

**PEM TİPİ YAKIT PİLLERİ İÇİN ÇİFT KUTUPLU AKIŞ PLAKALARININ  
MODELLENMESİ**

**AHMET EKİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2010**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Prof. Dr. Ünver KAYNAK  
Anabilim Dalı Başkanı

Ahmet EKİZ tarafından hazırlanan PEM TİPİ YAKIT PİLLERİ İÇİN ÇİFT KUTUPLU AKIŞ PLAKALARININ MODELLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Yrd. Doç. Dr. Mehmet SANKIR  
Tez Danışmanı

---

Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU  
Yardımcı Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL

Üye : Doç. Dr. Derek K. BAKER  
( ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü )

Üye : Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet SANKIR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet EKİZ

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanları** : Yrd. Doç. Dr. Mehmet SANKIR  
Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Ağustos 2010

**Ahmet EKİZ**

## **PEM TİPİ YAKIT PİLLERİ İÇİN ÇİFT KUTUPLU AKIŞ PLAKALARININ MODELLENMESİ**

### **ÖZET**

Yakıt pili teknolojisi, hidrojen enerjisini en ekonomik ve verimli kullanan teknolojilerden bir tanesidir. Kullandığı yakıt ve üretebildiği güç bakımından çeşitli yakıt pilleri mevcuttur. Bu yakıt pilleri içerisinde polimer elektrolit membranlı yakıt pillerinin (PEMYP) en çok gelecek vaad ettiği öngörülmektedir. Bu tez çalışmasında tek hücreli bir polimer elektrolit membranlı yakıt pili Comsol Multiphysics programı kullanılarak iki boyutlu olarak modellenmiştir. Akışa paralel model oluşturulmuştur. Akış kanalına farklı geometrilerde engeller konularak daha fazla yakıtı reaksiyona zorlamak hedeflenmiştir. Bu şekilde ideal performans değerlerine yakın akım ve güç yoğunlukları oluşturulmaya ve kayıpları en aza indirmeye çalışılmaktadır. Sınır koşulları olarak değişik hız değerleri girilmiştir. Bu şekilde debiyi sabit tutmak hedeflenmiştir. Ayrıca çıkış sınır şartları için farklı basınç değerleri verilerek performans etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu görülmüştür ki; giriş hızının artması, çıkış basıncının artması, katot tarafındaki sınır şartlarına anoda göre daha fazla oksidant beslenmesi ve kanal boyunca bulunan engellerin derinliğinin artması sonrasında yakıt hücresi performansları artmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** PEM Yakıt Pili, Comsol, Yakıt Hücresi, 2-D Modelleme

**University** : TOBB Economics and Technology University  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Assistant Prof. Dr. Mehmet SANKIR  
**Co-Supervisor** : Assistant Prof. Dr. Sıtkı USLU  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – August 2010

**Ahmet EKİZ**

**MODELLING OF BIPOLAR PLATES FOR PROTON EXCHANGE  
MEMBRANE FUEL CELLS**

**ABSTRACT**

Fuel cell technology is one of the most economic and efficient ways to utilize hydrogen energy. Various types of fuel cells are present regarding the fuel type and amount of produced power. Among those, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are very promising. In this thesis work, a 2D proton exchange membrane fuel cell unit cell was modeled using Comsol Multiphysics software. Cell section was taken parallel to flow direction. Obstacles with various geometries were placed on the flow channel in order to force more amount of reactant species to react. By doing that, values of current and power densities that are close to ideal performance were tried to be approached and losses were tried to be minimized. As boundary conditions, several inlet velocities were applied. By doing so, reactant flow rate was aimed to be kept constant. Also, the effect of setting different pressure values at the outlet on performance was investigated. Consequently, it was observed that increasing inlet velocity and outlet pressure, feeding more reactant at the cathode compared to the anode and increasing the depth of the obstacles placed through the channel enhanced the fuel cell performance.

**Keywords:** PEM Fuel Cell, Comsol, Fuel Cell, 2-D Modeling

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren kıymetli hocalarım ve danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Mehmet SANKIR ve Yrd. Doç. Dr. Sıtkı USLU'ya, bu çalışmanın ortaya çıkmasında çok önemli katkıları bulunan ODTÜ Makine Mühendisliği bölümü öğretim üyesi sayın **Doç. Dr. Derek K. BAKER** ve ODTÜ Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisansını tamamlayıp doktorasına Amerika'da Drexel Üniversitesi'nde devam **Ertan AĞAR'a**, katkılarından dolayı jüri üyeleri sayın Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL ve Yrd. Doç. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU'na, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, yardımları için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü son sınıf öğrencisi A.Talha CAMCI'ya, maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim eşim ve aileme ve bu çalışmayı (SANTEZ 00277-STZ.2008-1) numaralı projesiyle maddi olarak destekleyen Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'na teşekkürü bir borç bilirim.

*EŐİME ve KIZLARIMA*

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	viii
TABLolarIN LİSTESİ .....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xiii
KISALTMALAR .....	xv
SEMBOL LİSTESİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kaynak Taraması .....	2
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	5
BÖLÜM 2 .....	6
2. YAKIT PİLLERİ .....	6
2.1. Yakıt Pilleri Çalışma Prensibi ve Avantajları .....	6
2.2. Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi .....	9
2.3. Yakıt Pili Türleri .....	12
2.3.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili .....	13
2.3.2. Alkali Yakıt Pili .....	14
2.3.3. Eriyik Karbonat Yakıt Pilleri .....	15



2.3.4. Fosforik Asit Yakıt Pilleri .....	16
2.3.5. Katı Oksit Yakıt Pili .....	17
2.3.6. Direk Metanol Yakıt Pili .....	18
2.4. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili(PEMYP) .....	20
2.4.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili Bileşenleri .....	21
2.4.1.1 Polimer Elektrolit Membran .....	22
2.4.1.2 Elektrotlar .....	23
2.4.1.3 Gaz Difüzyon Destek Tabakaları .....	24
2.4.1.4 Çift Kutuplu Plakalar .....	24
2.4.2. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili Termodinamiği .....	26
2.4.2.1 Yakıt Pili Verimi .....	26
2.4.2.2 Yakıt Pili Kayıpları .....	30
2.4.2.3 Aktivasyon Kayıpları .....	32
2.4.2.4 Ohmik Kayıplar .....	33
2.4.2.5 Konsantrasyon Kayıpları .....	33
2.4.2.6 Toplam Kayıplar .....	34
BÖLÜM 3 .....	35
3. MODELLEME .....	35
3.1. Genel Durum .....	35
3.2. PEM Yakıt Pili'nin Sayısal Modellenmesi .....	37
3.2.1. Modellemenin Amacı ve Model Varsayımları .....	37
3.2.2. COMSOL Uygulama Modları ve Matematik Denklemler .....	38

3.2.2.1	Yük Korunumu .....	39
3.2.2.2	Gözenekli Ortam Akışı için Momentum Korunum .....	41
3.2.2.3	Maxwell-Stefan Kütle Transferi .....	42
3.3.	Model Analizi .....	44
3.3.1.	Model Geometrisi .....	44
3.3.2.	Kullanılan Sabitler .....	44
3.3.3.	Model İçin Kullanılan COMSOL Uygulama Modları .....	46
3.3.3.1	Incompressible Navier-Stokes Modu .....	46
3.3.3.2	Elektrotlar İçin Conductive Media DC Uygulama Modu .....	47
3.3.3.3	Membran İçin Conductive Media DC Uygulama Modu .....	48
3.3.3.4	Anottaki Türler İçin İçin Maxwell-Stefan Diffusion and Convection Uygulama Modu .....	48
3.3.3.5	Katottaki Türler İçin İçin Maxwell-Stefan Diffusion and Convection Uygulama Modu .....	49
BÖLÜM 4	.....	50
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	50
4.1.	Çözüm Prosedürü .....	50
4.2.	Paralel Model Geometrisi ve Çözüm Ağı .....	50
4.2.1.	Model Uzunluğunun Etkisi .....	52
4.2.2.	Giriş Hızı Etkisi .....	53
4.2.3.	Çıkış Basıncı Etkisi .....	54
4.3.	Akış Kanalına Engel Konulması .....	56
4.4.	Akış Analizi .....	72

BÖLÜM 5 .....	83
5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....	83
BÖLÜM 6 .....	86
6. GELECEK ÇALIŞMALAR .....	86
KAYNAKLAR .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	89

## TABLULARIN LİSTESİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. Yakıt pili reaksiyonları	13
Tablo 2.2. Yakıt pillerinin kıyaslanması	19
Tablo 2.3. PEM yakıt pili reaksiyonları	20
Tablo 2.4. Hidrojenin 25°C'deki yükseltgenme reaksiyonu için, Entalpi, Entropi ve Gibbs serbest enerjisi değerleri	27
Tablo 2.5. Farklı sıcaklıklardaki, $\Delta G$ , $E_{rev}$ ve verim değerleri	29
Tablo 3.1. Akışa paralel modelin geometrik özellikleri	44
Tablo 3.2. Modellemede kullanılan sabit değerler	45
Tablo 3.3. Incompressible Navier-Stokes modu için sınır değerler	47
Tablo 3.4. İletken alan Dc uygulaması modu (elektrot) için sınır koşulları	48
Tablo 3.5. İletken alan Dc uygulaması modu (zar) için sınır koşulları	48
Tablo 3.6. Anotta Maxwell-Stefan difüzyon ve iletim uygulama modu için sınır koşulları	48
Tablo 3.7. Anotta Maxwell-Stefan difüzyon ve iletim uygulama modu için sınır koşulları	49
Tablo 4.1. Paralel model için çözüm ağı istatistikleri	51
Tablo 4.2. Farklı çıkış basınçları	55
Tablo 4.3. Dikdörtgen engelli model 1 için çözüm ağı istatistikleri	58
Tablo 4.4. Dikdörtgen engelli model 2 için çözüm ağı istatistikleri	59
Tablo 4.5. Dikdörtgen engelli model 3 için çözüm ağı istatistikleri	60
Tablo 4.6. Daire engelli model 1 için çözüm ağı istatistikleri	61
Tablo 4.7. Daire engelli model 2 için çözüm ağı istatistikleri	62
Tablo 4.8. Daire engelli model 3 için çözüm ağı istatistikleri	63
Tablo 4.9. İkizkenar yamuk engelli model 1 için çözüm ağı istatistikleri	64
Tablo 4.10. İkizkenar yamuk engelli model 2 için çözüm ağı istatistikleri	65
Tablo 4.11. V=0.6 V için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması	68
Tablo 4.12. V=0.5 V için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması	69
Tablo 4.13. V=0.6 V için farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması	71
Tablo 4.14. V=0.5 V için farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması	72

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yakıt pillerinin genel gösterimi	7
Şekil 2.2. Emisyon değerlerinin karşılaştırılması	8
Şekil 2.3. Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi	10
Şekil 2.4. GM yakıt pili ile çalışan bir modeli	11
Şekil 2.5. PEM yakıt pili şematik gösterimi	14
Şekil 2.6. Alkali yakıt pili şematik gösterimi	15
Şekil 2.7. Erimiş karbonat yakıt pili şematik gösterimi	16
Şekil 2.8. Fosforik asit yakıt pili şematik gösterimi	17
Şekil 2.9. Katı oksit yakıt pili şematik gösterimi	18
Şekil 2.10. PEM yakıt pili şematik diyagramı	21
Şekil 2.11. PEM yakıt pili bileşenleri	22
Şekil 2.12. Çift kutuplu plakalar a)Paralel akış kanalı, b)Serpantin tipi akış kanalı	25
Şekil 2.13. Yakıt pilinde ideal ve gerçek voltaj akım karakteristiği	31
Şekil 2.14. Tipik bir yakıt pili güç yoğunluğu ve polarizasyon eğrileri	32
Şekil 3.1. PEMYP modellemede kullanılan ticari CFD yazılımları (Literatürdeki modellemelerde en fazla görülenler)	36
Şekil 3.2. Akışa paralel model	38
Şekil 3.3. Paralel modelde sınır değerlerinin numaralandırılması	46
Şekil 4.1. Paralel Model	51
Şekil 4.2. Paralel model çözüm ağı yapısı	52
Şekil 4.3. Paralel modelde farklı iki uzunluğa göre performans eğrisi karşılaştırması	53
Şekil 4.4. Paralel modelde farklı giriş hızlarında performans eğrisi karşılaştırması	54
Şekil 4.5. Paralel modelde farklı çıkış basınçlarında performans eğrisi karşılaştırması	55
Şekil 4.6. Dikdörtgen engelli model 1	58
Şekil 4.7. Dikdörtgen engelli model 1 çözüm ağı yapısı	58
Şekil 4.8. Dikdörtgen engelli model 2	59
Şekil 4.9. Dikdörtgen engelli model 2 çözüm ağı yapısı	59
Şekil 4.10. Dikdörtgen engelli model 3	60
Şekil 4.11. Dikdörtgen engelli model 3 çözüm ağı yapısı	60
Şekil 4.12. Daire engelli model 1	61
Şekil 4.13. Daire engelli model 1 çözüm ağı yapısı	61
Şekil 4.14. Daire engelli model 2	62
Şekil 4.15. Daire engelli model 2 çözüm ağı yapısı	62
Şekil 4.16. Daire engelli model 3	63
Şekil 4.17. Daire engelli model 3 çözüm ağı yapısı	63
Şekil 4.18. İkizkenar yamuk engelli model 1	64
Şekil 4.19. İkizkenar yamuk engelli model 1 çözüm ağı yapısı	64
Şekil 4.20. İkizkenar yamuk engelli model 2	65

Şekil 4.21. İkizkenar yamuk engelli model 2 çözüm ağı yapısı	65
Şekil 4.22. Paralel model ile dikdörtgen engelli modellerin karşılaştırılması	66
Şekil 4.23. Paralel model ile daire engelli modellerin karşılaştırılması	67
Şekil 4.24. Paralel model ile ikizkenar yamuk engelli modellerin karşılaştırılması	67
Şekil 4.25. En uç iki değer ile arada yer alan herhangi bir değer karşılaştırılması	68
Şekil 4.26. Farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için engelli modeller ile paralel modelin karşılaştırılması	70
Şekil 4.27. Farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için en uç iki modelin karşılaştırılması	71
Şekil 4.28. Daire engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri	74
Şekil 4.29. Daire engelli model 3 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri	76
Şekil 4.30. Dikdörtgen engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri	78
Şekil 4.31. Dikdörtgen engelli model 3 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri	80
Şekil 4.32. İkizkenar yamuk engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri	82

## KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

<b>AFP</b>	Alkali yakıt pilleri
<b>CFD</b>	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
<b>DMYP</b>	Direk metanol yakıt pilleri
<b>EKYP</b>	Erimiş karbonat yakıt pilleri
<b>FAYP</b>	Fosforik asit yakıt pilleri
<b>GDE</b>	Gaz difüzyon elektrot
<b>GDL</b>	Gaz yayılım tabakası
<b>GDT</b>	Gaz difüzyon tabakaları
<b>HHV</b>	Yüksek ısıtma ısısı
<b>KOYP</b>	Katı oksit yakıt pilleri
<b>LHV</b>	Düşük ısıtma ısısı
<b>MEB</b>	Membran elektrot birleşimini
<b>PEM</b>	Polimer elektrolit membran
<b>PEMYP</b>	Polimer elektrolit membran yakıt pili

## SEMBOL LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
$e$	Bir elektronun yükü
$E_o$	Standart teorik gerilim farkı
$E_{eq}$	Denge gerilimi
$E_{rev}$	Teorik(tersinir) gerilim farkı
$F$	Faraday sabiti, 96485 [C/mol]
$G$	Gibbs serbest enerjisi [kJ]
$G_o$	Standart Gibbs serbest enerjisi [kJ]
$h_f$	Oluşum ısısı
$H$	Entalpi
$i$	Akım yoğunluğu [ $A/m^2$ ]
$i_0$	Değişim akım yoğunluğu [ $A/m^2$ ]
$i_L$	Yakıt pili iç akımı
$K$	Henry sabiti (Pa.m <sup>3</sup> /mol).
$M$	Mol kütlesi [kg/kmol]
$n$	Mol başına elektron sayısı, H <sub>2</sub> için.
$N$	Avogadro sayısı
$R$	İdeal gaz sabiti (8.3145 J/mol°K)
$R_{pil}$	Hücredeki toplam direnç
$S$	Entropi
$T$	Sıcaklık
$V_{cell}$	Hücre voltajı
$w$	Kütle kesri
$W_{el}$	Elektrik işi
$x$	Mol kesri

### Yunan Harfleri

$\alpha$	Elektron transfer katsayısı
$\delta$	Mesafe [ $m$ ]
$\epsilon$	Gözeneklilik
$\eta$	Gaz viskozitesi [ $mPa.s$ ]
$\eta_{act}$	Aktivasyon kaybı
$\eta_{cons}$	Konsantrasyon kaybı
$\eta_{ohm}$	Ohmik kayıp
$\eta_{rev}$	Tersinir (ideal) verim
$\kappa$	İletkenlik [ $S/m$ ]
$\kappa_p$	Geçirgenlik [ $m^2$ ]
$\lambda_{H_2O}$	Sürüklenme katsayısı, su için
$\rho$	Yoğunluk [ $kg/m^3$ ]
$\phi$	Potansiyel [ $V$ ]



<b>İndisler</b>	<b>Açıklama</b>
<i>a</i>	Anot
<i>act</i>	Aktivasyon
<i>agg</i>	Agglomerate
<i>c</i>	Katot
<i>cell</i>	Hücre
<i>cons</i>	Konsantrasyon
<i>e</i>	Türler
<i>el</i>	Elektrik
<i>eq</i>	Denge
<i>gas</i>	Gaz
<i>in</i>	İç
<i>liq</i>	Sıvı
<i>mix</i>	Karışım
<i>ohm</i>	Ohmik
<i>ref</i>	Referans
<i>rev</i>	Tersinir

## BÖLÜM 1

### 1. GİRİŞ

#### 1.1. Giriş

Fosil yakıtların keşfi dünyadaki enerji ihtiyacını o günün şartlarında karşılamış olsa bile günümüzde fosil yakıtların yeterliliği ve çevreye olan etkileri herkes tarafından bilindiği üzere tartışılır hale gelmiştir. Her şeyden önce fosil yakıtların rezervleri hızla tükenmektedir. Ayrıca bunların elde edilmesi ve enerjiye dönüştürülmeleri sırasında oluşan çevre kirliliği insanlığın geleceğini tehdit etmektedir. Bu olumsuz etkenler sonucunda, teknolojiden vazgeçemeyecek olan insanoğlu enerji ihtiyacını karşılamak için alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Yeni ve yenilenebilir enerji olarak adlandırılan bu alternatif kaynakların en önemli özelliği çevreye en az zarar verecek özelliklere sahip olmalarıdır. Başta rüzgar enerjisi olmak üzere güneş, jeotermal kaynaklar, hidroelektrik, biyoenerji ve hidrojen dünyanın artan çevre kirliliğine çare olacak kaynaklar olarak gösterilmektedir. Bu kaynaklar ile ilgili olarak yeni teknolojiler geliştirilmekte, dünyanın artan enerji ihtiyacının karşılanması hedeflenmektedir. Dünyadaki teknolojik gelişmeler ışığında ülkemizde de yenilenebilir enerji konusunda çalışmalar yapılmaktadır. 2023 yılı için toplam elektrik enerjisi ihtiyacının %30'nun yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edilmesi hedeflenmektedir [10].

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önemi gün geçtikçe artan ve üzerinde en çok çalışma yapılan kaynak hidrojen enerjisidir. Dünyanın artan enerji ihtiyacını çevreyi kirletmeden ve sürekli olarak sağlayabilecek en ileri teknolojinin hidrojen enerji sistemi olduğu günümüzde çoğu bilim adamı tarafından kabul edilmiştir. Elektriğe 20. yüzyılın enerji taşıyıcısı, hidrojene ise 21. yüzyılın enerji taşıyıcısı diyen yaklaşımlar vardır [10]. Hidrojen enerjisini en ekonomik ve en verimli kullanan teknolojilerden biri ise yakıt pili teknolojisidir. Bu nedenle yakıt pili teknolojisinin değeri dünyada her geçen gün biraz daha artmaktadır.

Yakıt pilleri, yakıtın kimyasal enerjisini elektrokimyasal bir tepkime ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu dönüşüm sonucu yanma ürünü olarak sadece su ve ısı açığa çıkmaktadır. Bu özelliği nedeniyle çevreci bir teknoloji olan yakıt pilleri ayrıca bünyelerinde hareketli parçalar olmadığı için sessiz ve güvenilirlerdir. Çalışma verimleri de yüksek olan yakıt pilleri; cep telefonundan otomobile, sabit uygulamalardan uzay araçlarına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Tüm bu özellikleri yan yana konulduğu zaman yakıt pilleri geleceğin teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Yakıt pilleri içerisinde de özellikle Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP) düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek verimleri ile ön plana çıkmaktadır.

## **1.2. Kaynak Taraması**

Yakıt pilleri ve özellikle PEMYP ile ilgili olarak literatürde çok fazla sayıda çalışma yer almaktadır. Özellikle model çalışmaları ile ilgili olarak; bir boyuttan 3 boyuta, tek fazdan çift faza, farklı geometrilerden farklı çalışma şartlarına kadar binlerce çalışma mevcuttur. Bu çalışma sırasında incelenen makalelerden bazılarının özetleri aşağıda yer almaktadır.

Gurau ve arkadaşları tarafından oluşturulan modelde ilk defa hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çözülmüştür. Bu model, akış kanallarını da ele alan iki boyutlu, tek fazlı ve izotermal olmayan bir modeldir ve gaz akış kanalları boyunca Navier-Stokes denklemleri çözülmüştür. Yapılan çalışmada; gözeneklilik, sıcaklık gibi parametrelerin yakıt pili üzerindeki etkileri, elektrotlarda gaz dağılımları ve akım yoğunluğu dağılımları ile akım yoğunluğundaki değişimlerin membranda su dengesine olan etkisi incelenmiştir. Oksijen mol oranlarında kanal boyunca lineer olmayan değişim gözlemlenmiş, gerçek yakıt pillerine yakın sonuçlar elde edilmiştir [20].

Dutta ve arkadaşları oluşturdukları üç boyutlu nümerik modelde, parçalı akış kanallarına sahip bir yakıt pilindeki kütle transferini incelemiştir. Çeşitli yük karışımları için Navier- Stokes denklemleri çözülmüştür. Anot ve katot tarafında

bulunan kanallardaki akış ile membran elektrot birleşimindeki tüketim ilişkilendirilmiştir. Su iletiminin elektro-osmotik akı ve difüzyonla gerçekleştiği kabul edilmiştir. Sonuçta düz akış kanallarında basınç azalmasının gerçek değerlerinden daha düşük olduğu bulunmuştur [19].

He ve arkadaşları parçalı tip kanal geometrisi kullanarak oluşturdukları modelde iki fazlı inceleme yapmış; basınç farkı, elektrot kalınlığı, kanal sayısının değişimi, kanal/plaka oranının değişiminin performansa etkilerini incelemiştir [17].

Um ve Wang oluşturdukları modelde düz ve parçalı kanal geometrisinde gaz taşınımı ve elektrokimyasal olayları incelemiştir. Yapılan bu çalışma parçalı tip kanalın olduğu modelin daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu tasarımın oksijen taşınımını artırarak yakıt pili performansını da arttırdığı görülmüştür. Modelin doğruluğu için Penn State Elektrokimyasal Motor Merkezi'nden alınan deneysel polarizasyon eğrileri de çalışmalarına eklenmiştir [18].

Güvelioğlu ve Stenger, kanal geometrisi ve hidrojenin nemlendirilmesinin yakıt pili performansına etkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada anot ve katot taraflarında farklı basınç değerleri ( 3-5 atm) kullanmışlardır. Sonuçta daha yüksek akım yoğunluğu elde etmek için daha küçük kanal boyu ve pil geometrisi gerekli olduğunu göstermişlerdir [16].

Hermann ve arkadaşları çift kutuplu plakaların PEM yakıt hücreleri için önemini ifade etmişlerdir. Bu çalışmalarında çift kutuplu plakaların; yakıtı ve havayı eşit miktarda dağıttıklarını, elektrik akımını hücreden hücreye ilettiklerini, ısıyı aktif alandan uzaklaştırdıklarını belirtmiş, gazların ve soğutucunun kaçak yapmasını önlediklerinden bahsederek çift kutuplu plaka imalatı için kullanılan malzemeleri özetlemiştir [21].

Shimpalee ve Zee yaptıkları çalışmada, farklı serpantin gaz akış kanal kesit alanlarının hücre performansına ve hücre içindeki reaksiyona giren gazların konsantrasyon dağılımına etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Bir PEM yakıt

hücresindeki reaksiyona giren gazların konsantrasyonlarındaki değişiklik, PEM yakıt hücresinin yerel akım yoğunluğu, sıcaklığı ve oluşan suyun konsantrasyon dağılımını etkilemektedir. PEM yakıt hücresindeki reaksiyona giren gazların konsantrasyonlarındaki değişikliğe en büyük etkenlerden biri de hücre geometrisidir. Gerekli analizler yapılmadığı takdirde, yakıt hücresinin farklı bölgelerinde gerilmeler meydana gelebilir. Bu gerilmeleri azaltmanın en etkili yöntemlerinden biri akış alanının boyutlarını değiştirmektir. Yapılan bu çalışma ile de uygun kanal geometrisi belirlenerek hücre performansının arttırılması amaçlanmıştır. Ayrıca akış yönünün, hücre performansı ve reaksiyona giren gazların konsantrasyon dağılımlarına etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, PEM yakıt hücresinin sabit kullanım alanlarında dar kanallı ve kanallar arası mesafenin fazla olmasının daha uygun olduğu, hareketli kullanım alanlarında ise, geniş kanallı ve kanallar arası mesafenin az olmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir [22].

Soo Kim ve arkadaşları iki boyutlu modeller ile üç boyutlu modelleri karşılaştırmışlardır. Üç boyutlu modeller iki boyutlu modellere göre daha gerçekçi ve daha öğreticidir. Fakat yapılan bu çalışma, iki boyutta oluşturulan modellerde ihmal edilen diğer üçüncü boyuttaki kütle, ısı ve yük transferinin önemsiz olduğunu göstermiştir. İki boyutlu modellerde elde edilen sonuçlar üç boyutlu modellerde elde edilen sonuçlardan çok farklı değildir. Bu nedenle zaman alıcı ve maliyetli üç boyutlu modeller yerine 2 boyutlu modeller oluşturmanın daha cazip olduğu belirtilmiştir [35].

Lobato ve arkadaşları; üç boyutlu, 50 m<sup>2</sup> aktif alanlı bir yakıt pili modeli oluşturarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemi ile inceleme yapmışlardır. Oluşturdukları bu modelde, yakıt pilini düşük oksijen debileri ile beslediklerinde kütle transferi ve düşük akım yoğunluğu sorunları ortaya çıkmıştır. Ayrıca giriş hızını kademeli olarak arttırdıklarında belli bir değerden sonra performansın çok fazla artmadığı görülmüştür [36].

### **1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Son yıllarda yakıt pilleri ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunu model çalışmaları oluşturmaktadır. Pahalı deneysel çalışmalar yerine model çalışmaları tercih edilerek proje maliyetleri düşürülmekte ve zamandan da tasarruf sağlanmaktadır. Model çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar hedefe daha çabuk ulaşılmasını sağladığı gibi yapılacak olan üretim denemelerinin sayısını da çok daha aza indirir. Yapılan bu açıklamalar ışığında bu tez çalışmasının amacı da ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, PEM tipi bir yakıt pili için çift kutuplu akış plakalarını iki boyutlu olarak modelleyerek yakıt pili performans değerlerine ulaşmaktır. Oluşturulan model farklı akış kanalı geometrilerine sahip olup yine farklı çalışma şartlarında inceleme yapılmıştır. Kanal boyunun, giriş hızının, çıkış basıncının ve kanal boyunca konulan engellerin yakıt pili performansına etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Birinci bölümde genel bir giriş yapılarak literatürdeki benzer çalışmalar kısaca anlatılmıştır. İkinci bölümde yakıt pillerinden bahsedilmiş ve PEM tipi yakıt pili termodinamiği anlatılmıştır. Üçüncü bölümde nümerik modelin temel denklemleri ve modelin nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar şekil ve grafiklerle gösterilerek tartışılmıştır. Beşinci bölümde sonuçların genel değerlendirilmesi yapılmış ve altıncı bölümde ise geleceğe yönelik tavsiyeler anlatılmıştır.

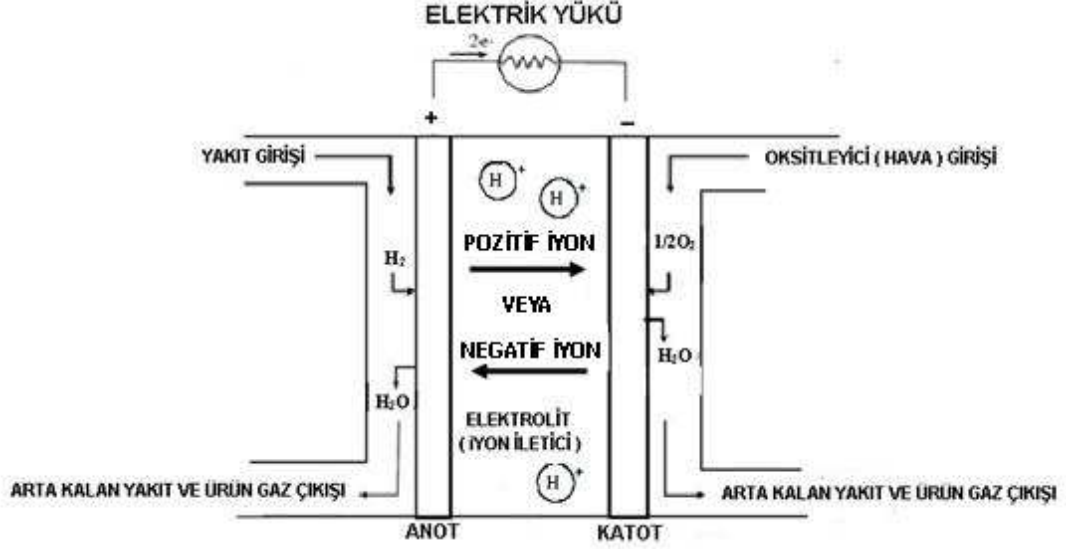
## BÖLÜM 2

### 2. YAKIT PİLLERİ

Yakıt pili teknolojisine giriş yapmadan önce hidrojen üzerinde biraz durmak gerekir. 1500'lü yıllarda keşfedilmiş olan hidrojenin 1700'lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılmıştır. Evrenin en basit ve en çok bulunan elementi olan hidrojen, renksiz, kokusuz ve tamamen zehirsiz bir gazdır. Genel olarak herhangi bir enerji kaynağından beklenen en önemli özellikler; çevreye vereceği zararın en az olması ve veriminin yüksek olmasıdır. Bu bağlamda, hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıt olup, hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı enerji sistemlerinde çevreye atılan atık ürün sadece su ve/veya su buharıdır. Ayrıca hidrojen, yerel olarak üretimi mümkün, kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınması sırasında az enerji kaybı olan, ulaşım araçlarından ısınmaya, sanayiden mutfaklarımıza kadar her alanda yararlanacağımız bir enerji sistemidir. İşte özellikleri yukarıda kısaca anlatılan hidrojen enerjisini en ekonomik ve en verimli kullanan teknoloji olarak yakıt pili teknolojisi ön plana çıkmaktadır [10].

#### 2.1. Yakıt Pilleri Çalışma Prensibi ve Avantajları

Yakıt pilleri; yanma olmaksızın, kullanılan yakıtın ve oksitleyicinin sahip olduğu kimyasal enerjiyi elektrokimyasal bir reaksiyon sonucu doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Yakıt pillerinin çalışma prensibi suyun elektrolizinin tam tersidir. Şekil 2.1'de yakıt pilinin genel yapısı gösterilmiştir. Yakıt pillerinde, ortada bir elektrolit ve bunun çevresinde de elektrolit ile temas halinde olan gözenekli yapıdaki anot ve katot elektrotlar yer almaktadır. Gaz yakıtlar anot tarafından, oksitleyici gazlar ise katot tarafından sisteme verilir. Anot tarafında yükseltgenme yani elektron bırakma, katot tarafında ise indirgenme yani elektron alma reaksiyonları oluşur. Elektrotlarda meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu bir elektrik akımı oluşur. Meydana gelen toplam reaksiyon sonucu ürün olarak ise su ve ısı açığa çıkar [5].



Şekil 2.1. Yakıt pillerinin genel gösterimi [5]

Yakıt olarak genellikle hidrojen kullanılmasına rağmen doğal gaz, metan, metanol, etanol ve LPG gibi farklı tip yakıtlar da kullanılabilir. Oksitleyici olarak ise oksijen gazı veya hava kullanılır. Yakıt pillerinin çalışması akümülatör veya pil gibidir. Aralarındaki en önemli fark akümülatörde kimyasal enerji kullanımdan önce depolanmış durumdadır, yakıt pillerinde ise sürekli olarak yakıtla besleme yapıldığı sürece elektrik üretilebilir.

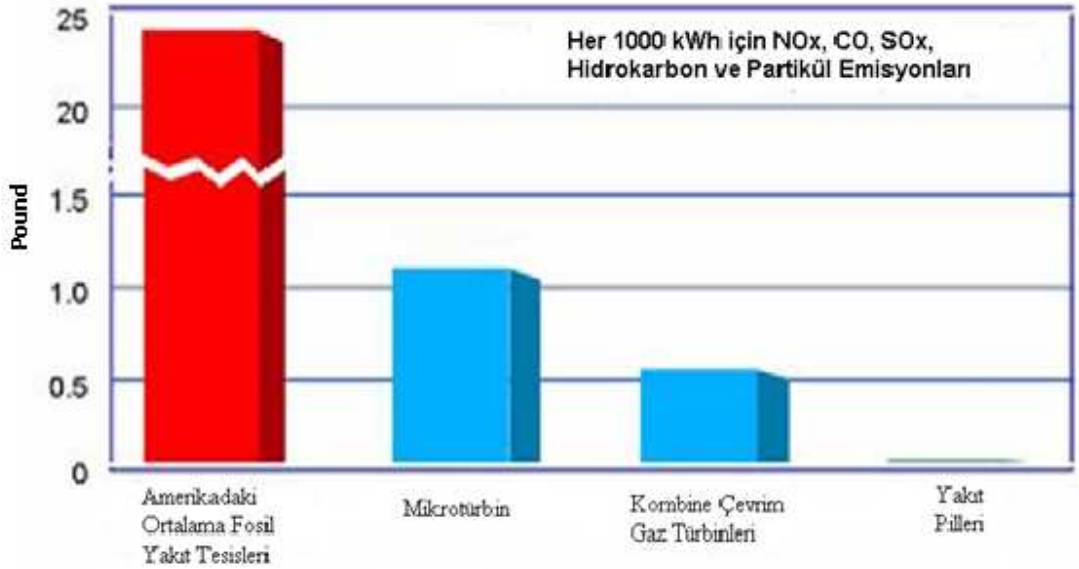
Sistemin önemli noktalarından biri suyun üretildiği ve uzaklaştırıldığı yere bağlı olarak transfer edilen iyonun cinsi ve taşıma yönünün farklı olmasıdır. İyon pozitif ya da negatif iyon olabilir (Şekil 2.1). Bu da iyonun hem negatif hem de pozitif yük taşıyabileceği anlamına gelmektedir. Hidrojen gazı uygun katalizörler kullanıldığında çok çabuk reaksiyona girdiğinden uygulamaların çoğunda yakıt olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Benzer şekilde, kolay ve ekonomik olarak havadan elde edilebilmesi ve kapalı çevrelerde tekrar kolayca depolanabilmesi nedeniyle en çok kullanılan oksitleyici oksijendir. Reaksiyon girdileri, elektrolit ve katalizörler arasında gözenekli elektrot bölgesinde bir ara yüzey oluşmaktadır. Bu ara yüzeyin yapısı özellikle elektroliti sıvı olan yakıt pillerinde, yakıt pilinin elektrokimyasal performansında kritik rol oynamaktadır. Bu ara yüzeyde gözenekli



elektrot, katalizör ve sıvı elektrolit temas halindedir. Eğer gözenekli elektrot fazla miktarda elektrolit içeriyorsa elektrot yüzebilir ve elektrot tarafındaki gazların reaksiyon bölgesine geçmesini engeller. Sonuçta gözenekli elektrodun elektrokimyasal performansı da düşer. Az miktarda elektrolit içermesi durumunda ise elektrot kuru kalır ve reaksiyon oranı azalır. Bu durumda elektrot, elektrolit ve gözenekli elektrodun içindeki gaz fazları arasında çok hassas bir denge kurulmasının gerektiği açıkça anlaşılmaktadır [6].

Yakıt pilleri, bütün standartların belirttiği emisyonların çok altında emisyon değerlerine sahiptir. İçten yanmalı motorlarda, toplam kontrol edilemeyen emisyonlar 2370 ppm, gaz türbinli sistemlerde 120 ppm olduğu halde, yakıt pilli sistemlerde sadece 5 ppm'dir (Şekil 2.2) [10,11]. Yakıt pilleri, yapılarında hareketli parçalar içermedikleri için sessiz çalışırlar ve bu nedenle de güvenilir cihazlardır.

## YAKIT PİLİ EMİSYONLARI



Şekil 2.2. Emisyon değerlerinin karşılaştırılması [11]

Özetle yakıt pillerinin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

- Sessiz çalışırlar.
- Yanma olmadan doğrudan enerji dönüşümü sağlarlar.
- Düşük sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlarlar.
- Tasarım dışı değişen yüklere hızlı yanıt vererek iyi bir işletme performansı oluştururlar.
- Uzaktan işletim kolaylığı vardır.
- Ölçü/boyut esnekliğine sahiptirler.
- Yakıt esnekliğine müsaittir. ( Hidrojen, doğal gaz, etanol, metanol, LPG vs..)
- Yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir.
- Katı atık problemi yoktur.
- Hızlı yük takip edebilme yeteneğine sahiptir.
- Çevreyi kirletmezler.
- Modüler sistemlerdir ve taşınabilirler.
- Düşük emisyonu sahiptirler.
- Uzun ömürlüdürler.
- Hareketli parçaları yoktur.

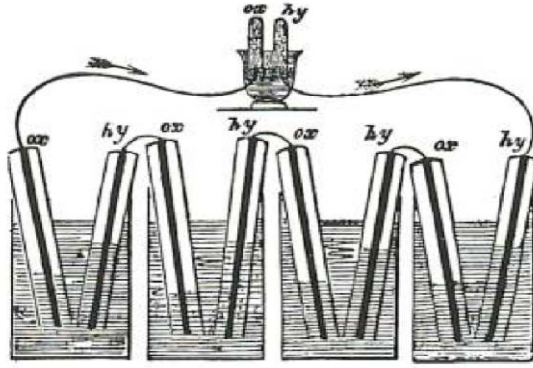
Dezavantajları ise şu şekildedir:

- Yeni bir teknoloji olduğu için üretimleri ve araştırmaları pahalıdır. Bu da maliyetleri yükseltir.
- Güç üretim endüstrisi için tanıdık olmayan bir teknolojidir.
- Bazı yakıt türleri için ( hidrojen, metanol. ) bir dağıtım altyapısı yoktur.
- Gelişimleri için yüksek teknolojiye ihtiyaç vardır.
- Seri üretimleri tam olarak henüz gerçekleştirilememiştir.

## 2.2. Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Yakıt pili teknolojisinin ilk kez Sir William Grove tarafından 1839 yılında keşfedildiği kabul edilir. Grove hücresi olarak bilinen ilk hücre çinko sülfat içerisine platin elektrot daldırılarak oluşturulmuştur. Grove, birisi sülfirik asit kabına diğeri ise

oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrodu düzenleyerek elektrotlar arasında sabit bir akım akacağını keşfetmiş ve yaptığı bu ilk deneyde 1,8 volt civarında 12 amperlik akım üretmiştir. Daha sonraki yıllarda Grove, kullandığı bu sistemdeki hücrelerden elli tanesini birleştirerek oluşturduğu yeni sistemde daha fazla elektrik akımı üretmiştir [2, 8].



Şekil 2.3. Sir William Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi [2]

Yakıt pili terimi ise ilk kez 1889 yılında Ludwig Mond ve asistanı Charles Langer tarafından kullanılmıştır. Onların ilk denemeleri hava ve endüstriyel kömür gazı ile olmuştur. Bu çalışmada 1.5 watt güç üreten ve %50 çalışma verimine sahip bir yakıt pili geliştirilmiştir [2, 8].

Araştırmalar sanayinin ve araştırmaların başlangıcı olan 1900'lü yıllarda hızlanmış, 1920'lerden sonra gaz-difüzyon elektrotunun başarılı düşük sıcaklıklı işlemler için önemli bir anahtar olduğu fark edilmiştir. A.Schmid ilk platin katalizörlü, gözenekli karbon-hidrojen elektrotları silindirik şekilde yapan araştırmacı olmuştur. [2,8].

1932'de Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Bacon gözenekli metal elektrotlu alkali yakıt pili sistemleri üzerine çalışmaktaydı. Bu çalışmalar sonucunda Bacon, düşük korozif özelliğe sahip, alkalın elektrolit ile pahalı olmayan nikel elektrotlar kullanarak daha önce yapılan çalışmalardan daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıktı. Bacon tarafından geliştirilen bu sistem 1968'de insanların Ay'a

uçmasını sağlayan NASA yakıt pili sisteminin ilk prototipi olmuştur. Bacon ve arkadaşları 1952’de 5 kW’lık güç üreten bir yakıt hücresi yapmışlardır. Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan bir traktör tasarlamıştır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur [2, 8, 10].

1960’lı yıllarda NASA yakıt pili teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmaya başlamıştır. NASA’nın yakıt pilleri ile ilgili projeleri desteklemesinin sebepleri; hafif olmaları, yüksek verimlilikleri, düşük gürültü ve titreşim özellikleri, yüksek enerji yoğunluğu ve yakıt olarak kullanılan hidrojenin çok saf olması durumunda yan ürün olarak sadece içilebilir kalitede su üretmesi olarak sıralanabilir. Bu nedenle bugüne kadar, yakıt pillerini çeşitli yönleriyle inceleyen 200’den fazla araştırma NASA tarafından desteklenmiştir. Bugün, Apollo ve Space Shuttle görevlerinde güvenli olarak elektrik (ve su) sağlamış olmaları nedeniyle, yakıt pilleri uzaydaki rollerini ispatlamış bulunmaktadır Uluslararası potansiyel yakıt pili pazarı (Sadece "sabit cihazlar " için) 2030 yılı için 45 milyar Euro olarak tahmin edilmektedir [10].

Günümüzde otel, hastane, üniversite gibi sabit uygulamalardan; otomobil, traktör, otobüs gibi taşıma sistemlerine ve hatta cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi mikro uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede yakıt pillerinin kullanıldığını görmekteyiz.



Şekil 2.4. GM yakıt pili ile çalışan bir modeli [33]

### 2.3. Yakıt Pili Türleri

Yakıt pillerinin sınıflandırılması; pilin çalışma sıcaklığı, elektrolitin tipi, yakıt ve oksitleyici kombinasyonu, yakıtın içte veya dışta işlenmesi gibi farklı özellikler göz önünde bulundurularak yapılabilmektedir. En çok kullanılan yöntem kullanılan elektrolite göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre günümüzde bilinen 6 çeşit yakıt pili bulunmaktadır. Bunlar;

1. Alkali yakıt pilleri (AFP)
2. Erimiş karbonat yakıt pilleri (EKYP)
3. Fosforik asit yakıt pilleri (FAYP)
4. Katı oksit yakıt pilleri (KOYP)
5. Direk metanol yakıt pilleri (DMYP)
6. Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri (PEMYP) olarak sıralanabilir.

Çalışma sıcaklığı da sınıflandırmada önemli bir etkidir. Buna göre yakıt pillerini; düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri ve yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri şeklinde iki gruba ayırabiliriz. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri 50-250 °C arasında, yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri ise 600-1000 °C arasında çalışırlar [5].

Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri diğer gruba nazaran daha hızlı çalışır, az yer kaplar ve daha hafiftirler. Bu nedenle ulaşım sektörü için tercih sebebidirler. Bunlar; polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri (PEMYP), doğrudan metanol yakıt pilleri (DMYP), alkali yakıt pilleri (AYP) ve fosforik asit yakıt pilleridir (FAYP). Yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri ise diğer gruba göre daha yüksek verime sahip olup atık olarak ısı ortaya çıkartırlar. Bu atık ısı kojenerasyon uygulamaları için oldukça uygundur. Bunlar ise; erimiş karbonat yakıt pilleri (EKYP) ve katı oksitli yakıt pilleridir (KOYP). Tablo 2.1'de yakıt pillerinde meydana gelen reaksiyonlar toplu halde verilmiştir [5].

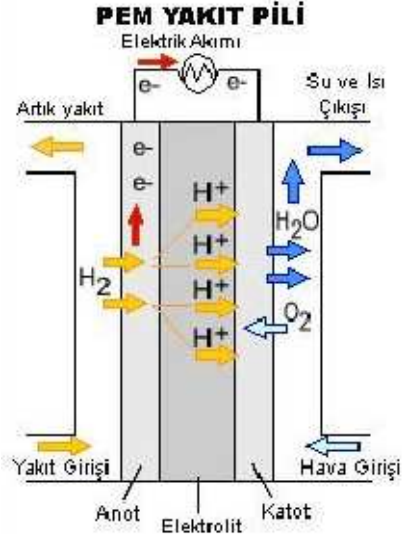
Tablo 2.1. Yakıt pili reaksiyonları [2,5]

Yakıt Pili	Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
PEMYP	$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$
DMYP	$CH_3OH + H_2O \longrightarrow 6H^+ + CO_2 + 6e^-$	$3/2O_2 + 6H^+ + 6e^- \longrightarrow 3H_2O$
AYP	$H_2 + 2(OH)^- \longrightarrow 2H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + H_2O + 2e^- \longrightarrow 2(OH)^-$
FAYP	$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$
EKYP	$H_2 + CO_3^{-2} \longrightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{-2} \longrightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \longrightarrow CO_3^{-2}$
KOYP	$H_2 + O^{-2} \longrightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{-2} \longrightarrow CO_2 + 2e^-$	$1/2O_2 + 2e^- \longrightarrow O^{-2}$

### 2.3.1 Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri ( PEMYP )

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit, iyon değişim membranıdır. Membran malzemesi florlanmış sulfonik asit polimer veya diğer benzer bir polimerdir. Bu membran su ile ıslatıldığında çok iyi bir proton iletici haline gelir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip olan bu tip yakıt pilleri 50-80 °C sıcaklık aralığında çalışırlar. Membran, anot ve katotta kimyasal reaksiyonlar için katalizörlerle bağlantılıdır. Katalizör hidrojen atomunun proton ve elektronlarına ayrışmasına yardımcı olur. Düşük sıcaklıkta çalışması sebebiyle Platin gibi pahalı katalizörler gereklidir. Katalizör CO zehirlenmesine karşı duyarlıdır. Bu nedenle kullanılan yakıtın saf hidrojen olması gerekir. Hidrojen anot kısmına verilir. Katalizörün yardımıyla hidrojen iyonlarına ayrılır. Elektronlar dış çevrim vasıtasıyla katot tarafına geçerken elektrik enerjisi üretilmiş olur. Protonlar ise membran üzerinden katot tarafına geçerek buradaki oksijen atomları ile birleşir ve su oluşur. Protonun bu hareketi nedeniyle bu tip yakıt pillerinin bir diğer adı da “Proton Değişim Membran Yakıt Pilleri”dir. Bu yakıt pilleri, düşük çalışma sıcaklığında yüksek verim elde edilmesi, yüksek güç yoğunluğu, hızlı ilk hareket kolaylığı, sessiz çalışması ve saf suyun dışında herhangi

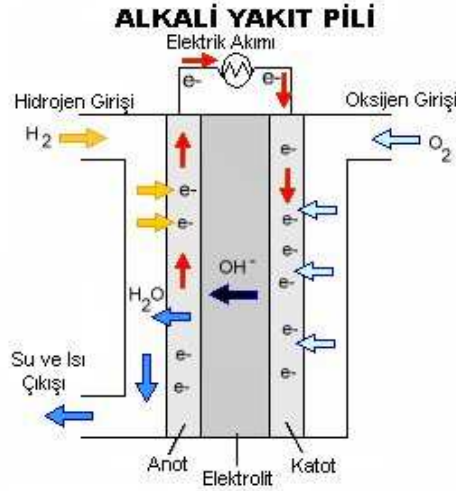
bir atık ortaya çıkarmamasından dolayı en çok ilgi çeken ve en çok gelecek vaad eden yakıt pili türüdür [5,12].



Şekil 2.5. PEM yakıt pili şematik gösterimi [12]

### 2.3.2 Alkali Yakıt Pili

Alkali yakıt pillerinde konsantre potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi hem soğutucu hem de elektrolit olarak kullanılır. Bu çözelti hidroksil iyonlarını katottan anoda iletir. 80°C civarında çalışır. Verimleri %70 civarındadır. Diğer yakıt pilleri gibi çok az kirlilik oluştururlar. Elektrikğin yanı sıra içilebilir özellikte su ürettikleri için NASA tarafından uzay araştırmalarındaki çeşitli programlarda alkali yakıt pili kullanılmıştır. Bu tip yakıt pillerinin en önemli dezavantajı kullanılan hidrojenin ve oksitleyicinin çok saf olması gerekliliğidir. Çok az miktarda bile olsa CO<sub>2</sub> elektrolit için çok zararlıdır. CO<sub>2</sub>, elektrolit ile reaksiyona girerek zehirlenmesine sebep olur. Bu ise yakıt pili performansını olumsuz etkiler [5, 8, 12].

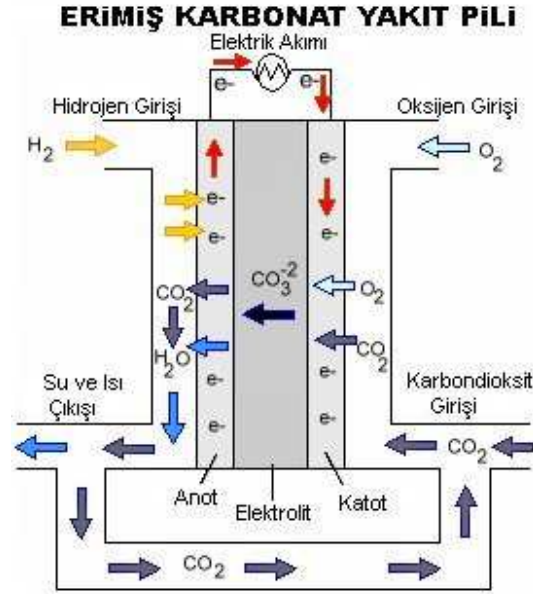


Şekil 2.6. Alkali yakıt pili şematik gösterimi [12]

### 2.3.3 Eriyik Karbonat Yakıt Pilleri

Eriyik alkali karbon karışımını elektrolit olarak kullanır. Bu eriyik karbon iyonları aracılığı ile katottan anoda kütle ve şarj aktarımını sağlar ve inert gözenekli yapıda tutar. 650°C 'den daha yüksek sıcaklıklarda çalışır. Eriyik karbonların kullanımı işletim sıcaklığını 650°C 'den daha yüksek değerlere ulaştırdığı için yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler kullanmak gerekmektedir. Anotta nikel katotta ise nikel oksit elektrot kullanılabilir. Verimleri %60 civarındadır. Genellikle yüksek kapasiteli (2 Mwe gibi) kullanım alanlarında tercih edilir (Sabit güç sistemleri; oteller, hastaneler vs...). Sıvı elektrolit ile çalışmanın karmaşıklığı bu tip yakıt pillerinin dezavantajlı yanıdır [5, 8, 12].

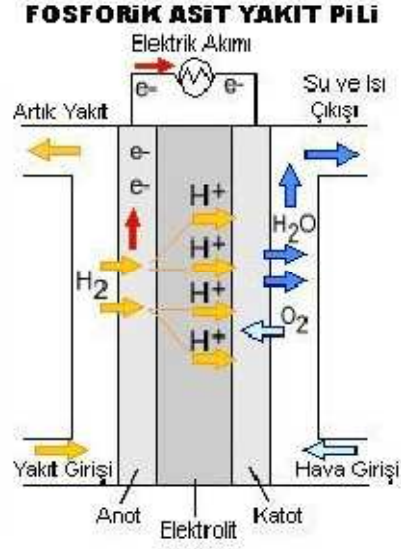




Şekil 2.7. Erimiş karbonat yakıt pili şematik gösterimi [12].

### 2.3.4 Fosforik Asit Yakıt Pilleri

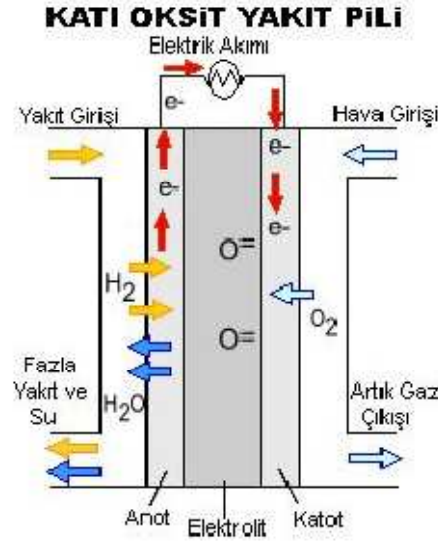
Elektrolit olarak fosforik asit kullanılır. Elektrolit protonları anottan katoda iletir ve inert gözenekli yapı tarafından hapsedilir. Düşük sıcaklıklarda fosforik asit kötü bir iletken olduğu için sistem yaklaşık 200 °C sıcaklık civarında çalışır. Elektrotlarda katalizör olarak platin kullanımına izin verir. Ortalama verimleri %40 - %50 arasındadır. Yakıt pilleri içerisinde en büyük gelişme gösteren tip, fosforik asit yakıt pilleri olup ticari anlamda da ilk kullanılan tür bunlardır. 200 kW enerji üretim kapasitesine kadar olan fosforik asit yakıt pilleri ticari amaçla kullanılmaktadır. 11 MW kapasiteli sistemler test aşamasındadır. Anotta hidrojen gazı, hidrojen iyonları ve elektronları üretmek için iyonize olur. Elektronlar anottan katoda bir dış çevrim vasıtasıyla iletilir. Hidrojen iyonları katoda elektrolit ile iletilir. Katotta ise oksijen, hidrojen iyonları ve elektron ile reaksiyona girerek su oluşturur [5, 8, 12].



Şekil 2.8. Fosforik asit yakıt pili şematik gösterimi [12]

### 2.3.5 Katı Oksit Yakıt Pili

Bu tip yakıt pilinde elektrolit, katı, gözeneksiz ve  $Y_2O_3$  içeren zirkonya'dan oluşmaktadır. Saf zirkonya yalıtkan olduğu halde  $Y_2O_3$  ilavesi ile iletkenlik özelliği gösterir. İşletim sıcaklığı  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  civarındadır. Bu yüksek sıcaklıklarda doğal gaz kolaylıkla hidrojene dönüştürülebildiği için yakıtın hidrojene dönüştürülmesine gerek yoktur. Dönüşüm hücrede gerçekleşir İnce zar teknolojisine sahip daha düşük sıcaklıklarda çalışan modelleri de mevcuttur. Atık gazların yüksek sıcaklıklarda olması sebebiyle kojenerasyon uygulamaları için uygundur. Hem elektrolit hem de elektronlar seramik malzemedendir.  $O^{2-}$  iyonları katı bir elektrolit üzerinden katottan anoda aktarılır. Bu iyonlar anotta CO ve  $H_2$  içeren yakıt ile birleşerek elektron oluştururlar. Anotta CO kullanılması nedeniyle doğalgaz, benzin, dizel ve kömür gazı gibi birçok yakıt kullanılabilir. Sıvı bir elektrolit bulunmaması sebebiyle bir karıştırıcıya gerek duyulmaz ve elektrotların yüzmesi, elektrolitin buharlaşması ve katalizörlerin ıslanması gibi problemler yoktur. Elektrik verimleri %50 ye kadar çıkabilir [5, 8, 12].



Şekil 2.9. Katı oksit yakıt pili şematik gösterimi [12]

### 2.3.6 Direk Metanol Yakıt Pili

Direk metanol yakıt pillerinde yakıt olarak sıvı metanol kullanır. Son yıllarda büyük bir gelişme gösteren bu tip yakıt pilleri düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleri ( 50-120 °C ) ve herhangi bir yakıt dönüştürücüsüne ihtiyaç duymamaları sebebiyle cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi daha küçük boyutlu uygulamalar için daha uygundur. Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak, PEMYP'de de olduğu gibi polimer membran kullanılır. Anottan katoda elektrik üretmeden yakıtın geçmesi ve metanolün zehirli, korozif bir yapıda olması bu tip yakıt pillerindeki en büyük problemlerdir. Metanol yerine diğer alkoller de yakıt olarak kullanılabilir. Verimleri %40 civarındadır [5, 12].

Tablo 2.2'de yakıt pili çeşitlerinin kıyaslanması yapılmıştır [2, 10]. Tüm bu türler içerisinde en çok gelecek vaad eden ve üzerinde en fazla çalışılan tür polimer elektrolit membran yakıt pili (PEMYP) olduğu için bizim esas çalışmamızı da bu tür oluşturacaktır.

Tablo 2.2. Yakıt pillerin kıyaslanması [2, 10]

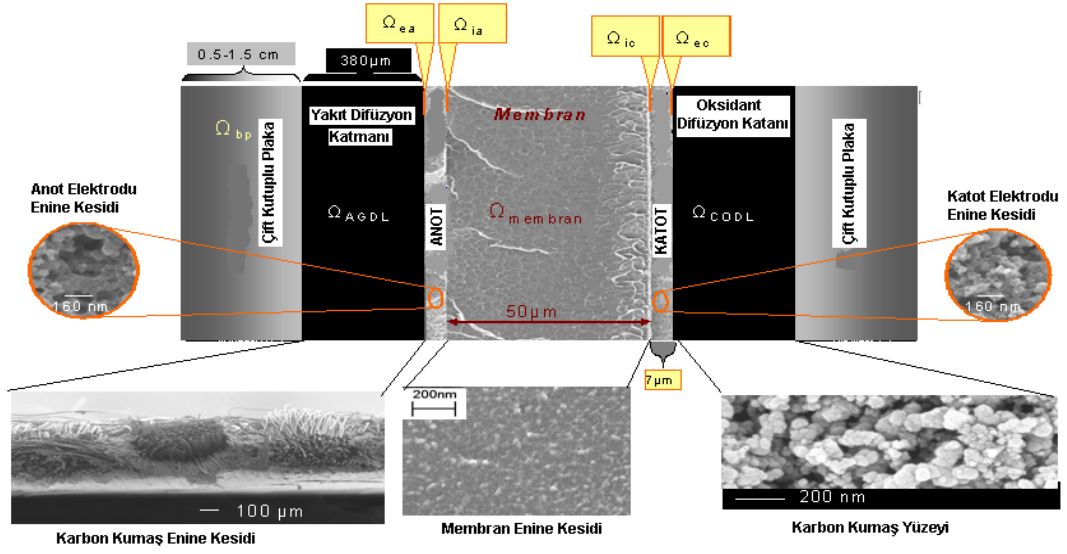
	PEMYP	DMYP	AYP	FAYP	EKYP	KOYP
<b>Elektrolit</b>	Katı polimer membran	Katı polimer veya sıvı alkalın	KOH	Sıvı fosforik asit	Sıvı erimiş karbonat	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeren zirkonya
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>	80 °C	50-120 °C	65-220 °C	150-220 °C	650 °C	600-1000 °C
<b>Katalizör</b>	Pt	Pt veya Pt/Ru	Pt	Pt	Ni	Perovskites
<b>Transfer Edilen İyon</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sup>-2</sup>
<b>Yakıt Islahı</b>	Pil dışı	Gerekmez	Pil dışı	Pil dışı	Pil içi	Pil içi
<b>Anot Gazı</b>	Hidrojen	Su içinde metanol	Hidrojen	Hidrojen	Hidrojen,metan	Hidrojen,metan
<b>Katod Gazı</b>	Saf oksijen veya hava	Havadan oksijen	Saf oksijen	Havadan oksijen	Havadan oksijen	Havadan oksijen
<b>Isı Yönetimi</b>	Soğutucu	Soğutucu	Soğutucu-Koj.	Kojenerasyon	Kojenerasyon	Kojenerasyon
<b>Verim</b>	% 35-60	% 35-40	% 50-70	% 35-50	%40-55	%45-60
<b>Diğer Özellikler</b>	Düşük sıcaklıkta çalışması avantajdır.	PEMYP'nin avantajları yanında yakıtın elektrik üretmeden anottan katoda geçiş problemi vardır.	Hidrojen ve oksijen ile iyi performans gösterir. Uzay araştırmaları için uygundur.	Performansı AYP'den düşüktür.	Elektrolit korozif özelliğe sahiptir. Pil yapısı için paslanmaz çelik gerekir.	Materyaller arasında ısı genleşme oranlısızlıkları oluşabilir.

#### 2.4. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili (PEMYP)

PEM yakıt pilleri anot ve katot olmak üzere iki adet elektrot içerir. Bu elektrotlar birbirlerinden polimer elektrolit membran ile ayrılmışlardır. Her iki elektrot tabakası da bir kenarından ince katalizör tabakası ile örtülmüştür. Elektrotlar, katalizör ve membran ile birlikte membran elektrot birleşimini oluştururlar. Yakıt (hidrojen) anot gaz kanalında nemlendirilerek gaz difüzörüne, difüzörden de katalizör katmanına gönderilir. Burada katalizör yardımıyla hidrojenin yükseltgenmesi yapılır. Ortaya proton iyonları ( $H^+$ ) ve elektronlar çıkar. Protonlar membran üzerinden, elektronlar ise dış çevrim ile katot tarafına gönderilir. Katotta oksijenin indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. Membran üzerinden gelen protonlar havadan alınan oksijen ve dış çevrim vasıtasıyla gelen elektronlar reaksiyona girerek su ve ısı oluşturulur. Anot ve katotta meydana gelen reaksiyonlar ile toplam hücre reaksiyonu sırasıyla aşağıda verilmiştir [2, 4, 5]. Şekil 2.10'da şematik olarak PEMYP görülmektedir [34].

Tablo 2.3. PEM yakıt pili reaksiyonları

$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	anot reaksiyonu
$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O (sıvı)$	katot reaksiyonu
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O (sıvı)$	toplam hücre reaksiyonu



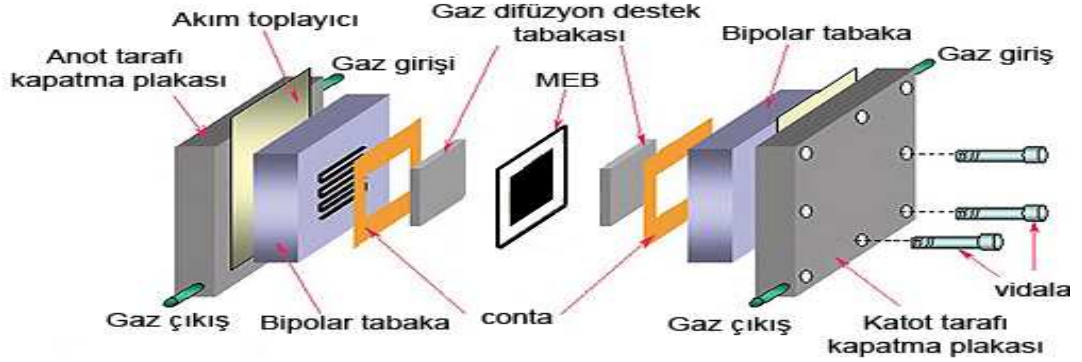
Şekil 2.10. PEM yakıt pili şematik diyagramı [34]

PEM yakıt pilleri diğer yakıt pilleri içerisinde en çok gelecek vaad eden tip olarak öne çıkmaktadır. Bunda etken olan avantajları şu şekilde sıralanabilir: Yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, hızlı ilk hareket kolaylığı sağlaması, düşük çalışma sıcaklıkları, uzun ömür, ürün olarak içilebilir kalitede su çıkması, kolay dizayn ve boyut esnekliği, çalışma sırasında değişen yüklere hızlı yanıt verebilme. Bu avantajları yanı sıra bazı olumsuz yönleri ise şu şekilde sıralanabilir: Yüksek elektrolit (membran) maliyeti, CO'e duyarlı olma, yapısal dayanım özelliklerinin sınırlı oluşu, atık ısıdan yararlanamama ve yüksek miktarda katalizör kullanımına ihtiyaç duymasıdır.

#### 2.4.1. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili Bileşenleri

PEMYP bileşenleri; bir PEM yakıt hücresi, membran elektrot bileşimi (MEB), gaz difüzyon tabakaları (GDT), çift kutuplu plakalardan ve yakıt hücresi kapatma plakalarından oluşmaktadır. Membranın her iki tarafında gözenekli yapıda elektrotlar bulunmaktadır. Gözenekli elektrotlarda, üzerinde elektrokimyasal reaksiyonun meydana geldiği katalizör tabakası bulunmaktadır. Membran, elektrotlar ile birlikte membran elektrot birleşimini (MEB) oluşturur. MEB'nin her iki yanında gaz

difüzyon tabakaları (GDT) bulunmaktadır. Elektrotlar GDT üzerinde ise bu birleşim gaz difüzyon elektrot (GDE) adını alır. MEB ve GDT iki çift kutuplu tabaka arasında sıkıştırılmaktadır. ( Şekil 2.11 )



Şekil 2.11. PEM yakıt pili bileşenleri [14]

#### 2.4.1.1 Polimer Elektrolit Membran

PEM yakıt hücresinin kalbi proton iletken özellikte membrandır. Membranların;

1. Proton geçirgen özellikte olması
2. Gaz geçirgenliğinin az olması
3. Mekanik dayanımının yüksek olması
4. Uzun süreli kullanımda ısıl ve kimyasal direncinin yüksek olması
5. Emniyetli ve ucuz olması gerekmektedir.

Günümüzde ticari olarak kullanılan membranların çeşitliliğinin az ve fiyatlarının yüksek olması alternatif membranların geliştirilmesine yönelik çalışmaları hızlandırmıştır. 1970'li yıllarda DuPont, Nafion adı verilen ve  $10^4$ - $10^5$  saatlik çalışma ömrüne sahip membranı geliştirmiştir. Bu membran yakıt pili çalışmalarında kullanılan en iyi performansa sahip ticari membran olarak bilinmektedir. . Bu membranın polimer yapısı poli(tetrafluoroetilen) bir omurga içerir. Bu omurga, uçları sülfonik asit gruplarla biten yan zincirlere sahiptir. Kalınlıkları  $51\mu\text{m}$  -  $254\mu\text{m}$

arasında değişir [2, 4, 5]. Pekçok firma da “Nafion”a yakın özelliklere sahip membran geliştirme çalışmalarına devam etmektedir.

Membran, proton iletimine izin vererek çevrimin tamamlanmasını ve elektron iletimini engelleyerek elektronların dış çevrim vasıtasıyla iletilmesini sağlar. Bu sebeple membran proton iletimine karşı iyi iletken, elektriğe karşı ise yalıtkandır. Polimer elektrolitli membran protonu daha iyi iletmek için sulandırılmalıdır. Bu sebeple yakıt pilinin çalışma sıcaklığı suyun kaynama noktasının altında olmalıdır. Membranın tutabileceği su miktarı membranın önemli özelliklerini ( iletkenlik, gaz geçirgenliği ve mekanik özellikler ) belirler. Membranın en büyük dezavantajı sonlu bir iyon iletim oranına sahip olmasıdır. Membranın diğer bir dezavantajı da yakıt ve oksitleyici gazların karşıt geçişleridir. Bu durumda hidrojen ve oksijen bir dış akım üretmeden reaksiyona girer ve performans düşer [2, 4, 5].

#### **2.4.1.2 Elektrotlar**

Birbirinden polimer membran elektrolit ile ayrılan yakıt pili elektrotlarından, anotta oksidasyon yarı reaksiyonu; katotta indirgenme yarı reaksiyonu meydana gelmektedir. Yakıt hücresine giren hidrojen gözenekli yapıdaki elektrotlarda ilerlerken yükseltgenme yarı reaksiyonu ile gaz halindeki hidrojenden elektrotlar üzerinde bulunan platinler vasıtasıyla hidrojen iyonları oluşur. Bu iyonlar, iyonik iletim özelliğine sahip polimerik membrandan geçerek katota doğru ilerlerken açığa çıkan elektronlar ve katota beslenen oksijen ile birleşerek su oluşturur ve reaksiyon sırasında ısı açığa çıkar. İki reaksiyon oldukça yavaş meydana gelmekte 80-90 °C gibi düşük çalışma sıcaklıklarında oluşmaktadır. Anot ve katotta bulunan katalizörler yarı reaksiyonların hızını artırmaktadır. Elektrotlar, gazların katalizör yüzeyine difüzlenebilmesi amacıyla gözenekli yapıdadırlar. Katalizör olarak yüksek dağılıma sahip, nanokristalik yapıda karbon üzerine desteklenmiş platin kullanılır. Tipik elektrot kalınlıkları mikrometreler seviyesindedir. Elektrot, membran yüzeyine spreyle yapılarak, çıkartma yapılarak (decalling) veya diğer uygun üretim metotları ile yerleştirilir. Membran ve elektrotları içeren yapı membran elektrot birleşimi (MEB) şeklinde isimlendirilir [2, 4, 5].



### 2.4.1.3 Gaz Difüzyon Destek Tabakaları

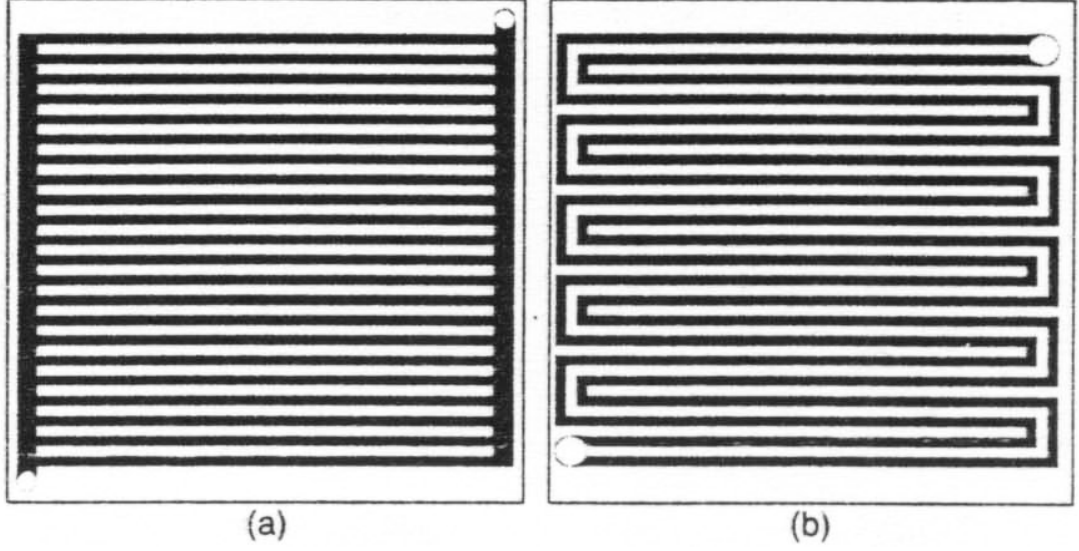
Yakıt pillerinde bir tanesi anot tarafında diğeri ise katot tarafında olan destek tabakaları, katalizör tabakası ve çift kutuplu tabakalar arasında bulunmaktadır. Gaz difüzyon destek tabakaları elektrokimyasal reaksiyona direk olarak katılmazlar. Ama aşağıda sıralanan önemli fonksiyonlara sahiptirler:

1. Gözenekli yapısından dolayı, reaktant gazların membran elektrot birleşimi üzerindeki katalizörlere daha iyi yayınmasını sağlarlar.
2. Reaksiyon sonucu katotta oluşan suyun hücre dışına çıkmasını sağlayarak hücrede oluşabilecek taşmaları engeller. Oluşan suyu katalizör tabakasından uzaklaştırırlar.
3. Elektriksel olarak iletken malzemeden yapıldıkları için katalizör tabakasının, çift kutuplu plakalara elektriksel olarak bağlanmalarını sağlar ve elektronların dış devrede akmasına yardımcı olur.
4. Elektrokimyasal reaksiyon sonucunda oluşan ısıyı, katalizör tabakasından çift kutuplu plakalara doğru uzaklaştırarak, ısı uzaklaştırılmasına yardımcı olurlar [2,4,5].

### 2.4.1.4 Çift kutuplu Plakalar

Çift kutuplu plakalar; birden fazla yakıt hücresinin bir araya gelerek oluşturduğu yakıt hücresi yığınlarında, birbirine komşu bireysel yakıt hücrelerine gelen reaktant gazların birbirinden ayrılmasını ve hücrelerin birbirine elektriksel olarak bağlanmasını sağlarlar. Ayrıca hücrelere destek olmaktadır. Yakıt hücrelerindeki ısı iletimi ve su idaresini de çift kutuplu plakalar sağlamaktadır. Yakıt hücresi yığınlarında, her bir yakıt hücresinin anot ve katot tarafında bulunan çift kutuplu tabakaların her iki yüzeyinde de reaktant gazların akışı için kanallar bulunmaktadır. Tek bir yakıt hücresinde ise çift kutuplu plakanın sadece tek bir yüzeyinde akış kanalları bulunmaktadır. Bunlar bu nedenle tek kutuplu plakalar olarak adlandırılır. Çift kutuplu plakalar korozyona dirençli ve kimyasal olarak inert olmalıdır. Ayrıca ticari uygulamaların maliyetlerini düşürmek açısından ucuz ve kolay işlenebilir malzeme tercih edilmelidir. Ayrıca çift kutuplu plakaların kanal geometrileri kütle

transferi için oldukça önemlidir. Farklı geometrilere çift kutuplu plaka görmek mümkündür. Şekil 2.12 'de iki farklı plaka örnek olarak verilmiştir [2, 4, 5].



Şekil 2.12. Çift kutuplu plakalar a) Paralel akış kanalı, b) Serpantin tipi akış kanalı, [2].

Paralel akış alanı dizaynında en çok karşılaşılan problem bitişik kanallar ve gaz blokajları arasında basınç eşitsizliklerinin ortaya çıkmasıdır. Serpantin tipi akış kanalları ise başlangıçtan sona kadar süreklidir. Serpantin plakanın bir avantajı, yol üzerinde su zerresi gibi bir engelin akışı engellememesidir. Tıkanık bir serpantin kanalında tepken gazlar, akım toplayıcı plakaların altındaki akışla kanalı geçmeye zorlanır ve gözenekli alana doğru geçerek yan kanal ile birleşir. Bu yan geçiş ile gazlar tıkanıklığın olduğu bölgeye doğru difüze olabilir. Bu tıkanıklığın net etkisi ile artan bir basınç düşümü olacak fakat aktif alan kaybı olmayacaktır. Serpantin akış kanalının aksine paralel akış kanalı durumunda bir kanaldaki engel, tıkanıklığın alt bölgesinde bir ölü bölge oluşturacaktır. Bu ölü bölge içerisinde tepken bulunmayacak ve aktif olmayacaktır [2, 4, 5].

## 2.4.2 Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili Termodinamiği

Bu kısım, Fuel Cell Technology Handbook ve PEM Fuel Cells:Theory and Practice kitaplarının ilgili bölümleri esas alınarak hazırlanmıştır.

### 2.4.2.1 Yakıt Pili Verimi

Sabit sıcaklık ve basınçta çalışan bir yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum elektrik işi elektrokimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim ile belirlenir:

$$W_{el} = - \Delta G \quad (2.1)$$

Gibbs serbest enerji ifadesi ise, kimyasal süreçler için reaksiyon ısısının elektriğe dönüştürülecek kısmı olarak tanımlanır.

$$\Delta G = \Delta H - T.\Delta S \quad (2.2)$$

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi yakıt pillerinde elektrokimyasal reaksiyonlar oluşmaktadır. Tipik bir PEM yakıt pilinde meydana gelen reaksiyonlar ise aşağıda yer almaktadır.



Toplam reaksiyon sonucunda ürün olarak su ve ısı açığa çıkar. Bu ısı da, tepkimeye girenler ile ürünlerin oluşum ısıları farkından hesaplanır. Tablo 2.4'te 25°C hidrojenin yükseltgenme reaksiyonu için entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerji değerleri verilmiştir.

$$\Delta H = h_{f,H_2O} - h_{f,H_2} - \frac{1}{2} h_{f,O_2} \quad (2.6)$$

Tablo 2.4. Hidrojenin 25°C'deki yükseltgenme reaksiyonu için, Entalpi, Entropi ve Gibbs serbest enerjisi değerleri [9]

	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta S$ (kJ/mol.K)	$\Delta G$ (kJ/mol)
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O_{liq}$	-286.02	-0.1633	-237.34
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O_{gas}$	-241.98	-0.0444	-228.74

Bir pil tarafından yapılan iş, pilde olan akı miktarı ile bu akıya sebep olan potansiyel farkın ( $E$ ) çarpımından elde edilir. Pilde olan akı ise reaksiyon için gereken elektronun mol sayısı ile her mol elektrondaki kulomb (C) sayısının çarpımı ile elde edilir.

$$W_{el} = -\Delta G = n.F.E_{rev} \quad (2.7)$$

Buradan; yakıt pilinin teorik potansiyel (gerilim) farkı aşağıdaki gibidir hesaplanır:

$$E_{rev} = \frac{-\Delta G}{n.F} \quad (2.8)$$

Bu denklemde  $n$ ,  $H_2$  molekülü başına elektron sayısı ( $2 \text{ kmol}_e^- / \text{kmol}_{H_2}$ ) iken  $F$  ise Faraday sabitidir ( $96485 \text{ C/mol}$ ). Faraday sabiti de şu şekilde bulunur:

$$F = N.e \quad (2.9)$$

Burada  $N$  Avogadro sayısı ( $N = 6.022 \cdot 10^{23}$ ) ve  $e$  ise bir elektronun yüküdür ( $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

Bu denklemden PEM yakıt pilinin ideal standart potansiyel farkı çıkışta su sıvı halde ise aşağıdaki gibi bulunur:

$$E_{rev}=1.23 \text{ V} \quad (2.10)$$

Enerji dönüştürücüdeki ısı verim yararlı enerjinin reaksiyon sonucu ortaya çıkan kimyasal enerjiye oranı ile belirlenir

$$\eta = \frac{\text{Yararlı enerji}}{-\Delta H} \quad (2.11)$$

Bir elektrokimyasal dönüştürücünün ideal durumunda, reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim, kullanılabilir elektrik enerjisidir. Tersinir olarak çalışan bir yakıt pilinin teorik (ideal) verimi:

$$\eta_{rev} = \Delta G / \Delta H \quad (2.12)$$

Teorik verimlilik, suyun sıvı ya da gaz fazına göre değişir. Sıvı fazdaki su için yakıtın Üst Isıl Değeri (HHV) uygunken buhar fazındaki su için iye Alt Isıl Değer (LHV) uygun olmaktadır. Isı değeri, 1 mol hidrojenin tamamının yanması durumunda oluşan ısıdır.

$$\text{HHV} = - \Delta H = 286.02 \text{ kJ/mol (25 } ^\circ\text{C 'de)} \quad (2.13)$$

$$\text{LHV} = - \Delta H = 241.98 \text{ kJ/mol (25 } ^\circ\text{C 'de)} \quad (2.14)$$

Sonuçta, bir yakıt pili için 25°C'de sıvı fazda suyun üretildiği, teorik(tersinir) olarak mümkün olan en yüksek verimlilik aşağıdaki gibi bulunur:

$$\eta_{rev} = \Delta G / \Delta H = 237.34 / 286.32 = 83\% \quad (2.15)$$

Hesaplanan bu değer 25°C'deki sıcaklık değeri için bulunmuştur. Sıcaklığın değişimi ile birlikte entalpi ve entropi değerleri değişeceği için Gibbs serbest enerji değeri de değişecektir. Sonuç olarak farklı sıcaklık değerleri için verim ve potansiyel farkı değerleri de değişecektir. Sıcaklığın artması ile birlikte bu değerler düşme gösterir. Tablo 2.5'te bu değişim gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Farklı sıcaklıklardaki,  $\Delta G$ ,  $E_{rev}$  ve verim değerleri [1]

	T (°C)	$\Delta G$ (kJ/mol)	$E_{rev}$ (V)	Verim(%)
Sıvı	25	-237.2	1.23	83
Sıvı	80	-228.2	1.18	80
Gaz	100	-225.2	1.17	79
Gaz	200	-220.4	1.14	77
Gaz	400	-210.3	1.09	74
Gaz	600	-199.6	1.04	70
Gaz	800	-188.6	0.98	66
Gaz	1000	-177.4	0.92	62

Tipik bir yakıt pili atmosferik basınçtan 6-7 bara kadar olan basınç aralığından çalışır. Tersinir hücre gerilimini daha iyi anlayabilmek için, sıcaklığa ek olarak, basıncın etkisi de incelenmelidir.

İzotermal bir süreç için,

$$dG = v dP \quad (2.16)$$

Burada  $v$ ; Türlerin molar hacimleridir, ve ideal gaz için,

$$Pv = RT \quad (2.17)$$

(2.16) ve (2.17) denklemleri beraber kullanılırsa:

$$dG = RT \frac{dP}{P} \quad (2.18)$$

İntegral alındıktan sonra;

$$G = G_0 + RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.19)$$

Bu denklem hidrojen/oksijen reaksiyonuna uygulanırsa, aşağıdaki Nerst Denklemi elde edilir:

$$\Delta G = \Delta G_0 + RT \ln \left( \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}} \right) \quad (2.20)$$

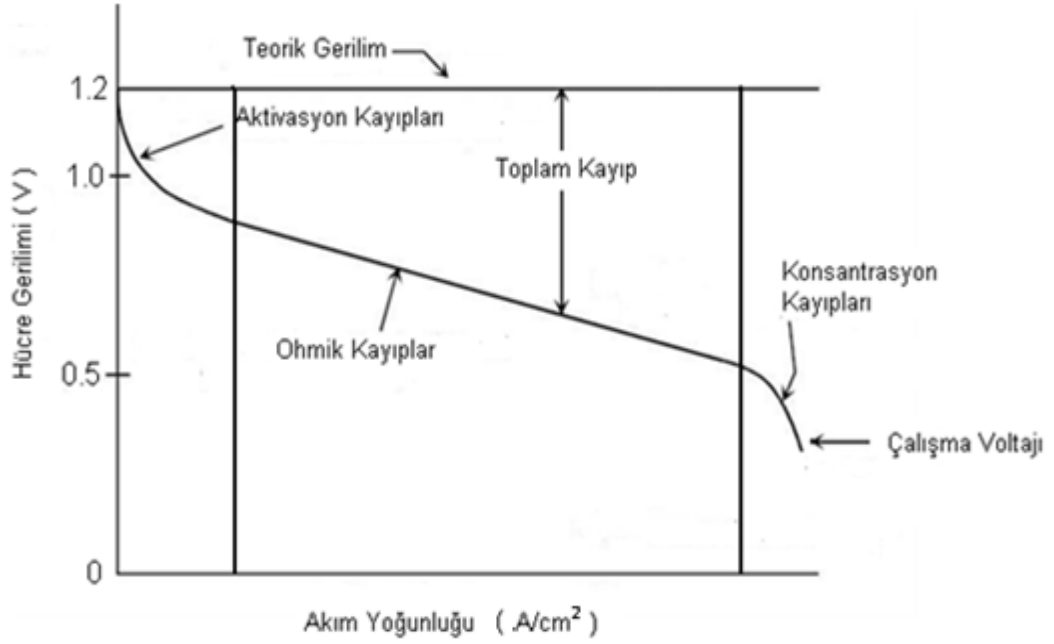
Nerst Denklemi (2.8) denklemine uygularsak;

$$E_{rev} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \quad (2.21)$$

Burada, P, tepkimeye girenlerin ve ürünlerin atmosfere göre gösterge basınçlarıdır. Bu da gösteriyor ki; tepkimeye girenlerin basınçlarının yüksek olması yüksek hücre potansiyeli elde edilmesine sebep olur.

#### 2.4.2.2 Yakıt Pili Kayıpları

Yakıt pillerindeki katalizör katmanında aktivasyon kayıpları, çift kutuplu plakalarda ve elektrotta elektron kaybı, proton değişim membranında proton kaybı, direnç kayıpları ve konsantrasyon kayıpları gibi kayıplar sebebiyle gerçek performans, Şekil 2.13'te görüldüğü gibi ideal performanstan farklı bir eğri çizer.



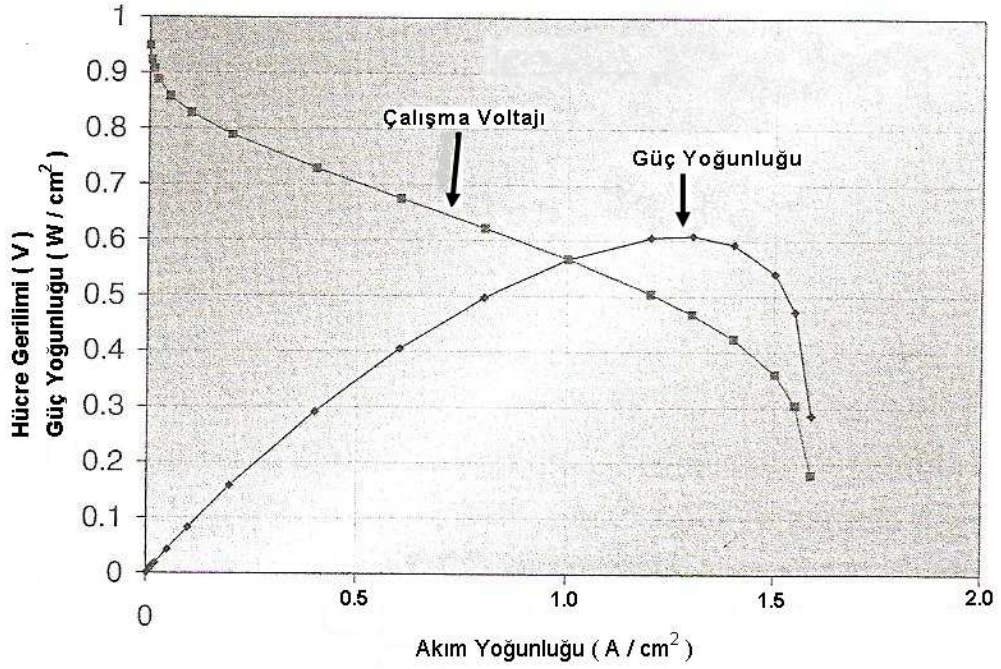
Şekil 2.13. Yakıt pilinde ideal ve gerçek voltaj akım karakteristiği [5].

Bir yakıt pilinin gücü ise akım ile potansiyel farkının çarpımı ile bulunur.

$$P = V \cdot I \quad (2.22)$$

Şekil 2.14'te yakıt pilleri için tipik bir güç yoğunluğu eğrisi ve polarizasyon eğrisi bir arada verilmiştir.





Şekil 2.14. Tipik bir yakıt pili güç yoğunluğu ve polarizasyon eğrileri[4]

### 2.4.2.3 Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıpları, elektrot üzerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlarda iyonların nasıl oluştuğu ve oluşum hızları ile ilgili bir kayıptır. Reaksiyonlarda elektronların alınması veya verilmesi durumunda gaz ile katalizör yüzeyindeki atomlar karşılaşır. İyonların oluşması için gaz içerisindeki bağların kırılması, bir ürün oluşturmak için ise yeni bağların oluşması gerekir. Tüm bu işlemler için bir aktivasyon enerjisi harcanır. İşte bu işlemler için gereken enerjiler ve elektron / proton kayıpları aktivasyon kayıplarını oluşturur. Aktivasyon kayıpları aşağıdaki Tafel denklemi ile belirtilir.

$$\eta_{act} = \frac{R.T}{\alpha.n.F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2.23)$$

Reaksiyon hızları katotta anottakine göre daha yavaştır. Bunun için katottaki aktivasyon kayıpları anoda göre daha fazladır. Düşük sıcaklıklarda çalışan yakıt pillerinde aktivasyon kayıpları yüksektir. Aktivasyon kayıpları gaz-elektrot-elektrolit ara yüzeyinin çok iyi ayarlanması ile azaltılabilir. Ayrıca aktivasyon kayıplarını azaltmanın diğer yöntemleri arasında; daha gelişmiş katalizör kullanılması, elektrot yüzeyinde pürüzlülüğün artırılması, tepkenlerin konsantrasyonunun artırılması ile sıcaklığın ve basıncın artırılması gibi farklı çözüm önerileri sıralanabilir.

#### 2.4.2.4 Ohmik Kayıplar

Ohmik kayıplar; iyonların elektrolitteki akışına karşı oluşan direnç, ara yüzeydeki temas dirençleri ve elektrot malzemesinde elektron akışına karşı meydana gelen dirençlerden oluşur. Bu kayıplar, yakıt pili voltaj akım karakteristiği eğrisinde aktivasyon kaybından sonra başlar ve konsantrasyon kayıpları belirgin olana kadar lineer olarak devam eder. Aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\eta_{ohm} = i \cdot R_{pil} \quad (2.24)$$

$R_{pil}$ ; hücredeki toplam dirençtir.

Tüm direnç kayıpları içerisinde elektrolitteki kayıplar daha fazladır. Bu kayıplar elektrolitin iyon iletkenliğini artırarak ve elektrotlar arasındaki mesafeyi kısaltarak azaltılabilir.

#### 2.4.2.5 Konsantrasyon Kayıpları

Yakıt pilinde akım başladıktan sonra, kullanılan yakıtın ve oksitleyicinin konsantrasyon değerlerini koruyamaması sebebiyle bir potansiyel kaybı oluşur. Ayrıca gazların elektrot gözeneklerinde yavaş yayılması, tepkenlerin/ürünlerin erimesi veya bozulması, tepkenlerin/ürünlerin elektrolit üzerinden elektrokimyasal

reaksiyon bölgesinin içine veya dışına kaçması konsantrasyon kayıplarını artırır. Konsantrasyon kayıpları aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\eta_{cons} = \frac{R.T}{n.F} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.25)$$

Konsantrasyon kayıplarını azaltmak için; saf hidrojen ve oksijen kullanılması, elektrolitin karıştırılması veya sıcaklık artışı ile birlikte iyonik difüzyonun artırılması gibi çözüm önerileri sıralanabilir.

Tüm bu kayıplara ek olarak, yakıt pilinin çalışması sırasında hidrojenin bir kısmı anottan ayrılıp membran üzerinden, iyonlarına ayrılmamış vaziyette katot tarafına geçerek doğrudan oksijenle reaksiyona girer. Bu durum herhangi bir akım oluşturmadan doğrudan su üretilmesine sebep olur. Böylece aynı miktarda hidrojenden daha az güç üretilmiş olur. Bu olay “yakıt karşıt geçişi” veya “iç akımlar” olarak adlandırılır.

#### 2.4.2.6. Toplam Kayıplar

Yukarıda bahsedilen tüm kayıpların toplamı sonrası bir yakıt hücresinin gerçek potansiyel farkı aşağıdaki gibi bulunur:

$$V = E_{rev} - (\eta_{act} + \eta_{cons})_a - (\eta_{act} + \eta_{cons})_c - \eta_{ohm} \quad (2.26)$$

## BÖLÜM 3

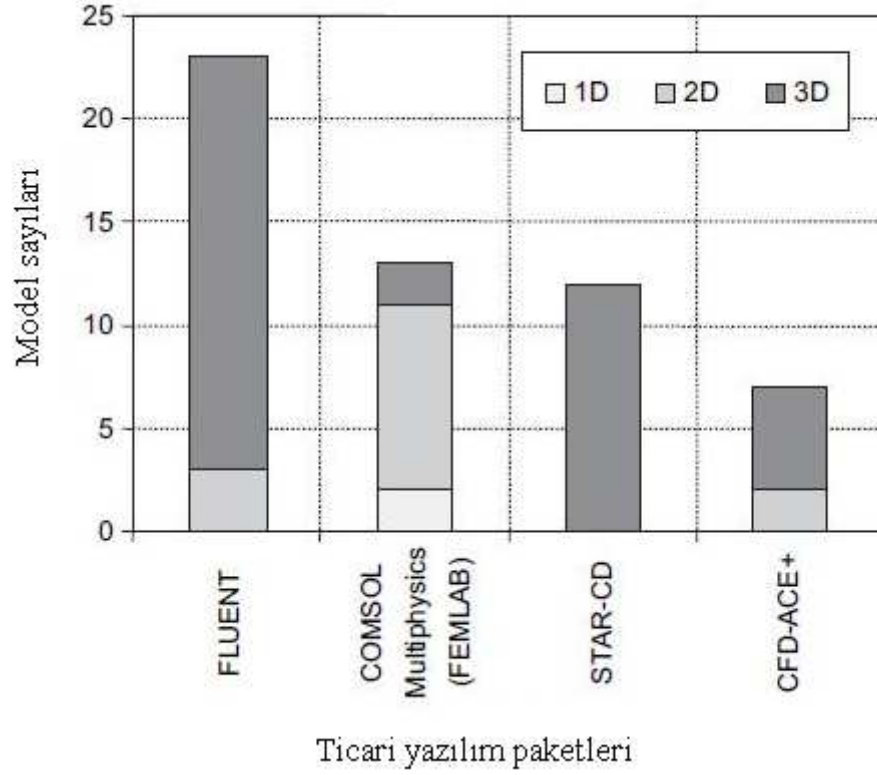
### 3. MODELLEME

#### 3.1. Genel Durum

Genel olarak; proje maliyetlerini azaltmak, farklı çalışma koşullarını daha hızlı bir şekilde deneyebilmek ve meydana gelebilecek olumsuzlukları daha çabuk görerek gerekli düzeltmeleri çok daha kısa sürede yapabilmek için pahalı deneysel çalışmalar yerine modellemeler yapılır. Çok farklı üretim alanlarında önemi gün geçtikçe artan model çalışmaları yakıt pilleri için de önemli bir yer teşkil eder. Yakıt pilleri üzerinde yapılan modelleme çalışmaları sayesinde daha verimli ve daha iyi tasarımlar ortaya çıktığı için üretim maliyetleri önemli ölçüde azalır. Modellemeye olan ilginin artmasının bir nedeni de yakıt pili performansına etki eden faktörlerin kolayca anlaşılabilmesi olmuştur.

Yakıt pilleri ile ilgili bir boyuttan üç boyuta kadar farklı model çalışmaları yapılmıştır. Özellikle 1990'lı yıllarda ve öncesinde bir boyutlu modeller oluşturulurken 2000'li yıllarla birlikte iki boyutlu modeller geliştirilmiştir. Günümüzde ise üç boyutlu model çalışmaları da yapılmaktadır.

Yakıt pili teknolojisi; malzeme bilimi, elektrokimya, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve termodinamik gibi farklı disiplinleri bünyesinde barındırmaktadır. Farklı disiplinlerle uğraşılması ve her bir disiplinin karmaşık denklemlerinin olması deneysel çalışmaları zorlaştırmaktadır. Bu nedenle oluşturulan modeller sayesinde en iyi performansı veren optimum çalışma şartlarına ulaşılması hedeflenmektedir. Yakıt pillerinin modellenmesinde ticari yazılım programlarının önemi de gün geçtikçe artmaktadır. Siegel yapmış olduğu çalışmada literatürde en çok görülen ticari yazılım programlarını karşılaştırmıştır [23]. Bu karşılaştırma Şekil 3.1'deki grafikte de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. PEMYP modellemede kullanılan ticari CFD yazılımları (Literatürdeki modellemelerde en fazla görülenler) [23]

Bu tez çalışmasında farklı disiplinleri bünyesine barındıran COMSOL Multiphysics ticari programı kullanılmıştır. Bu program sayesinde farklı geometrik özelliklerde ve farklı sınır şartlarında tek bir yakıt pili hücrenin performans eğrilerine ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bir model kabul edilen varsayımlar çerçevesinde doğru sonuçlar verir. Yakıt pili modellerinin doğru ve kaliteli sonuçlar vermesi için gerçek sonuçları çok fazla etkilemeyecek konularda belirli ihmallere yapılarak model basitleştirilmeye çalışılır. Kabul edilen varsayımların iyi anlaşılması modeli de daha iyi anlamamızı sağlar. Literatürde genel olarak karşılaşılan yakıt pili varsayımları şu şekilde sıralanabilir:

- Gaz türleri ve karışımlar ideal durumdadır.
- Elektrotlar, membran ve kanallar izotropik malzeme olarak kabul edilir.

- Gaz, sıvı ve katı fazların bölgesel ısı transferi dirençleri sıfır olarak kabul edilir.
- Gaz/sıvı/katı arasındaki sıcaklık her zaman aynıdır.
- İndirgenme reaksiyonunda oluşan su sıvı fazda kabul edilir.
- Sıvı su ile su buharı arasında bir denge vardır.
- Akış laminer ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilir.

### **3.2. PEM Yakıt Pilinin Sayısal Modellenmesi**

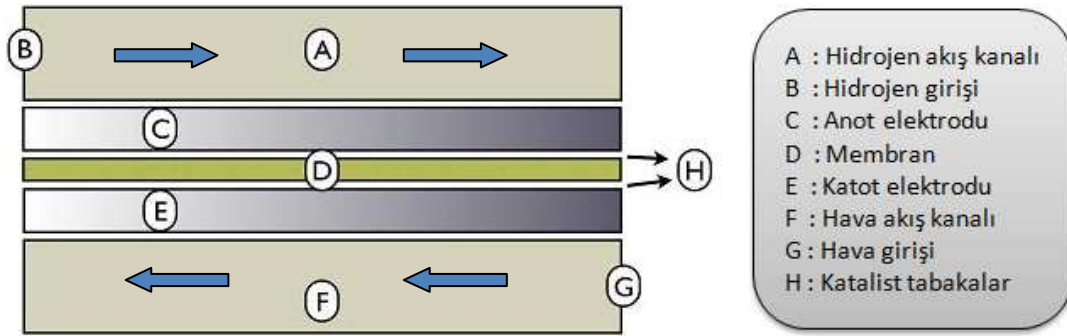
#### **3.2.1 Modellemenin Amacı ve Model Varsayımları**

Bu çalışmanın amacı; kararlı halde çalışan iki boyutlu sayısal bir PEM yakıt pili modeli kurarak geometrik özelliklerin ve çalışma parametrelerinin yakıt pili performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Öncelikle model akış alanına paralel olarak oluşturulmuş ( Şekil 3.2 ) ve farklı uzunluklarda denemeler yapılmıştır. Sonrasında performans değeri daha iyi olan kanal uzunluğu baz alınarak akış kanalına engeller konulmuştur. Engel konulmasındaki amaç ise yakıt pili performansına kanal boyunca engel olmasının olumlu etki yapıp yapmayacağını araştırılmasıdır. Elde edilen veriler sonuçlar bölümünde ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Model; akış kanalları, anot elektrodu, iyonik membran ve katot elektrodundan oluşmaktadır. Anot tarafında hidrojen katalist tabakasında tepkimeye girerek iyonik akımı katot tarafına ulaştıran protonları oluşturmaktadır. Bu çalışmada bir protonun bir su molekülünü anot tarafından katot tarafına sürüklediği kabul edilmiştir. Katot katalist tabakasında ise bu protonlar oksijenle birlikte reaksiyona girerek ürün olarak su oluşturmaktadır.

Katalist tabakasındaki reaksiyonlar için agglomerat modeli kullanılmıştır. Katalist tabakasının karbon, katalist metali ve elektrolitten oluşan ve gaz delikleri tarafından ayrılan bir yapıya sahip olduğu kabul edilmiştir. Gazlar öncelikle difüzyon tabakasındaki delikler tarafından daha sonra ise elektrolit tarafından difüze edilir, sonrasında ise gaz katalist tabakasına ulaşır.

Model için kabul edilen varsayımları ise şu şekilde sıralayabiliriz:

- Yakıt olarak kullanılan hidrojen ve oksitleyici olarak kullanılan hava ideal gaz olarak kabul edilmiştir.
- Elektrotlar ve kanalların geçirgenlik, gözeneklilik ve iletkenlik gibi özellikleri homojen kabul edilir.
- Sabit sıcaklık seçilmiştir.
- Model tek fazlı olup türler gaz fazındadır ve sıvı formları ihmal edilmiştir.
- Gazlar hem konveksiyonla hem de difüzyonla taşınmaktadır.
- Akış sıkıştırılmaz kabul edilmiştir.
- Sistem kararlı halde çalışmaktadır.
- İki boyutlu inceleme yapılmıştır.
- Nemlendirilmiş hidrojen ve nemlendirilmiş hava akış kanallarının girişlerinden verilmektedir.



Şekil 3.2. Akışa paralel model

### 3.2.2 COMSOL Uygulama Modları ve Matematik Denklemler [31]

COMSOL ticari yazılımı bünyesinde bir PEM yakıt pili modelini çözmek için kullanılan uygulama modları vardır. Burada model analizini yapmadan önce bu modlar hakkında genel bilgiler verilerek aynı zamanda PEM yakıt pili analizi için kullanılan matematik denklemler de anlatılmaya çalışılacaktır.

“Conductive Media DC” modu, yük dengesi ve hücre potansiyelinin akım yoğunluğu ile ilişkisini modellemek için kullanılır. “Incompressible Navier-Stokes” modu, elektrotlar içerisindeki gözenekli ortam akışı için kullanılır. “Maxwell-Stefan Diffusion and Convection” modu ise anot ve katottaki kütle transferi için kullanılır. Aşağıda bu modların, kullanılan korunum denklemleri ile birlikte açıklamaları yer almaktadır.

### 3.2.2.1 Yük Korunumu

Bu modda PEM yakıt hücresindeki potansiyel dağılımını tanımlamak için yüklerin korunumu denklemi kullanılmıştır.

$$\nabla \cdot (-\kappa_s \nabla \phi_s) = 0 \quad (\text{anot ve katot için}) \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot (-\kappa_m \nabla \phi_m) = 0 \quad (\text{membran için}) \quad (3.2)$$

Burada  $\kappa_s$  katı hal elektronik iletkenlik (S/m) ve  $\kappa_m$  membran’ın iyonik iletkenliğidir. Membran boyunca oluşan potansiyel  $\phi_s$  ve  $\phi_m$  tarafından belirlenmektedir. Denklem (3.1) elektrotlar için, denklem (3.2) ise membran için kullanılmaktadır.

Katalist tabakasında sınır koşulu olarak gerilim ve akım yoğunluğu arasında ilişkiyi bulmak için Butler-Volmer denklemleri kullanılmıştır. Membranda içeri doğru olan iyonik akım yoğunluğu anot ve katot taraflarında tanımlanmıştır. Bu değerler ise  $i_a$  ve  $i_c$  olup şu denklem sayesinde elde edilmiştir:

$$i_e = L_{act}(1 - \varepsilon_{mac})j_{agg,e} \quad (3.3)$$

Burada; ‘a’, anot ve ‘c’ katot anlamına gelmektedir.  $L_{act}$  aktif tabakanın kalınlığıdır (m).  $\varepsilon_{mac}$  makroskopik gözeneklilik olup  $j_{agg,e}$  ise agglomerat model tarafından verilen akım yoğunluğudur.



Anot ve katot için tanımlanan agglomerat modelinde, aktif katalist tabakasındaki akım yoğunluğu yerel olarak tanımlanabilir. Bu yerel akım yoğunlukları difüzyon denklemlerinin ve Butler-Volmer denklemlerinin analitik çözümüyle verilebilir.

$$i_{agg,e} = -6n_e \frac{D_{agg}}{R_{agg}^2} (1 - \lambda_e \coth \lambda_e) \beta_e \quad (3.4)$$

Denklem (3.4) de  $\beta$  ve  $\lambda$  anot ve katot için bilinmesi gereken değerlerdir. Bu modelde bağımsız olarak aşağıda verilen formül yardımıyla bulunabilirler.

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{i_{0a} S R_{agg}^2}{2F c_{H_2,ref} D_{agg}}} \quad (3.5)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{i_{0c} S R_{agg}^2}{4F c_{O_2,ref} D_{agg}} \exp\left(-\frac{F}{2RT} \eta_c\right)} \quad (3.6)$$

$$\beta_a = [c_{H_2,ref} - c_{H_2,ref} \exp\left(\frac{-2F}{RT} \eta_a\right)] \quad (3.7)$$

$$\beta_c = c_{O_2,agg} \quad (3.8)$$

Burada;  $D_{agg}$ , agglomerat gaz difüze bilitisi ( $m^2/s$ ),  $R_{agg}$ , agglomerat yarıçapıdır (m).  $n_e$ , yük transfer sayısı ( $H^+$  için 1 ve  $O_2$  için -2) olup  $S$ , agglomerat içerisindeki katalistin spesifik alanıdır ( $1/m$ ).  $F$ , Faraday sabiti (C/mol),  $c_{i,ref}$ , türlerin referans konsantrasyonu ( $mol/m^3$ ),  $c_{agg,i}$ , agglomerat yüzeyindeki konsantrasyonlar ( $mol/m^3$ ),  $i_{0a}$  ve  $i_{0c}$  değişim akım yoğunlukları ( $A/m^2$ ),  $R$ , gaz sabiti ( $J/(molK)$ ) ve  $T$  ise sıcaklıktır (K).

Dahası, anot ve katot taraflarındaki aşırı gerilim şu şekilde verilmiştir ( $\eta_a$  ve  $\eta_c$ ).

$$\eta_a = \phi_s - \phi_m - E_{eq,a} \quad (3.9)$$

$$\eta_c = \phi_s - \phi_m - E_{eq,c} \quad (3.10)$$

Burada  $E_{eq}$  denge gerilimini ifade etmektedir.

Oksijen ve hidrojen reaksiyonla birlikte tüketilirken, agglomerat yüzeyindeki katalist içindeki hidrojen ve oksijen konsantrasyonları Henry Kanunu ile hesaplanabilen her bir türün molar oranına bağlıdır.

$$c_{agg,H_2} = \frac{p_H x_H}{K_H} \quad (3.11)$$

$$c_{agg,O_2} = \frac{p_O x_O}{K_O} \quad (3.12)$$

Burada, K, Henry sabitidir (Pa.m<sup>3</sup>/mol).

Akım toplayıcı plakalara temas eden yüzeyler hariç diğer tüm sınır yüzeylerinin elektriksel olarak yalıtıldığı kabul edilmiştir. Anot plakası ve katot plakası arasındaki gerilim farkı toplam hücre gerilimini vermektedir. Anot tarafındaki gerilim değeri sıfıra eşitlenirken katot tarafındaki gerilim değeri ise  $V_{cell}$ 'e eşitlenmiştir. Hücre gerilimi bu iki değer farkına eşittir.

$$\phi_s = 0 \quad (\partial\Omega_{a,cc}) \quad (3.13)$$

$$\phi_s = V_{cell} \quad (\partial\Omega_{c,cc}) \quad (3.14)$$

### 3.2.2.2 Gözenekli Ortam Akışı için Momentum Korunumu

Akışa paralel olarak kurulan bu modelde gözenekli ortamdaki akış için Brinkman Denklemleri kullanılmıştır. Literatürdeki çoğu çalışmada gözenekli ortam akışı için Darcy Kanunu kullanılmıştır. Brinkman Denklemleri, Darcy Kanunu'nun viskoz etkileri de dikkate alarak genişletilmiş bir halidir. Bu denklemlerde kayma gerilmesi tarafından momentumun transferi önem arz etmektedir. Daha da önemlisi, Brinkman

Denklemleri COMSOL içerisinde serbest akış ile uyumlu bir şekilde çalışabilmektedir. Bu da akışa paralel olarak oluşturulan modellerin incelenmesinde oldukça verimli sonuçlar verir. Ayrıca bu uygulama modu sayesinde hidrojen akış kanalı ile anot elektrodu ve hava akış kanalı ile katot elektrodu arasında sınır koşulu tanımlamaya gerek kalmaz. Bu yüzden temas yüzeyinde sınır koşulu tanımlamaya gerek yoktur.

Boş kanallardaki akış Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanmaktadır.

$$\nabla(\rho_{mix}u) = 0 \quad (3.15)$$

$$\nabla[-\eta(\nabla u + (\nabla u)^T) + pI] = -\rho_{mix} (u\nabla)u \quad (3.16)$$

Burada;  $\eta$ , dinamik viskozite (Pa.s),  $u$ , akışkanın hızı (m/s),  $\rho_{mix}$ , akışkan karışımının yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>) ve  $p$  ise basınçtır (Pa).

Gözenekli ortamda Brinkman Denklemleri akışı tanımlar.

$$\nabla(\rho_{mix}u) = 0 \quad (3.17)$$

$$\nabla \left[ \frac{-\eta}{\epsilon_p} (\nabla u + (\nabla u)^T) + pI \right] = \frac{-\eta}{\kappa_p} u \quad (3.18)$$

Burada;  $\kappa$ , geçirgenlik (m<sup>2</sup>) ve  $\epsilon_p$ , gözenekliliktir (birimsiz).

### 3.2.2.3 Maxwell-Stefan Kütle Transferi

Kütle transferinde daha çok bilinen bir kanun olan Fick Yasası türlerin sadece çözücü ile etkileşime girmesi kabulüne dayanmaktadır. Bununla beraber, difüzyon katsayıları böyle etkileşimlerde konsantrasyona bağlı değildir. Buna rağmen, gaz karışımlarında bütün türler birbiri ile etkileşim halindedir ve bu yüzden difüzyon katsayıları basınç ve sıcaklığa ek olarak konsantrasyona da bağlıdır.

Bu modelde, anot tarafında H<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O olmak üzere iki farklı, katot tarafından ise O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O olmak üzere üç farklı tür bulunmaktadır. Maxwell-Stefan Kütle Transfer Denklemleri'ne göre difüzyon şu denklemlere göre ortaya çıkmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho w_i + \nabla \cdot \left[ -\rho w_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \left\{ \frac{M}{M_j} \left( \nabla w_j + w_j \frac{\nabla M}{M} \right) + (x_j - w_j) \frac{\nabla p}{p} \right\} + w_i \rho u + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right] = R_i \quad (3.19)$$

Hesaplama modeli kütle oranı  $\omega_i$ ' yi aramaktadır. Burada R<sub>i</sub> terimi sıcaklık farkı olmadığı için sıfır olarak kabul edilmektedir. Aynı şekilde model kararlı durumda olduğundan zamana bağlı ilk terimler de sıfıra eşit olmaktadır. Bu durumda katot tarafındaki kütle transferi denklemleri ise şu şekilde ortaya çıkmaktadır (oksijen=1, su=2 ve nitrojen=3):

$$\nabla \cdot \left\{ -\rho w_1 \sum_j \left[ D_{1j} \left( \nabla x_j + (x_j - w_j) (\nabla p/p) \right) \right] \right\} = -(\rho u \cdot \nabla w_1) \quad (3.20)$$

$$\nabla \cdot \left\{ -\rho w_2 \sum_j \left[ D_{2j} \left( \nabla x_j + (x_j - w_j) (\nabla p/p) \right) \right] \right\} = -(\rho u \cdot \nabla w_2) \quad (3.21)$$

Burada D<sub>ij</sub> matematik modelinden hesaplanan Maxwell-Stefan difüzyon matrisidir(m<sup>2</sup>/s). Giriş kısımlarında ise besleme gazlarının kütle oranları girdi olarak verilmiştir. Anot tarafında hidrojenin kütle akısı, katot tarafında ise oksijen ve suyun kütle akısı elektrokimyasal reaksiyonlar tarafından belirlenmiştir. Sınır koşullarında ise kütle transferini tanımlamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$-n \cdot N_{H_2} \Big|_{anode} = \frac{j_{anode}}{2F} M_{H_2} \quad (3.22)$$

$$-n \cdot N_{O_2} \Big|_{cathode} = \frac{j_{cathode}}{4F} M_{O_2} \quad (3.23)$$

$$-n \cdot N_{H_2O} \Big|_{cathode} = \frac{j_{cathode}}{F} (0.5 + \lambda_{H_2O}) M_{H_2O} \quad (3.24)$$

### 3.3. Model Analizi

Bu bölümde, modelin COMSOL ticari yazılımı kullanılarak nasıl geliştirildiği anlatılacaktır.

#### 3.3.1 Model Geometrisi

Akışa paralel olarak oluşturulan modelin basit şekli Şekil 3.2’de gösterilmişti. Model boyutları ise Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Öncelikle akışa paralel model kanal boyu 20 mm ve 50 mm olacak şekilde iki farklı durumda incelenmiş daha sonra 20 mm uzunluğundaki model ile çalışmalara devam edilerek akış kanalına farklı şekil ve boyutlarda engeller konulmuştur.

Tablo 3.1. Akışa paralel modelin geometrik özellikleri

		Elektrot	Membran	Akış Kanalı
1. Durum	Uzunluk	50 mm	50 mm	50 mm
	Yükseklik	0.25 mm	0.1 mm	0.75 mm
2. Durum	Uzunluk	20 mm	20 mm	20 mm
	Yükseklik	0.25 mm	0.1 mm	0.75 mm

#### 3.3.2 Kullanılan Sabitler

Model çalışması için COMSOL ticari programında kullanılan sabit değerler Tablo 3.2’de verilmiştir. Katotta toplam giren havanın %21’inin oksijen olduğu kabul edilir. Anot ve katottaki gaz karışımlarının yoğunlukları şu şekilde tanımlanır:

$$\rho_{mix} = \frac{p}{R.T} (x_{H_2} M_{H_2} + x_{H_2O_a} M_{H_2O}) \quad (\text{anot için}) \quad (3.25)$$

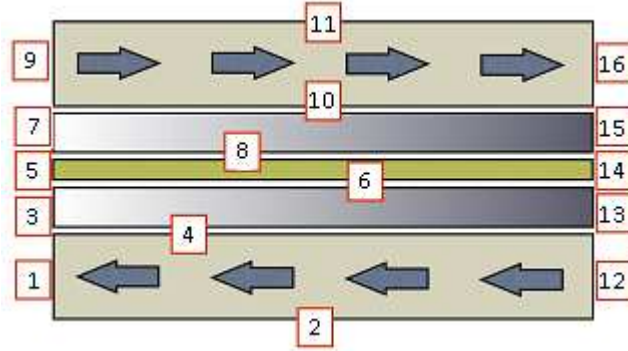
$$\rho_{mix} = \frac{p}{R.T} (x_{O_2} M_{O_2} + x_{H_2O_c} M_{H_2O} + x_{N_2} M_{N_2}) \quad (\text{katot için}) \quad (3.26)$$

Tablo 3.2. Modellemede kullanılan sabit değerler

İsim	Anlatım-	Değeri	Anlamı
kappa_s	1000[S/m]	1000[S/m]	Elektrotların elektronik iletkenliği
kappa_m	9[S/m]	9[S/m]	Membran iletkenliği
V_cell	0.6[V]	0.6[V]	Hücre voltajı
R	8.314[J/(mol*K)]	8.314[J/(mol*K)]	İdeal Gaz sabiti
T	353[K]	353[K]	Sıcaklık
F	96485[C/mol]	96485[s·A/mol]	Faraday sabiti
kappa_p	1e-13[m^2]	(1e-13)[m^2]	Elektrot geçirgenliği
eta	2.1e-5[Pa*s]	(2.1e-5)[kg/(m·s)]	Elektrot gözeneklerindeki gaz viskozitesi
p_ref	1.013e5[Pa]	1.013e5[Pa]	Referans basıncı
p_a_in	1.00001*p_ref	1.01301e5[Pa]	Anot giriş basıncı
p_c_in	1.00001*p_ref	1.01301e5[Pa]	Katod giriş basıncı
drag	1	1	Su sürüklenme katsayısı
E_eq_a	0[V]	0[V]	Anot denge potansiyeli
E_eq_c	1[V]	1[V]	Katod denge potansiyeli
i0_a	1e5[A/m^2]	1e5[A/m^2]	Anot kısmı değişim akım yoğunluğu
i0_c	1[A/m^2]	1[A/m^2]	Katod kısmı değişim akım yoğunluğu
S	1e7[1/m]	1e7[1/m]	Elektrotların özgül yüzey alanı
R_agg	0.1[um]	(1e-7)[m]	Aglomerat parçacık çapı
L_act	10[um]	(1e-5)[m]	Katalizör katmanı kalınlığı
eps_mic	0.2	0.2	Aglomerata içindeki mikroskobik gözeneklilik
eps_mac	0.4	0.4	Aglomerata arasındaki makroskobik gözeneklilik
D_agg	1.2e-10[m^2/s]*((1-eps_mac)*(eps_mic))^1.5	(4.988306e-12)[m^2/s]	Aglomerata içerisinde gaz yayılım katsayısı
D_effH2_H2O	0.915e-4[m^2/s]*(T/307.1[K])^1.5*(eps_mac)^1.5	(2.852682e-5)[m^2/s]	H2 - H2O arasındaki efektif ikili yayılım
D_effO2_H2O	0.282e-4[m^2/s]/(T/308.1[K])^1.5*(eps_mac)^1.5	(5.817208e-6)[m^2/s]	O2_H2O arasındaki efektif ikili yayılım
D_effO2_N2	0.22e-4[m^2/s]*(T/293.2[K])^1.5*(eps_mac)^1.5	(7.352394e-6)[m^2/s]	O2_N2 arasındaki efektif ikili yayılım
D_effH2O_N2	0.256e-4[m^2/s]*(T/307.5[K])^1.5*(eps_mac)^1.5	(7.965707e-6)[m^2/s]	H2O_N2 arasındaki efektif ikili yayılım
wH2_in	0.1	0.1	Anot girişindeki, hidrojen ağırlık oranı
wO2_in	0.21*0.8	0.168	Katod girişindeki, oksijen ağırlık oranı
wH2Oc_in	0.2	0.2	Katod girişindeki, su ağırlık oranı
MH2	2[g/mol]	0.002[kg/mol]	Hidrojenin mol kütlesi
MO2	32[g/mol]	0.032[kg/mol]	Oksijenin mol kütlesi
MH2O	18[g/mol]	0.018[kg/mol]	Suyun mol kütlesi
MN2	28[g/mol]	0.028[kg/mol]	Azotun mol kütlesi
xH2_in	(wH2_in/MH2)/(wH2_in/MH2+(1-wH2_in)/MH2O)	0.5[1]	Anot girişindeki, hidrojen mol oranı
xO2_in	(wO2_in/MO2)/(wO2_in/MO2+wH2Oc_in/MH2O+(1-wO2_in-wH2Oc_in)/MN2)	0.134849[1]	Katod girişindeki, oksijen mol oranı
KH2	3.9e4[Pa*m^3/mol]	39000[J/mol]	Aglomerata içindeki hidrojen için Henry konsantrasyon sabiti
KO2	3.2e4[Pa*m^3/mol]	32000[J/mol]	Aglomerata içindeki oksijen için Henry konsantrasyon sabiti
cH2_ref	xH2_in*p_ref/KH2	1.298718[mol/m^3]	Katalizör katmanında referans hidrojen konsantrasyonu
cO2_ref	xO2_in*p_ref/KO2	0.42688[mol/m^3]	Katalizör katmanında referans oksijen konsantrasyonu
epsilon	0.4	0.4	Elektrotların kuru gözenekliliği
rho_mix_a	0.8[kg/m^3]	0.8[kg/m^3]	Anot yoğunluğu
rho_mix_c	0.7[kg/m^3]	0.7[kg/m^3]	Katod yoğunluğu

### 3.3.3 Model İçin Kullanılan COMSOL Uygulama Modları

COMSOL ticari programında oluşturduğumuz paralel akışlı model için 3 farklı uygulama modu kullanılmıştır. Bunlardan ilki olan “Incompressible Navier-Stokes” modu, elektrotlar içerisindeki gözenekli ortam akışı için kullanılır. “Conductive Media DC” modu, yük dengesi ve hücre potansiyelinin akım yoğunluğu ile ilişkisini modellemek için kullanılır. Bu mod elektrotlar için ayrı, membran için ayrı ele alınmıştır. “Maxwell-Stefan Diffusion and Convection” modu ise anot ve katottaki kütle transferi için kullanılır. Bu mod da anot ve katot için ayrı ayrı değerlendirilir. Burada bu modların model için nasıl kullanıldığı ve kullanılan sınır değerler anlatılacaktır. Tüm modlarda kolaylık olması açısından Şekil 3.3’te tüm model için kullanılan sınır değerleri numaralandırılmıştır.



Şekil 3.3. Paralel modelde sınır değerlerinin numaralandırılması

#### 3.3.3.1 Incompressible Navier-Stokes Modu

Bu modda, sıkıştırılamaz akış için kullanılan Navier-Stokes denklemleri Brinkman Denklemi ile desteklenmiştir. Brinkman Denklemi, kanaldaki serbest akış ve gözenekli alan akışı arasındaki kombinasyonu sağlayabilme özelliğine sahiptir ve COMSOL yazılımı da bu kombinasyonu sağlamayı Brinkman Denklemi uygulama modu ile başarılı bir şekilde sağlamaktadır. Bu nedenle gözenekli ortam akışı için bu uygulamada Darcy Kanunu uygulama modu tercih edilmemiştir.

Bu modda elektrotlar alt alan ayarları için seçilmiş, membran inaktif edilmiştir. Giriş değerleri olarak;  $\kappa_p$ -katı faz iletkenliği,  $\eta$ -elektrotların geçirgenliği ve  $\rho_{\text{mix}}$ -gaz karışımının yoğunluğu olarak verilmiştir. Bu modun sınır koşulları Tablo 3.3'te verilmiştir. Tablo 3.3 'de verilenlerin dışındaki sınır koşulları kayma durumu olmayan duvar tipi sınır olarak belirlenmiştir

Tablo 3.3. Incompressible Navier-Stokes modu için sınır değerler

Sınırlar	1, 16	9	12
Tip	Çıkış	Giriş	Giriş
	Basınç	Hız	Hız
Değer	p_ref (Pa)	0.2 (m/s)	0.4 (m/s)

Bu bölümde sınır şartı olarak girişte hız, çıkışta ise referans basıncı kullanılmıştır. Bu şekilde akış kanallarında sabit debide sürekli bir akış elde edilerek meydana gelebilecek basınç düşümleri önlenmeye çalışılmıştır. Bu şekilde sürekli olarak, kullanılan yakıt ve hava konsantrasyon kaybına fazla uğramadan reaksiyona girmeye zorlanmıştır. Reaksiyona daha fazla tür sokmak için yapılan bir uygulama da akış kanalına engeller konulmasıdır. Tablo 3.3'te verilen değerler haricinde farklı hız ve basınç değerleri de denenmiştir. Sonuç bölümünde, elde edilen sonuçlarla birlikte bu farklı sınır şartları anlatılacağı için burada fazla değinilmemiştir.

### 3.3.3.2 Elektrotlar İçin Conductive Media DC Uygulama Modu

Elektrotlar için sadece alt alan ayarları tanımlanır, ve membran inaktif edilir. Bu modda, bir sabit olarak verilen katı faz elektriksel iletim( $\kappa_s$ ), iletim ilişkileri için tanımlanmıştır. Sınır koşulları Tablo 3.4'de verilmiştir.



Tablo 3.4. İletken alan Dc uygulaması modu (elektrot) için sınır koşulları

Sınırlar	3, 7, 13, 15	4	6	8	10
Tip	Elektrik yalıtım	Elektrik potansiyeli	İç akım	İç akım	Elektrik potansiyeli
Değer	0	V_cell (V)	-i_c (A/m <sup>2</sup> )	-i_a (A/m <sup>2</sup> )	0 (V)

### 3.3.3.3 Membran İçin Conductive Media DC Uygulama Modu

Bu uygulama modunda, iyonik iletim ( $\kappa_m$ ) iletim ilişkilerini tanımlamak için kullanılmıştır. Sadece membran alt alanı seçilmiş ve diğer iki elektrot ayarlar için inaktif edilmiştir. Sınır koşulları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. İletken alan Dc uygulaması modu (zar) için sınır koşulları

Sınırlar	5, 14	6	8
Tip	Elektrik yalıtım	İç akım	İç akım
Değer	0	i_c (A/m <sup>2</sup> )	i_a (A/m <sup>2</sup> )

### 3.3.3.4 Anottaki Türler İçin Maxwell-Stefan Diffusion and Convection Uygulama Modu

Sınır koşulları Tablo 3.6'da verilmiştir. Alt alan tanımlarındaki geri kalan tüm sınırlar, yalıtım/simetri sınır durumu olarak bırakılmıştır.

Tablo 3.6. Anotta Maxwell-Stefan difüzyon ve iletim uygulama modu için sınır koşulları

Sınırlar	7, 11, 15	8	9	16
Tip	Yalıtım / Simetri	Akı	Kütle fraksiyonu	Konvektif akı
Değer	0	-i_a*MH2/(2*F) [kg/(m <sup>2</sup> .s)]	wH2_in	wH2_in

### 3.3.3.5 Katottaki Türler İçin İçin Maxwell-Stefan Diffusion and Convection Uygulama Modu

Tablo 3.7 katot elektrotu için Maxwell-Stefan uygulama modunda sınır koşullarını vermektedir. Alt alan tanımlarındaki geri kalan tüm sınırlar, yalıtım/simetri sınır durumu olarak bırakılmıştır.

Tablo 3.7. Anotta Maxwell-Stefan difüzyon ve iletim uygulama modu için sınır koşulları

Sınırlar	1	2-3, 13	6	12
Tip	Konvektif akı	Yalıtım/Simetri	Akı	Kütle fraksiyonu
Değer	{wO2_in;wH2Oc_in}	{0;0}	$i_c \cdot \text{MO}_2 / (4 \cdot F); -$ $i_c \cdot \text{MH}_2\text{O} \cdot (1/2 + \text{drag}) / F$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	{wO2_in;wH2Oc_in}

## BÖLÜM 4

### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada COMSOL ticari programı kullanılarak, farklı geometrik özellikler ve farklı sınır şartlarında tek hücreli bir PEM yakıt hücresinin performansı test edilmiştir. Giriş sınır şartı olarak hız, çıkış sınır şartı olarak ise basınç kullanılmıştır. Yakıt pili termodinamiği kısmında da anlatıldığı gibi hücre potansiyeli-akım yoğunluğu grafiği yakıt hücrelerinde performans (polarizasyon) eğrisi olarak tanımlanmıştır. Bu eğriyi oluşturabilmek için genel olarak 0.2 V-1.2 V aralığında ve 0.1 V'luk artışlarla her hücre potansiyeli değeri için modeller oluşturulmuştur. Bazı durumlarda ise özellikle 0.3 V'tan düşük hücre gerilimlerinde 0.1 V'tan daha da düşük farklarla program çalıştırılmıştır. Oluşturulan tüm modellerin çözümü için kullanılan çözüm prosedürü aynı olup aşağıda kısaca bahsedilmiştir. Kullanılan çözüm ağı ise paralel ve engelli modeller için farklı farklıdır. Modeller anlatılırken çözüm ağı oluşumu ve çözüm ağı genel verileri de anlatılacaktır.

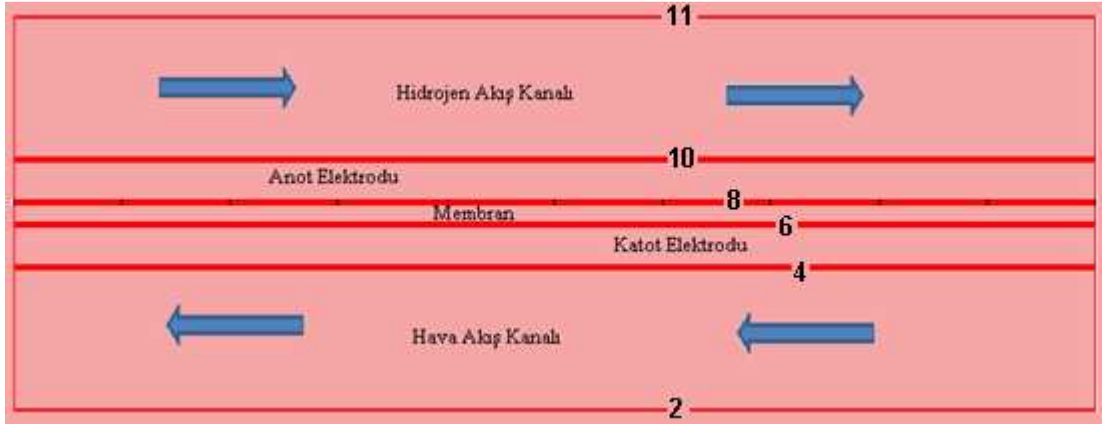
#### 4.1. Çözüm Prosedürü

COMSOL programı, 25 maksimum iterasyon sayısı ve  $10^{-6}$  göreceli toleranslı lineer sistem çözücü kullanmaktadır. Çabuk yakınsamalar elde etmek için çözüm sıralı düzen çalıştırılır. İlk olarak, "Conductive Media DC" uygulama modları çözülür. Daha sonra, "Conductive Media DC" uygulama modları ile birlikte "Incompressible Navier-Stokes" uygulama modu birlikte çözülür. En son olarak ise tüm uygulama modları bir önceki çözümden elde edilen sonuçlar kullanılarak çözülür. Böyle sıralı bir geliştirme, çözümün yakınsama hızını artırmak için oldukça önemlidir. Bu çalışmada oluşturulan tüm modellerde aynı çözüm prosedürü kullanılmıştır.

#### 4.2. Paralel Model Geometrisi ve Çözüm Ağı

Şekil 4.1'de akışa paralel olarak oluşturulan model geometrisi yer almaktadır. Bu modelde; 2, 4, 6, 8, 10 ve 11 numaralı sınırlar için maksimum element boyutu  $1e^{-4}$  m.

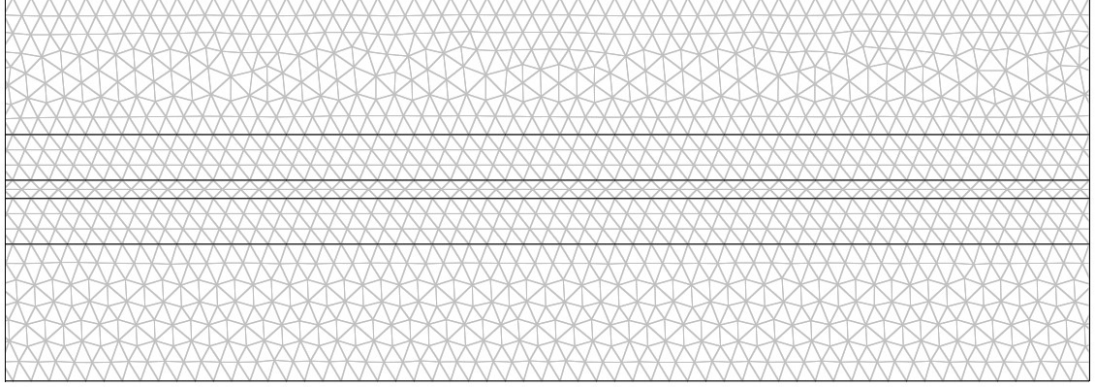
olarak girilmiştir. Tablo 4.1’de çözüm ağı istatistikleri verilmiş olup Şekil 4.2’de ise çözüm ağı yapısı gösterilmiştir. Paralel model için, kanal boyunun etkisi, giriş hızının etkisi ve çıkış basıncının etkisi ayrı ayrı incelenmiş olup elde edilen sonuçlar başlıklar halinde anlatılacaktır. Tüm bu üç durum için de aynı çözüm ağı kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Paralel model

Tablo 4.1. Paralel model için çözüm ağı istatistikleri

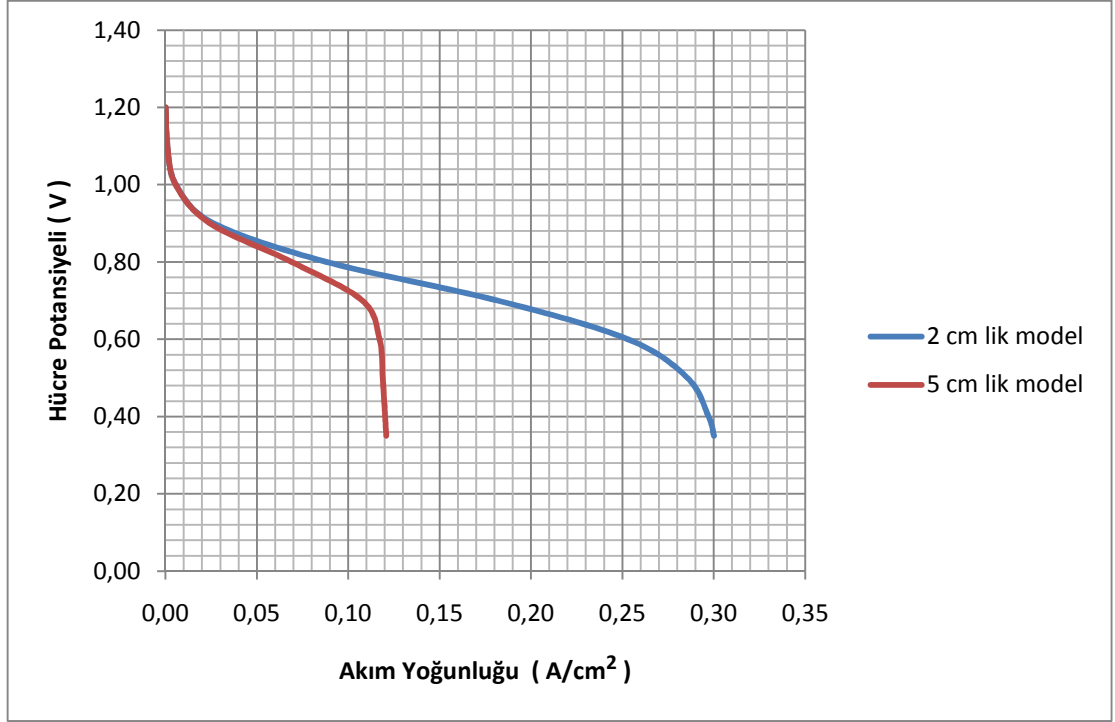
Number of degrees of freedom	72587
Number of mesh points	4736
Number of elements	9024
Triangular	9024
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1246
Number of vertex elements	12
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.182



Şekil 4.2. Paralel model çözüm ağı yapısı

#### 4.2.1. Model Uzunluğunun Etkisi

Öncelikle çalışmalar hiçbir engel olamayan akışa paralel model üzerinde yapılmıştır. İlk yapılan çalışma kanal boyunun performans etkisini araştırılmıştır. İki farklı uzunlukta model oluşturulmuştur. İlk model 5 cm uzunluğundadır. Daha sonra model boyu kısaltılarak 2 cm uzunlukta bir model oluşturulmuştur (Şekil 4.1). Sınır şartları olarak  $H_2$  ve Hava girişlerinde 0.05 m/s hız tanımlanmış olup çıkış şartı ise her iki kanal için de atmosferik basınçtır (1atm). Şekil 4.3'te her iki kanal boyu için performans değerleri karşılaştırılmıştır. 2 cm'lik modelde türler kanalı daha çabuk terk etmektedir. Bu nedenle konsantrasyon kayıpları daha az olmaktadır. 5 cm'lik modelde ise diğerine göre kanal boyu daha uzun olduğu için türler kanalı terk edene kadar daha fazla konsantrasyon kaybına uğrarlar. Bunun sonucu olarak da daha kısa olan modelin performans eğrisi daha iyi olmaktadır. Bu Şekil 4.3'te de açıkça görülmektedir. Kanal boyunun kısalması sonucu hücre performansının artması ve en iyi performansta karşılaştırmalar yapılmak istenmesi nedeniyle bundan sonra yapılan çalışmalara 2 cm'lik kanal boyu baz alınarak devam edilmiştir. Program minimumda 0.35 V gerilim değerinde çalışmaya müsaade etmiştir.

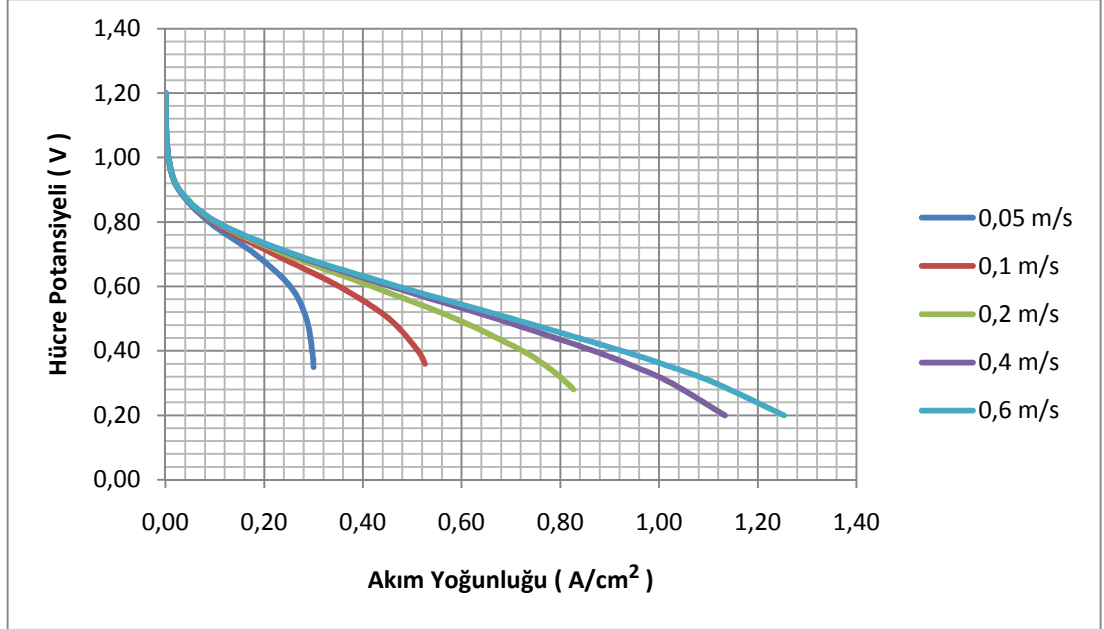


Şekil 4.3. Paralel modelde farklı iki uzunluğa göre performans eğrisi karşılaştırması (Giriş sınır şartı; her iki kanal için: 0.05 m/s, çıkış sınır şartı; her iki kanal için: 1 atm)

#### 4.2.2. Giriş Hızı Etkisi

Bir önceki çalışmada H<sub>2</sub> ve hava giriş hızları 0.05 m/s olarak verilmişti. Bu kısımda giriş hızı artışının performansa etkisi araştırılmıştır. Yine öncelikle 0.05 m/s hızla başlanılmak üzere bir önceki hıza göre 2 kat artışla 5 farklı hız değerinde program çalıştırılmıştır. Son hız değeri, 0.8 m/s hıza program yanıt vermediği için 0.6 m/s olarak alınmıştır. Çıkış sınır değeri her koşul için atmosferik basınçtır. Bu modelde de akış kanalı üzerinde herhangi bir engel yoktur. Elde edilen performans grafiği Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Giriş hızını artırmak hücre performansını da artırmıştır. Çünkü hızın artması sisteme verilen türlerin debisini de arttırmaktadır. Debinin artması ise daha fazla yakıt ve havanın reaksiyona girmesine neden olur. Ayrıca yüksek debi ile birlikte hücrede daha fazla tür olacağı için konsantrasyon kayıpları da daha az olmaktadır. Program 0.6 m/s hız şartlarında 0.2 V alt sınırına kadar hücre

geriliminde çalışmaya müsaade etmişken 0.05 m/s hız sınır değeri için inilebilen minimum gerilim 0.35 V olmuştur.



Şekil 4.4. Paralel modelde farklı giriş hızlarında performans eğrisi karşılaştırması (Çıkış sınır şartı; her durum için: 1 atm)

#### 4.2.3. Çıkış Basıncı Etkisi

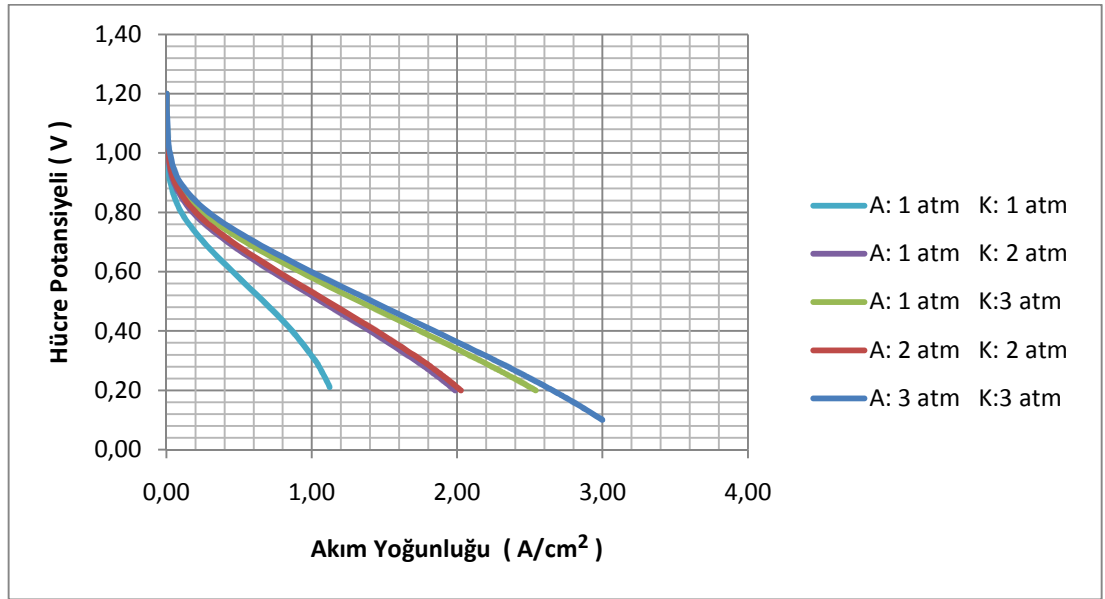
Bundan önceki iki bölümde anlatılan çalışmalarda çıkış sınır şartları sabit tutulmuş o da atmosferik basınca eşitlenmiştir. Zorlanmış koşullarda hücre performansını test etmek için ise çıkış sınır değerleri değiştirilmiştir. Çıkış basınçları 1 atm'den 3 atm'e kadar değişik kombinasyonlarda denenmiştir.

Önceki çalışmalardan farklı olarak burada anot ve katot tarafındaki kanallar için farklı sınır değerler verilmiştir. Bundan önceki çalışmalarda H<sub>2</sub> ve hava giriş-çıkışları için aynı sınır şartları verilmişti. Burada ise öncelikle giriş değerleri tanımlanmıştır. Farklı hızlarda yapılan çalışmalar sonrasında gelecek çalışmalarda da optimizasyon sağlamak için anot tarafındaki kanalda H<sub>2</sub> giriş hızı 0.2 m/s katot tarafındaki kanalda hava giriş hızı ise 0.4 m/s olarak verilmiştir. Bu değerler sabit tutularak farklı çıkış

basınçlarının performansa etkileri araştırılmıştır. Bunun için Tablo 4.2’de gösterilen 5 farklı durum denenmiştir. Elde edilen sonuçların grafiği ise Şekil 4.5’te yer almaktadır.

Tablo 4.2. Farklı çıkış basınçları

	H <sub>2</sub> Çıkışı	Hava Çıkışı
1. durum	1 atm	1 atm
2. durum	1 atm	2 atm
3. durum	1 atm	3 atm
4. durum	2 atm	2 atm
5. durum	3 atm	3 atm



Şekil 4.5. Paralel modelde farklı çıkış basınçlarında performans eğrisi karşılaştırması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s)

Katot tarafındaki kanalın giriş ve çıkış değerleri anot tarafındaki kanala göre daha yüksek verilmiştir. Çünkü reaksiyonu esas belirleyen kısım katot tarafıdır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki katot tarafındaki kanalda verilen sınır şartlarının anot tarafındaki kanala göre yüksek olması her ikisinin de aynı olduğu duruma göre daha



yüksek hücre performansı sağlamıştır. Şekil 4.5'teki grafikte görüldüğü üzere anot tarafındaki kanal çıkış basıncı 1 atm ve katot tarafındaki kanal çıkış basıncı 2 atm olan durum ile her iki taraf çıkış basınçları 2 atm olan durum birbirlerine çok yakındır. Aynı durum 1 atm - 3 atm ve 3 atm - 3 atm şartları için de söylenebilir. Zorlanmış şartlar her ne kadar performans artışı sağlasa da sistem maliyetine getirdiği fazladan yükler nedeniyle tartışılan bir konu olmuştur. Bu nedenle her iki kısımda da yüksek çıkış basıncı vermek yerine anot tarafındaki kanal atmosferik basınç şartlarında tutularak sadece katot tarafındaki kanalın çıkış basıncı arttırılabilir.

### **4.3. Akış Kanalına Engel Konulması**

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda paralel akış kanalı kullanılmış akışa engel teşkil edecek herhangi bir geometrik değişiklik model üzerinde yapılmamıştı. Verilen sınır şartları nedeniyle sistem sabit debide çalışmakta ve hücre içerisinde türlerin konsantrasyonunda çok fazla azalma olmamaktadır. Buradaki amacımız ise akış boyunca kanala engeller koyarak daha fazla miktarda yakıt ve havayı reaksiyona girmeye zorlamaktır. Bunun da hücre performansını arttırması beklenir.

Akış kanalı boyunca üç farklı geometrik özellikte engel konulmuştur. Bunlar dikdörtgen şeklinde, daire ve yamuk şeklindedir. Bunların derinlikleri de kademe kademe arttırılarak toplamda 8 farklı şekil ortaya çıkmıştır. Her biri kendi arasında sığdan derine doğru numaralandırılmıştır. Bundan sonraki bölümlerde engelli modellerin performans eğrileri oluşturularak engel olmayan paralel model ile karşılaştırılacaktır.

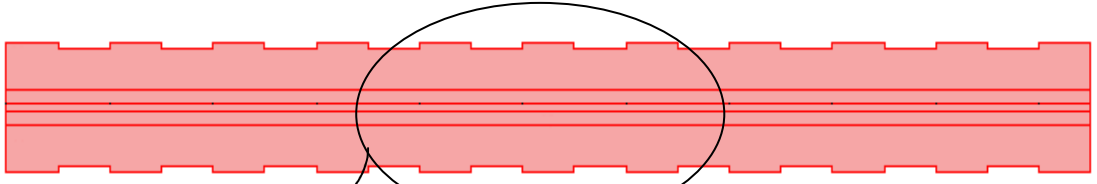
Daha önce de belirtildiği gibi oluşturulan engelli modellerin çözüm prosedürü de paralel model ile aynıdır. Fakat geometriler farklı olduğu için çözüm ağı sayısı değişmektedir. Engelli model geometrilerinde farklı olan kısım akış kanallarıdır. Membran ve elektrotların geometrik özelliklerinde bir değişiklik yoktur. Engelli modellerin çözüm ağı oluşturulurken de Şekil4.1'de paralel model üzerinde gösterilen 2, 4, 6, 8, 10 ve 11 numaralı sınırlar kullanılmıştır.

Dikdörtgen engelli model 1 ve dikdörtgen engelli model 2 için çözüm ağı oluşturulurken, 2, 4, 6, 8, 10 ve 11 numaralı sınırlarda maksimum element boyutu  $1e^{-4}$  m. olarak girilmiştir. Farklı olarak dikdörtgen engelli model 3 için çözüm ağı oluşturulurken, 4, 6, 8 ve 10 numaralı sınırlarda maksimum element boyutu  $1e^{-4}$  m., 2 ve 11 numaralı sınırlarda ise maksimum element boyutu  $8e^{-5}$  m. olarak girilmiştir.

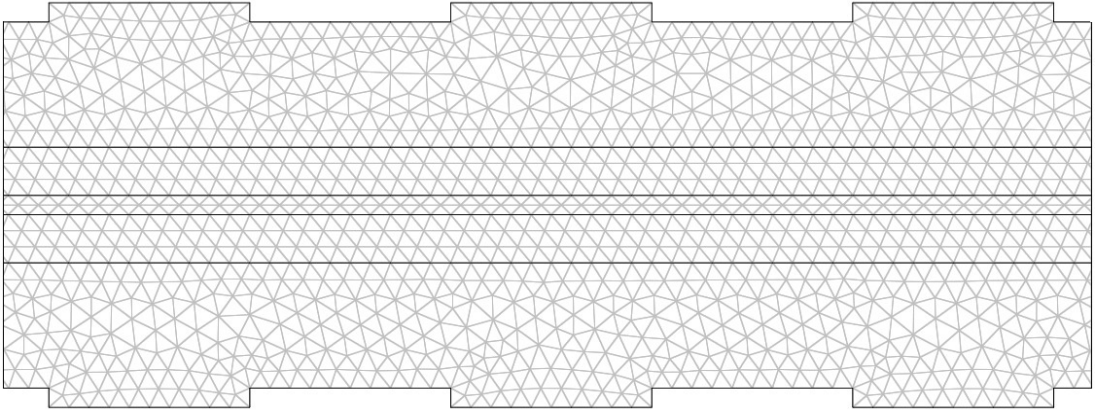
Daire engelli model 1 ve daire engelli model 2 için çözüm ağı oluşturulurken, 4, 6, 8 ve 10 numaralı sınırlarda maksimum element boyutu  $1e^{-4}$  m., 2 ve 11 numaralı sınırlarda ise maksimum element boyutu  $8.5e^{-5}$  m. olarak girilmiştir. Benzer şekilde daire engelli model 3 için çözüm ağı oluşturulurken de 4, 6, 8 ve 10 numaralı sınırlarda maksimum element boyutu  $1e^{-4}$  m., 2 ve 11 numaralı sınırlarda ise maksimum element boyutu  $6.5e^{-5}$  m. olarak girilmiştir.

İkizkenar yamuk engelli model 1 için çözüm ağı oluşturulurken, 2, 4, 6, 8, 10 ve 11 numaralı sınırlarda maksimum element boyutu  $9.7e^{-5}$  m. olarak girilmiştir. Yine benzer şekilde ikizkenar yamuk engelli model 2 için çözüm ağı oluşturulurken ise, 2, 4, 6, 8, 10 ve 11 numaralı sınırlarda maksimum element boyutu  $9.6e^{-5}$  m. olarak girilmiştir.

Bu şekilde her engelli modelde farklı değerlerin girilmesinin amacı, tüm modellerde birbirine çok yakın bir çözüm ağı yapısına ulaşmaktır. Böylece tüm modeller için daha doğru bir karşılaştırma imkanı doğacaktır. Aşağıdaki şekil ve tablolarda engelli model geometrileri, çözüm ağı yapıları ve çözüm ağı verileri yer almaktadır. Dikkat edilecek olursa tüm modellerin çözüm ağı verilerinde element sayıları birbirine çok yakındır. Çözüm ağı yapısının daha rahat görülebilmesi için ise model üzerinde kısa bir kesitin resmi konulmuştur.



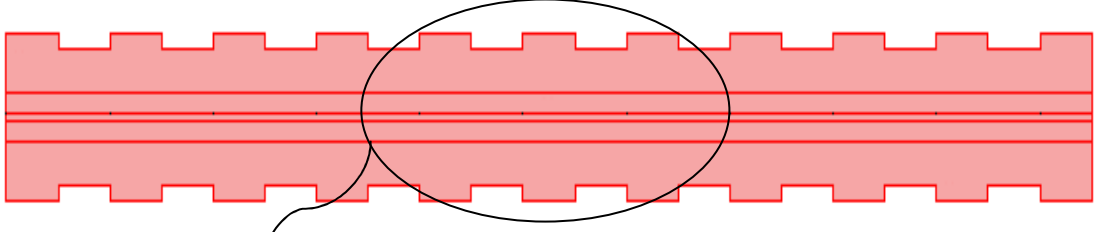
Şekil 4.6. Dikdörtgen engelli model 1



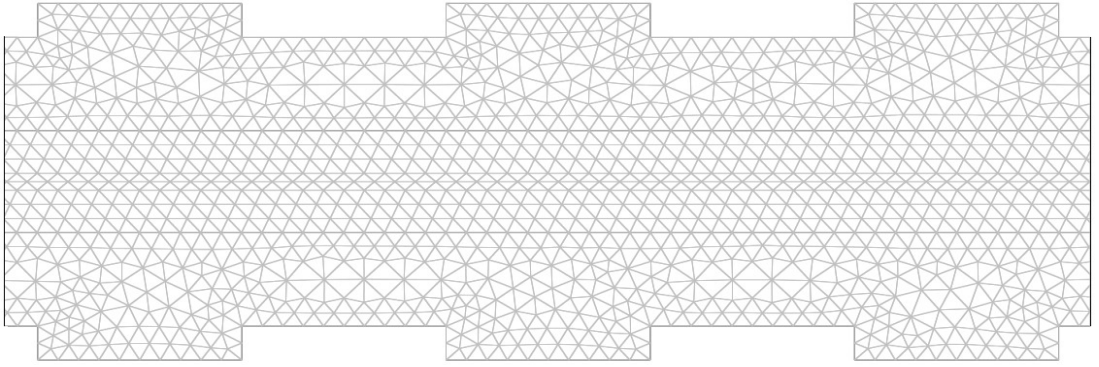
Şekil 4.7. Dikdörtgen engelli model 1 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.3. Dikdörtgen engelli model 1 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	102558
Number of mesh points	4998
Number of elements	9488
Triangular	9488
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1346
Number of vertex elements	92
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.171



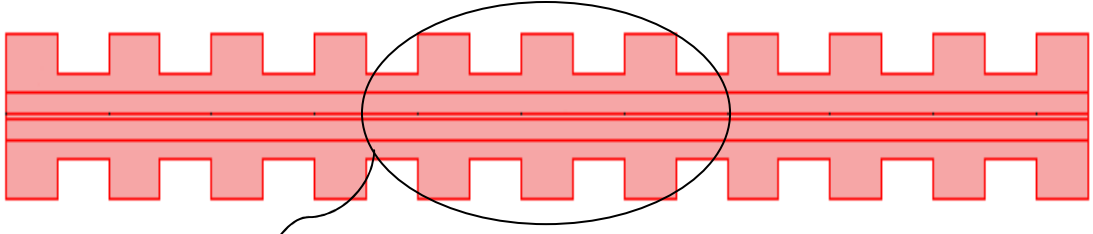
Şekil 4.8. Dikdörtgen engelli model 2



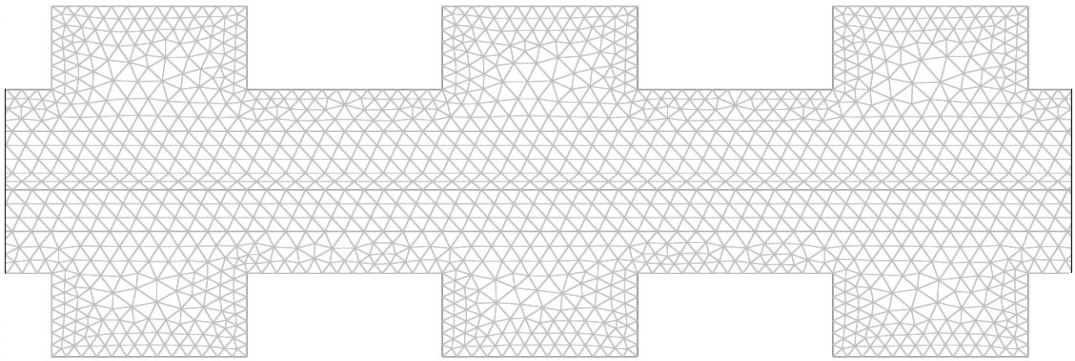
Şekil 4.9. Dikdörtgen engelli model 2 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.4. Dikdörtgen engelli model 2 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	75660
Number of mesh points	4943
Number of elements	9338
Triangular	9338
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1386
Number of vertex elements	92
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.14



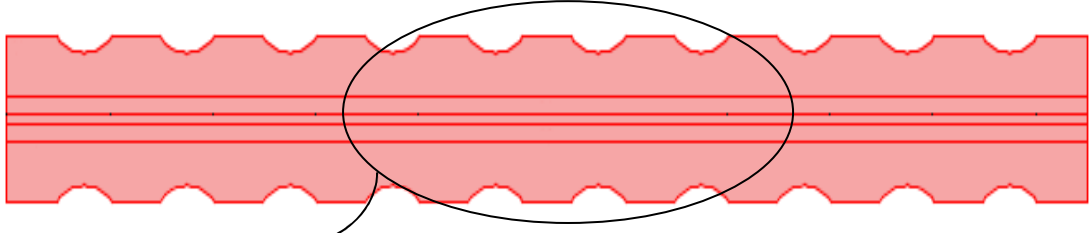
Şekil 4.10. Dikdörtgen engelli model 3



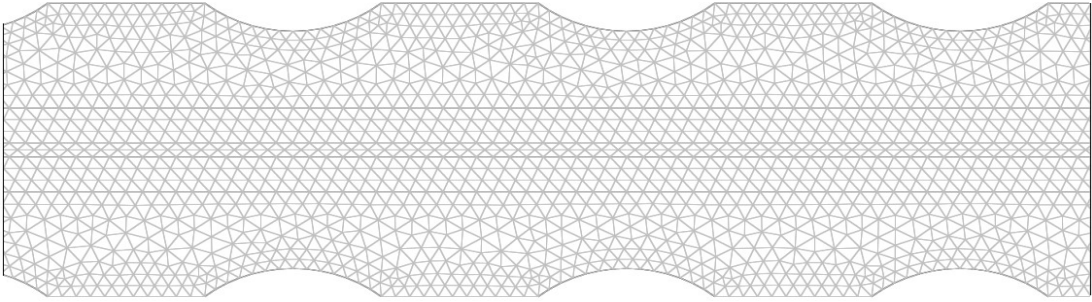
Şekil 4.11. Dikdörtgen engelli model 3 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.5. Dikdörtgen engelli model 3 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	113213
Number of mesh points	5542
Number of elements	10210
Triangular	10210
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1712
Number of vertex elements	92
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.09



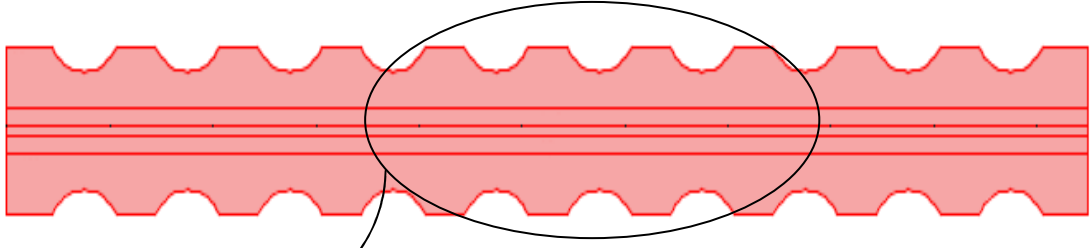
Şekil 4.12. Daire engelli model 1



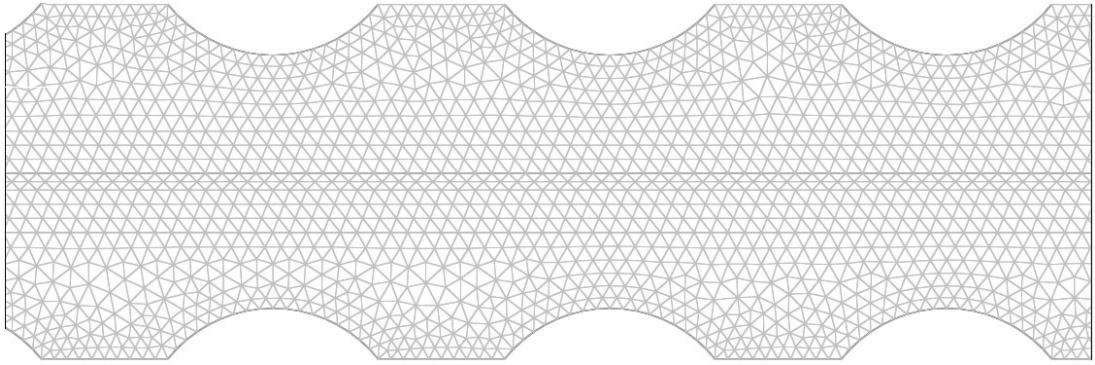
Şekil 4.13. Daire engelli model 1 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.6. Daire engelli model 1 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	110386
Number of mesh points	5357
Number of elements	10140
Triangular	10140
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1412
Number of vertex elements	72
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.138



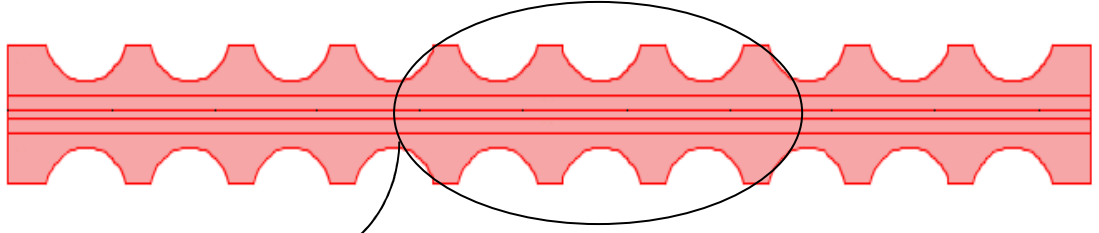
Şekil 4.14. Daire engelli model 2



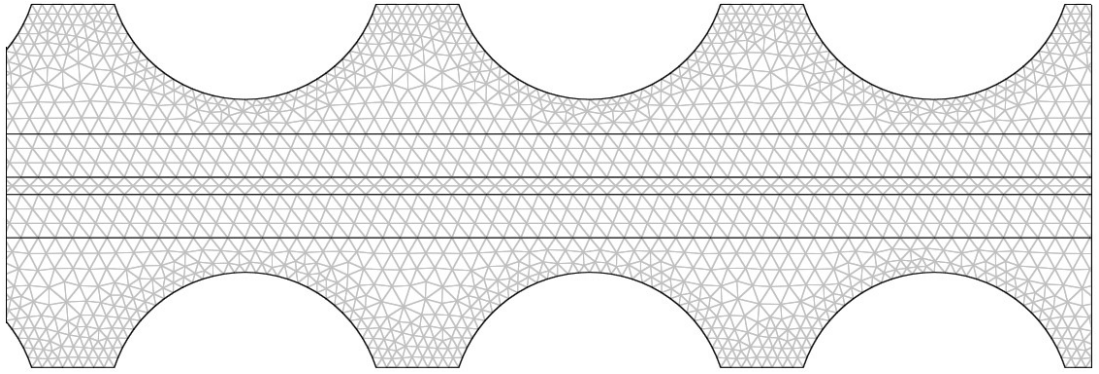
Şekil 4.15. Daire engelli model 2 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.7. Daire engelli model 2 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	111041
Number of mesh points	5391
Number of elements	10150
Triangular	10150
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1470
Number of vertex elements	72
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.154



Şekil 4.16. Daire engelli model 3

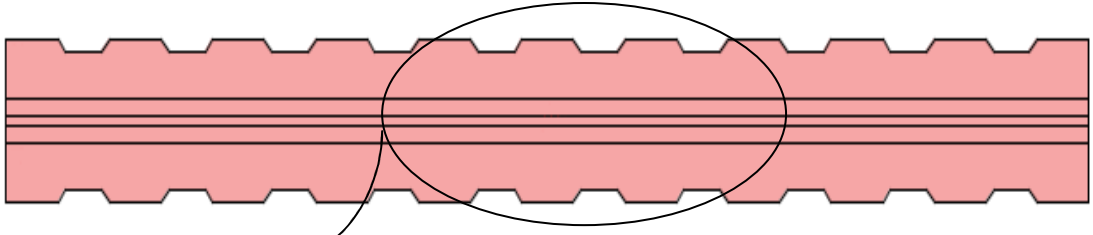


Şekil 4.17. Daire engelli model 3 çözüm ağı yapısı

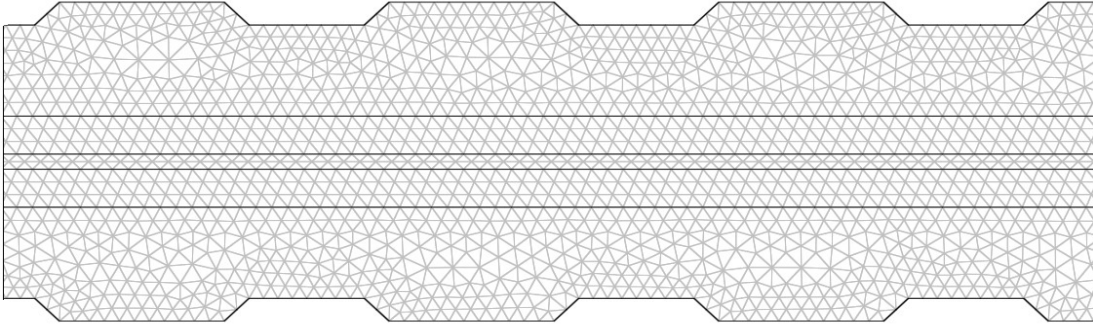
Tablo 4.8. Daire engelli model 3 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	116175
Number of mesh points	5673
Number of elements	10466
Triangular	10466
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1718
Number of vertex elements	72
Minimum element quality	0.71
Element area ratio	0.131





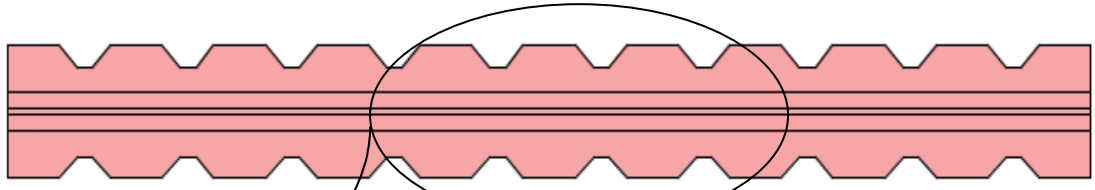
Şekil 4.18. İkizkenar yamuk engelli model 1



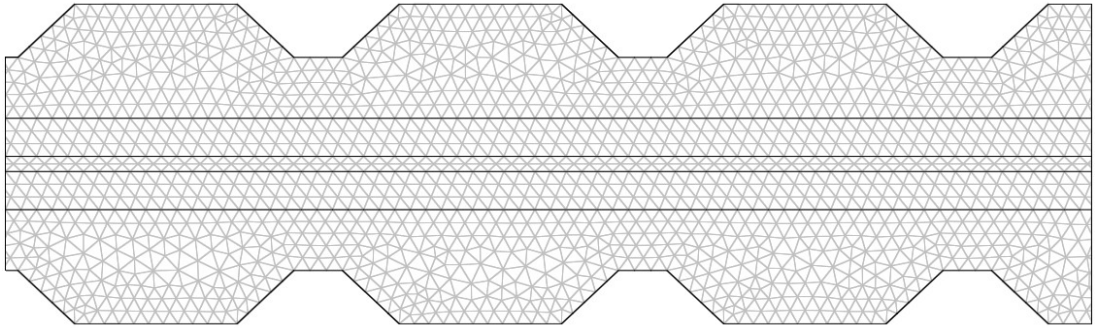
Şekil 4.19. İkizkenar yamuk engelli model 1 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.9. İkizkenar yamuk engelli model 1 için çözüm ağı istatistikleri

Number of degrees of freedom	111883
Number of mesh points	5418
Number of elements	10304
Triangular	10304
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1398
Number of vertex elements	92
Minimum element quality	0.726
Element area ratio	0.068



Şekil 4.20. İkizkenar yamuk engelli model 2



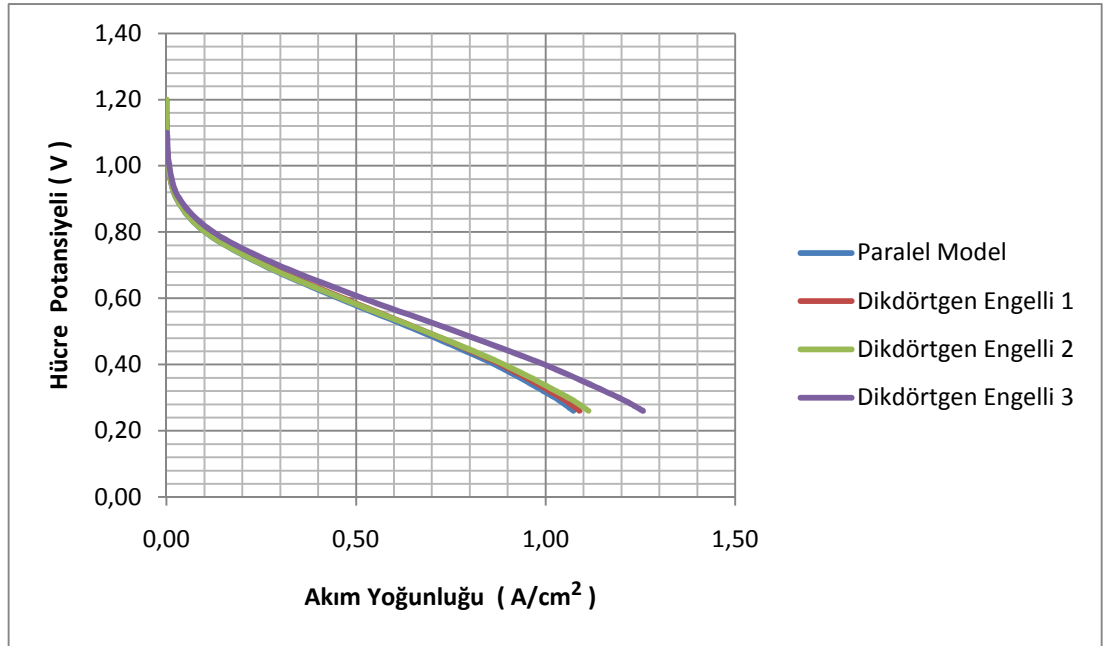
Şekil 4.21. İkizkenar yamuk engelli model 2 çözüm ağı yapısı

Tablo 4.10. İkizkenar yamuk engelli model 2 için çözüm ağı istatistikleri

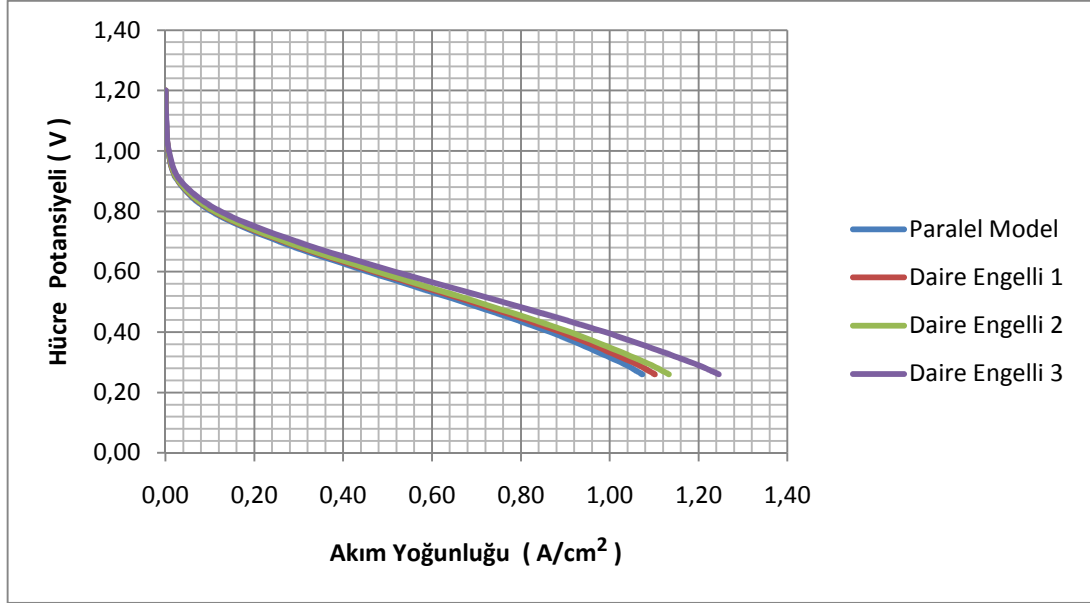
Number of degrees of freedom	108884
Number of mesh points	5304
Number of elements	10058
Triangular	10058
Quadrilateral	0
Number of boundary elements	1424
Number of vertex elements	92
Minimum element quality	0.85
Element area ratio	0.176

Paralel model ile engelli modelleri karşılaştırmak için sınır şartları şu şekilde tanımlanmıştır.  $H_2$  0.2 m/s hızıyla kanala girmekte ve 1 atm basınç altında kanalı terk etmektedir. Hava ise 0.4 m/s hız ile kanala girip 1 atm basınç altında kanalı terk etmektedir. Tüm değerlerin bir grafikte toplanması oldukça karışık görüldüğü için

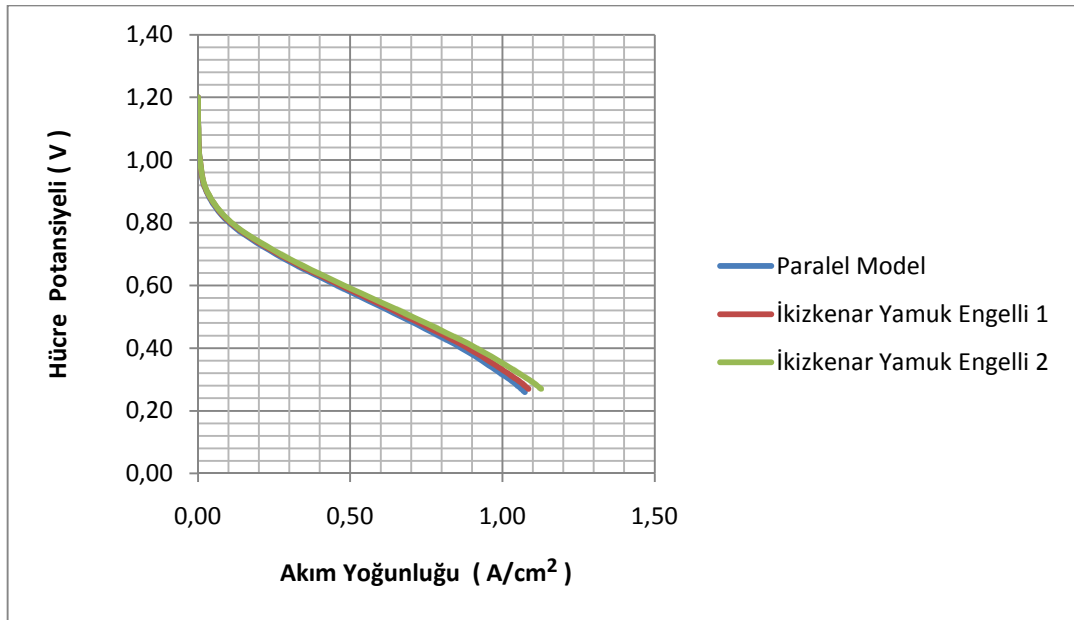
paralel model ile engelli modeller gruplar halinde gösterilmiştir. Şekil 4.16'da bunlara ek olarak paralel modele göre en iyi performansı veren model ile ara bir değere sahip bir model karşılaştırılmıştır. Tablo 4.11'de ise tüm modellerde 0.6 V hücre gerilimi değerinde elde edilen akım yoğunluğu değerleri sayısal olarak verilmiştir. Tüm engelli modellerin performansı paralel modele göre daha iyi olup bunların yüzdesel farkları da ayrıca belirtilmiştir. Bu tabloda verilen değerler de göstermiştir ki H<sub>2</sub> ve hava sabit debide kanallara gönderildiğinde önüne çıkan engel nedeniyle katalist tabakaya daha fazla yönelmekte ve reaksiyona daha fazla girmektedir. Bunun sonucunda da hücre performansı artmaktadır. En iyi sonucu en derin olan engelli model vermiştir.



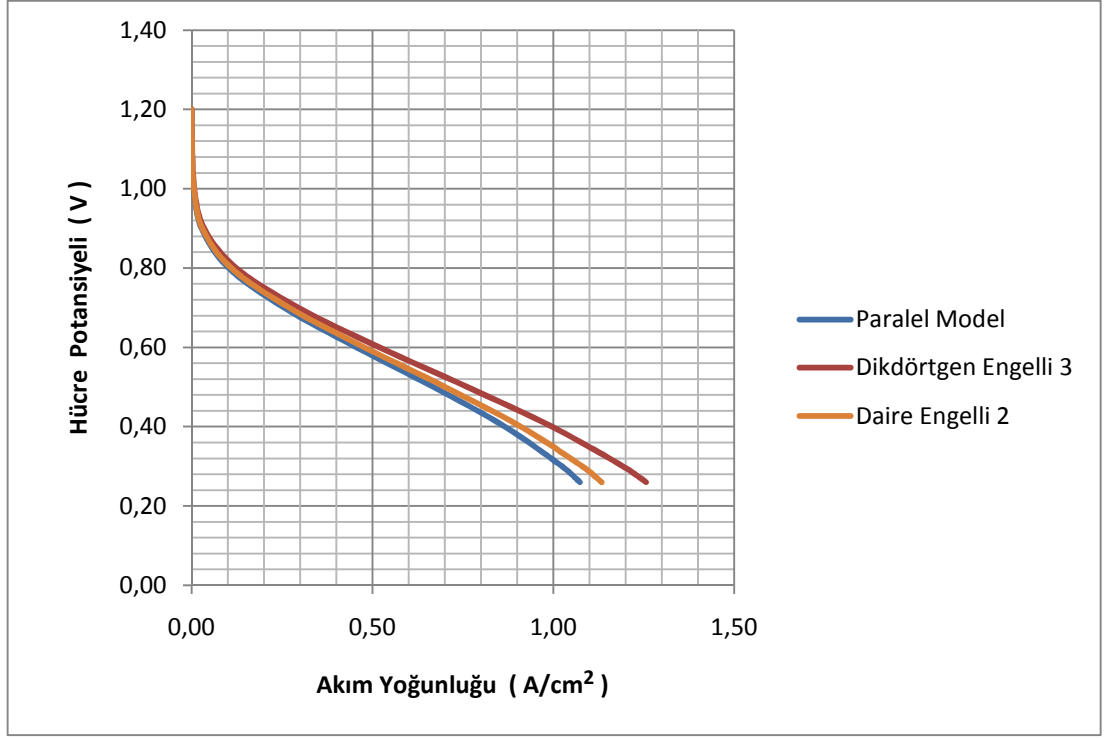
Şekil 4.22. Paralel model ile dikdörtgen engelli modellerin karşılaştırılması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; her iki kanal için: 1 atm)



Şekil 4.23. Paralel model ile daire engelli modellerin karşılaştırılması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; her iki kanal için: 1 atm)



Şekil 4.24. Paralel model ile ikizkenar yamuk engelli modellerin karşılaştırılması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; her iki kanal için: 1 atm)



Şekil 4.25. En uç iki değer ile arada yer alan herhangi bir değer karşılaştırılması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı her iki kanal için: 1 atm)

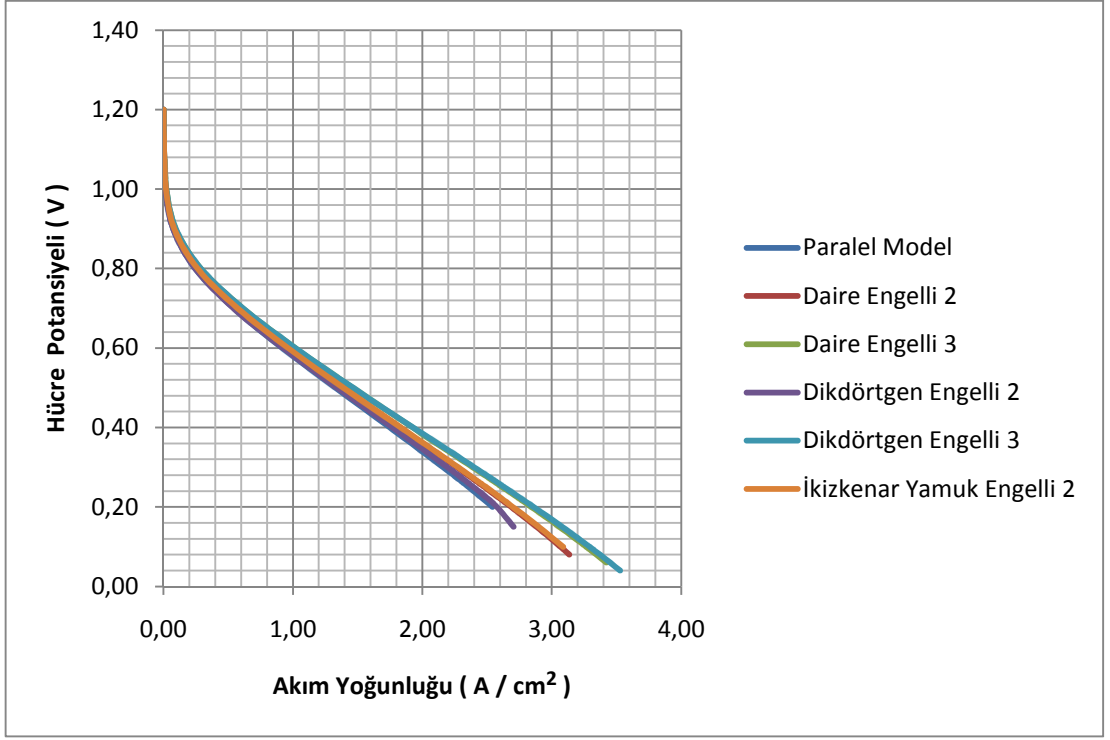
Tablo 4.11.  $V=0.6$  V için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması

	Akım Yoğunluğu	FARK	DEĞİŞİM
	(A/m <sup>2</sup> )	(A/m <sup>2</sup> )	%
Dikdörtgen Engelli 3	5192	631	13,83
Daire Engelli 3	5165	604	13,25
İkizkenar Yamuk Engelli 2	4804	243	5,33
Daire Engelli 2	4780	219	4,81
Daire Engelli 1	4700	139	3,04
İkizkenar Yamuk Engelli 1	4690	129	2,83
Dikdörtgen Engelli 1	4671	110	2,41
Dikdörtgen Engelli 2	4628	67	1,47
Paralel Model	4561	0	0,00

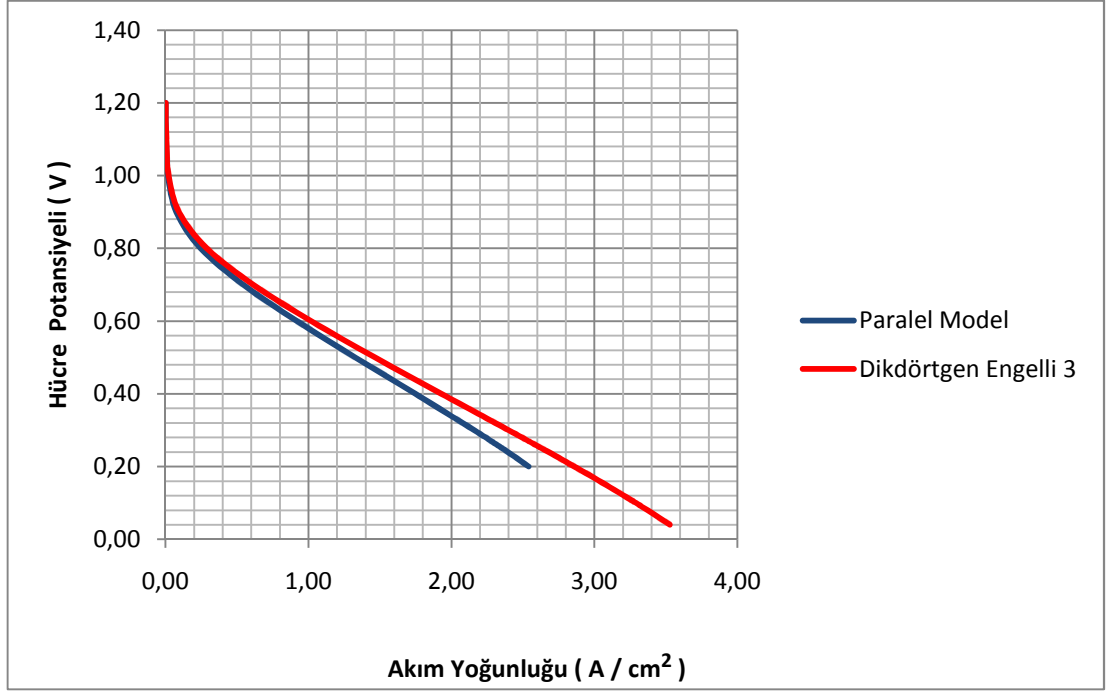
Tablo 4.12.  $V=0.5$  V için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması

	Akım Yoğunluğu	FARK	DEĞİŞİM
	(A/m <sup>2</sup> )	(A/m <sup>2</sup> )	%
Dikdörtgen Engelli 3	7625	937	14,02
Daire Engelli 3	7578	891	13,32
İkizkenar Yamuk Engelli 2	7048	361	5,39
Daire Engelli 2	7013	326	4,87
Daire Engelli 1	6877	190	2,84
İkizkenar Yamuk Engelli 1	6860	173	2,58
Dikdörtgen Engelli 2	6829	141	2,11
Dikdörtgen Engelli 1	6827	139	2,08
Paralel Model	6688	0	0,00

Son olarak farklı çıkış basınçları kullanılması sonucunda engelli modellerin performansı karşılaştırılmıştır. Giriş değerleri bir önceki uygulamada olduğu gibi H<sub>2</sub> girişi için 0.2 m/s hava girişi için ise 0.4 m/s verilmiştir. Çıkış değerleri ise H<sub>2</sub> kanalında 1 atm, hava kanalında ise 3 atm olarak girilmiştir. Burada daha derin olan modeller seçilerek toplamda 5 adet engelli model için çözüm yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Burada elde edilen performans değerleri atmosferik çıkış şartlarından daha iyidir.



Şekil 4.26. Farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için engelli modeller ile paralel modelin karşılaştırılması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)



Şekil 4.27. Farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için en uç iki modelin karşılaştırılması (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)

Tablo 4.13. V=0.6 V için farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması

	Akım Yoğunluğu	FARK	DEĞİŞİM
	( A/m <sup>2</sup> )	( A/m <sup>2</sup> )	%
Dikdörtgen Engelli 3	10194	1006	10,95
Daire Engelli 3	10156	967	10,53
İkizkenar Yamuk Engelli 2	9633	445	4,84
Dairesel Engelli 2	9587	398	4,34
Dikdörtgen Engelli 2	9256	68	0,74
Paralel Model	9188	0	0,00



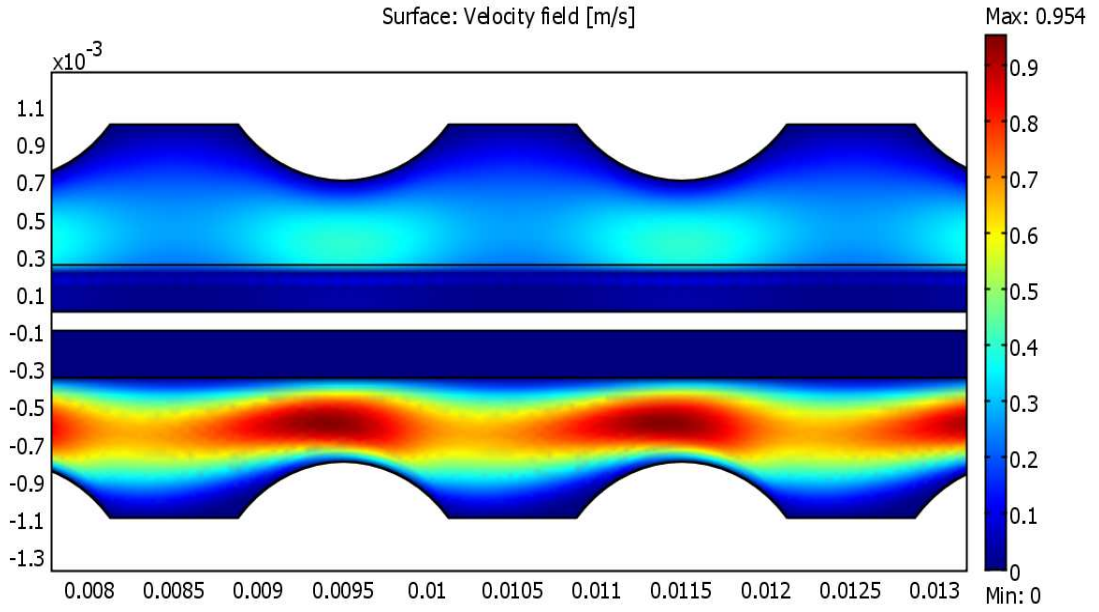
Tablo 4.14.  $V=0.5$  V için farklı basınçtaki çıkış sınır değeri için tüm modeller ile paralel modelin kıyaslanması

	Akım Yoğunluğu	FARK	DEĞİŞİM
	( $A/m^2$ )	( $A/m^2$ )	%
Dikdörtgen Engelli 3	14651	1371	10,32
Daire Engelli 3	14590	1309	9,86
İkizkenar Yamuk Engelli 2	13916	635	4,78
Dairesel Engelli 2	13848	567	4,27
Dikdörtgen Engelli 2	13411	130	0,98
Paralel Model	13281	0	0,00

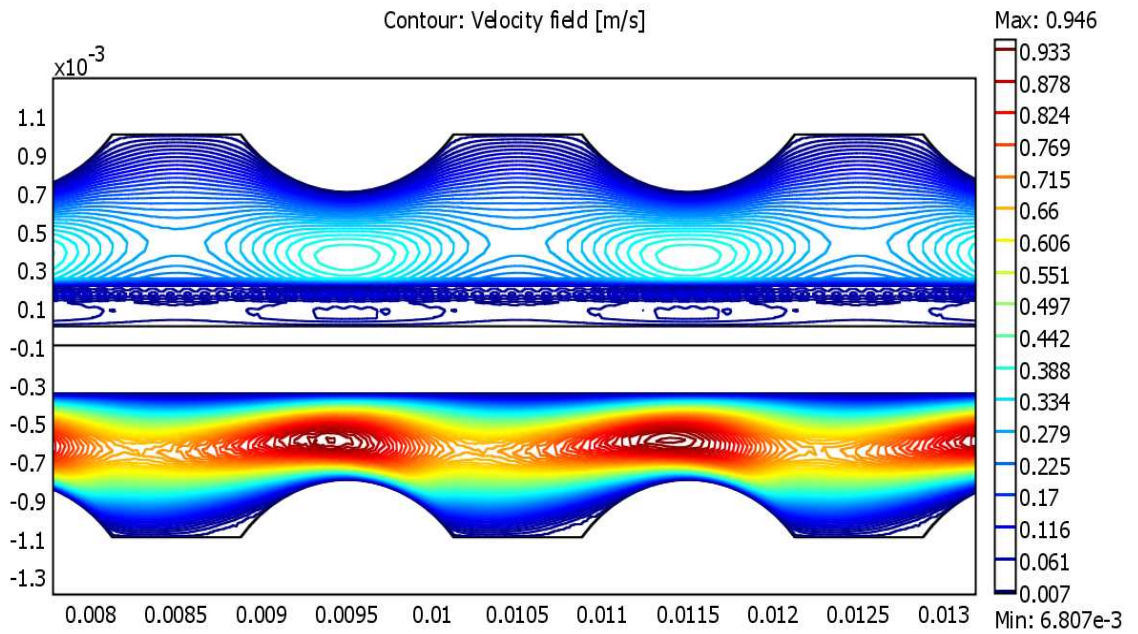
#### 4.4 Akış Analizi

En son yapılan incelemede, zorlanmış şartlarda 5 farklı engelli modelin performans eğrileri çıkartılarak paralel model ile karşılaştırılmıştı. Burada çözüm sırasındaki sınır şartları; anot tarafındaki kanal giriş hızı 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal giriş hızı 0.4 m/s, anot tarafındaki kanal çıkış basıncı 1 atm ve katot tarafındaki kanal çıkış basıncı 3 atm olarak verilmişti. Bu bölümde ise bu 5 modelin akış analizi incelenmiştir.

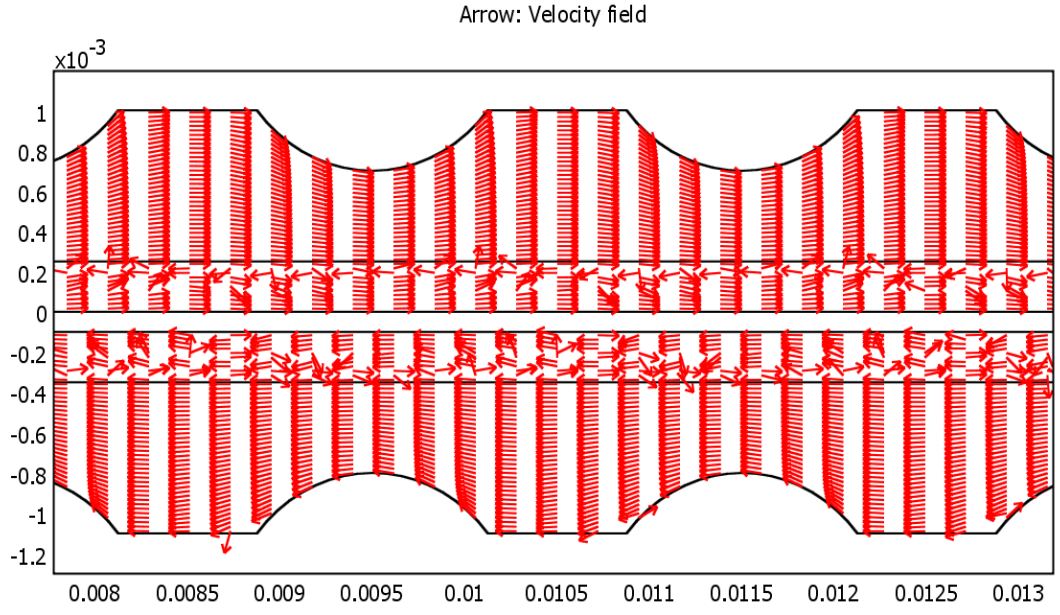
Akış kanalına engel konulması sonucu türler katalist tabakaya doğru daha çok nüfuz eder. Engelin geometrik şekline göre katalist tabakaya yönlendirilen yakıt veya hava miktarı değişir. Özellikle daire şekilli engellerin olduğu modelde akış kanallarında daha düzgün bir akış varken dikdörtgen engelli modellerde türler katalist tabakaya daha çok yönlenebilir. Dikdörtgen kesitli engelli modellerde derinlik arttıkça akış daha çok zorlanmaktadır. Hatta belli bölgelerde ters akışlar ve girdaplar oluşmaktadır. Bu da dikdörtgen engellerin derinliği arttıkça daha fazla türü katalist tabakaya yönlendirdiğini gösterir. Şekil 4.27’de de görüldüğü üzere en iyi performans değerini en derin olan dikdörtgen engelli model vermiştir. Aşağıda bu 5 engelli modelin akış analizini gösteren hız vektörleri, konturlar ve hız değişiminin genel yüzeysel görünümü ayrı ayrı gösterilmiştir.



(a) Daire engelli model 2 için yüzeysel hız değışimi

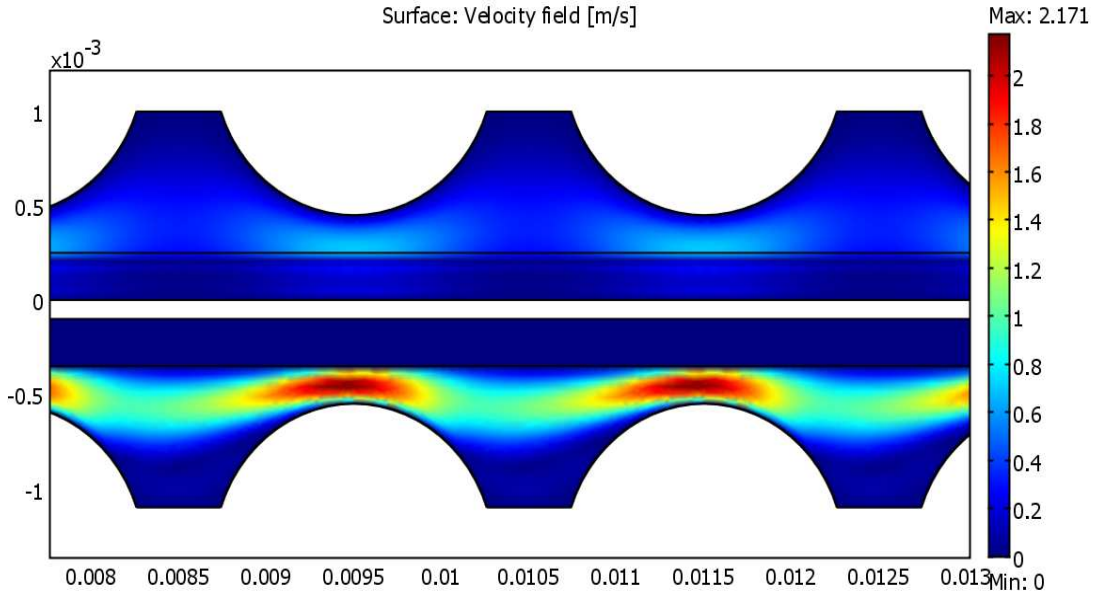


(b) Daire engelli model 2 için hız konturları

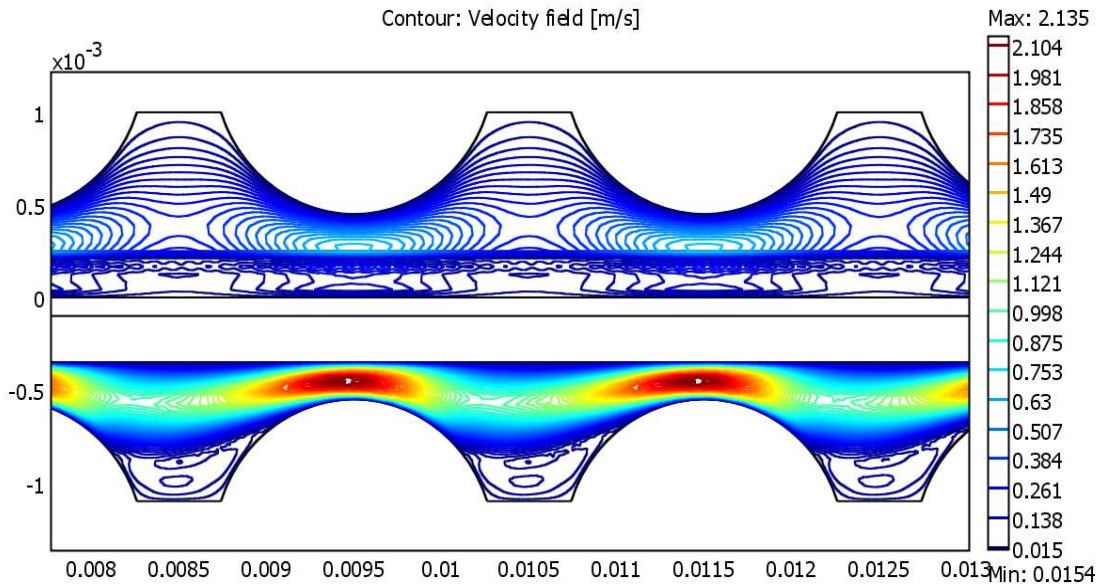


(c) Daire engelli model 2 için hız vektörleri

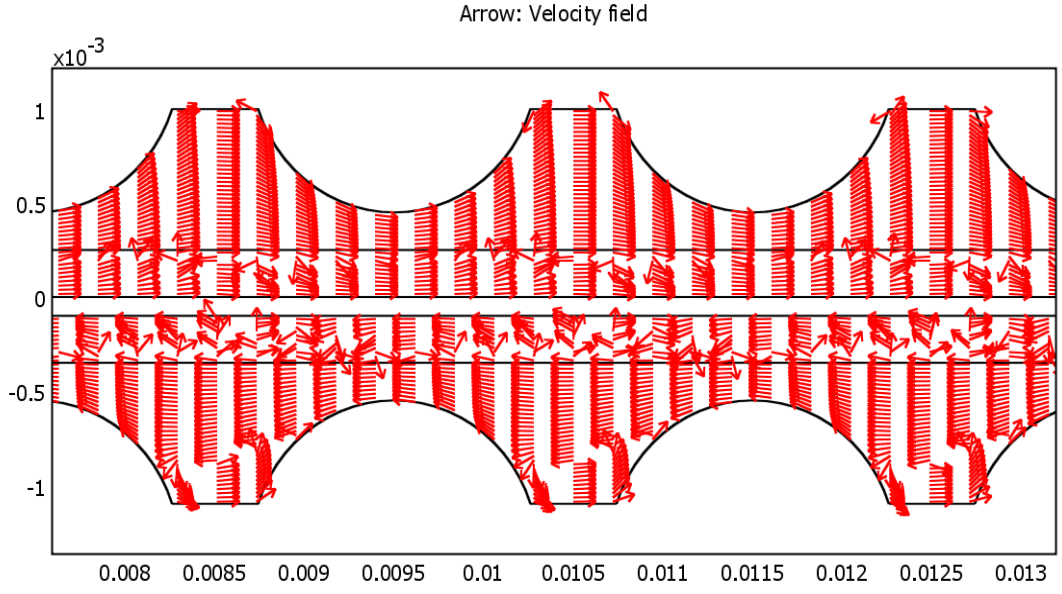
Şekil 4.28. Daire engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)



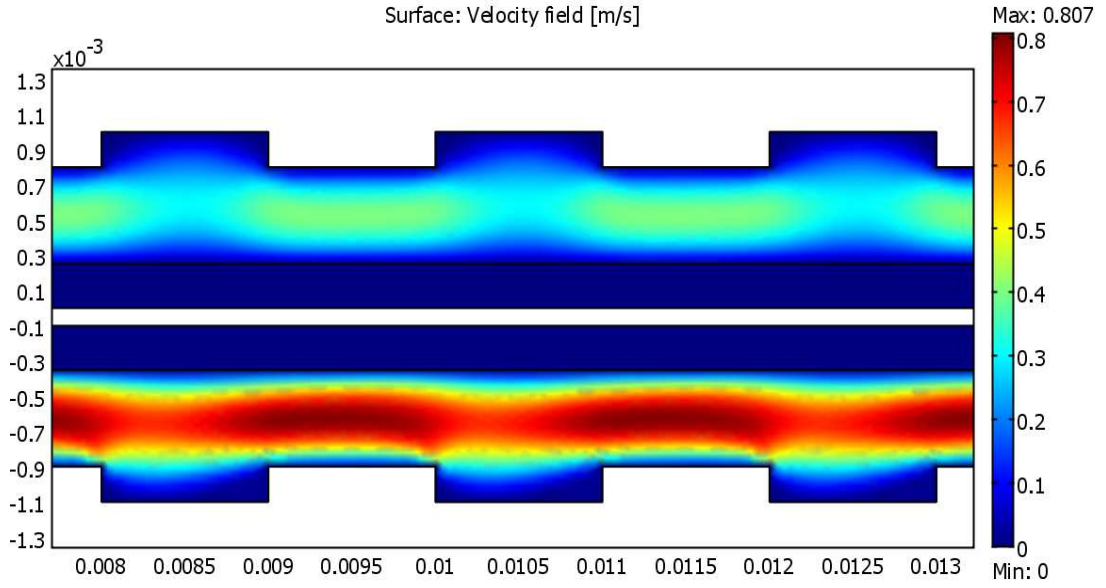
(a) Daire engelli model 3 için yüzeysel hız değişimi



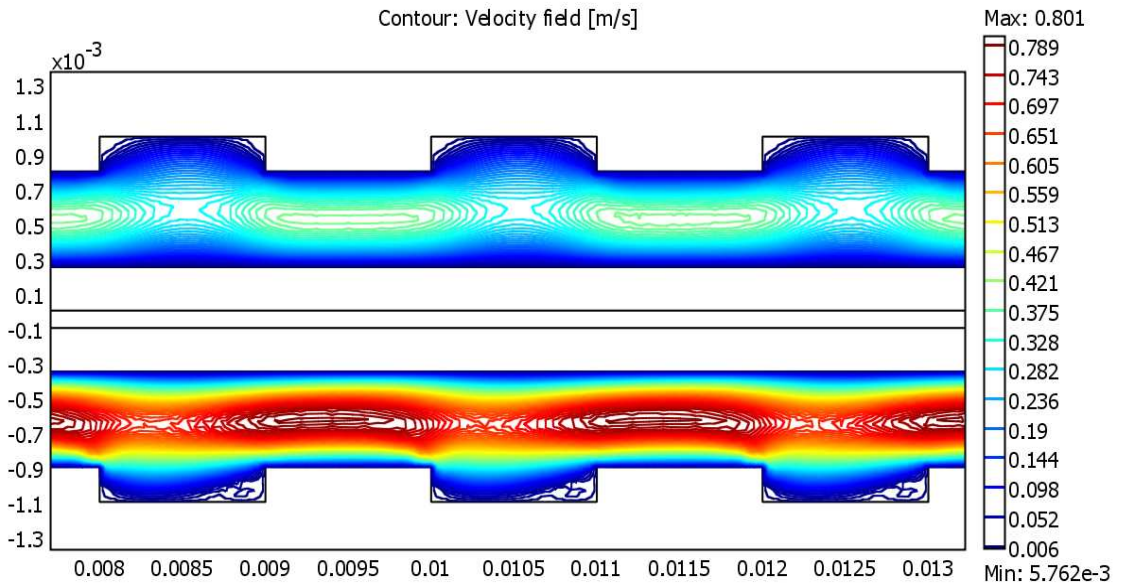
(b) Daire engelli model 3 için hız konturları



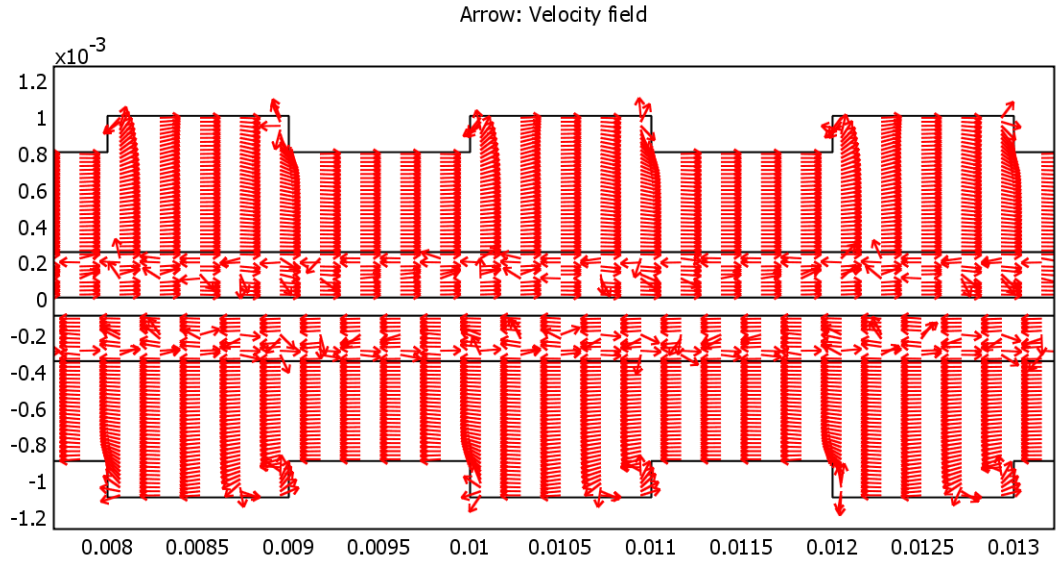
Şekil 4.29. Daire engelli model 3 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)



(a) Dikdörtgen engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi

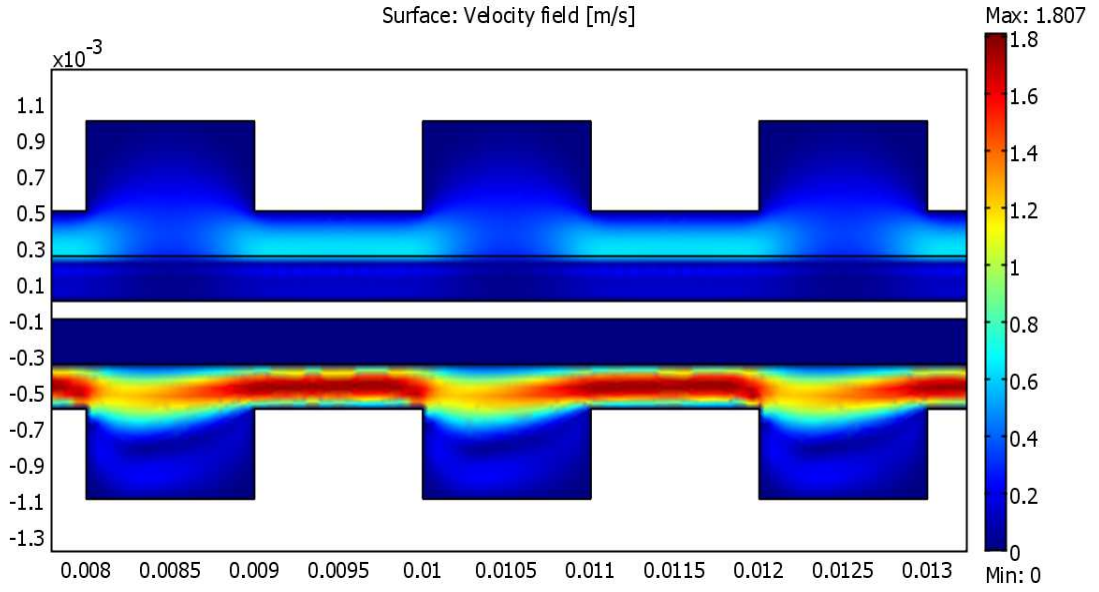


(b) Dikdörtgen engelli model 2 için hız konturları

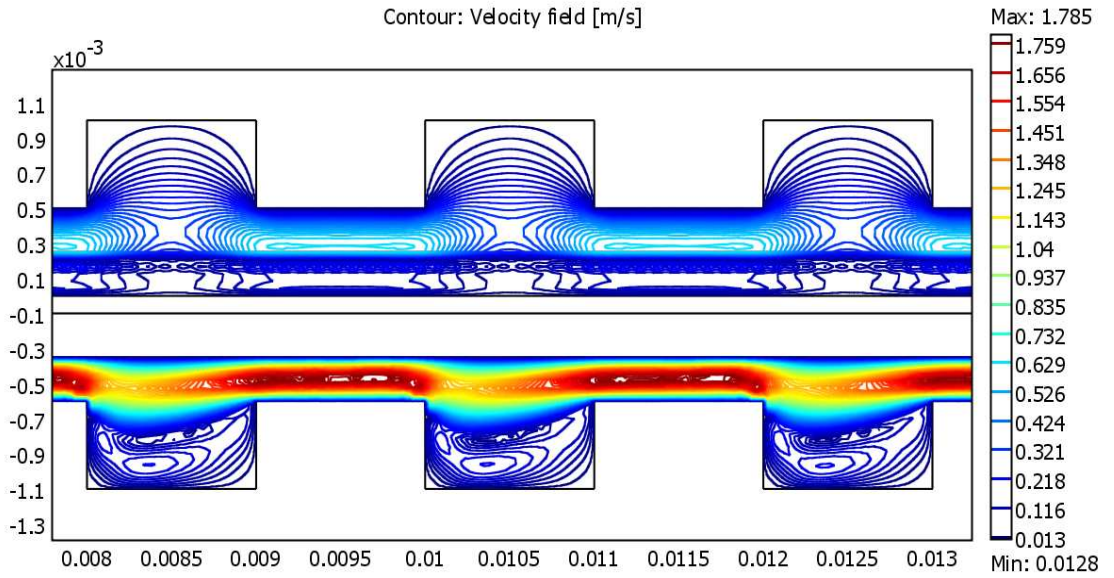


(c) Dikdörtgen engelli model 2 için hız vektörleri

Şekil 4.30. Dikdörtgen engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)

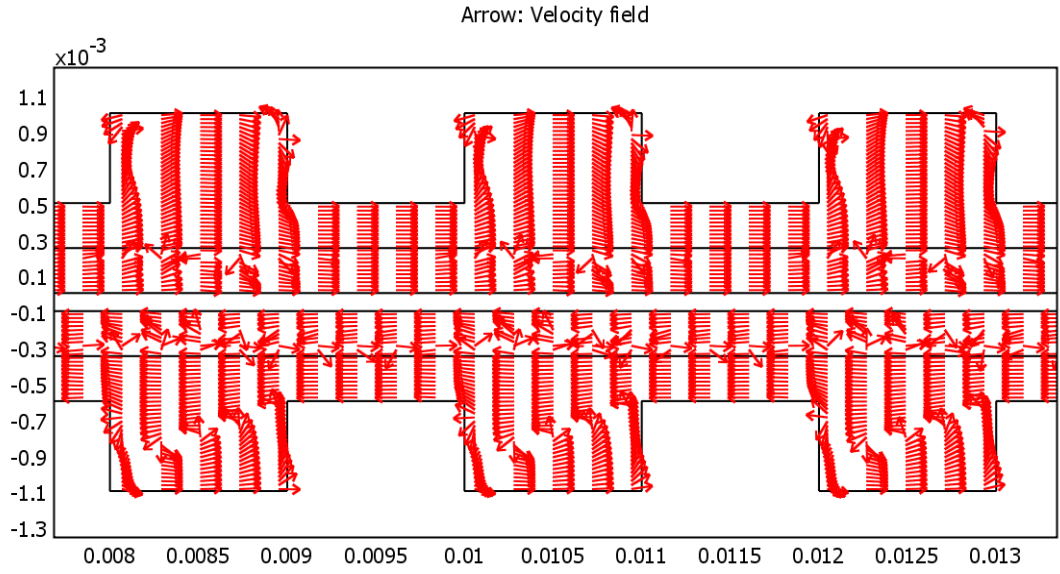


(a) Dikdörtgen engelli model 3 için yüzeysel hız değişimi



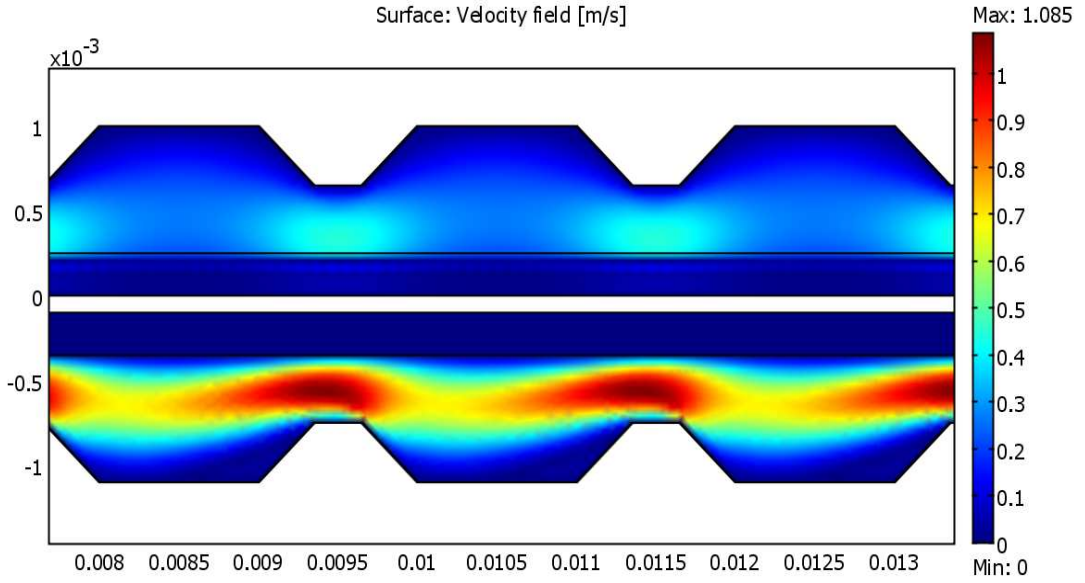
(b) Dikdörtgen engelli model 3 için hız konturları



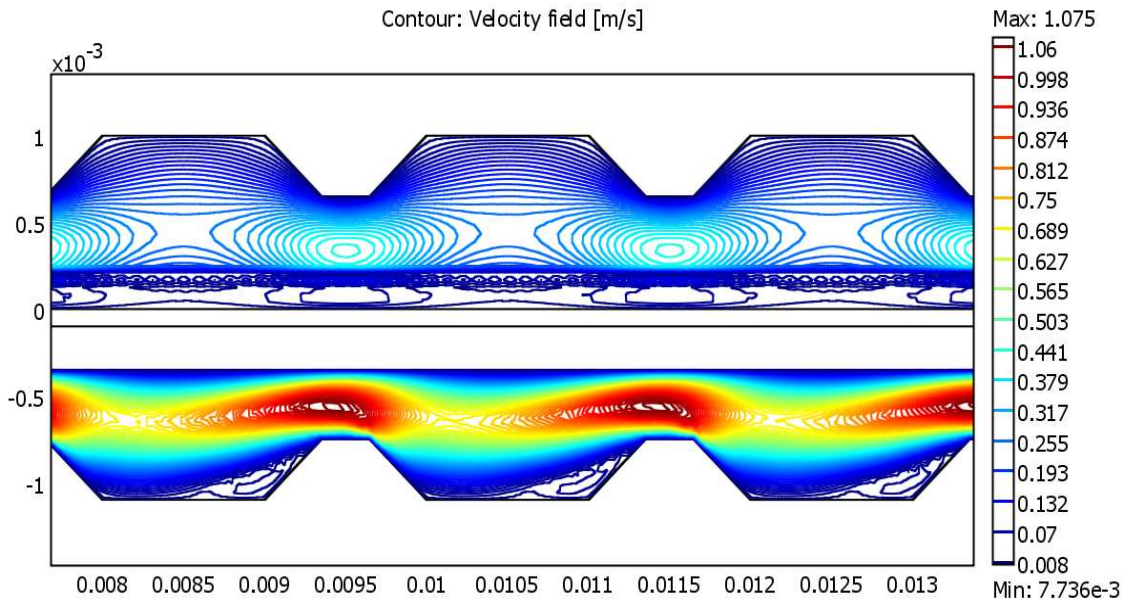


(c) Dikdörtgen engelli model 3 için hız vektörleri

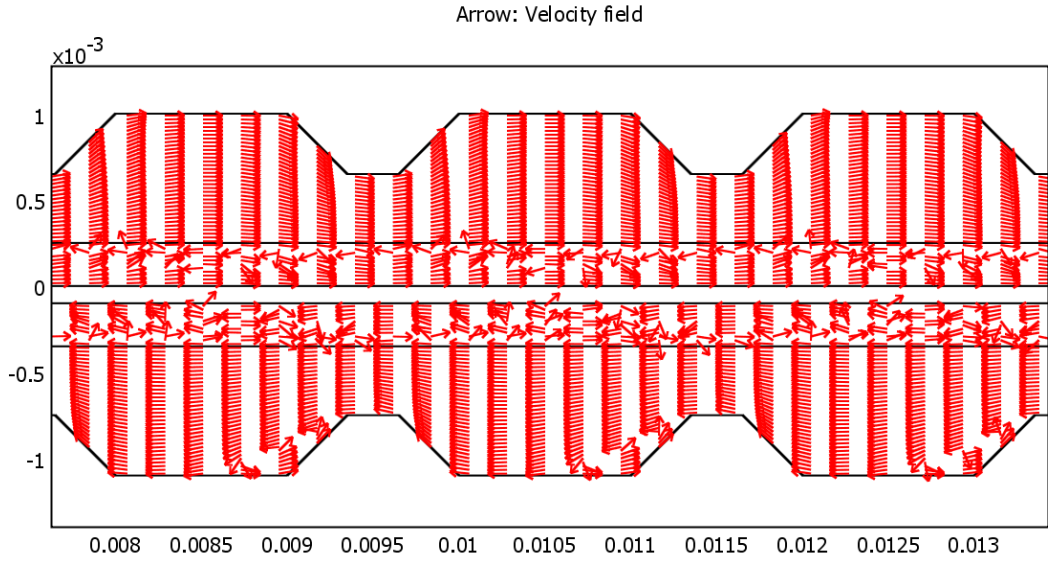
Şekil 4.31. Dikdörtgen engelli model 3 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)



(a) İkizkenar yamuk engelli model 2 için yüzeysel hız değışimi



(b) İkizkenar yamuk engelli model 2 için hız konturları



(c) İkizkenar yamuk engelli model 2 için hız vektörleri

Şekil 4.32. İkizkenar yamuk engelli model 2 için yüzeysel hız değişimi, hız konturları ve hız vektörleri (Giriş sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 0.2 m/s, katot tarafındaki kanal için: 0.4 m/s. Çıkış sınır şartı; anot tarafındaki kanal için: 1 atm, katot tarafındaki kanal için: 3 atm)

## BÖLÜM 5

### 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Özetle bu çalışmada, PEM tipi bir yakıt pili için çift kutuplu akış plakaları iki boyutlu olarak modellenmiştir. Farklı akış kanalı geometrilerinde ve farklı sınır değerlerinde model çözdürülmüştür. Giriş sınır şartı olarak hız, çıkış sınır şartı olarak ise basınç kullanılmıştır. Kanal uzunluğunun etkisi, giriş hızı etkisi, çıkış basıncı etkisi ve akış kanalına konulan engellerin etkisi olmak üzere 4 farklı durum için tek hücreli bir PEM yakıt pilinin performans eğrilerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Yakıt pili termodinamiği kısmında da anlatıldığı gibi hücre potansiyeli-akım yoğunluğu grafiği yakıt hücrelerinde performans (polarizasyon) eğrisi olarak tanımlanmıştır. Bu eğriyi oluşturabilmek için genel olarak 0.2 V-1.2 V aralığında ve 0.1 V'luk artışlarla her hücre potansiyeli değeri için oluşturulan modeller çözdürülmüştür. Bazı durumlarda ise özellikle 0.3 V'tan düşük hücre gerilimlerinde 0.1 V'tan daha da düşük farklarla program çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar paragraflar halinde aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Öncelikle iki farklı kanal uzunluğunda akışa paralel model oluşturulmuştur. İlk model 5 cm uzunluğunda ikincisi ise 2 cm uzunluğundadır. Her iki modelde de aynı sınır şartları tanımlanmıştır. Giriş hızı H<sub>2</sub> ve Hava girişlerinde 0.05 m/s, çıkış basıncı ise her iki kanal için de atmosferik basınçtır ( 1atm). 2 cm'lik modelde türler kanalı daha çabuk terk etmektedir. Bu nedenle konsantrasyon kayıpları daha az olmaktadır. 5 cm'lik modelde ise diğerine göre kanal boyu daha uzun olduğu için türler kanalı terk edene kadar daha fazla konsantrasyon kaybına uğrarlar. Bunun sonucu olarak da daha kısa olan modelin performans eğrisi daha iyi olmaktadır.

Bir diğer durum giriş hızı artışının performansa etkisinin incelenmesidir. 0.05 m/s ilk hızla başlanılmak üzere bir önceki hıza göre 2 kat artışla 5 farklı hız değerinde program çalıştırılmıştır. Son hız değeri, 0.8 m/s hıza program yanıt vermediği için 0.6 m/s olarak alınmıştır. Çıkış sınır değeri her koşul için atmosferik basınçtır. Giriş

hızını artırmak hücre performansını da artırmıştır. Çünkü hızın artması sisteme verilen türlerin debisini de arttırmaktadır. Debinin artması ise daha fazla yakıt ve havanın reaksiyona girmesine neden olur. Ayrıca yüksek debi ile birlikte hücrede daha fazla tür olacağı için konsantrasyon kayıpları da daha az olmaktadır. İncelenen bir başka durumda ise katot tarafındaki kanalın giriş ve çıkış değerleri anot tarafındaki kanala göre daha yüksek verilmiştir. Çünkü reaksiyonu esas belirleyen kısım katot tarafıdır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki katot tarafındaki kanalda verilen sınır şartlarının anot tarafındaki kanala göre yüksek olması her ikisinin de aynı olduğu duruma göre daha yüksek hücre performansı sağlamıştır.

Zorlanmış koşullarda hücre performansını test etmek için ise çıkış sınır değerleri değiştirilmiştir. Önceki çalışmalarda çıkış sınır değeri atmosferik basınç iken burada 1 atm'den 3 atm'e kadar değişik kombinasyonlarda 5 farklı durum incelenmiştir. Giriş sınır değerleri, anot tarafındaki kanalda H<sub>2</sub> giriş hızı 0.2 m/s, katot tarafındaki kanalda hava giriş hızı ise 0.4 m/s olarak sabit tutulmuştur. Çıkış basıncını arttırmak hücre performansını arttırmıştır. Çünkü çıkış basıncının artması ile daha fazla tür anot ve katot elektrotlarına yönelmekte ve reaksiyona giren madde miktarı artmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi reaksiyonu esas belirleyen kısım katot tarafıdır. Bunun için incelenen durumlardan bazılarında katot tarafındaki kanal çıkış sınır değerleri anot tarafındaki kanal çıkış değerlerinden daha yüksek verilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir her iki kanal çıkışında aynı değerlerin verilmesi ile katot tarafındaki kanalda daha yüksek sınır şartları tanımlamak birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu nedenle her iki kısımda da yüksek çıkış basıncı vermek yerine anot tarafındaki kanal atmosferik basınç şartlarında tutularak sadece katot tarafındaki kanalın çıkış basıncı arttırılabilir.

Son incelenen durum akış kanalına engeller konulmasıdır. Verilen sınır şartları nedeniyle sistem sabit debide çalışmakta ve hücre içerisinde türlerin konsantrasyonunda çok fazla azalma olmamaktadır. Buradaki amacımız ise akış boyunca kanala engeller koyarak daha fazla miktarda yakıt ve havayı reaksiyona girmeye zorlamaktır. Bunun da hücre performansını arttırması beklenir. Akış kanalı boyunca üç farklı geometrik özellikte engel konulmuştur. Bunlar dikdörtgen

şeklinde, daire ve yamuk şeklidir. Bunların derinlikleri de kademe kademe arttırılarak toplamda 8 farklı şekil ortaya çıkmıştır. Her biri kendi arasında sığdan derine doğru numaralandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki akış kanalına engel konulması sabit debi çalışma şartlarında hücre performansını arttırmıştır. Çünkü daha fazla tür reaksiyona zorlanmıştır. Engel derinliğinin artması ile birlikte en iyi performans değerlerine ulaşılmıştır.

## BÖLÜM 6

### 6. GELECEK ÇALIŞMALAR

Öncelikle model oluşturulurken kabul edilen durumlardan bir tek fazlı akıştı. Yani bu model suyun sadece buhar fazı için düşünölmüştü. Bu nedenle yapılacak çalışmalardan biri 2 fazlı bir model oluşturularak daha gerçekçi bir yakıt pili performansı elde etmektir.

Bir diğer durum ise elde edilen en iyi performans değerinin zorlanmış şartlar altında gerçekleşmesidir. Zorlanmış şartlar her ne kadar iyi bir performans sağlasa da sisteme getirdiği fazladan maliyet nedeniyle tartışılır olmuştur. Zorlanmış şartlarda elde edilen performans değerlerine farklı geometriler denenerek atmosferik şartlarda ulaşmak hedef olmalıdır.

Yapılan tüm bu çalışmaların sonunda gerçek amaç iyi bir yakıt pili yapmaktır. Model sonucunda en iyi performansı veren çift kutuplu plaka geometrisinde numune üretim yapılarak laboratuvar şartlarında yapılacak testlerle model verileri ile gerçek durum karşılaştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Larminie, J., Dicks, A., Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2003.
- [2] Hoogers, G., Fuel Cell Technology Handbook, CRC Press, 2002.
- [3] Kakaç, S., Vasiliev, L., Pramuanjaroenkij, A., Mini-Mikro Fuel Cell Fundamentals and Applications, Springer, 2007.
- [4] Barbir, F., PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier Academic Press, 2005.
- [5] EG&G Technical Services, Inc., Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, 2004.
- [6] EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, Fuel Cell Handbook (Fifth Edition), U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, 2000.
- [7] Açar, E., 2010, 2-D Modeling of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [8] Bıykoğlu, A., Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri Ve Bugünkü Durumu, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 16(3), 523-542, 2003.
- [9] Barbir, F., Fuel cell basic chemistry, electrochemistry and thermodynamics. In Mini-Micro Fuel Cells: Fundamentals and Applications, pages 13–26, 2008.
- [10] “Elektrik İşleri Etüd İdaresi” erişim adresi: <http://www.eie.com/>, erişim tarihi: 26 Nisan 2010.
- [11] “Fuel Cell Online, Fuel Cell Information” erişim adresi: <http://www.fuelcells.org/>, erişim tarihi: 28 Temmuz 2010.
- [12] “U.A. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy” erişim adresi: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html), erişim tarihi: 26 Nisan 2010.
- [13] “The National Institute of Standards and Technology (NIST)” erişim adresi: <http://physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html> erişim tarihi : 26 Nisan 2010.
- [14] Scientific Computing World erişim adresi: <http://www.scientific-computing.com/scwjnfeb03fuelcell.html> erişim tarihi: 20 Temmuz 2010.
- [15] Robalinho, E., Cunha, E.F., Andrade, A.B., Bejarano, M.L.M., Linardi, M., Cekinski, E., COMSOL Modelling and Simulation of PEM Fuel Cell’s Flow Channels, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, Boston, U.S.A., 2007.
- [16] Guvelioglu, G.H. and Stenger, H.G., Computational fluid Dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 147, 95–106, 2005.
- [17] He, W., Yi, J.S. and Nguyen, T.V., Two-Phase Flow Model of the Cathode of PEM Fuel Cells Using Interdigitated Flow Fields, *AIChE Journal*, 46, 2053-2064, 2000.
- [18] Um, S. and Wang, C.Y., Three-dimensional analysis of transport and electrochemical reactions in polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power Sources*, 125, 40–51, 2004.



- [19] Dutta S., Shimpalee S., Vanzee W.J., Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells, *J. Applied Electrochemistry*,(30) 135-146, 1999.
- [20] Gurau, V., Liu, H. And Kakac, S., Two-Dimensional Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *AIChE Journal*, 44, 2410-2422, 1998.
- [21] Hermann, A., Chaudhuri, T., Spagnol, P., International Journal of Hydrogen Energy 30, 1297, 2005.
- [22] Shimpalee, S., Van Zee, J.W., ‘‘Numerical Studies on Rib & Channel Dimension of Flow Field on PEMFC Performance’’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 80-102, (2006).
- [23] Siegel, C., Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells, *Energy* , 33,1331–1352, 2008.
- [24] Mehta, V. and Cooper, J., Review and analysis of pem fuel cell design and manufacturing, *Journal of Power Sources*, 114,32–53, 2003.
- [25] Tsuchiya, H. and O Kobayashi, O., Mass production cost of pem fuel cell by learning curve, *International Journal of Hydrogen Energy*, 29,985–990, 2004.
- [26] Li, X. and Sabir, I., Review of bipolar plates in pem fuel cells: Flow-field designs, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30,359–371, 2005.
- [27] Hermann, A., Chaudhuri, T. and Spagnol, P., Bipolar plates for pem fuel cells: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30,1297–1302, 2005.
- [28] Tawfik, H., Hung, Y. and Mahajan, H., Metal bipolar plates for pem fuel cell—a review, *Journal of Power Sources*, 163,775–767, 2007.
- [29] Wind, J., Spah, R., Kaiser, W. and Böhm, G., Metallic bipolar plates for pem fuel cells, *Journal of Power Sources*, 105,256–260, 2002.
- [30] Xing, Q.X., Lum, K.W., Poh, H.J., Wu, Y.L., Geometry optimization for proton-exchange membrane fuel cells with sequential quadratic programming method, *Journal of Power Sources*, 186, 10–21, 2009.
- [31] Comsol Multiphysics. Proton exchange membrane fuel cell. In *Chemical Engineering Module Model Library*, Comsol, 2009.
- [32] Comsol Multiphysics. *Chemical Engineering Module User’s Guide*. Comsol, 2008.
- [33] ‘‘General Motors Company’’ resmi internet sitesi erişim adresi: <http://www.gm.com/vehicles/innovation/fuel-cells/> erişim tarihi: 28 Temmuz 2010.
- [34] Sankır, M., PhD Dissertation, 2005.
- [35] Soo Kim, G., Sui, P.C., Shah, A.A., Djilali, N., Reduced-dimensional models for straight-channel proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 195, 3240-3249, 2010.
- [36] Lobato, J., Canizares, P., Rodrigo, M.A., Pinar, J.F., Mena, E., Ubeda, D., Three-dimensional model of a 50 cm<sup>2</sup> high temperature PEM fuel cell. Study of the flow channel geometry influence, *International Journal of Hydrogen Energy*, xxx, i-ii, 2010.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKİZ, Ahmet  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 17.03.1976 Giresun  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (505) 258 79 26  
Faks :  
e-mail : [ahmetekiz1976@hotmail.com](mailto:ahmetekiz1976@hotmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/Makine Müh.	1997

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2003-2004	AYVAZ A.Ş.	Satış Mühendisi
2004-2008	İPRAGAZ A.Ş.	Teknik Destek Sorumlusu

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar