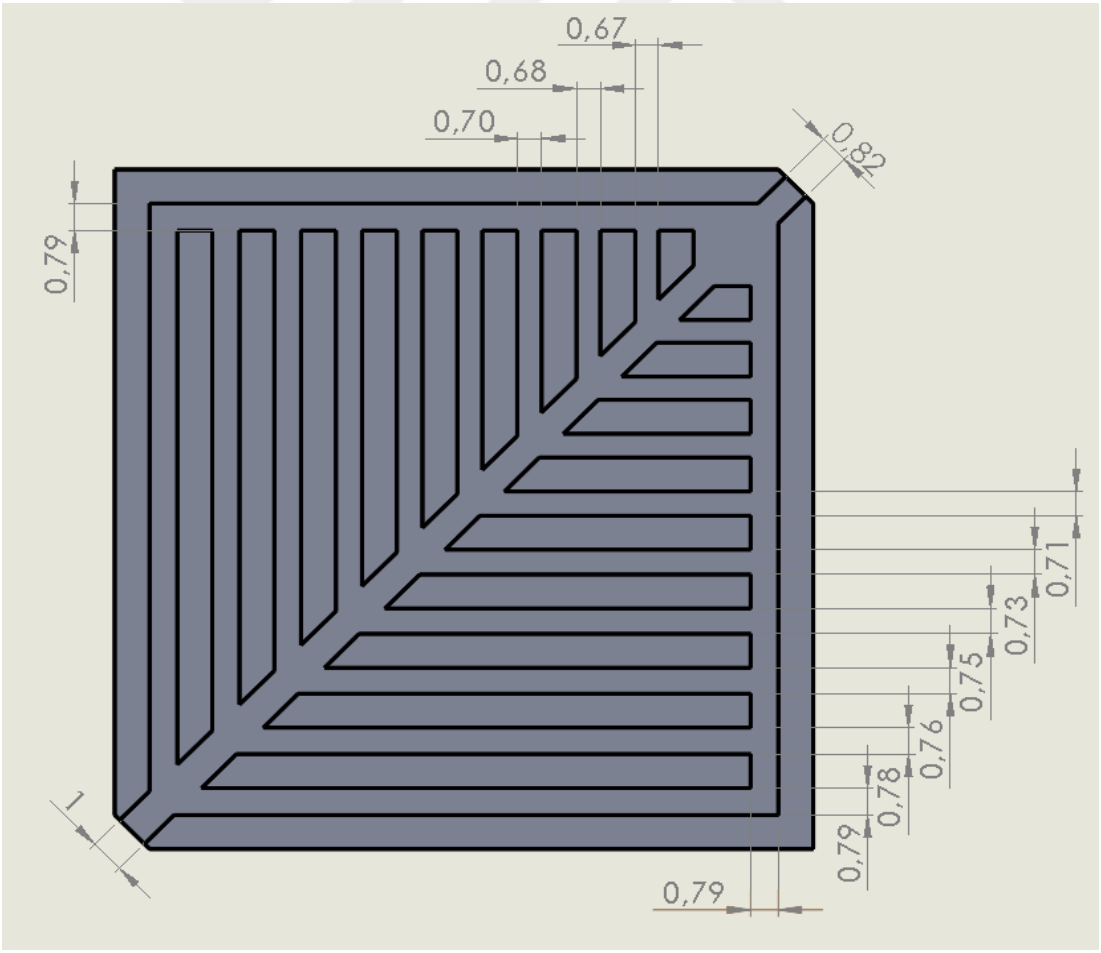
Murray kanunu, doğada yer alan dağıtım sistemlerini tanımlayan bir kanundur. Bu kanuna göre dağıtım sistemlerindeki dallanma yapısının, akışkanın taşınması için gerekli minimum enerji sarf edilerek ve akışa karşı en az direnç gösterecek şekilde gerçekleşmektedir. Kanuna göre ağaç yapraklarındaki damar yapısı esas alınarak modellenen (Şekil 5.3) yaprak tasarımda akış kanallarındaki matematiksel oran Denklem 5.1'de ifade edildiği gibidir [36]. Murray kanununa göre oluşturulan kanal geometrisinin detayları Şekil 5.4'de verilmiştir.

$$d_1^3 = d_2^3 + d_3^3 \tag{5.1}$$

Bu denklemde d_1 ana kanal çapı, d_2 ve d_3 dallanan yan kanalların çapıdır.



Şekil 5.3: Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

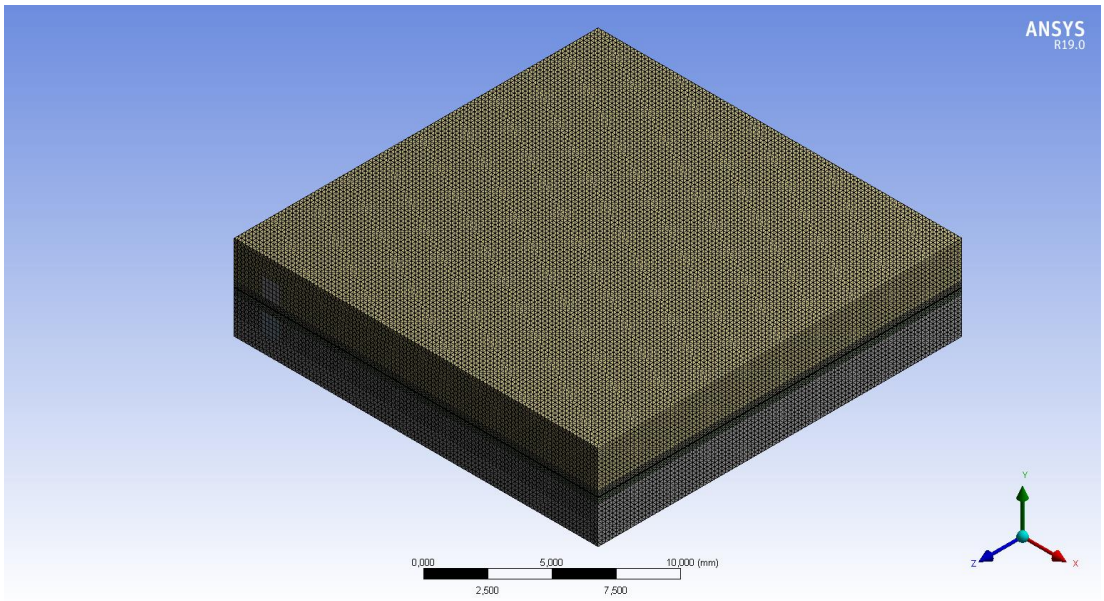


Şekil 5.4: Murray kanununa göre oluşturulan kanal tasarımının geometrik boyutları.

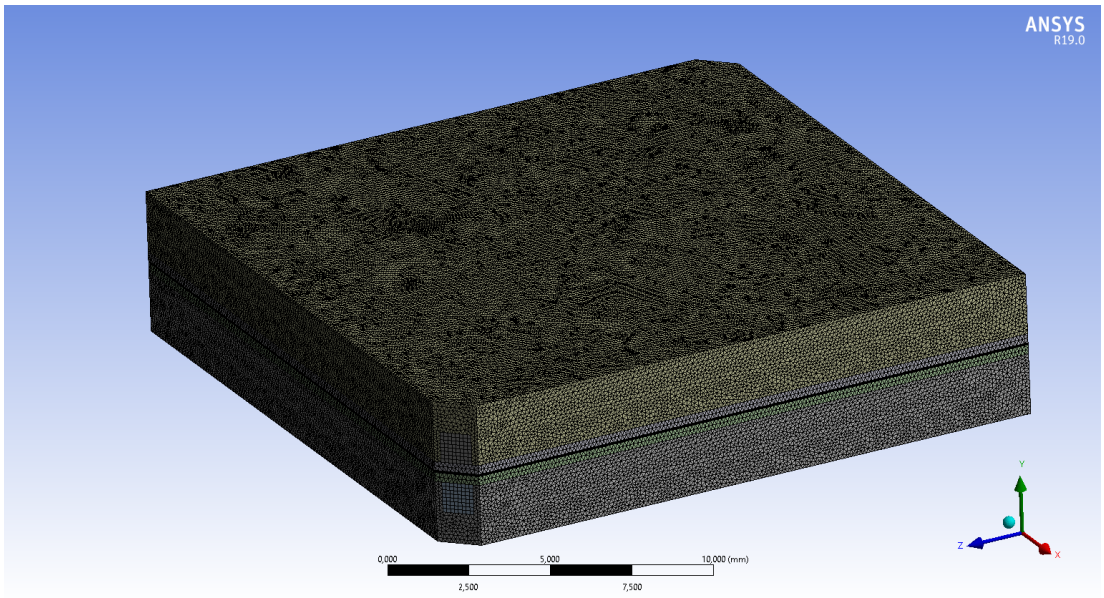
5.2. Ağ Yapısı (Mesh) Oluşturma

Ağ yapısı (mesh) oluşturma, fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölerek bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla yapılan işlem olarak ifade edilebilir. Sayısal analiz yöntemiyle elde edilecek sonuçların doğruluğu, ağ yapısındaki eleman tipi ve sayısıyla bağlantılıdır. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların yakınsaması için uygun eleman sayısı ve boyutu seçilmelidir. Gereksiz sayıda eleman kullanımı ise zaman kaybına neden olacaktır ve hesaplamalarda oluşabilecek hatanın artmasına neden olacaktır [37].

Bu etkiler göz önünde bulundurularak Ansys Mesh ile en uygun ağ yapısı oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan ağ yapıları (Şekil 5.5) ve (Şekil 5.6) görüldüğü gibidir. İyi bir ağ yapısı olup olmadığı "orthogonal quality" ve "aspect ratio" değerinin kabul edilebilir aralıkta olması dikkate alınarak kontrol edilmiştir. "orthogonal quality" değeri 0 ile 1 arasında değişen bir kalite değeridir. 1'e yaklaştıkça kalitenin arttığı anlaşılır ve kabul edilebilir değeri en az 0,1 olmalıdır. Oluşturulan ağ yapılarında "orthogonal quality" değeri minimum 0,2'dir.



Şekil 5.5: Mesh işlemi yapılmış serpantin tasarıma sahip PEM yakıt hücresi.



Şekil 5.6: Mesh işlemi yapılmış yaprak tasarıma sahip PEM yakıt hücresi.

5.3. Sınır Şartları

Süreklilik bölgeleri ilgili hacimler seçilerek bu hacme ait malzeme tipi Tablo 5.2'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

Tablo 5.2: Süreklilik bölge tiplerinin tanımı.

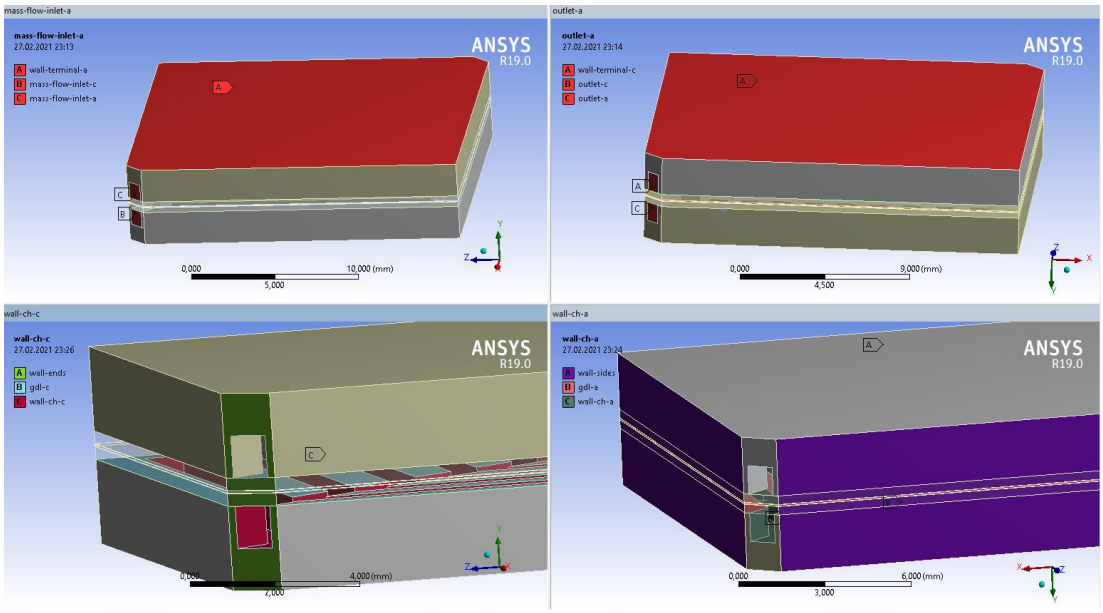
Bölge adı	Tipi
Anot ve katot akım toplayıcılar	SOLID
Anot ve katot akış kanalları	FLUID
Anot ve katot gaz difüzyon tabakaları	FLUID
Anot ve katot katalizör tabakaları	FLUID
Elektrolit (membran)	FLUID

Modelin ağ yapısı Ansys Mesh kısmında oluşturulduktan sonra sınır şartlarına ait yüzeyler ve bu yüzeylerin sınır tipleri belirlenmiştir. Belirlenen bu sınır yüzeyleri ve

sınır tiplerine ait değerler Tablo 5.3'de görüldüğü gibidir. Tanımlanan sınır şartları Şekil 5.7'de yaprak tasarım modeli üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 5.3: Sınır bölgesi tanımlamaları.

Yüzey	Bölge adı	Sınır bölgesi tipi
Anot girişi	inlet-a	MASS FLOW INLET
Katot girişi	inlet-c	MASS FLOW INLET
Anot çıkışı	outlet-a	PRESSURE OUTLET
Katot çıkışı	outlet-c	PRESSURE OUTLET
Anot akım toplayıcı üst yüzeyi	wall-terminal-a	WALL
Katot akım toplayıcı üst yüzeyi	wall-terminal-c	WALL
Anot akış kanalı duvarları	wall-ch-a	WALL
Katot akış kanalı duvarları	wall-ch-c	WALL
Hücre sonları	wall-ends	WALL
Hücre yan yüzeyleri	wall-sides	WALL
Anot gaz difüzyon tabakası duvarı	gdl-a	WALL
Katot gaz difüzyon tabakası duvarı	gdl-c	WALL

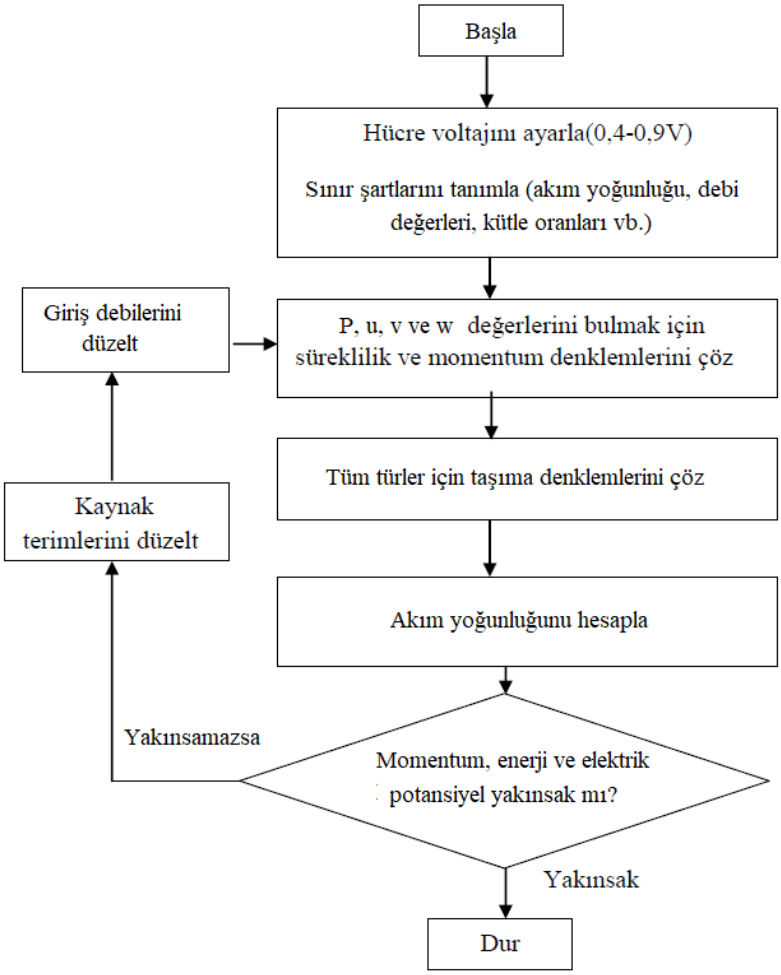


Şekil 5.7: Yaprak tasarım modeli üzerindeki sınır şartları.

5.4. Çözüm Algoritması ve Çözücü Ayarları

Yapılan çalışmada sayısal analiz yapılırken Ansys FLUENT'de basınca dayalı ayrık çözüm metodu olan, hız ve basınç arasındaki doğru bağlantıyı sağlayan SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Çözüm algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 5.8'de verilmiştir [38].

Çözümde değişkenlerin (hız, enerji vb.) her biri çözücünün çözmeye çalıştığı bir denklemi ifade eder ve her iterasyonda değişkenler için elde edilen değerler birbirine yaklaşık olmalıdır. Bazen birçok nedenden dolayı çözüm kararsız hale gelebilir. İterasyon işleminin daha kararlı ve düzgün olabilmesi için gevşeme faktörü (under-relaxation factor, URF) kullanılır. Gevşeme faktörleri, çözümdeki sayısal hatalardan kaynaklanan salınımları azaltır. Sayısal analizde gevşeme faktörü değerleri basınç için 0,7, momentum için 0,3, protonik potansiyel için 0,95 ve su içeriği için 0,95 olarak belirlenmiştir ve çözümün yakınsamasını sağlamak amacıyla Multigrid döngü türü olarak F-Cycle kullanılmıştır.



Şekil 5.8: Çözüm algoritmasının akış diyagramı [39].

Bu çalışmada kullanılan yakıt hücresi modellerinde Tablo 5.4'de yer alan elektrokimyasal parametreler ve Tablo 5.5'de yer alan sınr şartları kullanılmıştır.

Tablo 5.4: Sayısal analizde kullanılan elektrokimyasal parametreler [40].

Parametre	Sembol	Birim	Değeri
Anot referans akım yoğunluğu	j_{an}^{ref}	A/m^2	7500
Katot referans akım yoğunluğu	j_{cat}^{ref}	A/m^2	20
Açık devre voltajı	V_{oc}	V	0,95
Anot referans mol konsantrasyonu	$[H_2]_{ref}$	kmol/m^3	1
Anot referans mol konsantrasyonu	$[O_2]_{ref}$	kmol/m^3	1
Anot konsantrasyon üssü	γ_{an}	-	0,5
Katot konsantrasyon üssü	γ_{cat}	-	1
Anot ve katot transfer katsayısı	α_{an},α_{cat}	-	2
H_2 , O_2 , H_2O referans diffüzitesi	D_i^0	m^2/s	3×10^{-5}
GDL gözenekliliği	ε_{GDL}	-	0,5
GDL viskoz direnci	-	1/m^2	1e+12
Katalizör tabakası gözenekliliği	ε_{CL}	-	0,5
Katalizör tabakası viskoz direnci	-	1/m^2	1e+12
Katalizör tabakası yüzey/hacim oranı	-	1/m	200000
Membran eşdeğer ağırlığı	M_m	kg/kmol	1100
Membran protonik iletim katsayısı	β	-	1
Membran protonik iletim üssü	ω	-	1

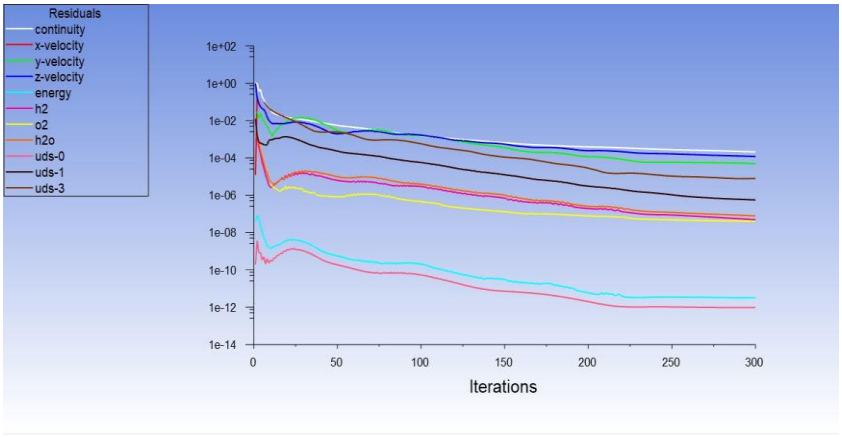
Tablo 5.5: Sayısal analizde kullanılan sınır şartları [40].

Parametre	Birim	Değeri
Anot girişi kütle akış hızı	kg/s	6e-7
Katot girişi kütle akış hızı	kg/s	5e-6
Anot girişi H_2 kütle kesri	-	0,8
Anot girişi H_2O kütle kesri	-	0,2
Katot girişi O_2 kütle kesri	-	0,2
Katot girişi H_2O kütle kesri	-	0,1
Basınç	atm	2
Sıcaklık	K	353

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

6.1. Sayısal Analizin Yakınsama Kriteri

Kalıntı (Residuals) değerleri, gevşeme faktörleri için alınan değerlerin uygun olduğu hususunda bize fikir sunmaktadır. Bunun yanında kalıntıların kontrolü yakınsamanın kontrolünde de önemli bir etkendir. Sayısal çözümün yakınsadığını anlayabileceğimiz bir ölçüt yoktur, ancak kalıntı değerlerinin iterasyon sayısı ile değişiminin takip edilerek yakınsamanın olup olmadığına karar verilebilir. Yapılan çalışmada da yakınsama kriterinin enerji denklemi için 10^{-9}, diğer denklemler için 10^{-3} mertebesi olarak belirlenmiştir. Sayısal analizde de 300. iterasyondan sonra enerji denkleminin 10^{-9}, diğer denklemlerin 10^{-4} mertebesinin altına düştüğünden, analizlerde için 300 iterasyon uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.1'de 300 iterasyon uygulanan yaprak modelinin, 0,75 V hücre voltajında kalıntı değerleri görülmektedir. Yakınsamanın 250. iterasyondan sonra gerçekleştiği bunun içinde 300 iterasyonun çözümler için yeterli olduğu buradan da anlaşılmaktadır.

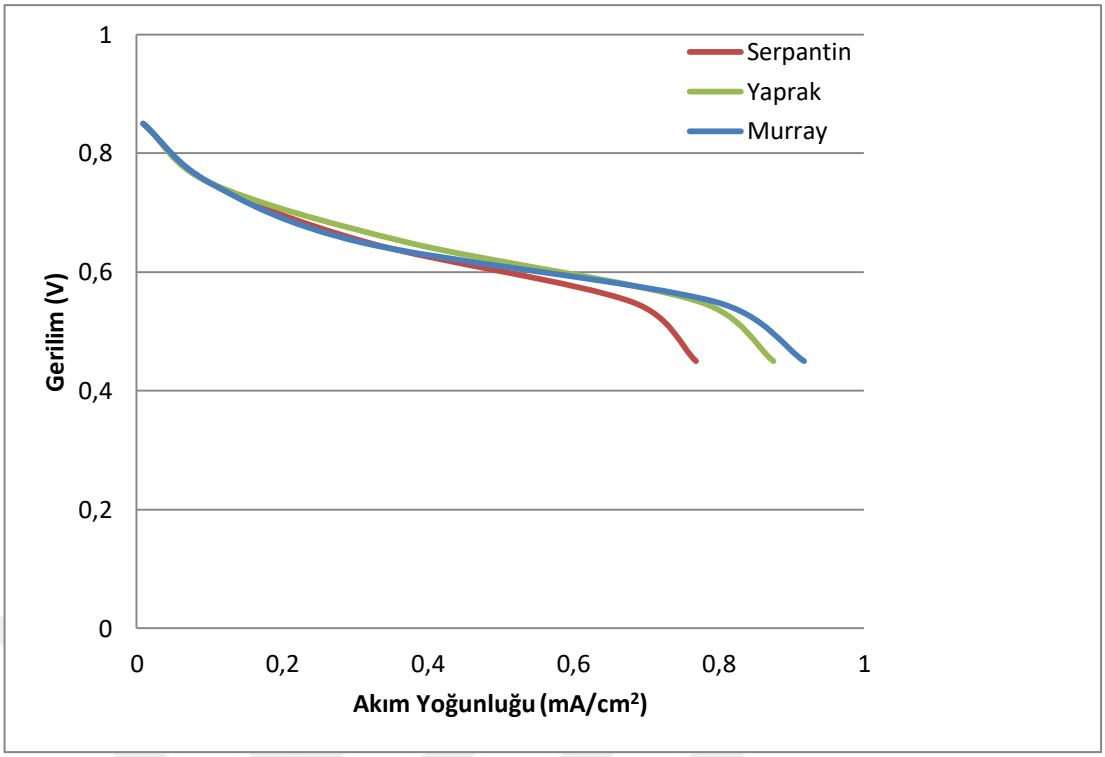


Şekil 6.1: 300 iterasyon uygulanan yaprak modelinin kalıntı (residuals) değerleri.

6.2. Polarizasyon Eğrileri

Polarizasyon eğrileri, ideal hücre voltajına ulaşılmasına engel olan yakıt hücresi kayıplarının görülebilmesini sağlayarak hücre performansı kıyaslamada önemli bir yere sahiptir. Bir polarizasyon eğrisinde genel olarak Şekil 2.9'da gösterildiği gibi aktivasyon kayıpları, ohmik kayıplar ve konsantrasyon kayıpları olarak üç bölgede kayıplar yaşanmaktadır. Yaşanan bu kayıplarla ilgili detaylı bilgi Bölüm 2.4'de verilmişti. Sonuçlar incelendiğinde incelenen yakıt hücresi tasarımları için üç farklı kayıp bölgesi açık olarak görülebilmektedir. Bunun yanında farklı akış kanalı tasarımları için düşük akım yoğunluklarında akış kanalı tasarımının önemli bir etkisi görülmemiştir ki bu sonuç literatürde incelenen çalışmalarla da tutarlıdır. Bunun sebebi ise reaksiyon hızlarının düşük akım yoğunluklarında düşük olması ve buna bağlı olarak da akış kanallarındaki düşük su içeriğidir. Yüksek akım yoğunluklarında, akış kanal geometrisi, reaktant gazların dağılımını engelleyen su içeriğinin verimli bir şekilde azaltılmasında ve böylece konsantrasyon kayıplarının azaltılmasında önemli bir rol üstlenir.

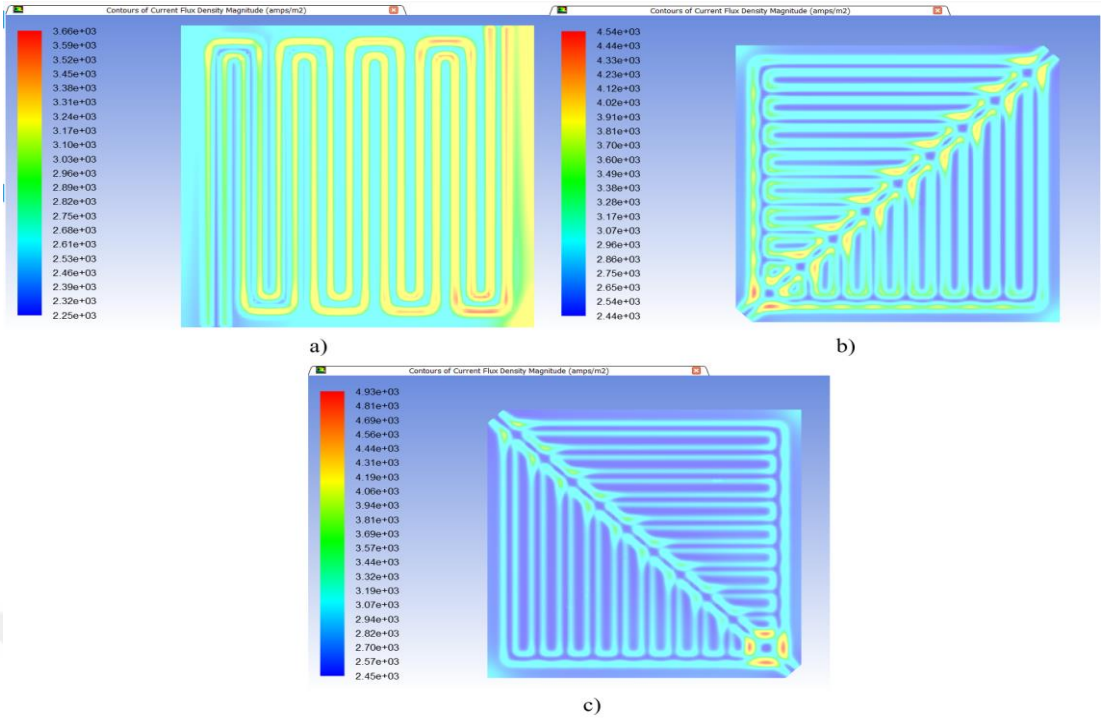
Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre yakıt hücresi polarizasyon eğrilerinde gerilim ile akım yoğunluğu arasındaki değişim Şekil 6.2'de görüldüğü gibi gerçekleşmiştir. Grafik değerleri belirlenen hücre voltajlarında (0,45V, 0,55V, 0,65V, 0,75V, 0,85V) ve çalışma koşullarında elde edilen sonuçları göstermektedir. Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım modelinin su tahliye kabiliyetinin yüksek oluşuna bağlı olarak konsantrasyon kaybının yaşandığı bölgede iyi sonuçlar vererek hücre performansında artış sağlandığı söylenebilir.



Şekil 6.2: Serpantin, yaprak ve murray kanuna göre oluşturulan yaprak tasarımlarının farklı hücre voltajlarında elde edilen performans verileri.

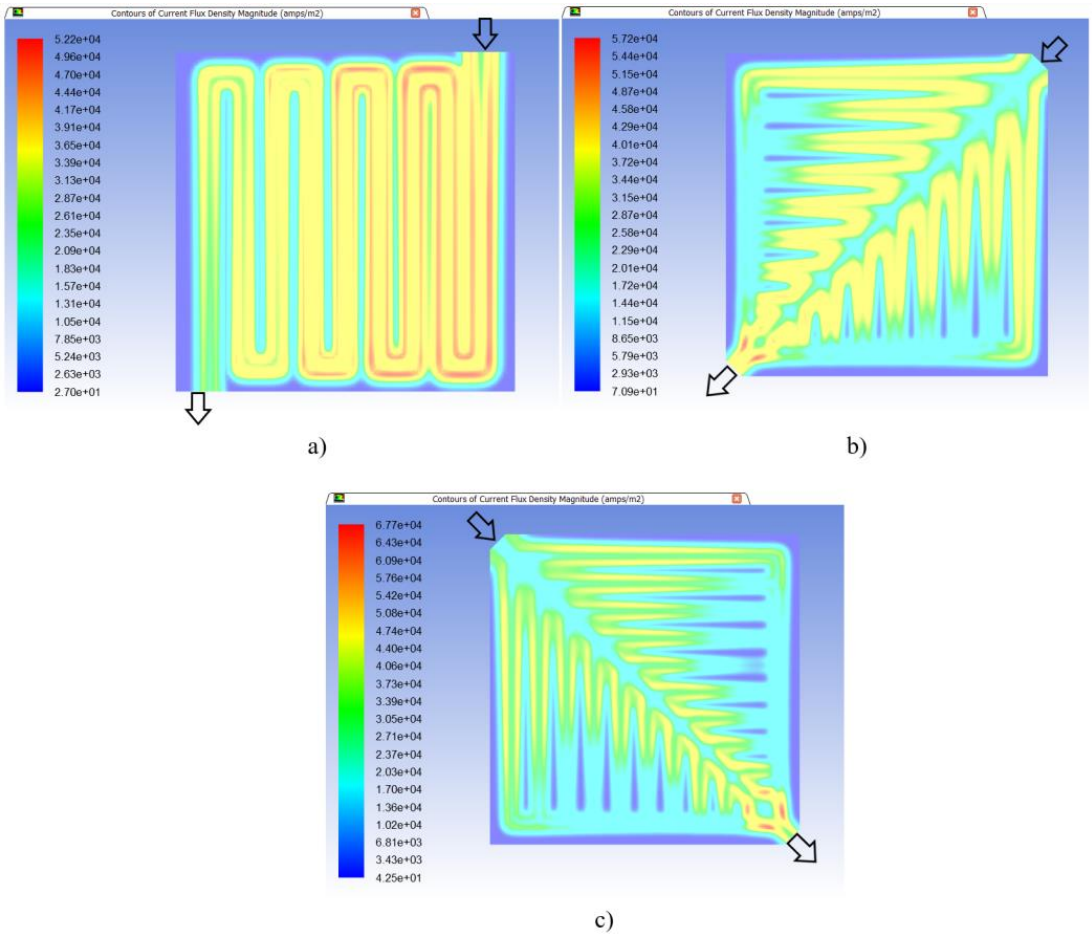
6.3. Akım Yoğunluğu Dağılımları

Yakıt hücresi polarizasyon eğilerinde verilen gerilim-akım yoğunluğu arasındaki değişim, yakıt hücresinin genel olarak performansını göstermektedir. Buna rağmen katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımı da incelenmiştir. Şekil 6.3'de incelenen yakıt hücresi tasarımlarına ait 0,75 V hücre voltajında elde edilen akım yoğunluğu dağılımları görülmektedir. Burada yakıt hücresi aktif alanı üzerinde kimyasal reaksiyonların hangi bölgelerde daha yoğun gerçekleştiği ve hangi bölgelerden daha fazla akım yoğunluğu elde edildiği görülebilmektedir. Analiz sonuçlarına dikkat edilecek olursa akım yoğunluğu dağılımı geliştirilen yaprak tasarım modellerinde daha eşit dağılıma sahipken serpantin tasarımda bu durumun aksine çıkışa doğru reaksiyonların yavaşlamasına bağlı olarak akım yoğunluğu azalmıştır.



Şekil 6.3: 0,75 V hücre voltajında katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

Daha önce de belirtildiği gibi, farklı hücre voltajlarında analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4'de 0,45 V hücre voltajında elde edilen değerler görülmektedir. Yüksek akım yoğunluğu değerlerinde (düşük hücre voltajlarında) elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapmak daha doğru olacaktır. Çünkü yakıt hücresi polarizasyon eğrilerinde konsantrasyon kaybına bağlı olarak gerçekleşen ani düşüşler bu bölgelerde yaşanmaktadır.

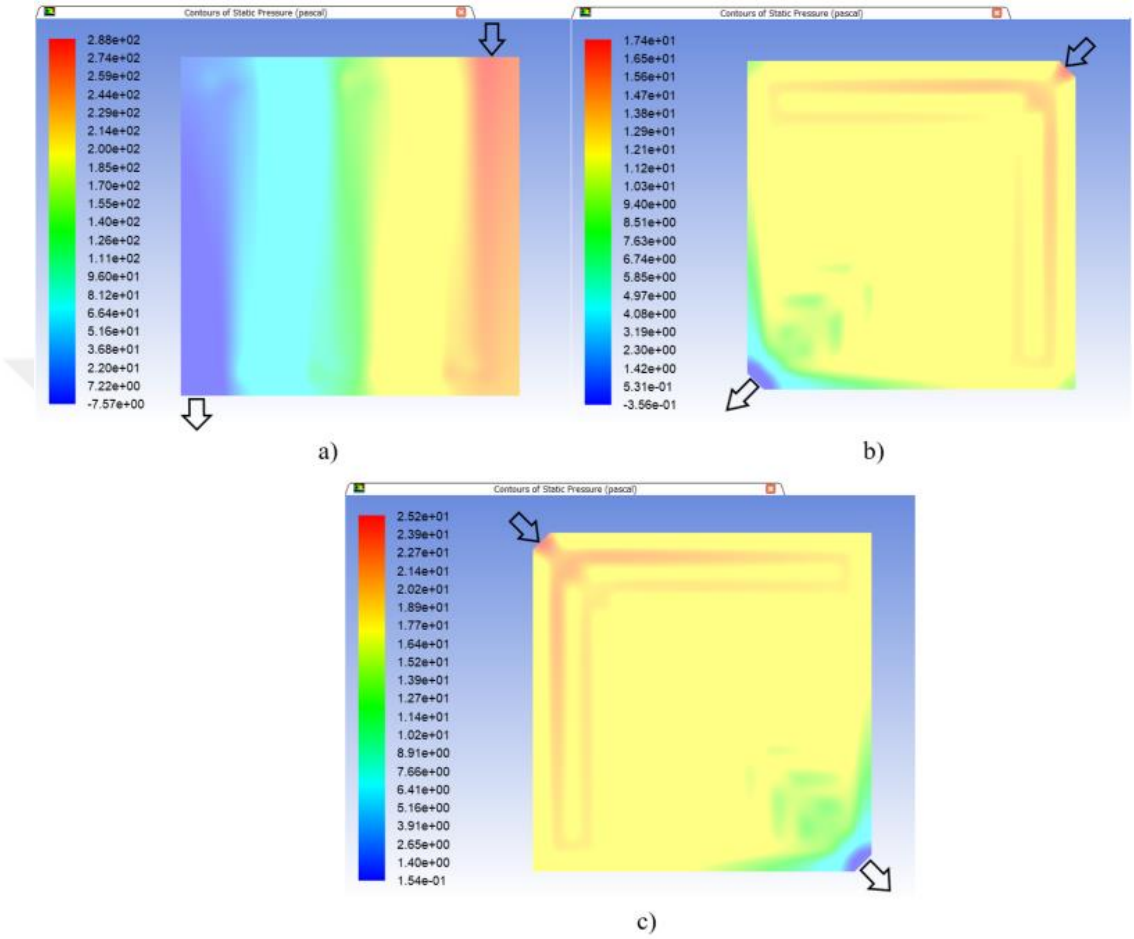


Şekil 6.4: 0,45 V hücre voltajında katot katalizör/gaz difüzyon tabakası ara yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

6.4. Basınç Dağılımları

Yakıt hücrelerinde basınç dağılımı, hücre performansını etkileyen önemli bir faktördür. Yakıt hücresi giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı yani basınç düşüşü yüksek olduğunda hücrenin su tahliyesi daha iyi olmaktadır. Ancak hücre içerisinde reaktant gazların dağılımının homojen olmamasına ve buna bağlı olarak güç kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle basınç düşüşünün az olduğu ancak su tahliye kabiliyeti yüksek olan kanal tasarımları daha yüksek hücre performansı sağlayacaktır. Şekil 6.5'de farklı akış kanal tasarımlarının katot gaz difüzyon tabakasındaki basınç dağılımları görülmektedir. Şekilde görülen sonuçlar 0,75 V hücre voltajında elde edilmiştir. Burada ölçeklendirme kısmına dikkat edilecek olursa her analiz sonucu için farklı olduğu gözlemlenebilir. Her ne kadar modellenen

yakıt hücresi boyutları küçük olsa da serpantin tasarım ve yaprak tasarım arasındaki fark görülebilmektedir. Serpantin tasarımda kanalın tek ve uzun olması su tahliyesini iyileştirirken, giriş ve çıkış arasındaki basınç farkının yükselmesine neden olur.

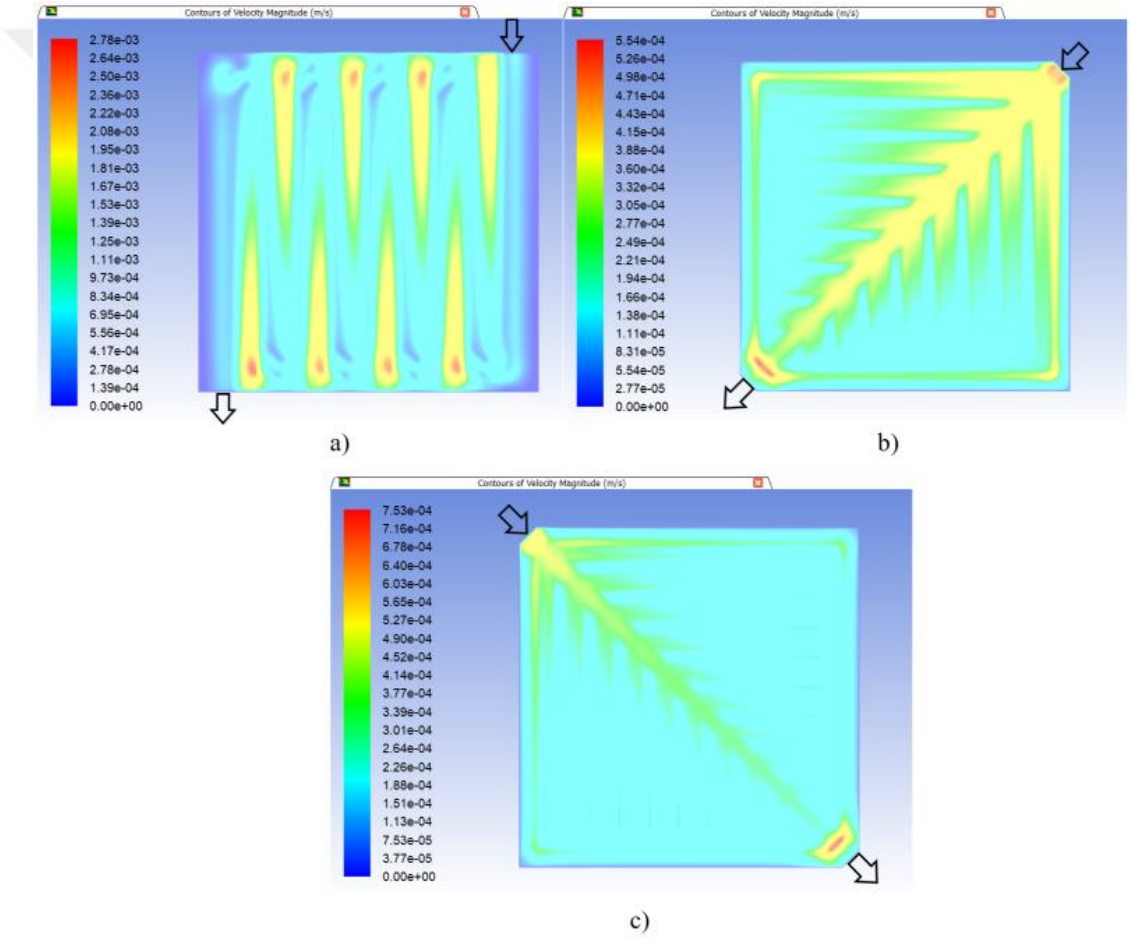


Şekil 6.5: 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki basınç dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

6.5. Hız Dağılımları

Bir yakıt hücresinde hız dağılımı, elektrokimyasal reaksiyonların hızlarını ve hücre içerisinde oluşan suyun tahliyesini etkiler. Yakıt hücresinde düşük akış hızı, su tahliyesini kötüleştirmekte ve düşük akım yoğunluğu değerlerinde membranda su birikmesine neden olmaktadır. Yüksek akış hızları ise su tahliyesini iyileştirmekte ancak reaksiyonların oluşumu için yeterli zaman olmadığından eksik reaksiyon oluşumuna neden olabilir. Gaz difüzyon tabakalarında reaktant gazların ve oluşan ürünlerin hızlarının dağılımı akış kanal tasarımıyla bağlantılıdır. Şekil 6.6'da

incelenen yakıt hücrelerinin 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki hız dağılımları görülmektedir. Yine aynı şekilde basınç dağılımında olduğu gibi modelin küçük olmasına rağmen hız dağılımlarında farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Analiz sonuçlarında ölçeklendirme kısmına dikkat edilecek olursa serpantin ve diğer oluşturulan tasarımlar arasındaki fark görülebilmektedir. Burada murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımın serpantin ve yaprak tasarıma göre daha düzgün bir hız profiline sahip olduğu söylenebilir. Düzgün hız profili, reaktant gazların daha homojen dağılımını sağlar ve daha yüksek maksimum hızlar suyun tahliyesini kolaylaştırır.

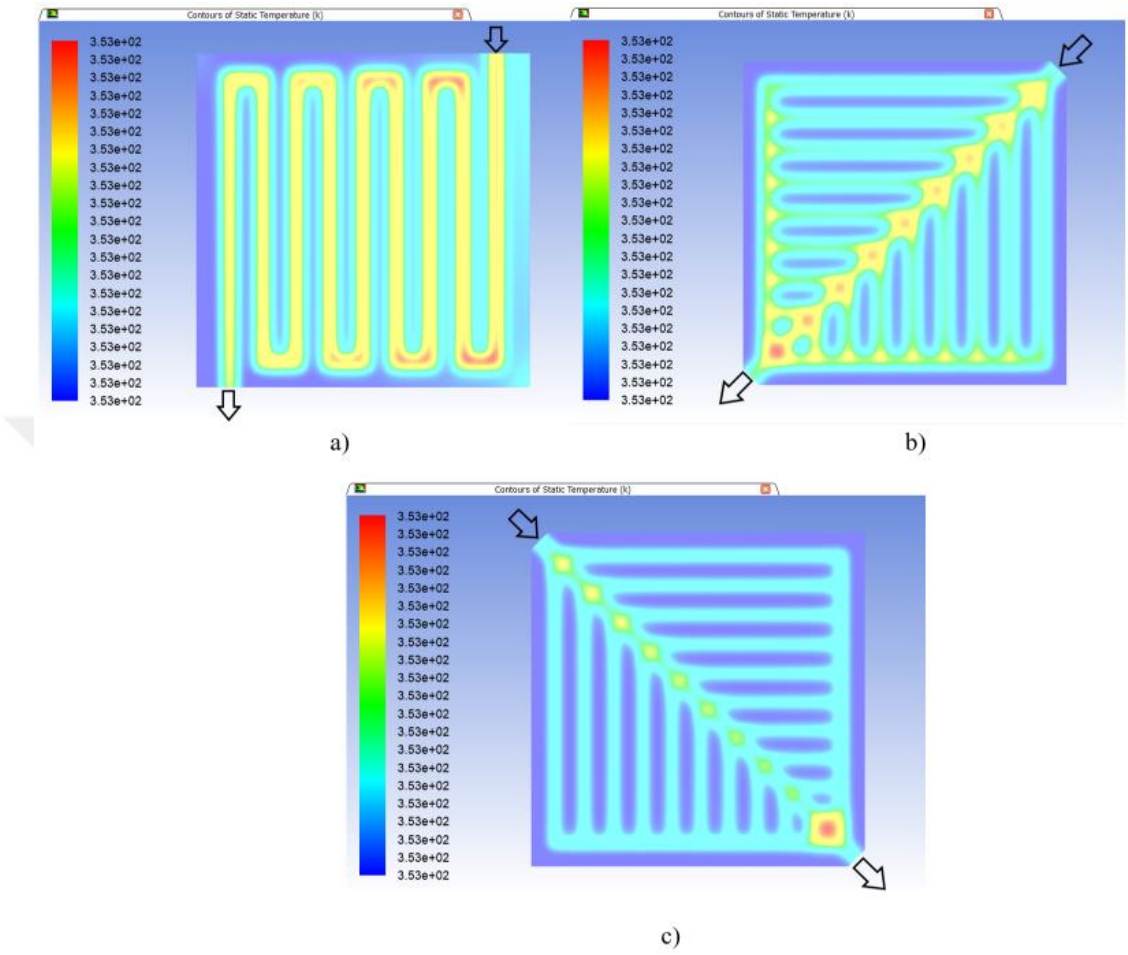


Şekil 6.6: 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki hız dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

6.6. Sıcaklık Dağılımları

Yakıt hücrelerinde sıcaklık, hücrede kullanılan malzemelerin ömrünün uzun olması için büyük önem taşımaktadır. Şekil 6.7'de incelenen yakıt hücrelerinin 0,75 V hücre

voltajında katot katalizör tabakası/membran arayüzü sıcaklık dağılımları görülmektedir.



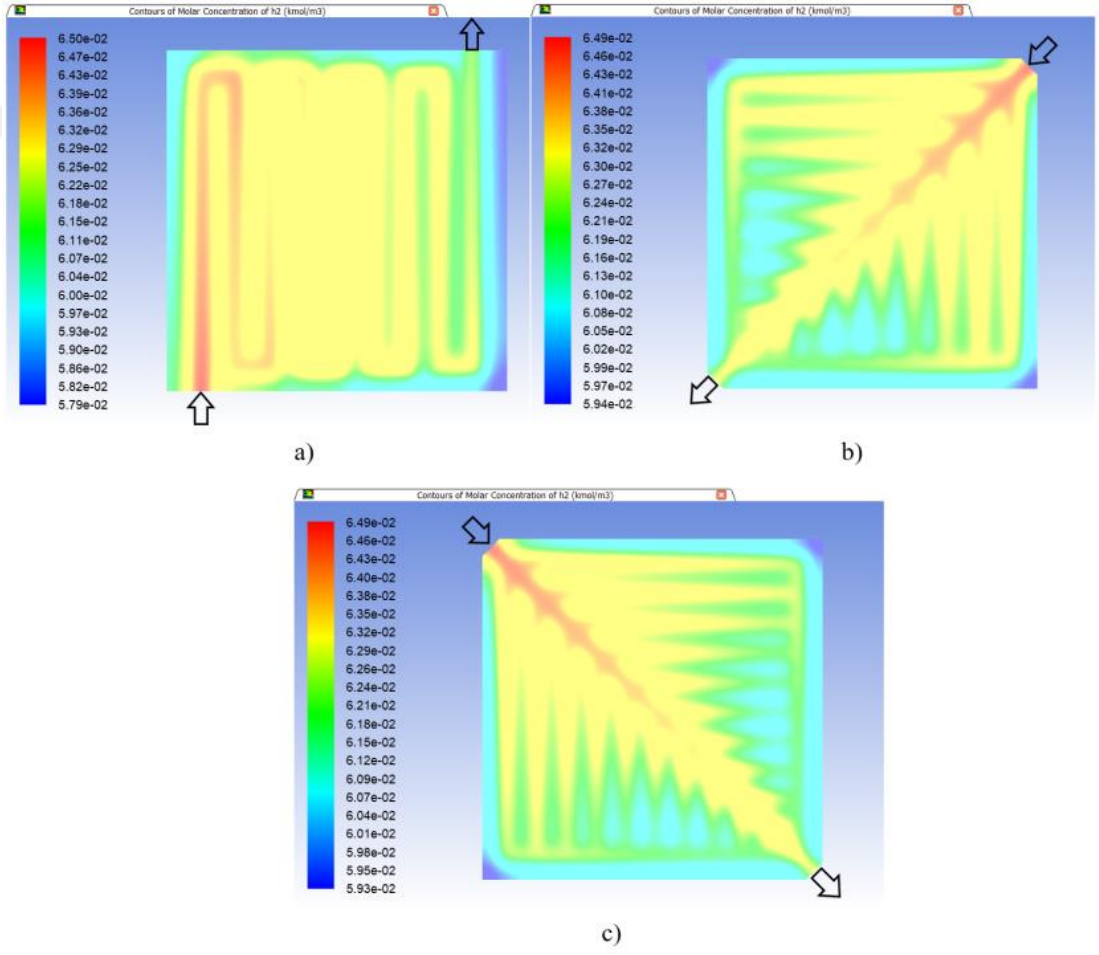
Şekil 6.7: 0,75 V hücre voltajında katot katalizör tabakası/membran arayüzü sıcaklık dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

6.7. Reaktant Gaz Dağılımları

Yakıt hücrelerinde reaktant gaz dağılımı bipolar plakalar üzerinde bulunan akış kanalları ile sağlanmaktadır. Reaktant dağılımı yakıt hücresi içerisinde bütün noktalara eşit şekilde olmalıdır. Bu konuda da akış kanal tasarımı ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan su yönetiminin yanında reaktant dağılımı konusunda da önemli bir rol üstlenmektedir [41].

6.7.1. Hidrojen dağılımı

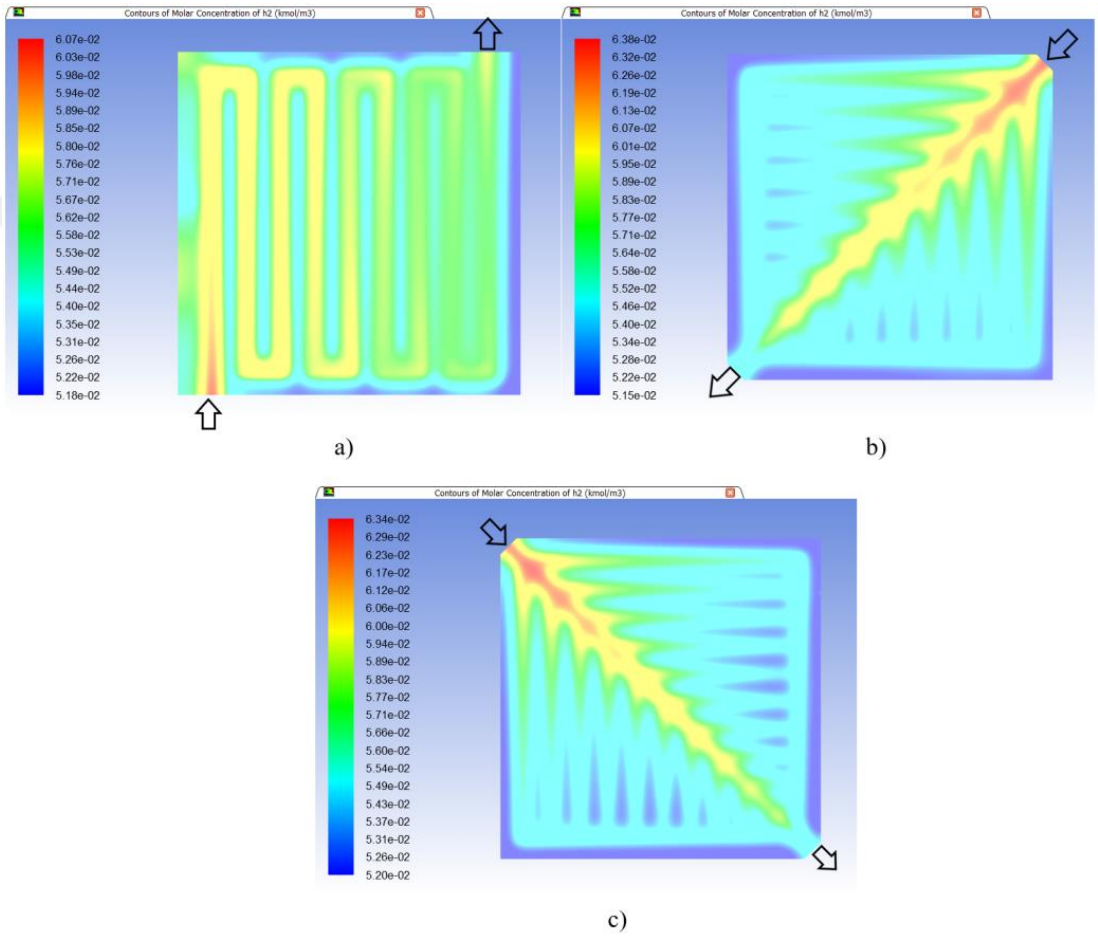
Yakıt hücrelerinde reaktant dağılımları, hız dağılımıyla benzer şekilde oluşmaktadır. Bu dağılımın hücre içerisinde eşit olması, yakıt hücresi aktif alanından homojen akım yoğunluğu üretimini sağlar. Daha yüksek reaktant oranlarına sahip olan bölgelerde reaksiyon oranları yüksek olmakta ve daha yüksek akım yoğunlukları elde edilmektedir. Şekil 6.8'de 0,75 V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları görülmektedir.



Şekil 6.8: 0,75 V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

Sonuçlar incelenirken ölçeklendirme kısımlarına da dikkat edilmesi gerekir. Bu sonuçlar incelendiğinde yaprak tasarım ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım benzer hidrojen dağılım oranlarına sahiptir. Serpantin tasarımda, kanal çıkışına yakın olan bölgelerde yani konsantrasyonun en az gözlendiği noktalarda

hidrojen mol konsantrasyonu 0.0603 kmol/m^3 civarında iken, doğadan esinlenerek oluşturulan diğer iki tasarımda bu değer yaklaşık 0.061 kmol/m^3'dür. Yakıt hücrelerinde dağılan reaktant gazın mol konsantrasyon oranının yüksek olması reaksiyon oluşumunun da yüksek olması demektir ve bu da verimi artıran etkenlerdendir. Şekil 6.9'da 0,45 V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları görülmektedir.

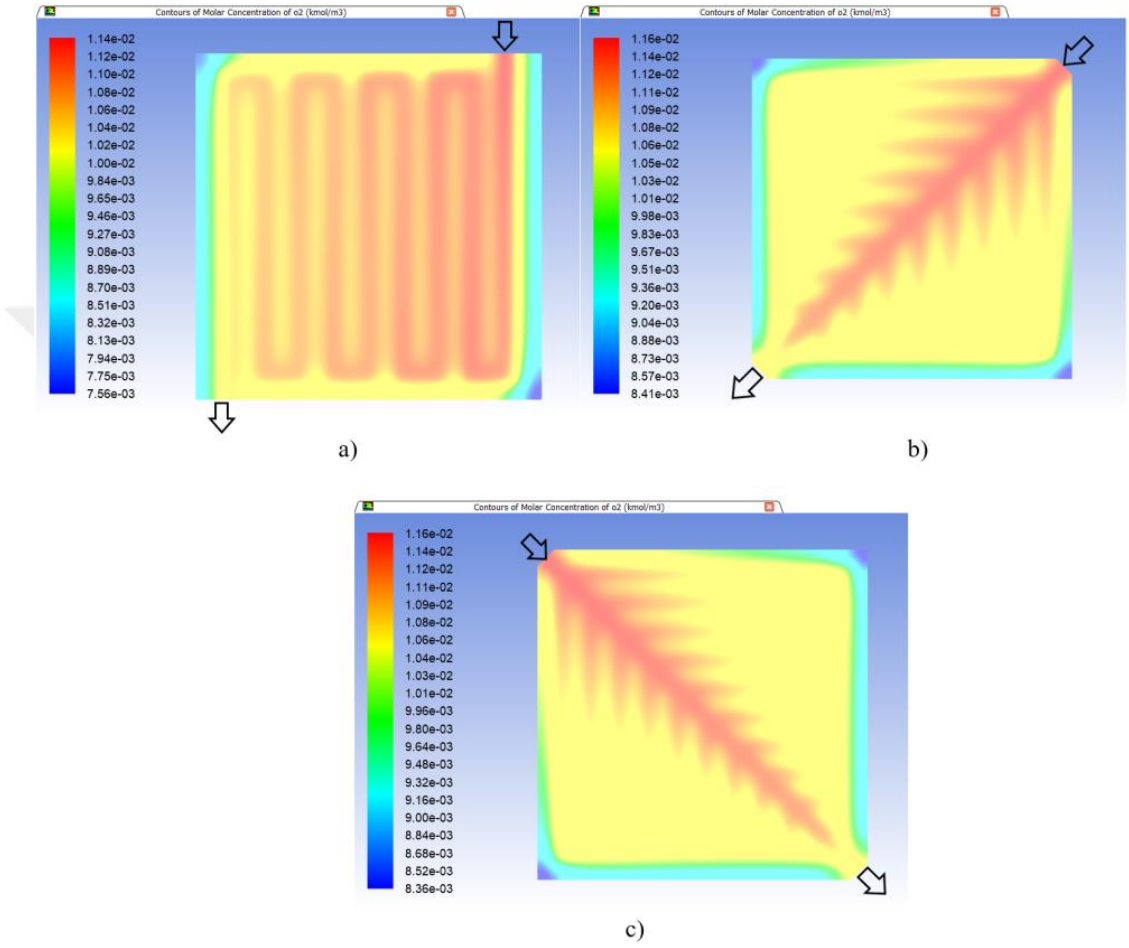


Şekil 6.9: 0,45 V hücre voltajında anot gaz difüzyon tabakasındaki hidrojen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

6.7.2. Oksijen dağılımı

Yakıt hücrelerinde performans, reaktant gaz dağılımının hücre içerisinde yayılış şekline bağlı olarak etkilenir. Şekil 6.10'da 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde oksijen dağılımının, şekil 6.8'deki hidrojen dağılımına göre daha

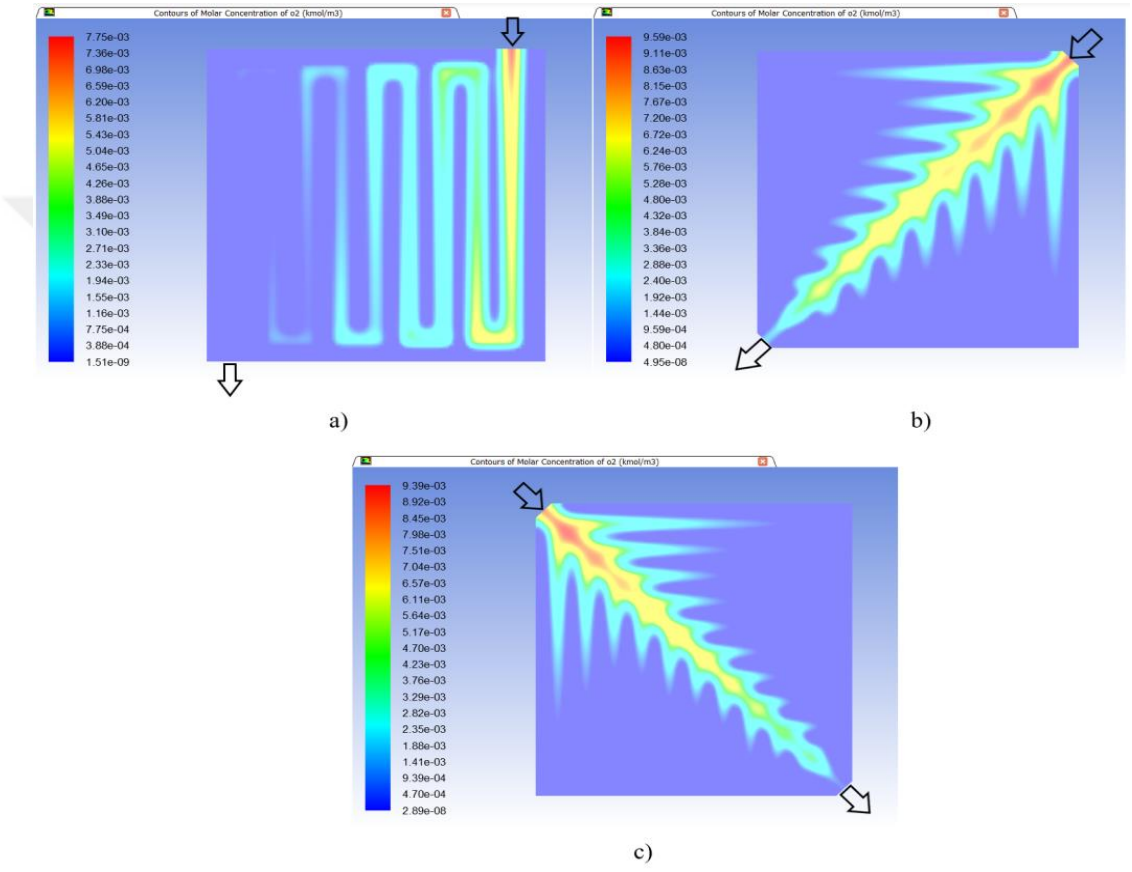
üniform şekilde gerçekleştiği söylenebilir. Serpantin tasarımda, kanal çıkışına yakın olan bölgelerde yani konsantrasyonun en az gözlendiği noktalarda oksijen mol konsantrasyonu 0.0101 kmol/m^3 civarında iken, doğadan esinlenerek oluşturulan diğer iki tasarımda bu değer yaklaşık 0.0106 kmol/m^3'dür.



Şekil 6.10: 0,75 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

Serpantin tasarımda çıkışa doğru, diğer iki tasarımda ise yan kanallarda (ana kanaldan ayrılan ikincil kanallarda) kanal sonuna doğru oksijen yoğunluğunda azalma görülmektedir. Bunun sebebi akış kanalı boyunca oksijen tüketiminden kaynaklanmaktadır. Akış kanalı uzunluğu arttıkça bu sorun da artacak ve reaksiyon için gerekli olan reaktant gaz ihtiyacı karşılanamayacaktır. Bu konuda serpantin tasarıma kıyasla geliştirilen tasarımların akış kanalı uzunluğunun daha kısa olması avantaj sağlamıştır. Bu nedenle daha büyük yakıt hücresi çalışmalarında yan

kanalların artırılması da bu açıdan avantaj sağlayacaktır. Bu durum yakıt hücresi boyutlarının daha büyük olduğu durumlarda daha iyi sonuçlar elde edilmesi anlamına gelir. Bu durum hidrojen dağılımı içinde geçerlidir. Oksijen konsantrasyonu, hidrojene kıyasla iyonize olması için gerekli enerjisi gereksinimleri nedeniyle reaksiyon hızları için önemli bir faktördür. Bu nedenle, daha yüksek oksijen konsantrasyonunun görüldüğü bir tasarım performansı artıracaktır.



Şekil 6.11: 0,45 V hücre voltajında katot gaz difüzyon tabakasındaki oksijen dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

Oksijen dağılımı, yakıt hücrelerinde elektrokimyasal reaksiyonların hızını etkileyen belirleyici bir faktördür. 0,75 V'da elde edilen değerler incelendiğinde daha az oksijen tüketimine bağlı olarak daha eşit ve yüksek konsantrasyonda bir oksijen dağılımı olduğu da söylenebilir. Buna rağmen Şekil 6.11'de 0,45 V hücre voltajında elde edilen sonuçlarda daha homojen olmayan bir dağılım görülmektedir. Yüksek akım yoğunluklarında oksijen tüketimine bağlı olarak daha üniform olmayan bir dağılım elde edilmiştir. Ayrıca, reaktant gazların daha fazla tüketilmesi, kanallarda

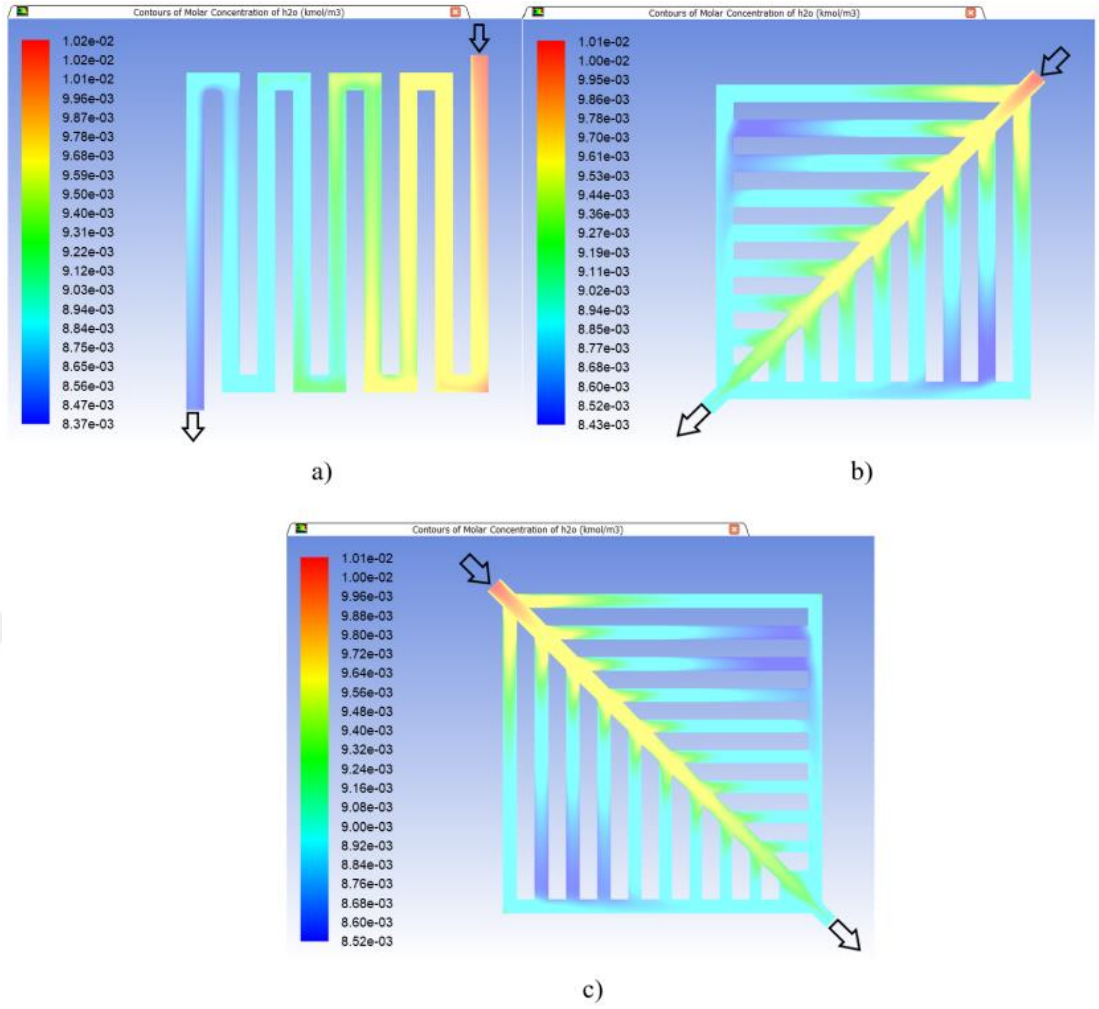
ve membranda daha yüksek su konsantrasyonu anlamına gelir. Buradan yola çıkarak yakıt hücrelerinde, amaç akış alanını optimize etmek ve su yönetimi bakımından inceleme yapmaksa yüksek akım yoğunluklarında elde edilen verilerin daha fazla önem taşıdığı söylenebilir.

6.8. Su Yönetimi

Yakıt hücrelerinde su yönetimi çok önemli bir yere sahiptir ve bu konuyla ilgili birçok araştırma yapılmaktadır. Hücre içerisinde reaksiyonların gerçekleşmesiyle oluşan su tahliye edilememesi durumunda membranda su baskınlarına neden olmaktadır. Ancak membranın iletkenliğini sağlaması için de nemli kalabilmesi gerekir. Membranın kuruması durumunda iletkenlik önemli ölçüde azalacaktır [42].

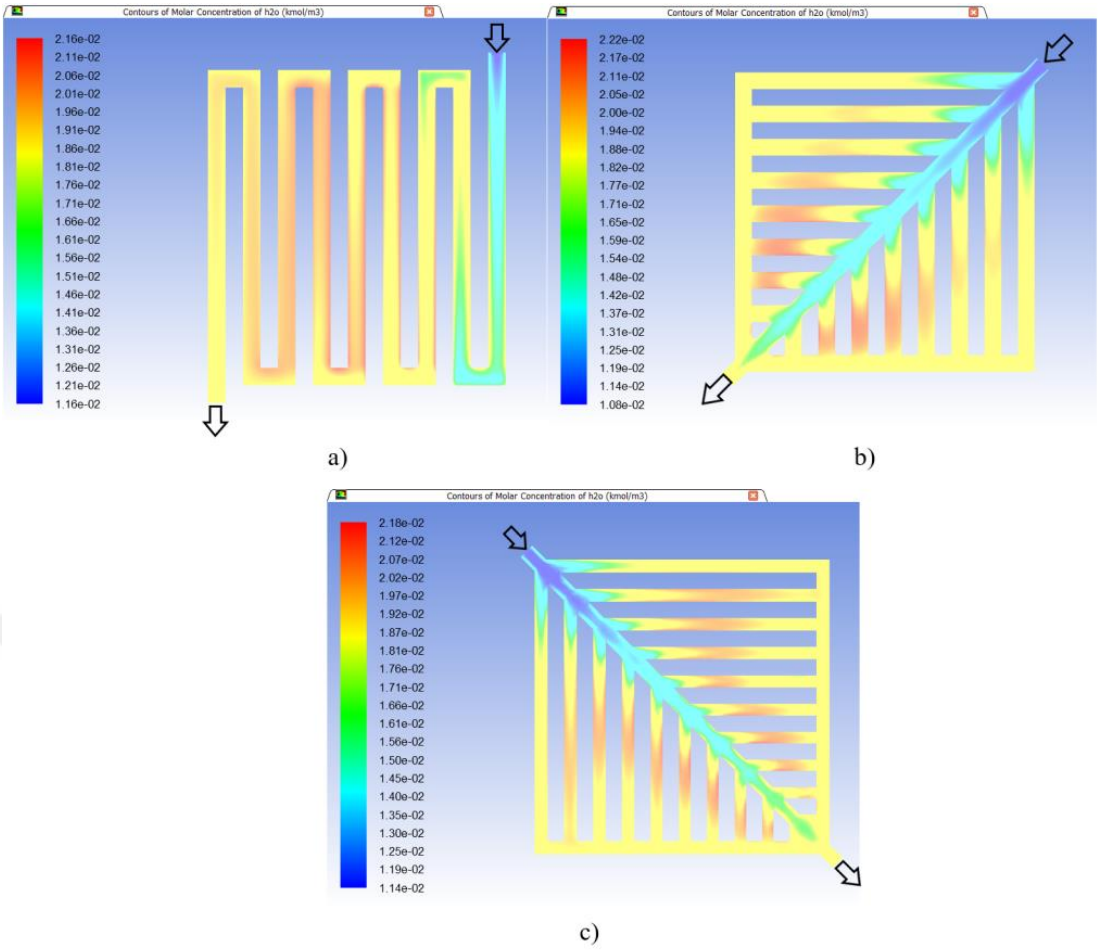
6.8.1. Katot kanallarında su dağılımı

Katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyonu, reaksiyonların yoğun olduğu yerlerde ve su tahliyesinin iyi olmadığı yerlerde yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Bunun dışında giriş kısımlarında su hücreden çıkmak için daha fazla yol kat etmesi gerektiğinden bu bölgelerde su konsantrasyonu daha yüksek iken çıkış bölgelerinde ise bunun tersi söz konusudur. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda serpantin tasarımda kanal uzunluğu dezavantajdır. Şekil 6.12'de 0,75 V hücre voltajında katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyon dağılımları görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde yaprak tasarım ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımda yan kanallarda su tahliyesinin daha iyi olduğu görülebilir. Serpantin tasarımda girişte suyun molar konsantrasyonu 0.0102 kmol/m^3, çıkışta ise 0.00837 kmol/m^3'dür. Yaprak tasarımda ana kanaldaki suyun molar konsantrasyonu ortalama 0.00961 kmol/m^3 iken bu değer yan kanallarda 0.00843 kmol/m^3'e kadar düşmektedir. Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımda ise ana kanaldaki suyun molar konsantrasyonu ortalama 0.00964 kmol/m^3 iken bu değer yan kanallarda 0.00852 kmol/m^3'e kadar düşmektedir.



Şekil 6.12: 0,75 V hücre voltajında katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyon dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

Şekil 6.13'de 0,45 V hücre voltajında katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyon dağılımları görülmektedir. Burada serpantin tasarımda girişte suyun molar konsantrasyonu 0.0116 kmol/m^3, çıkışta ise ortalama 0.0186 kmol/m^3 civarındadır. Yaprak tasarımda ana kanaldaki suyun molar konsantrasyonu ortalama 0.0137 kmol/m^3 iken bu değer yan kanallarda 0.0194 kmol/m^3'e kadar çıkmaktadır. Murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımda ise ana kanaldaki suyun molar konsantrasyonu ortalama 0.014 kmol/m^3 iken bu değer yan kanallarda 0.0192 kmol/m^3 civarlarındadır. Buradan yüksek akım yoğunluklarında sonuçların daha farklı olduğu gözlemlenebilmektedir.

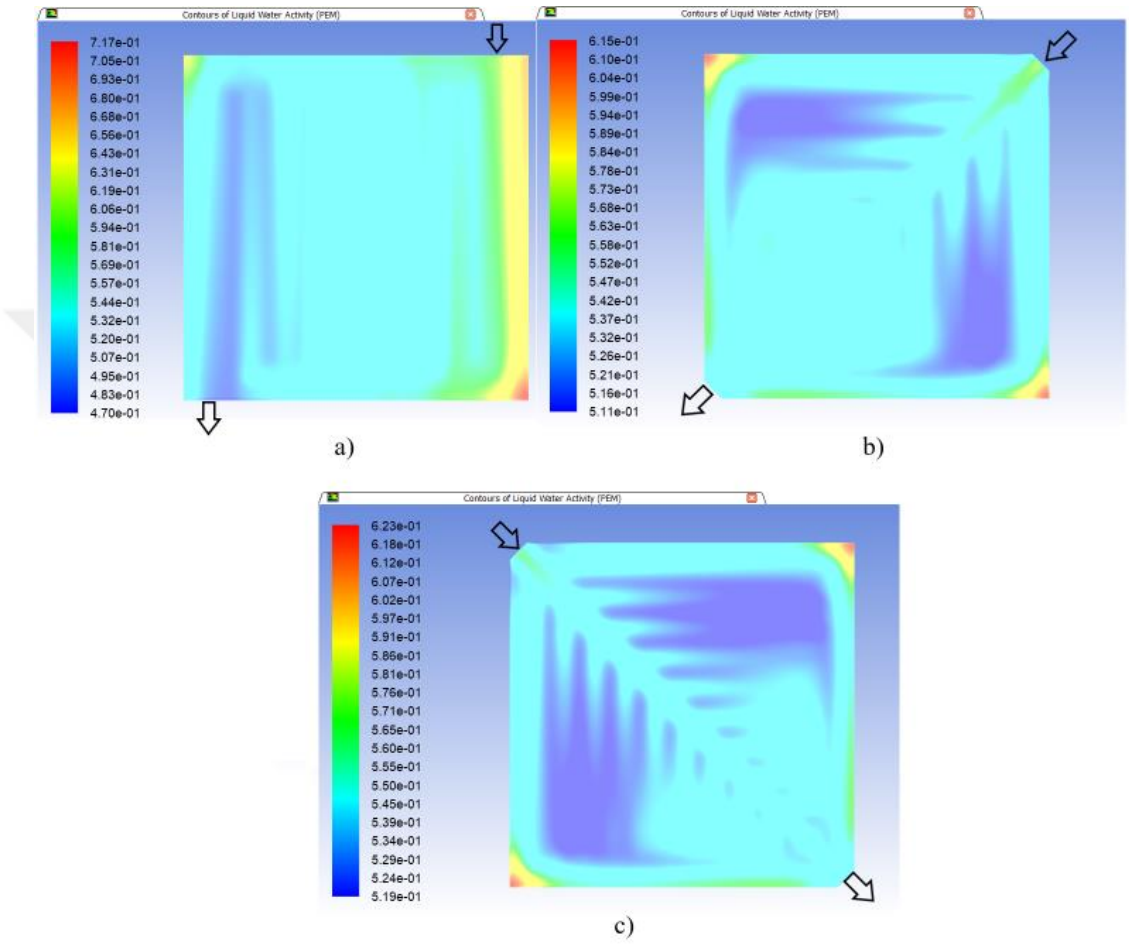


Şekil 6.13: 0,45 V hücre voltajında katot kanallarındaki suyun molar konsantrasyon dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

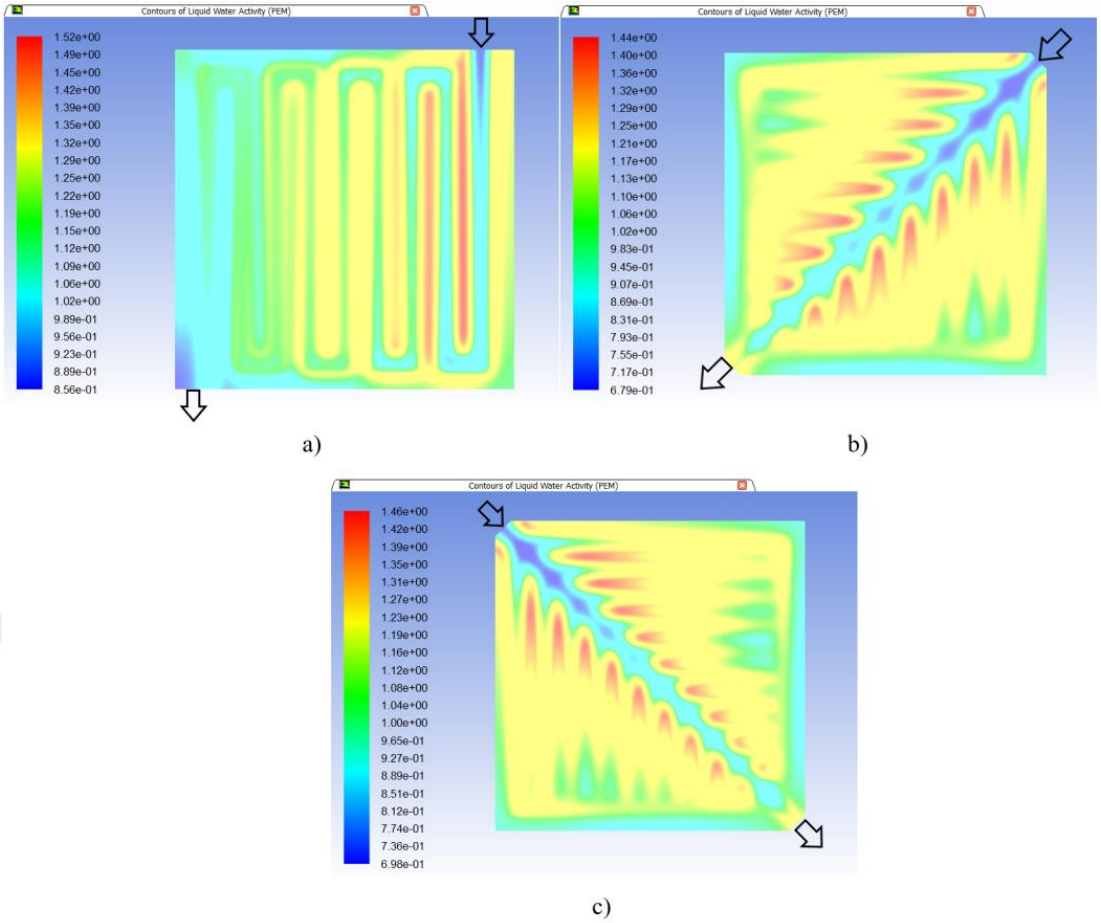
6.8.2. Membranda su içeriği dağılımı

Şekil 6.14'de 0,75 V hücre voltajında membrandaki su içeriğinin dağılımını da ifade eden membran sıvı su aktivitesi görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi serpantin tasarımda sıvı suyun girişte daha yoğun görüldüğü gözlemlenmektedir. Membrandaki bu durum gaz difüzyon tabakasında da benzer şekilde giriş kısmındaki gözeneklerin sıvı su ile tıkanması ve reaktant gazların katalizör yüzeyine geçişine engel oluşturması ve reaksiyon oluşumunu kötü yönde etkilemesi anlamına gelir. Bu nedenle yakıt hücrelerinde membranda su baskınına neden olmayacak tasarımlar tercih edilir. Sonuç olarak yaprak tasarım ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarımda sıvı su tahliyesi serpantin tasarıma göre daha iyi olduğu söylenebilir.

Şekil 6.15'de 0,45 V hücre voltajında membran sıvı su aktivitesi görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde düşük akım yoğunluğunda elde edilen sonuçların aksine yüksek akım yoğunluklarında su içeriğindeki dağılım hız dağılımına benzer şekilde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.14: 0,75 V hücre voltajında membrandaki su içeriği dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.



Şekil 6.15: 0,45 V hücre voltajında membrandaki su içeriği dağılımları; a) serpantin tasarım, b) yaprak tasarım, c) murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarım.

BÖLÜM 7. ÖNERİLER

Bu çalışmada; serpantin, yaprak ve murray kanununa göre oluşturulan yaprak tasarıma sahip PEM yakıt hücresi modelleri sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak yüksek akım yoğunluğu değerlerinde doğadan esinlenerek oluşturulan modellerin hücre performansını artırdığı gözlemlenmiştir. Buradan geliştirilen modellerin su yönetimi konusunda geleneksel serpantin tasarımdan daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun yanında reaktant dağılımları ve akım yoğunluğu dağılımlarının da hücrede eşit dağılımıda sağlanmıştır.

Yapılan çalışmada, murray kanununa göre oluşturulan tasarımın serpantin tasarıma kıyasla daha iyi olduğu görüldüğü halde yan kanallarda da dallanma yapısının oluşturulması ve yan kanalların bitişinde yer alan kanalın geliştirilmesinin su tahliye kabiliyetini daha da iyileştirecektir. Daha büyük aktif alana sahip yakıt hücrelerinde yan kanallardaki dallanma yapısındaki artış kanal uzunluğunu azaltacağından ve daha homojen dağılım sağlayacağından hücre performansını artıracaktır. Aynı zamanda yan kanalların bitişinde yer alan ve tüm bu yan kanallardaki oluşan suyun hücreden dışarı atılmasını sağlayan kanalın geliştirilmesi su tahliye kabiliyetini daha da artıracak buna bağlı olarak da yüksek akım yoğunluklarında yaşanan konsantrasyon kayıpları azalacaktır.

KAYNAKLAR

[1] (URL1) < https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_basics.html> erişim tarihi:17 Ocak 2021.

[2] Barbir, F. , *PEM Fuel Cells Theory and Practice*. 2005: Elsevier Academic Press.

[3] Kandlikar SG, Lu Z. *Thermal management issues in a PEMFC stack e a brief review of current status. Appl. Therm. Eng*., 2009.

[4] Manso A. P., Marzo F. F., Barranco J., Garikano X., and Garmendia Mujika M., "*Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review*," International Journal of Hydrogen Energy 37, 15256–15287 (2012).

[5] (URL2) < http://yunus.hacettepe.edu.tr > erişim tarihi: 22 Ocak 2021.

[6] Bıyıkoğlu A., "*Yakıt hücrelerinin tarihsel gelişimi, çalışma prensipleri ve bugünkü durumu"*.G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi (2003) 523-542.

[7] (URL3) https://studylibtr.com/doc/582756/yakıt-pilleri-ders-notları Bülent Ecevit Üniversitesi>erişim tarihi: 29 Ocak 2021.

[8] Kütük E. (2011). "*Yakıt pillerinde kullanılan bipolar plakaların hesaplamalı akışkan analizi*"(Yüksek lisans tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

[9] Kahraman H., Çevik İ., "*PEM yakıt pillerinde kullanılacak metalik çift kutuplu plakanın geliştirilmesi*" 6th International Advanced Technologies Symposium 2011; Elazığ, Turkey.

[10] Yılmaz, A., Ünvar, S., Ekmen, M. ve Aydın, S., (2017). "*Yakıt Pili Teknolojisi*", Technological Applied Sciences (NWSATAS), 12(4):185-192.

[11] Okur O.,(2012). "*Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pili anot ve katot elektrokatalizörünün sentezi ve karakterizasyonu*"(Doktora tezi).Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[12] Çakar S., (2011). "*Katı oksit yakıt pillerinde kullanılabilir özellikli Nb_2O_5 katkılanmış δ-Bi_2O_3 tabanlı katı elektrolitlerin ince filmlerinin üretilmesi ve karakterizasyonları*"(Yüksek lisans tezi).Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

[13] Yılmaz B., (2006). "*Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri için anot üretimi*" (Yüksek lisans tezi).İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] Yeğen G., (2009). "*Doğrudan metanol yakıt pili membran elektrot bileşkesinin tasarım ve optimizasyonu"* (Yüksek lisans tezi).İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[15] Fuel Cell Handbook (2004). Seventh Edition, BEG&G Technical Services, Inc.

[16] Dong J., Liu S., " *Numerical investigation of novel bio-inspired flow field design scheme for PEM fuel cell"*. J. Renewable Sustainable Energy **12**, 044303 (2020).

[17] Guo N., Leu M.C., Koylu U.O. "*Bio-inspired flow field designs for polymer electrolyte membrane fuel cells"*. International Journal of Hydrogen Energy 39 (2014) 21185-21195.

[18] Kerkoub Y., Benzaoui A., Haddad F., Ziari Y.K., "*Channel to rib width ratio influence with various flow field designs on performance of PEM fuel cell"*. Energy Conversion and Management 174 (2018) 260–275.

[19] Kahraman H., Çoban A., "*Performance Improvement of a Single PEM Fuel Cell Using an Innovative Flow Field Design Methodology*". Arabian Journal for Science and Engineering (2020).

[20] Seyhan M., Akansu Y.E., Murat M., Korkmaz Y., Akansu S.O. "*Performance prediction of PEM fuel cell with wavy serpentine flow channel by using artificial neural network"*. International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 25619-25629.

[21] Sierra J.M., Figueroa-Ramı´rez S.J.,Dı´az S.E., Vargas J., Sebastian P.J. "*Numerical evaluation of a PEM fuel cell with conventional flow fields adapted to tubular plates".* International Journal of Hydrogen Energy 39 (2014) 1669-16705.

[22] Obayopo S.O., Bello-Ochende T., Meyer J.P. "*Modelling and optimization of reactant gas transport in a PEM fuel cell with a transverse pin fin insert in channel flow".* International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) 10286-10298.

[23] Kloess J.P., Wang X., Liuc J., Shi Z., Guessous L. "*Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells"* Journal of Power Sources 188 (2009) 132–140.

[24] Wang Y., Chen K.S. and Cho S.C., "*PEM fuel cells: thermal and water management Fundamentals*". New York: Momentum Press, (2013).

[25] Cai Y., Fang Z., Chen B., Yang T., Tu Z., "*Numerical study on a novel 3D cathode flow field and evaluation criteria for the PEM fuel cell design*". Energy, 161: 28-37 (2018).

[26] Bilgili M., Sivrioğlu M., "*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 of Gazi University, Vol 31, No 1, 51-63 (2016).

[27] Iranzo A., Munoz M., Rosa F., Pino J., "*Numerical model for the performance prediction of a PEM fuel cell. Model results and experimental validation*". International Journal of Hydrogen Energy 35: 11533-50 (2010).

[28] ANSYS 12.0 Fuel Cell Module Manual, ANSYS Inc. (2009).

[29] Arvay A., Ahmed A., Peng X.H., Kannan A.M., "*Convergence criteria establishment for 3D simulation of proton exchange membrane fuel cell*". International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) 2482-2489.

[30] Bilgili M.,(2011). "*Akış kanalları içerisindeki yarı silindirik blokların PEM yakıt hücresi performansına etkisinin üç boyutlu analizi"*.(Doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[31] Um S., Wang C.Y., Chen K.S., "*Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells*". J. Electrochem Soc 2000;147:4485-93.

[32] Yalın H.B., (2012). "*Tek kanallı polimer elektrolit membranlı yakıt pillerinin sayısal analizi"* (Yüksek lisans tezi). Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

[33] Özdemir B., (2012). "*Serpantin kanallı PEM yakıt hücresinin sayısal analizi"* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[34] Alvarado B.R., Guerrero A.H., Robles D.J., Li P., "*Numerical investigation of the performance of symmetric flow distributors as flow channels for PEM fuel cells*". International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) 436-448.

[35] Springer T.E., Zawodzinski T.A., Gottesfeld S., "*Polymer electrolyte fuel cell model*". J. Electrochem Soc 1991;138:2334-41.

[36] Sherman, T.F., "*On connecting large vessels to small: the meaning of Murray's law"*. The Journal of General Physiology, 78: 431-453 (1981).

[37] Choopanya P., Yang Z., "*An effective mesh strategy for CFD modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells*". International Journal of Hydrogen Energy 41 (2016) 6445-6456.

[38] "ANSYS Fluent Help Documentation, ANSYS Inc.", 2012.

[39] Hashemi,F. , Rowshanzamir, S., Rezakazemi, M., "*CFD Simulation of PEM Fuel Cell Performance: Effect of Straight and Serpentine Flow Fields*", Mathematical and Computer Modelling, 1540-1557 (2012).

[40] Tutorial: Modeling a Single-Channel, Counter-Flow Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell, ANSYS Inc. (2011).

[41] Yılmaz C., (2018). "*Bipolar plaka gaz akış kanalı desen tasarımının pem yakıt pili performansına etkisi"* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[42] Kahraman H.,(2016). "*Akış kanal tasarımının Polimer Elektrolit Membran yakıt hücresi performansına etkisinin incelenmesi*" (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.