

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞRUDAN METANOL YAKIT HÜCRELERİNDE YAKIT  
HÜCRESİ PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA  
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Şeyda YEGENOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İmdat TAYMAZ**

**Haziran 2021**

**T.C.**  
**SAKARYA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞRUDAN METANOL YAKIT HÜCRELERİNDE YAKIT  
HÜCRESİ PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA  
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Şeyda YEGENOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**

**Bu tez 08.06.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

**Jüri Başkanı**

**Üye**

**Üye**

## **BEYAN**

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

Şeyda YEGENOĞLU

08.06.2021

## TEŞEKKÜR

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

Hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ .....	x
ÖZET .....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR İNCELEMESİ .....	4
2.1.Çalışma Parametrelerinin Hücre Performansına Etkisi ile İlgili Çalışmalar.....	4
2.2.Tasarım Parametrelerinin Hücre Performansına Etkisi ile İlgili Çalışmalar.....	13
BÖLÜM 3.	
YAKIT PİLLERİ .....	24
3.1. Yakıt Pillerine Giriş.....	24
3.2. Yakıt Pili Çeşitleri .....	25
3.2.1. Katı oksit yakıt pili .....	26
3.2.2. Erimiş karbonat yakıt pili .....	26
3.2.3. Fosforik asit yakıt pili .....	27

3.2.4. Alkali yakıt pili .....	28
3.2.5. Proton değişim membranlı yakıt pili.....	28
3.2.6. Doğrudan metanol yakıt pili.....	30
3.3. Yakıt Pili Uygulamaları.....	31
3.4. Yakıt Pili Bileşenleri .....	32
3.4.1. Proton değişim membranı (elektrolit).....	33
3.4.2. Katalizör tabakası.....	33
3.4.3. Gaz Difüzyon tabakası.....	34
3.4.4. Akış alanı plakası (bipolar plaka) .....	34
3.4.5. Conta.....	35
3.5. Yakıt Hücresinin Termodinamiği.....	35
3.6. Yakıt Hücresi Performansı.....	36
3.7. Yakıt Olarak Metanol.....	40

#### BÖLÜM 4.

DOĞRUDAN METANOL YAKIT HÜCRESİNİN MODELLENMESİ.....	41
4.1. Geometri .....	42
4.2. Fizik .....	43
4.3. Model Parametreleri.....	48
4.4. Modelin Ağ Yapısının (Mesh) Oluşturulması.....	49
4.5. Model İçin Çözücü Seçimi.....	50

#### BÖLÜM 5.

ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	53
5.1. Yakıt Hücresi Modelinin Doğrulanması.....	53
5.2. Eleman Sayısının Yakıt Hücresi Modelinin Doğruluğuna Etkisi .....	54
5.3. Reaktantların ve Ürünlerin Kütle Oranları.....	56
5.4. Hücre Sıcaklığının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	59
5.5. Anot Akış Kanalı Girişindeki Metanol Hızının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	64
5.6. Katot Akış Kanalı Girişindeki Oksijen Hızının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	67

5.7.Katottaki Oksidanın Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	70
5.8.Anot Gaz Difüzyon Tabakası Gözenekliliğinin Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	71
5.9.Katot Basıncının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	75
5.10.Membran Kalınlığının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	78
5.11.Anot Katalizör Tabakası Kalınlığının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	82
5.12.Akış Kanalı Genişliğinin Yakıt Hücresi Performansına Etkisi.....	85
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR .....	91
ÖZGEÇMİŞ .....	98

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$D_i^T$	: Isıl difüzyon katsayısı (kg/m.s)
$a_v$	: Aktif spesifik yüzey alanı (1/m)
$i_0$	: Akım yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )
$x_k$	: Mol oranı
$\varepsilon_p$	: Gözeneklilik
a	: Anot
AFC	: Alkali yakıt hücresi
c	: Katot
CH <sub>3</sub> OH	: Metanol
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
DMFC	: Doğrudan metanol yakıt hücresi
E°	: Termodinamik potansiyel
F	: Faraday sabiti (C/mol)
G	: Gibbs serbest enerjisi
H <sup>+</sup>	: Proton
H <sub>2</sub> O	: Su
MCFC	: Erimiş karbon yakıt hücresi
MeOH	: Metanol
O <sub>2</sub>	: Oksijen
PAFC	: Fosforik asit yakıt hücresi
PEMFC	: Proton değişim membranlı yakıt hücresi
Pt	: Platin
R	: İdeal gaz sabiti (J/mol.K)
Ru	: Rutenyum
SOFC	: Katı oksit yakıt hücresi
T	: Sıcaklık (K)



$V_{hücre}$	: Hücre potansiyeli (V)
$v$	: Aşırı potansiyel
$F$	: Kuvvet terimi ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ )
$n$	: Elektron sayısı
$p$	: Basınç (Pa)
$u$	: Hız (m/s)
$w$	: Kütle oranı
$\alpha$	: Yük transfer katsayısı
$\eta_{hücre}$	: Yakıt hücresi teorik verimi
$\kappa$	: Gözenekli ortamın geçirgenlik tensörü ( $\text{m}^2$ )
$\mu$	: Dinamik viskozite (Pa.s)
$\rho$	: Akışkanın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Kaynak çeşitlerine göre küresel enerji tüketimi .....	2
Şekil 3.1. Geleneksel elektrik üretimi ile yakıt pilinin karşılaştırılması .....	24
Şekil 3.2. Akış alanı plakası çeşitleri .....	35
Şekil 3.3. Yakıt hücresinin genel polarizasyon eğrisi .....	40
Şekil 4.1. COMSOL Multiphysics kullanıcı arayüzü .....	41
Şekil 4.2. Üç boyutlu modelin şematik gösterimi.....	42
Şekil 4.3. Modelin ağ yapısında bileşenlerin gösterimi .....	43
Şekil 4.4. COMSOL Multiphysics programında modelleme için kullanılan fizikler	44
Şekil 4.5. Model ağ (mesh) yapısı .....	50
Şekil 4.6. Çözücü çeşitleri .....	51
Şekil 4.7. Fizik arayüzlerinin çözüme eklenmesi .....	52
Şekil 5.1. Yakıt hücresi modelinin deneysel verilerle doğrulanması (polarizasyon eğrisi).....	54
Şekil 5.2. Yakıt hücresi modelinin deneysel verilerle doğrulanması (güç yoğunluğu eğrisi).....	54
Şekil 5.3. Model ağ (mesh) yapısının akım yoğunluğuna etkisi .....	55
Şekil 5.4. Model ağ (mesh) yapısının güç yoğunluğuna etkisi .....	55
Şekil 5.5. Anot tarafındaki metanolün kütle oranının değişimi .....	56
Şekil 5.6. Anot tarafındaki suyun kütle oranının değişimi .....	57
Şekil 5.7. Anot tarafındaki karbondioksitin kütle oranının değişimi .....	57
Şekil 5.8. Katot tarafındaki oksijenin kütle oranının değişimi.....	58
Şekil 5.9. Katot tarafındaki suyun kütle oranının değişimi.....	59
Şekil 5.10. Hücre sıcaklığının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	60
Şekil 5.11. Hücre sıcaklığının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	60

Şekil 5.12. Hücre sıcaklığının anottaki metanolün kütle oranı dağılımına etkisi a)50 °C b)70 °C c)90 °C.....	62
Şekil 5.13. Hücre sıcaklığının katottaki oksijenin kütle oranı dağılımına etkisi a)50 °C b)70 °C c)90 °C.....	63
Şekil 5.14. Anot akış kanalı girişindeki metanol akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	64
Şekil 5.15. Anot akış kanalı girişindeki metanol akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	65
Şekil 5.16. Metanol akış hızının anottaki metanolün kütle oranı dağılımına etkisi a)1 ml/dk b)6 ml/dk c)12 ml/dk.....	66
Şekil 5.17. Katot akış kanalı girişindeki oksijen akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	67
Şekil 5.18. Katot akış kanalı girişindeki oksijen akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	68
Şekil 5.19. Oksijen akış hızının katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a)500 ml/dk b)600 ml/dk c)700 ml/dk.....	69
Şekil 5.20. Katottaki oksidanın yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	70
Şekil 5.21. Katottaki oksidanın yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	71
Şekil 5.22. Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	72
Şekil 5.23. Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	72
Şekil 5.24. Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a)0.4 b)0.6 c)0.8.....	74
Şekil 5.25. Katot basıncının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	75
Şekil 5.26. Katot basıncının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	76
Şekil 5.27. Katot basıncının katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a)1 atm b)2 atm c)3 atm.....	77

Şekil 5.28. Membran kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	78
Şekil 5.29. Membran kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	79
Şekil 5.30. Membran kalınlığının anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a)117,8 µm b)147,8 µm c)177,8 µm.....	80
Şekil 5.31. Membran kalınlığının katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a) 117,8 µm b) 147,8 µm c) 177,8 µm.....	81
Şekil 5.32. Anot katalizör tabakası kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	82
Şekil 5.33. Anot katalizör tabakası kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	83
Şekil 5.34. Anot katalizör tabakası kalınlığının anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a) 17 µm b) 19 µm c) 21 µm.....	84
Şekil 5.35. Akış kanalı genişliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi).....	85
Şekil 5.36. Akış kanalı genişliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi).....	86
Şekil 5.37. Akış kanalı genişliğinin anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a)1,5 mm b)2 mm c)3 mm.....	87
Şekil 5.38. Akış kanalı genişliğinin katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a)1,5 mm b)2 mm c)3 mm.....	88

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Yakıt pili çeşitlerinin özelliklerinin özeti .....	30
Tablo 3.2. Yakıt pili çeşitlerinin özelliklerinin özeti 2.....	31
Tablo 3.3. Yakıt pili çeşitlerinin güç aralıklarına göre yaygın uygulamalar.....	32
Tablo 4.1. COMSOL Multiphysics programındaki bilinmeyen değişkenlerin özeti.	47
Tablo 4.2. Model parametreleri.....	48
Tablo 5.1. Farklı hücre sıcaklıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri.....	60
Tablo 5.2. Farklı metanol akış hızlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri.....	65
Tablo 5.3. Farklı oksijen akış hızlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri.....	68
Tablo 5.4. Oksijen ve hava kullanıldığında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri .....	71
Tablo 5.5. Farklı anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri.....	73
Tablo 5.6. Farklı katot basınçlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri .....	76
Tablo 5.7. Farklı membran kalınlıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri .....	79
Tablo 5.8. Farklı anot katalizör tabakası kalınlıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri.....	83
Tablo 5.9. Farklı akış kanalı genişliklerinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri .....	86

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Doğrudan metanol yakıt hücresi, COMSOL Multiphysics, Matematiksel modelleme

Fosil yakıtların azalmasıyla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç artmaktadır. Yakıt hücreleri enerji kaynakları arasında umut vadeden bir teknoloji olmuştur. Doğrudan metanol yakıt hücresinde kullanılan yakıtın sıvı olması nedeniyle diğer yakıt hücreleri ile karşılaştırıldığında ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, üç boyutlu, çok bileşenli, tek fazlı, izotermal ve tek hücreli doğrudan metanol yakıt hücresi geliştirilmiştir. Bu model, sonlu elemanlar analizi çözücü ve simülasyon yazılımı olan COMSOL Multiphysics programı kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel model, literatürdeki deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerle çalıştırılarak karşılaştırılmış ve aralarında uyum olduğu doğrulanmıştır. Daha sonra seçilen parametrelerin üç farklı değeri için simülasyon program çalıştırılmıştır. Kullanılan parametreler için polarizasyon eğrileri, güç yoğunluğu eğrileri oluşturulmuştur. Kanal girişinden çıkışına doğru metanolün, suyun, karbondioksitin ve oksijenin kütle oranlarındaki değişimler gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda; doğrudan metanol yakıt hücresi, farklı çalışma koşullarında ve tasarım parametrelerinde çalıştırıldığında yakıt hücresinin performansı üzerindeki etkilerini değerlendirerek optimize edilebileceği ortaya çıkmıştır.

# **NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FUEL CELL PARAMETERS ON PERFORMANCE IN DIRECT METHANOL FUEL CELLS**

## **SUMMARY**

Keywords: Direct methanol fuel cell, COMSOL Multiphysics, Mathematical modeling

With the decline of fossil fuels, the need for renewable energy sources is increasing. Fuel cells have been a promising technology among energy sources. Compared to other fuel cells, direct methanol fuel cell stands out due to the fuel used in the fuel cell is liquid. In this study, three-dimensional, multicomponent, single-phase, isothermal, and single cell of direct methanol fuel cell has been developed. This model is developed using the COMSOL Multiphysics program, a finite element analysis solver and simulation software. The developed mathematical model was compared by the parameters used in experimental studies in the literature and confirmed that there is good agreement with experimental data. Then the simulation program was solved for three different values of the selected parameters. For the parameters used, polarization curves, power density curves are formed. From the channel inlet to outlet changes in the mass fraction of methanol, water, carbon dioxide and oxygen have been shown. In conclusion of the study, it has been revealed that direct methanol fuel cell can be optimized by evaluating its effects on the performance of the fuel cell when operated under different operating conditions and design parameters.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

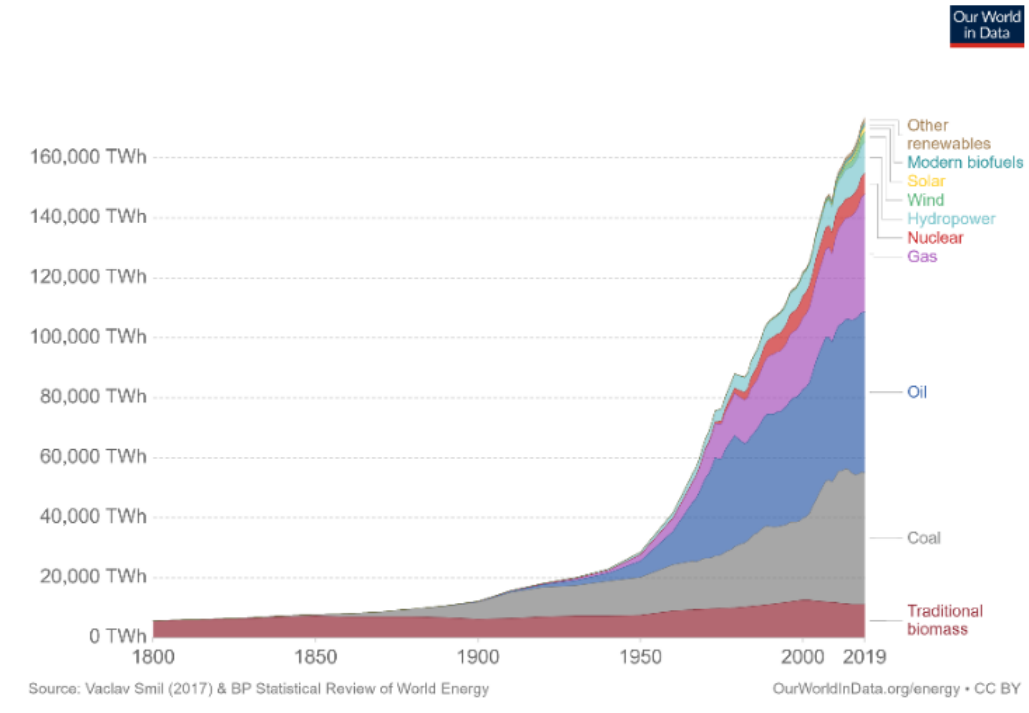
Günümüzde yenilenemeyen enerji kaynaklarının azalması büyük bir sorun haline gelmiştir. Büyüyen ekonomi, artan nüfus ve iklim değişiklikleriyle mücadele etmek için taleplerin karşılanmasına odaklanmak gerekmektedir. Bu sorunları çözmek için yenilenebilir enerji kaynakları ile yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Artan enerji krizi nedeniyle yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması giderek önem kazanmaktadır (Raj, 2020). Bu teknolojiler arasında yakıt hücresi teknolojisi gelecek vadetmektedir.

Uluslararası Enerji Ajansına (IEA) göre 2050 yılına kadar küresel olarak net sıfır emisyon elde etmeyi amaçlamaktadır (World Energy Outlook, 2020). Emisyonun azaltılması için gerekli olan güç sistemlerinin kesintisiz olarak çalışmasını sağlayarak teknolojide büyük bir adım atılması gerekmektedir.

Dünya enerji tüketimi 2050 yılına kadar %50 artacağı tahmin edilmektedir (2019 International Energy Outlook, IEO). Bunun sonucu olarak artan sera gazlarından dolayı bozulan çevre kalitesi dünyanın sürdürülebilirliği için bir tehdittir. Yenilenebilir enerji kullanımı, elektrik üretiminde kullanılan fosil yakıtların tüketimini en aza indirerek sera gazı etkisini azaltabilir (Tan ve ark., 2018).

Günümüzde enerji ihtiyacını karşılamak için çok çeşitli kaynaklar bulunmaktadır. Şekil 1.1.'de gösterilen grafikte 1800'lü yıllardan günümüze kadar olan enerji tüketimi gösterilmektedir. 19. yüzyılın ortalarına kadar geleneksel biyokütlenin (odun, kömür gibi yakıtların yakılması) dünya genelinde en çok kullanılan enerji kaynağı olduğu görülmektedir. Ancak Sanayi Devrimi ile kömürün ardından petrol ve gazın kullanımı artmaya başladı. 20. yüzyılın başlarında ise hidroelektrik enerji kullanıldı. Fosil yakıtlardan düşük karbonlu enerjiye geçiş başlamıştır.





Şekil 1.1. Kaynak çeşitlerine göre küresel enerji tüketimi

Yakıt hücreleri geliştirmenin gerekliliği, dünyadaki doğal fosil yakıt bazlı enerji rezervlerinin hızlı tükenmesi ve bu tükenme nedeniyle dünyamızın yakın gelecekte ciddi bir enerji kıtlığı tehlikesiyle karşı karşıya olduğu gerçeğinden kaynaklanmıştır. Bu gerçeğe ek olarak, kömür, doğal gaz, benzin ve dizel gibi geleneksel fosil bazlı enerji malzemelerinin genellikle düzensiz yanmasından kaynaklanan çevre kirliliği ile ilgili endişe de vardır. Bu etkilerden dolayı, yakıt hücreleri sıfır veya ihmal edilebilir emisyon cihazları olduğu için tercih edilmektedir (Das ve ark., 2020).

Olah ve arkadaşları tarafından gelecekteki bir "hidrojen ekonomisine" alternatif veya bir önceki adım olarak bir "metanol ekonomisi" önerilmiştir. Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), hidrojeni sıvı hidrokarbon olarak depolamanın ve taşımının en basit, en güvenli ve en kolay yoludur. Metanol ekonomisi sadece yakıt ve benzin katkı maddesi olarak metanol kullanımını değil, aynı zamanda sentetik hidrokarbonlara ve hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olan ürün ve malzemelere dönüştürülmesini de kapsamaktadır (Olah, 2005).

Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin düşük çalışma sıcaklığı, yüksek verimlilik gibi birçok avantajı olmasına rağmen, hidrojenin pratikte depolanması, üretimi ve dağıtımı hala tartışılan bir konudur. Bundan dolayı, doğrudan metanol yakıt hücresinde yakıt olarak kullanılan metanolün gaz hidrojenden daha az tehlikeli olması, yüksek enerji yoğunluğu ve verimliliği gibi avantajları sayesinde son yıllarda bu konuda yapılan çalışmaların sayısı artmıştır.

Bu çalışmada, farklı çalışma koşullarının ve tasarım parametrelerinin doğrudan metanol yakıt hücresinin performansına etkisi incelenmiştir. Model, COMSOL Multiphysics programı kullanılarak oluşturulmuştur. Seçilen parametreler, farklı hücre voltajlarında çalıştırılmıştır. Yapılan bu çalışma ile doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını arttırmak ve geliştirilmesini sağlayacak sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır.

## **BÖLÜM 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ**

### **2.1. Çalışma Parametrelerinin Yakıt Hücresi Performansına Etkisi ile İlgili Çalışmalar**

Tek hücre testi, kısa yığın testi ve bir boyutlu matematiksel modelin sonuçlarını karşılaştırmak için çalışma yapılmıştır. İşletme parametrelerinin performans üzerine etkisi incelenmiştir. Daha düşük metanol geçiş hızlarında dolayısıyla daha düşük sıcaklıklarda (çalışma sıcaklığı 57 °C olduğunda) iyim bir uyum göstermişlerdir. Model ve tek hücre test sonuçları arasındaki farklar yüksek akım yoğunluğu ile artmaktadır (Karaoglan ve ark., 2021).

Doğrudan metanol yakıt hücrelerinin performansı, metanol oksidasyon reaksiyonun yavaş kinetiği ve metanol geçişinden dolayı sınırlanmaktadır. Bu olayların doğrudan metanol yakıt hücresi üzerine etkisi nedeniyle çeşitli çalışma koşullarında incelenen çalışmalar bulunmaktadır. Metanol geçiş oranı; metanol konsantrasyonuna, oksidanın basıncına, çalışma sıcaklığına, membranın kalınlığına ve katalizörün yapısına bağlıdır. Bu geçişi minimum hale getirmek için çalışmalar devam etmektedir. Doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını artırmak için çalışma parametrelerini optimize etmek gerekmektedir (Raj, 2020).

Sıcaklığı arttırmak, metanol oksidasyon kinetiğini etkili bir şekilde arttırabilir ve bunun sonucu olarak yüksek performans elde edilebilir. Yeni geliştirilen silika emdirilmiş fosforik asit katkılı polibenzimidazol (PA/PBI/SiO<sub>2</sub>) kompozit membranın doğrudan metanol yakıt hücresinin performansı incelenmiştir. Burada geleneksel olarak üretilen Pt/C ve PtRu/C katalizörleri kullanılan yakıt hücreleri ile geliştirilen katalizör karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, elde edilen güç yoğunluklarına göre 205 °C'nin geçiş sıcaklığı olduğunu göstermektedir. 205 °C'nin üzerindeki yüksek

sıcaklıklarda ve yeni üretilen katalizör tabakaları ile çalıştırıldığında, doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bunun nedeni metanol oksidasyon reaksiyonunun önemli ölçüde geliştirilmiş kinetiğinden kaynaklanmaktadır (Cheng ve ark., 2020).

Düşük metanol konsantrasyonu (5 mol/L) ile sıvı beslemeli ve yüksek metanol konsantrasyonu (20 mol/L) ile buhar beslemeli pasif doğrudan metanol yakıt hücresinin bileşenlerinin malzemelerinin tasarımı ve seçimi açısından karşılaştırma yapan bir çalışma bulunmaktadır. Anot difüzyon tabakasının PTFE içeriğine sahip olması buhar beslemeli yakıt hücresindeki metanol geçişinde önemli bir rol oynamaktadır. Buhar beslemeli yakıt hücresinde; düşük çalışma sıcaklığında ve yüksek metanol konsantrasyonunda kimyasal ara maddenin oluşma olasılığının artacağı ve bununla birlikte hem çevreye zararlı etkisinin hem de verimliliği düşürücü etkisinin olduğu bulunmuştur. Higroskopik (nem çeken) membran kullanılmasıyla, sıvı beslemeli pasif doğrudan metanol yakıt hücresinde metanol geçişini engellemekle kalmayıp suyu emerek taşmayı önlediği veya azalttığı görülmüştür (Abdelkareem ve ark., 2019).

Pasif minyatür doğrudan metanol yakıt hücresinin iki fazlı taşınmasındaki kabarcık oluşumunun dinamik analizi yapılmıştır. Kabarcık üretimi, büyümesi, birleşmesi ve ayrılmasının dinamik süreci incelenmiştir. Kabarcık üzerindeki metanol konsantrasyonu etkisi test edilmiştir. Karbondioksit kabarcıklarının boyutunun ve sayısının hücre çalışma koşullarıyla oldukça fazla ilişkisi olduğu görülmüştür (Yuan ve ark., 2019).

Diğer bir çalışmada ise, bir boyutlu yüksek sıcaklıkta çalışan doğrudan metanol yakıt hücresi geliştirilmiştir. Fosforik asit (PA) katkılı polibenzimidazol (PBI)'dan oluşan membran kullanılarak metanol geçişi ve hücre performansı davranışları incelenmiştir. Geliştirilen membranın kullanılması, düşük sıcaklıkta 1 M metanol konsantrasyonu tolere edilebilecek en yüksek değer olmasına rağmen yüksek sıcaklıkta 12 M'nin üzerindeki metanol konsantrasyon herhangi bir ek performans düşüşüne neden olmadığını göstermiştir (Gwak ve ark., 2018).

Doğrudan metanol yakıt hücresinin sıcaklığının artırılmasının performans açısından olumlu etkisi olduğu bilinmekle birlikte oda sıcaklığında yapılan çalışmalarda bulunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda metanolün reaksiyonunu iyileştirmek için hidrojen peroksit eklenmektedir. Daha sonra farklı konsantrasyonlardaki etkisi incelenmiştir. 25 °C'de 0,1 mol/L hidrojen peroksit eklenmesinin sonucu, saf metanole göre akım yoğunluğunun %12,2 ve güç yoğunluğunun %34,1 oranında arttığını göstermektedir (Wang ve ark., 2018).

Pasif ve aktif doğrudan metanol yakıt hücresindeki sıcaklık dağılımını incelemek için matematiksel model geliştirilmiş çalışma bulunmaktadır. Modelde en yüksek sıcaklık profili katot katalizör tabakasında görülmektedir. Bu geçici sıcaklık dağılımı metanol konsantrasyonuna göre değiştiği gösterilmiştir. Verilen parametreler için, hücre boyunca sıcaklık profili 45 dakika civarında sabit duruma ulaştığı görülmektedir (Ramesh ve Krishnamurthy, 2018).

Akan elektrolitli doğrudan metanol yakıt hücresi yığını oluşturmak için üç hücreli, üç boyutlu modelleme yaklaşımı kullanıldı. Farklı metanol konsantrasyonları ve sülfirik asit akış hızları için her hücrenin anot katalizör tabakasındaki metanol konsantrasyon dağılımları bulundu. Daha düşük giriş metanol konsantrasyonlarının, sabit bir sülfirik asit akış hızlarında daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak, incelenen parametreler arasında metanol konsantrasyonunun 2000 mol/m<sup>3</sup> ve sülfirik asit akış hızınının 10 mL/dk olduğu durumda en düşük katodik aktivasyon polarizasyonu elde edilmiştir (Colpan ve Ouellette, 2018).

Ticari bir akış tablosu simülatörü olan ASPEN-HYSYS kullanılarak model oluşturulmuştur. Tek boyutlu, iki fazlı doğrudan metanol yakıt hücresi yığını modeli; yakıt ve su tankları, sıvı gaz ayırıcı, ısı eşanjörleri, pompalar, üfleyiciler gibi ana sistem bileşenlerinden oluşur. İşletme parametrelerinin ve ısı yönetiminin etkilerini analiz etmek için aktif bir doğrudan metanol yakıt hücresi yığını oluşturuldu. Oluşturulan bu yığın, en yüksek performansı 0,6 M değerindeki metanol konsantrasyonunda göstermiştir. Ayrıca simülasyon sonuçları; anot giriş sıcaklığının

yaklaşık 70-80 °C'de olduğunda çalışmanın çıkış gücünü iyileştirmede avantajlı olduğunu göstermiştir (Lee ve ark., 2017).

Doğrudan metanol yakıt hücresindeki metanol kütle geçişinin analizinin incelenmesi yapılmıştır. Hücre sıcaklığının, metanol akış hızının metanol geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Metanolün difüzyon katsayısının artmasından dolayı metanol geçiş hızı sıcaklıkla hızla arttığı bulunmuştur. Akım arttıkça, metanol akış hızında artış ile metanol geçiş hızı arttığı görülmüştür. 80 °C'de maksimum güç yoğunluğu 178 mW/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Bu değer Johnson Matthey tarafından üretilen ticari membran kullanıldığında elde edilenden %40 daha fazladır. Sonuçlar, 1 M metanol konsantrasyonu, 1 ml/dk metanol akış hızı ve 80 ml/dk oksijen akış hızında elde edilmiştir (Ji ve ark., 2017).

İnce elektrolit membranlı doğrudan metanol yakıt hücresi ile yüksek performans elde edilmesi için hücrenin çalışma sıcaklığı üzerinde araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, 27,5 µm kalınlığa sahip Nafion XL ticari membran kullanılmıştır. Membranın aktif alanı 16,1 cm<sup>2</sup>'dir. Anot tarafında 1 M metanol konsantrasyonu ve akış hızı 3 ml/dk olduğunda yakıt hücresi test edilmiştir. Anot tarafında hücre sıcaklığı 60 °C'den 90 °C'ye çıkarıldığında devamlı arttığı gözlenmiştir. Katot tarafında ise 60 °C'den 75 °C'ye kadar yükselmesine rağmen 75 °C'den 90 °C'ye kadar ise fazla artış göstermemiştir. 90 °C'de en yüksek güç yoğunluğu 320 mW/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir (Wan, 2017).

İki boyutlu, çok fazlı, izotermal olmayan akan elektrolitli doğrudan metanol yakıt hücresi modeli geliştirilmiştir. Anot ve katot giriş sıcaklığının termal giriş uzunluğuna etkisi incelenmiştir. Her iki tarafında giriş sıcaklıkları 40 °C, 60 °C ve 80 °C olduğu kabul edilerek test edilmiştir. Sonuç olarak katot tarafının termal giriş uzunluğunun anot tarafına göre daha büyük olduğuna ulaşılmıştır. 40 °C ve 60 °C giriş sıcaklıklarında yüksek katot hızı nedeniyle katot çıkışında hücre sıcaklığına ulaşamamıştır. Katodun giriş sıcaklığının, anodun giriş sıcaklığından çok genel hücre sıcaklığından daha fazla etkilendiği bulunmuştur (Atacan ve ark., 2017).

Doğrudan metanol yakıt hücresinin montaj kuvvetini optimize edilmesi ve çalışma parametrelerinin anot ve katodun özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Daha sonra metanol ve oksijenin optimal akış hızını etkileyen faktörün çalışma sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Buna göre 55 °C'de metanol konsantrasyonu 1,5 mol/L, metanol çözeltisinin akış hızı 5 mL/dk, oksijenin akış hızı 670 mL/dk olduğunda hücre performansının optimize edilmiş hali elde edilir (Liu ve ark., 2016).

Sıvı beslemeli doğrudan metanol yakıt hücresinin çalışma koşullarını araştırmak için iki boyutlu bir model geliştirilmiştir. İncelenen değişkenler arasında metanol ve oksijen konsantrasyonları, bipolar plaka malzemesi, hücre sıcaklığı ve difüzyon ortamı ile membran arasındaki temas direncidir. Temas direncinin, ohmik kayıplarla ilişkili olan hücre birleştirme işlemi sırasında oluşan küçük temas basınçları nedeniyle performansı düşürücü etkisi olduğu bulunmuştur (García-Salaberri ve Vera, 2016).

Anyon değişim membranlı alkali doğrudan metanol yakıt hücresinin anodundaki su yönetiminin modellenmesi yapılmıştır. Anottan suyun uzaklaştırılmasının membrandan difüzyon yoluyla gerçekleştirilmesi gerektiği bulunmuştur. Membranın alkali doğrudan metanol yakıt hücreleri için önemli bir bileşen olduğu tanımlanmıştır. Kararlı çalışma ve yüksek verimlilik sağlamak için anyon değişim membranları geliştirirken membranın su difüzyonu dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, çalışma koşullarının su seviyesi üzerindeki etkisinin incelenmesi yakıt hücresi tasarımı için önemli olduğu bulunmuştur (Weinzierl ve Krewer, 2016).

Mikro doğrudan metanol yakıt hücrelerinin çıkış parametrelerine, sıcaklığın etkisini incelemek için iki boyutlu bir model geliştirilmiştir. 0.64 cm<sup>2</sup> etki alanına sahip yakıt hücresi imal edilmiştir. Daha sonra deneysel doğrulama yapılmıştır. Nispeten düşük metanol akış hızındaki güç yoğunlukları; başlangıçta yükselme, 60 °C'de en yüksek güç yoğunluğu olan 85,3 mW/cm<sup>2</sup>'e ulaşma ve sonra düşme eğilimi göstermektedir. Metanol akış hızlarının 2,5 ve 5 ml/dk değerlerinde ise maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 106,4 mW/cm<sup>2</sup> ve 115,1 mW/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Sıcaklığın etkisi incelendiğinde artışın faydalı olduğu görülse de belirli koşullar altında metanol

geçişinde artış olabilir, bu da yakıt kullanımının ve yakıt hücresi verimliliğinin azalmasına yol açar (Yuan ve Yang, 2015).

Doğrudan metanol yakıt hücresinin güç yoğunluğunu arttırmak için farklı yapıda membranlar geliştirilmektedir. Bu çalışmada fosforik asit ( $H_3PO_4$ ) katkılı polibenzimidazol (PBI) membranı kullanılmıştır. Nafion membran ile karşılaştırıldığında metanol geçişinin önemli ölçüde düşük olduğu deneysel sonuçlarda ortaya çıkmıştır. 16 M metanol konsantrasyonunda ve 180 °C'de; 37,2 mW/cm<sup>2</sup> değerinde güç yoğunluğu elde edilmiştir (Zhao ve ark., 2015).

Anodu nemlendirmek için farklı teknikler ve buharla beslenen saf metanol, yakıt hücresindeki su yönetimi ile ilgili mekanizmalar geliştirilmiştir. Suyun bir yakıt rezervuarında depolanması, aktif su buharı tedarigi ve yarı süperhidrofobik bir sinterlenmiş gözenekli metal levha kullanılarak su geri difüzyonunun iyileştirilmesi olmak üzere üç su yönetimi yöntemi araştırılmıştır. Bu yöntemlerden her biri, hücre performansını iyileştirebilir ve yeniden şarj etmenin ilk zamanlarında performans düşüşünü azaltabilir. Sonuçlar ayrıca, Nafion 112 gibi daha ince bir zarın kullanılmasının, Nafion 117'den daha düşük bir hücre performansına neden olduğunu göstermektedir (Zhang ve ark., 2015).

İki polimer elektrolit membran arasına sıkıştırılan sıvı elektrolit ile kompozit bir elektrolitin elde edildiği pasif doğrudan metanol yakıt hücresi tasarlanmıştır. Burada polimer elektrolit membrandaki metanol ve su geçişini azaltmak için böyle bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sıvı elektrolitin; metanol geçiş hızını azalttığı, yakıt kullanımını artırdığı ve katot voltaj kaybını azalttığı dair sonuçlar elde edilmiştir (Yin, 2015).

Aktif doğrudan metanol yakıt hücresinin sorunlarından biri olan metanol konsantrasyonunun zamana bağlı dalgalanmasını çözmek için anot ve katot stokiyometrisinin etkisi incelenmiştir. Anot stokiyometrisi 1,5 ile 3,5 arasında değişen değerlerinde olduğunda bir boyutlu simülasyon gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek anot stokiyometrilere metanol geçişi artmaktadır. Buna rağmen katot



stokiyometrisinin metanol geçişine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Katot stokiyometrisi, katot aşırı potansiyelini önemli ölçüde etkilemektedir (Gwak ve ark., 2015).

Doğrudan metanol yakıt hücresi anot ve katot basınçları ile hücre sıcaklığının, hücre performansında etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada, en güçlü optimizasyon araçlarından biri olan genetik algoritma uygulanmıştır. İki boyutlu, izotermal bir model kullanılmıştır. MATLAB kullanılarak genetik kod geliştirilmiştir. Optimum değerlerin; hücre sıcaklığı 130 °C, anot basıncı 2,5 bar, katot basıncı 5 bar ve kanal yüksekliği 1 mm olduğu elde edilmiştir (Tafaoli-Masoule ve ark., 2014).

Çok fazlı alkali anyon değişim membranlı doğrudan metanol yakıt hücresinin analitik modeli geliştirilmiştir. Model, deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Hücre performansını önemli bir şekilde etkileyen parametreler incelenmiştir. Bunlar; metanol besleme konsantrasyonu, çalışma sıcaklığı ve membran kalınlığıdır. Düşük akım yoğunluğunda düşük metanol konsantrasyonunda daha iyi performans göstermesine rağmen yüksek akım yoğunluğunda ters etki oluşmuştur. Çalışma sıcaklığı da aynı etkiyi göstermiştir. Membran kalınlığı için sonuçlar; daha ince bir zar yüksek metanol geçişine neden olduğu, orta ve yüksek akım yoğunluğu aralığında performansı arttığı şeklindedir. Membran kalınlığının çok fazla olması ise suyun geçişini sınırlamaktadır (Deng ve ark., 2014).

Doğrudan metanol yakıt hücresinin anot tarafına odaklanan bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, metanol geçiş hızının farklı çalışma koşullarında ve anot tarafındaki farklı katmanların geometrik ve malzeme özelliklerinden nasıl etkilendiğini bulmak amaçlanmıştır. Metanol geçiş hızının doğrusal olmayan bir şekilde hücre sıcaklığına ve metanol konsantrasyonuna bağlı olduğu bulunmuştur (Biswas ve ark., 2014).

Isı ve kütle geçişinin doğrudan metanol yakıt hücresinin anot tarafındaki hücre performansını incelemek için üç boyutlu izotermal olamayan model geliştirilmiştir. Hesaplama için “FLUENT” ticari yazılımı kullanılmıştır. Farklı hücre voltajları ile

yapılan deneyler yapılmış ve sonuçlar modelde elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Metanol konsantrasyonlarının güç yoğunluğuna etkisi incelenmiştir. 0,25 M'den 1 M'ye yükseltildikçe güç yoğunluğunun 14 mW/cm<sup>2</sup>'den 21 mW/cm<sup>2</sup>'ye arttığı gözlenmiştir. Yakıt kullanma verimliliği ise 1 M metanol konsantrasyonunda %7 iken 0,25 M'de ise %13 olarak elde edilmiştir (Sudaroli ve Kolar, 2014).

İzotermal olmayan, iki boyutlu pasif doğrudan metanol yakıt hücresinin anot tarafındaki doğal taşınımı dikkate alan bir model oluşturulmuştur. Model, sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak çözümlenip daha sonra deney sonuçlarına göre doğrulanmıştır. Farklı çalışma koşulları altında hücre performansı incelenmiştir. Hücre sıcaklığının yükselmesi daha güçlü doğal konveksiyona neden olur, bu da hücre boyunca sıcaklık farklarının artmasına yol açmaktadır. Metanol konsantrasyonu 1 M'den 4 M'ye yükseldikçe metanol geçiş hızının arttığı görülmüştür. Ama 1 M - 2 M konsantrasyonlarında metanol geçiş hızı azalırken 3 M - 4 M değerlerinde ise artmıştır (Wang ve ark., 2013).

Sıvı beslemeli doğrudan metanol yakıt hücresinin dinamik çalışma davranışlarını araştırmak için geçici, iki boyutlu, iki fazlı model oluşturulmuştur. Hücre çalışma koşullarının ani değişimine yanıt olarak çeşitli süreçlerin hücre dinamik davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hücre akım yoğunluğunun ve metanol konsantrasyonunun ani düşüşüne yanıt olarak, hücre voltajının, anot ve katot aşırı potansiyelleri arasındaki etkileşimin ani yükselme davranışı gösterdiğine dair sonuçlar elde edilmiştir. Oksijen konsantrasyonunun aniden sifıra düşmesi sonucu hücre voltajı 12 saniye boyunca doğrusal olarak azalır daha sonra birkaç saniye içinde hızla sifıra düşer. Bunun nedeni, katot katalizör tabakasındaki oksijen konsantrasyonunun değişmesinden kaynaklanan katot aşırı potansiyelinin dinamik tepkidir (Yang ve ark., 2012).

Metanol konsantrasyonu, sıcaklık, metanol ve oksijen akış hızlarını içeren 4 çalışma parametrenin incelendiği bir çalışma bulunmaktadır. Bunların arasındaki ilişkiyi anlamak için yarı deneysel bir model geliştirilmiştir. Sıcaklık 298 K'den 343 K'e yükseltildiğinde aynı akım yoğunluğunda hücre voltajında %82,6'lık bir artış olur.

Metanol konsantrasyonu 0,25 M'den 0,5 M'e yükseltildiğinde hücre voltajında %3,9'luk bir artış olurken; 0,5 M'den 1 M'ye yükseltildiğinde hücre voltajında %15,2 azalma görülmüştür. Metanol akış hızı 3,5 ccm'den 5,5 ccm'ye yükseltildiğinde hücre voltajında %12,5'lik artış görülmektedir. Hava akış hızı 81,2 ccm'den 140,8 ccm'ye yükseltildiğinde ise hücre voltajında %90,1'lik artış elde edilmiştir (Yang ve ark., 2011).

Metanolün ve oksijenin akış hızı doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını etkileyen parametrelerdir. Bu konuda yapılan çalışmada sıcaklığın, metanol konsantrasyonunun, metanol akış hızının ve oksijenin akış hızının farklı değerleri için güç yoğunlukları hesaplanmıştır. Sonuç olarak sıcaklık arttıkça en yüksek güç yoğunluğunun elde edildiği görülmektedir. Bu artışın katalizör aktivasyonun yanı sıra membran elektron grubunun iletkenliğinin geliştirilmesinden kaynaklanmaktadır. (Chen, 2010).

Anot ve katot akış kanalları tasarımlarının, ortam basıncına yakın çalıştırılan doğrudan metanol yakıt hücresinin performansına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Tek serpantin, çoklu serpantin ve paralel ile serpantin karışımı olan üç farklı akış kanalı tasarımı kullanılmıştır. Aktif membran alanı  $25 \text{ cm}^2$ 'dir. Metanol konsantrasyonu 0,75 M ile 2 M değerlerinde, yakıt hücresi sıcaklığı  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ve  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  değerlerinde iken çalışılmıştır. Düşük sıcaklık ve yüksek konsantrasyonlar için anot akış kanalı olarak paralel ile serpantin karışımı şeklinde oluşturulan tasarımın kullanılması, katot akış kanalı olarak ise çoklu serpantin kullanılması hücre voltajı ve gücü üzerinde olumlu bir etki olmuştur (Oliveira ve ark., 2010).

Mikro doğrudan metanol yakıt hücresinin serpantin akış kanallarındaki ısı transferini ve basınç düşüşünü incelemek için üç boyutlu matematiksel model geliştirilmiştir. Her bir geçişte 4 kanal bulunan 6 geçişli bu kanalda ortalama sürtünme faktörü hesaplanmış ve geleneksel daha büyük sistemlere göre yüksek (%30 - 40) olduğu bulunmuştur. Bu hidrofilik yüzeye sahip mikro kanallardaki metanol akışından kaynaklanmaktadır. Yerel, kanalda ve dönüş yerlerindeki sürtünme faktörüne karşılık gelen Nusselt sayısı hesaplanmıştır. Kanal dönüş yerlerinin her biri için hız vektör

grafiği oluşturulmuştur. Dönüşlerdeki basınç düşüşünün düz kanallara göre ihmal edilebilir düzeyde olduğu bulunmuştur (Hsieh ve Her, 2007).

Doğrudan metanol yakıt hücresi ile ilgili deneysel çalışmalarda yapılmıştır. Bu konuda incelenen çeşitli işletme parametreleri olan hücre çalışma sıcaklığının, metanol konsantrasyonunun, anot akış hızının, hava akış hızının ve katot nemlendirmesinin etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar katot nemlendirmesi dışında incelenen tüm çalışma parametrelerinin doğrudan metanol yakıt hücresinin hücre performansları üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu ve katot nemlendirmesinin neredeyse ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu gösterdi. Hücre performansı çalışma sıcaklığı ile artar, ancak bir noktaya kadar sıcaklığın olumsuz etkisi baskın hale gelebilir. Oksidan olarak hava kullanıldığında optimum metanol konsantrasyonu 1 ve 2 M arasındadır. Yüksek hava akış hızında, metanol geçişinin olumsuz etkisi hafifletilebilir. Saf oksijen kullanıldığında metanol geçişinin olumsuz etkisi önemli ölçüde azalır. Bu sonuçlar katot yapısının ve çalışma koşullarının doğrudan metanol yakıt hücresinin tasarımında ve çalışmasında çok önemli bir rol oynayabileceğini gösterdi (Ge ve Liu, 2005).

Çalışma parametrelerinden birkaçı olan basınç, hava akış hızı ve hücre sıcaklığının performans üzerine etkileri incelenmiştir. Akış hızının performans üzerindeki etkisinin ortam basıncında ve düşük sıcaklıkta önemli olduğu sonucuna varmışlardır. Elektrot yapısında yaptıkları yenilikler ile 0,4 V ve 60 °C sıcaklıkta 150 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu elde edilmiştir. Bu performans seviyeleri metanol yakıt hücresini pratik uygulamalar için uygun hale getirir (Narayanan ve ark., 1996).

## **2.2. Tasarım Parametrelerinin Yakıt Hücresi Performansına Etkisi ile İlgili Çalışmalar**

Pasif mikro doğrudan metanol yakıt hücresindeki akım toplayıcı modeli ve açıklık oranlarının hücre performansına etkisi incelenmiştir. Anot için %45,6 ve katot için %35,8'lik açıklık oranlarının en iyi performansı verdiği bulunmuştur. Membran elektron grubuna sıcak presleme uygulanması, parametreleri önemli bir şekilde

etkilediği bulunmuştur. En yüksek güç yoğunluğu olan  $15 \text{ mW/cm}^2$ ;  $135 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de, 4 dakika boyunca  $1,0 \text{ MPa}$  basınç altında elde edilmiştir (Wang ve ark., 2021).

Doğrudan metanol yakıt hücresi için lazerle delikli anot gaz difüzyon katmanları geliştirilmiştir. Hem hidrofobik hem de hidrofilik olarak tasarlanmıştır. Bu tür difüzyon tabakaları metanol ve karbondioksit geçişlerini geliştirmek için oluşturulur. Delinmiş olan anot gaz difüzyon tabakasının kullanılması delinmemiş olana göre performansı %32 arttırmıştır ve konsantrasyon kayıplarını azaltmıştır. Delinmiş olan gaz difüzyon tabakalarından maksimum faydayı elde etmek için hidrofobik ve hidrofilik tasarımların kombinasyonu ile optimize edilmelidir (Alrashidi ve Liu, 2021).

Pasif doğrudan metanol yakıt hücresi için maliyet ve verimlilik arasında bir denge oluşturarak optimum sonuçlar elde edilmelidir. Bunun için performansı etkileyen akış kanalı için hem maliyetinin azaltılması hem de ağırlığının azaltılmasıyla ilgili çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; katot akış kanalı olarak paslanmaz çelik malzemesinin, anot akış kanalı olarak titanyum malzemesinin kullanılmasıyla metanol konsantrasyonu  $7 \text{ M}$  iken maksimum güç yoğunluğu  $5,23 \text{ mW/cm}^2$ 'dir (Braz ve ark., 2020).

Su yönetimi için üç boyutlu grafen yapılı katot mikro gözenekli tabaka oluşturulmuştur. Bu tabakanın içindeki hidrofobik gözeneklerin boyutunu azaltarak, katottan anoda su geri kazanımını arttırmak ve böylece katot kütle transferini geliştiren katot katalizör tabakasının içinde yüksek bir basınç oluşturulabilir. Hazırlanan bu doğrudan metanol yakıt hücresi ile yapılan deney sonuçları, hücre performansının önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir. Ticari olarak kullanılan karbon siyahı ile oluşturulan gaz difüzyon tabakası ile karşılaştırıldığında doğrudan metanol yakıt hücresi performansı %43 oranında artış göstermiştir (Yuan ve ark., 2020).

Sinüzoidal oluklu serpantin kanallara sahip doğrudan metanol yakıt hücrelerindeki iki fazlı akışta karbondioksit kabarcıklarının davranışları incelenmiştir. Kabarcık

davranışları hem simülasyon hem de görselleştirme testi ile incelenmiştir. Bu oluklu kanal tasarımıdaki girdaplar reaktantların homojen bir şekilde iletilmesine ve kabarcıkların kanal duvarlarından uzaklaştırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu kanalın 0,1 değerindeki genlikte ve 5 değerindeki açısız frekansta optimum performans elde edilmiştir. Bu değerlerin çok fazla olması ciddi kabarcık deformasyonuna ve ekstra enerji tüketimine neden olur (Su ve ark., 2020).

Nanofiber mikroyapıya sahip katot katalizör tabakası kullanılan doğrudan metanol yakıt hücresinin performansı incelenmiştir. Nanofiber yapıyla birlikte aktif yüzey alanı geliştirilmiştir. Elektrokimyasal aktif yüzey alanında %34,7'lik bir artış kütle taşıma özelliklerini iyileştirmiştir. Geliştirilen katalizör tabakası geleneksel katalizör tabakasına göre (anot için platin-rutenyum, katot için platin) yakıt hücresi güç yoğunluğunu %41,5 oranında arttırmıştır. Hücre sıcaklığı 55 °C'de iken güç yoğunluğu 99,29 mW/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir (Liu ve ark., 2020).

Her geçen gün yeni akış kanalı tasarımları geliştirilmektedir. Yapılan bir çalışmada çok yollu spiral akış kanalı, doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını iyileştirmek için kullanılmıştır. Üç boyutlu, izotermal ve tek fazlı matematiksel model, literatürde bulunan deneysel veriler kullanılarak geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. 0,25 M ve 0,5 M metanol konsantrasyonlarında sırasıyla %104 ve %74 güç yoğunluğunda artış gözlenmiştir. Bu geliştirilen yeni spiral akış kanalı modeli, düşük metanol konsantrasyonlarında yakıt hücresinin çıkış gücünü etkilemeden metanol geçişi sorununu çözmektedir (El-Zoheiry ve ark., 2019).

Düzenli yapılandırılmış katalizör katmanı kullanılarak doğrudan metanol yakıt hücresi modellenmiştir. Çalışmada, sıralı yapılı katot katalizör tabakasına sahip iki boyutlu ve iki fazlı bir yakıt hücresi modeli geliştirilmiştir. Bu model silindirik karbon nanoteller etrafındaki su birikiminin etkisini dikkate almaktadır. Sıralı elektrotlu doğrudan metanol yakıt hücresinin sırasıyla en yüksek güç yoğunluğu ve akım yoğunluğu aglomera elektrottan %46,6 ve %62,5 daha yüksek hücre performansı sağlamıştır. En yüksek güç yoğunluğu; karbon nanotel yarıçapı 45 nm,

karbon ve platin yüklemesi sırasıyla 2,0 mg/cm<sup>2</sup> ve 1,6 mg/cm<sup>2</sup> değerlerinde iken elde edilmiştir (Jiang ve ark., 2019).

Akış kanalı olarak farklı tasarımlara sahip serpantin kanallar kullanılarak doğrudan metanol yakıt hücresinin güç yoğunluğunun geliştirilmesi için çalışma yapılmıştır. Giriş ve çıkıştaki kanal genişlikleri eşit, daralan ve genişleyen şeklinde tasarlanmıştır. Oran olarak 0,6, 0,8, 1 ve 1,25 değerleri incelenmiştir. Sonuç olarak; giriş ve çıkış oranının 1'den küçük olan yani daralan kanal tasarımlarında, güç yoğunluğu üzerinde iyileşmelerinin meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte metanol konsantrasyon dağılımının homojenliğinin arttığı gözlenmiştir (Hu ve ark., 2019).

Yakıt hücrelerinde kullanılan akım toplayıcıların tasarımı; farklı yük, ısı ve kütle taşınımı olaylarına neden olduğu için enerji yoğunluğuna etkisi çok fazladır. Bu yüzden farklı delik sayısına (121, 36, 25 ve tamamen açık), çapa, açıklık oranlarına sahip 4 farklı tasarım hem anot hem de katot tarafında test edilmiştir. Pasif doğrudan metanol yakıt hücresinin performansı polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrileri ile değerlendirilmiştir. En iyi güç yoğunluğu; 2 M metanol konsantrasyonunda, her iki tarafta da açıklık oranı %34 olduğunda (121 tane delik sayısı) 3,14 mW/cm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir (Braz ve ark., 2019).

Doğrudan metanol yakıt hücresi yığını oluşturmak için 16 hücre kullanılmıştır. Hücre ağının toplam aktif alanı 128 cm<sup>2</sup>'dir. Bir cep telefonu için hedeflenen hücre ağ gücü değeri olan 5,18 W elde etmek için hedef voltaj değeri 3,7 V ve akım değeri 1400 mA olarak belirlenmiştir. Bu güç değeri tek hücre ile elde edilememektedir. 16 hücre ile yaklaşık 3,781 V olduğunda 5,29 W güç elde edilmiştir (Ismail ve ark., 2019).

Geleneksel akış kanallarına bir alternatif olan yaprakların damar sisteminden ilham alınarak yapılan akış kanalı tasarımları bulunmaktadır. Serpantin akış kanalı her ne kadar yüksek performans sağlasa da giriş ve çıkış boyunca büyük basınç düşüşlerine karşı hassastır. Bu çalışmada hem deneysel hem de modelleme yapılmıştır. Yaprak damarlarında besin akışının bir ana kanal ile iletildiği ve daha küçük kanallara

dağıtıldığı gözlenmiştir. Serpantin akış kanalı ile karşılaştırıldığında bu tasarımla en düşük basınç düşüşü sağlandı, ancak aynı zamanda bir anot ve katot akış kanalı olarak kullanıldığında en düşük performansı sağlamıştır (Ouellette ve ark., 2018).

Pasif buhar beslemeli alkali anyon membranlı doğrudan metanol yakıt hücresi, iki boyutlu olarak modellenmiştir. Bu model; açıklık oranın, karbondioksitin çıkış uzunluğunun, mikro gözenekli tabakanın ve gözenekli tabakanın hidrofobikliğinin etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar açıklık oranının azaltılmasının metanol geçişini etkili bir şekilde azaltabileceğini ama hücre performansında düşüş yaşanacağını göstermektedir. Karbondioksit çıkış uzunluğunun genişletilmesi yakıt kullanım verimliliğinin artmasına katkıda bulunduğu ve metanol geri kazanımıyla boşa harcanmanın azaldığı görülmüştür. Anot mikro gözenekli katmanın metanol geçişini etkili bir şekilde engellerken katot tarafındaki ise şiddetlendirdiği bulunmuştur. Hidrofobik gözenekli katmanların etkisiyle anot tarafındaki artan temas açısının düşük akım yoğunluğunda metanol geçişini azaltabildiği elde edilmiştir (Xie ve ark., 2018).

Membransız doğrudan metanol yakıt hücresinin üç boyutlu izotermal olmayan modeli geliştirilmiştir. Korunum denklemleri temelinde oluşturulan model, ticari CFD yazılımı FLUENT kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Membran yerine bir separatör kullanılmıştır. Nafion membran olmadan reaktantların geçişi çok daha kolay olacağı için engellemek gerekmektedir. Bunun için katot tarafında katalizör tabakası ve difüzyon tabakası kalınlığının arttırılmasıyla birlikte akış direnci artması geçişi azalmıştır (Wei ve ark., 2018).

Yerçekiminin, izotermal olmayan pasif mikro doğrudan metanol yakıt hücresine etkisi incelenmiştir. Katodun üst tarafta olduğu yatay konumunda, katodun alt tarafta olduğu yatay konumda ve dikey konumunda olmak üzere üç farklı yöndeki performansı test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, katodun üst tarafta olduğu yatay konumundaki modelde en iyi performans elde edilmiştir. Ancak 4 M yüksek metanol beslemesi için karbondioksit kabarcıkları ile optimum metanol konsantrasyonu arasında denge sağlanması gerekmektedir (Yuan ve ark., 2018).



Akış kanalı tasarımlarında en iyi performans genellikle serpantin akış kanalında elde edilmektedir. Bu yüzden bu akış kanalını geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Akış alanı yol sayısına göre farklı şekillerde tasarlanmıştır. Geleneksel serpantin tasarımına kıyasla geliştirilmiş akış kanalı tasarımları kullanılarak doğrudan metanol yakıt hücresinin girişi ve çıkışı arasındaki toplam basınç düşüşü önemli ölçüde azaltılmıştır. Metanol giriş konsantrasyonunun 0,5 M ve 0,25 M değerlerinde çalıştırılan yakıt hücresinde geleneksel serpantin akış kanalına kıyasla yeni geliştirilen dört yollu akış kanalında, güç yoğunluğunun sırasıyla %52,9 ve %35,8 oranında arttığı gözlemlenmiştir (El-Zoheiry ve ark., 2017).

Akan elektrolitli doğrudan metanol yakıt hücresinin farklı katot akış kanalı tasarımlarının performansa etkisi COMSOL Multiphysics programı kullanılarak incelenmiştir. Tekli serpantin, paralel serpantin, üçlü serpantin ve ızgara şeklinde akış kanalı çeşitleri için metanol konsantrasyonu, oksijen konsantrasyonu, basınç dağılımı ve hız dağılımı simüle edilmiştir. Performans açısından değerlendirildiğinde ızgara şeklindeki akış kanalında en düşük iken, tekli serpantin akış alanı tasarımında en iyi performans elde edilmiştir (Ouellette ve ark., 2017).

Doğrudan metanol yakıt hücrelerinde reaktantların ve ürünlerin dağılımını etkileyen bir bileşen olarak akış kanalı tasarımı oldukça ilgi görmektedir. Yapılan çalışmaların birinde çeşitli akış kanalına (serpantin, paralel, gözenekli) sahip doğrudan metanol yakıt hücresinin iki fazlı akıştaki sıcaklığı incelenmiştir. Sonuç olarak serpantin akış kanalının paralel tasarıma göre performansının metanol besleme hızındaki değişimden daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Bununla birlikte hücrede, serpantin akış kanalının kullanılması daha yüksek metanol konsantrasyonu ile çalıştırılmasını sağlamaktadır. Oksijen besleme hızının ise katot serpantin akış kanalına sahip yakıt hücresinde ihmal edilebilir etkiye sahiptir, ancak paralel yakıt hücresinde daha belirgin performans farkı görülmektedir (Yuan ve ark., 2016).

Oksijen indirgenme reaksiyonu için platin kullanılmayan metal katalizör geliştirilmiştir. Geliştirilen katalizör elektrokimyasal yöntemlerle değerlendirilmiştir.

Bu katalizör literatürde bildirilen en yüksek metanol toleranslarından birine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Metanol konsantrasyonunun 10 M değerine kadar hücre performansında önemli bir düşüş gözlenmemiştir. 90 °C’de ve 5 M metanol konsantrasyonundaki stabilite testinde zamanla performansta yavaş bir düşüş görülmüştür (Sebastián ve ark., 2016).

Mikro boyutlu doğrudan metanol yakıt hücresi, üç farklı en-boy oranlarına sahip mikro kanallardaki iki fazlı özellikleri incelemek için simüle edilmiştir. 0,64 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip yakıt hücresi oluşturulmuştur. En-boy oranları 1:1, 2:1, 4:1 şeklinde ayarlanmıştır. Yapılan deneysel sonuçlarla, matematiksel analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Maksimum güç yoğunluğu 27,1 mW/cm<sup>2</sup> olan bu değer 2:1 en-boy oranında analiz edildiğinde bulunmuştur (Z. Yuan ve ark., 2016).

Özel tasarlanmış iki farklı membran elektrodunun, doğrudan metanol yakıt hücresindeki metanol geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu tasarımlardan biri katalizör tabakasıyla aynı kalınlığa sahip teflon filmlerle kaplanarak, diğeri ise iki katalizörün arasına teflon filminin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Teflon filmlerle kaplanan membranın kullanıldığında, metanol geçiş akışının diğeri oranla daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bunun nedeninin kaplama kullanılan membrandaki konveksiyondan kaynaklandığı tahmin edilmiştir (Almheiri ve Liu, 2015).

Pasif doğrudan metanol yakıt hücresi için çok fazlı bir model geliştirilmiştir. Mikro gözenekli tabakanın ve metanol beslenme koşullarının etkisi araştırılmıştır. Farklı geçirgenliğe, temas açısına ve gözenekliliğe sahip mikro gözenekli tabakalar hem anot hem de katot için incelenmiştir. Burada geçirgenliğinin  $2,5 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>, temas açısının 140° ve gözenekliliğinin 0,3 olduğu durumda, sıvı metanolün yüksek taşıma direnci nedeniyle daha iyi performans gösterir (Guo ve ark., 2015).

Taşınabilir cihaz uygulamalarında kullanılmak için mikro doğrudan metanol yakıt hücreleri üzerine araştırma bulunmaktadır. 2,25 cm<sup>2</sup> alana sahip olan yakıt hücresinin performansı üzerine deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada metanol

konsantrasyonu, membran kalınlığı ve katot gaz difüzyon tabakası kalınlığının yakıt hücresi performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Metanol konsantrasyon değeri ile en yüksek güç yoğunluğunun elde edilmesi tasarım parametrelerine göre değişmektedir. Daha kalın membranlar ve gaz difüzyon tabakaları yüksek metanol konsantrasyonlarında kullanılabilceği bulunmuştur. Bunun sonucu olarak düşük metanol geçişinden dolayı hücre performansını önemli ölçüde arttıracığı gözlenmiştir (Falcão ve ark., 2015).

Konsantre yakıt ile beslenen doğrudan metanol yakıt hücresinde gaz difüzyon tabakasının açıklık oranı, anot gaz difüzyon tabakası bileşenleri ve katot filtre tasarımları gibi çeşitli yapısal parametrelerinin yakıt hücresi performansına etkisi araştırılmış bir çalışma bulunmaktadır. Gaz difüzyon tabakasının açıklık oranının %60 gibi bir değere kadar artmasıyla performansta iyileşmeler gözlemlenmiştir. Anot gaz difüzyon tabakasında hidrofobik ve hidrofilik mikro gözenekli tabakalar kullanıldığında yakıt hücresinin performansının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. 5 farklı katot filtresi kullanılarak yapılan deney sonuçlarında bir karbon kağıdı kullanılmasıyla performansın özellikle yüksek akım bölgesinde iyileştiği görülmektedir. Bu çalışma, katot filtrelerinin su yönetimi için yararlı olduğunu göstermektedir (Wu ve ark., 2014).

Doğrudan metanol yakıt hücresinin gaz difüzyon tabakasını çeşitli sıkıştırma oranları ile performans değişimi incelenmiştir. Katot tarafındaki sıkıştırma oranının yakıt hücresi performansını doğrudan etkilediği bulunmuştur. Gaz difüzyon tabakası aşırı sıkıştırma oranından hasar gördüğünden, conta kalınlığı 250  $\mu\text{m}$ 'nin altına düştüğünde performans azalmaktadır. 250  $\mu\text{m}$ 'ye kadar ohmik kayıplarda azalma meydana gelir ancak gaz difüzyon tabakasının gözenekliliğinin azaltır (Hwang ve ark., 2014).

Membranın oluşturulma şekli tasarım parametrelerinden biridir. Sandviç şeklinde tasarlanmış çok katmanlı membran kullanılarak oluşturulmuş bir çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, saf metanol ile çalışan doğrudan metanol yakıt hücresinin anottaki su açlığını gidermek için iki ince zar arasına sıkıştırılmış çok

katmanlı bir membran geliştirilmiştir. Reaksiyon tabakası PtRu katalizörlerinden, SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerinden ve Nafion iyonomerlerinden oluşmaktadır. Performans karakterizasyonu gösteriyor ki tek tabaka olarak Nafion membran yerine sandviç yapılı membran kullanımı daha yüksek hücre performansının elde edilmesini sağlamıştır (Wu ve ark., 2013).

Çeşitli hücre sıcaklıklarında üç farklı kanal derinliği değeri kullanarak doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını analiz etmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Anot ve katot kanal derinliği aynı anda değiştirilmiştir. Sonuçlara göre kanal derinliği 2 mm'den 1 mm'ye düştüğünde hücre performansı artmaktadır. Azalan kanal derinliği reaktantların ve ürünlerin hızında doğrusal bir artışa yol açmaktadır (Alizadeh ve ark., 2013).

Su ve metanol geçişini azaltan mikro gözenekli katmanlara sahip izotermal olmayan çok boyutlu doğrudan metanol yakıt hücresi modeli geliştirilmiştir. Hem anotta hem de katotta kullanılan mikro gözenekli tabakanın termal difüzyon ve faz değişimi davranışları incelenmiştir. Isı ve su yönetiminin, ısı iletkenliği ve hücre çalışma sıcaklığı ile bağlantısı olduğu bulunmuştur. Yüksek ısı iletkenlik durumunda yüksek sıcaklık farkına neden olduğu analiz edilmiştir (Jung, 2013).

Matematiksel model geliştirmek için literatürde bulunan analitik denklemler birleştirilmiştir. Bu yaklaşım, gözenekli difüzyon katmanlarında metanol ve oksijenin difüzyon katsayılarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Aynı zamanda yakıt hücresi deneysel olarak incelenmiştir. 60 °C'de 1 M metanol ve saf oksijen ile beslenen doğrudan metanol yakıt hücresinde anot ve katot için aynı gözeneklilik değer aralıkları incelenmiştir. 0,1 ile 0,9 arasında incelenen 5 değerinde analiz edilmiştir. 0,4 - 0,9 aralığında değerlerin çok farklı olmadığı gözlenmiştir. Bu da 0,4'ten yüksek değerlerde, hücre voltajıyla gözenekliliğin bağımsız olduğu tahmin edilmiştir (Wang ve ark., 2013).

Geometrik parametrelerin performansa büyük bir etkisi olduğu için bu yönde çalışmalar bulunmaktadır. Üç farklı geometriye ve genişliğe sahip serpantin akış

kanalları imal edilmiştir. Model sonuçları, daha dar genişliği sahip akış kanallarının difüzyon tabakalarının içine daha yüksek basınç ve katalizör katmanlarına daha fazla yakıt ve oksijen dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Bu etkilerin doğrudan metanol yakıt hücresi performansını arttırabileceği görülmektedir (Yu ve Zhao, 2012).

Doğrudan metanol yakıt hücresindeki ısı ve kütle taşınımının hücre performansı üzerine etkisini incelemek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Burada anodun etkilerini gözlemek için metanol buhar taşıma katmanı ve katodun etkilerini incelemek için katot su yönetimi katmanı incelenmiştir. Bu iki katmanın kalınlığının hücre performansını ve hücrede türlerin taşınmasını büyük ölçüde etkilediği ve bunların optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (He ve ark., 2012).

Akan elektrolitli doğrudan metanol yakıt hücresi iki boyutlu modellenmiştir. Farklı çalışma koşullarında hücrenin performansı incelenmiştir. Modelin sonuçları ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Yakıtın ve havanın kanal giriş hızları farklı değerlerde analiz edilmiştir. Yakıt kanalı girişindeki stokiyometrik katsayı arttıkça daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir ama daha az metanol kullanıldığı için hücrenin elektriksel verimi düşmektedir. Hava kanalı girişindeki stokiyometrik katsayı arttıkça hem güç yoğunluğu hem de elektriksel verimde artış gözlenmiştir (Colpan ve ark., 2012).

Saf metanol ile çalışan doğrudan metanol yakıt hücresi için gerekli su membran yoluyla katottan anoda difüzyon yoluyla sağlanması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada membrandan su taşıma hızının belirlenmesini sağlayan bir yöntem kullanılmıştır. Tasarım parametrelerinin ve çalışma koşullarının etkisi araştırılmıştır. Deneysel veriler, katottan anoda net bir su akışının sağlandığını göstermektedir. Ayrıca sonuçlar, anot gaz difüzyon tabakasının ve membranın inceltilmesinin yanı sıra katot gaz difüzyon tabakasının kalınlaştırılmasının katottan anoda su taşıma akışını arttırabileceğini de göstermektedir (Wu ve Zhao, 2011).

Paslanmaz çelik akım toplayıcılarına ve paslanmaz çelik ağa sahip mikro doğrudan metanol yakıt hücresinin performansı incelenmiştir. Paslanmaz çelik ağının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre paslanmaz çelik ağ, metanolün taşıma direncini arttırır, böylece metanol geçişini arttırır. Daha sonra kalınlıkları ve iç dirençleri gibi özellikleri ile beş farklı ağ çeşidinin karşılaştırılması yapılmıştır. Deney, hücre sıcaklığı 40 °C olduğunda ve metanol beslemesi 1 M, 1 mL/dk olduğunda çalıştırılmıştır. Doğrudan metanol yakıt hücresindeki paslanmaz çelik ağı açıklık oranının küçük olduğu zaman daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu da metanolün nüfuz etmesinin azaltılması ve karbondioksit kabarcıklarının uzaklaştırılmasının artması ile sonuçlanır (Zhang ve ark., 2011).

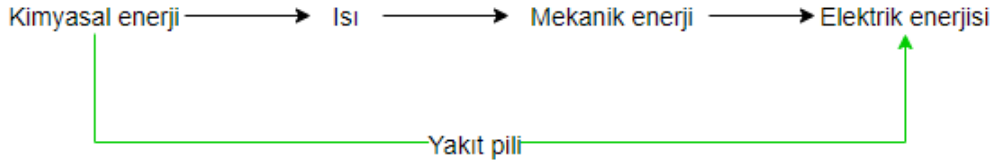
Tek boyutlu, iki fazlı doğrudan metanol yakıt hücresi modellenerek anot destek tabakasının malzeme özelliklerinin ve tasarımının performansa etkisi incelenmiştir. 200 µm ve 500 µm değerlerinde anot destek tabakası kalınlıkları, 2 M ve 5 M metanol besleme konsantrasyonlarında çalıştırılarak güç yoğunlukları elde edilmiştir. 5 M/500 µm durumu ile 2 M/200 µm durumunun benzer performans gösterdiğine ulaşılmıştır. Daha sonra anot destek tabakasının gözenekliliğinin etkisini incelemek için 0,3 ve 0,7 değerlerinde analiz edilmiştir. Anot destek tabakası gözenekliliğinin 0,3 ve metanol konsantrasyonunun 5 M olduğu değerlerde hücre performansında iyileşme gözlenmiştir (Ko ve ark., 2010).

Pasif sıvı beslemeli doğrudan metanol yakıt hücresinin metanol geçişini azaltmak için hidrofobik su yönetimi tabakası eklenerek deney yapılmıştır. Su yönetim katmanı, hem düşük su geçişine neden olmuştur hem de metanol geçişini düşürerek yakıt verimliliğini arttırmıştır. Metanol geçişinin, metanol konsantrasyonuna büyük ölçüde bağlı iken su geçişinin farklı metanol konsantrasyonları için hemen hemen aynı olduğu bulunmuştur (Xu ve ark., 2010).

## BÖLÜM 3. YAKIT PİLLERİ

### 3.1. Yakıt Pillerine Giriş

Yakıt pilleri, bir yakıtın kimyasal enerjisini oksijenle birlikte doğrudan elektrik ve ısıya aktaran yüksek verimli elektrokimyasal dönüştürücülerdir. Bu üretilen elektrik enerjisi araçlara ve elektronik cihazlara güç sağlamak da dahil olmak üzere birçok uygulama için kullanılabilir. Enerji dönüşüm aşamalarını kısaltan yakıt pilinin ve gaz türbinleri gibi geleneksel elektrik üretimi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Geleneksel elektrik üretimi ile yakıt pilinin karşılaştırılması

Yakıt pillerinin birçok avantajı bulunmaktadır. Yakıt pili teknolojisinin içten yanmalı motorlar veya gaz türbinine, buhar türbinine dayalı ısı makinası gibi çevrimlerle çalışan makinalara kıyasla daha yüksek verimlidir. Bir diğer avantajı ise ölçeklenebilir sistem olmasıdır. Yani birçok yakıt pilinin seri olarak bağlanmasıyla yakıt pili yığını oluşturarak 1W'tan 1MW'a kadar çeşitli güçlerde yakıt pilleri üretilir.

Düşük çevresel etkiye sahip olmaları yönleriyle yakıt pilleri avantajlı görünmektedir. Proton değişim membranlı yakıt pillerinde hidrojen ile beslendiği için yakıt pilinin hidrojenle elektrik üretme aşamasında su çıkmaktadır. Ama bazı yakıt pillerinde kullanılan karbon bazlı yakıt kullanıldığı için çok az miktarda karbonmonoksit, karbondioksit, azot oksit gazları ortaya çıkmaktadır. Yakıt pili yığının kendisinin

mekanik bir parçası olmadığı için sessiz çalışma özelliği vardır. Yan elemanları oluşturan yakıt pilini beslemek için kullanılan üfleyici veya pompa mekanik parçalar olduğu için biraz ses oluşmaktadır. Bu avantajlara rağmen geliştirmede bazı zorluklar vardır. Bunlardan biri, kullanılan malzemelerin pahalılığıdır. Örneğin katalizör olarak platinin kullanılması maliyeti arttırmaktadır. Platini azaltmak yönünde günümüzde çalışmalar bulunmaktadır. Yine proton değişim membranlı yakıt pili için hidrojenin üretimi, depolanması ve dağıtımıyla ilgili zorluklar vardır. Bu konuda sıvı yakıt pilleri (metanol, etanol vb.) için depolanma gibi bir sorun teşkil etmemektedir. Bu avantajları sayesinde sıvı yakıt pilleri konuda araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Bir diğer sorun ise uzun süre dayanıklılığın olmamasıdır. Burada amaçlanan performans düşüşünün zamanla en az olmasıdır. Günümüzde performans düşüşünü azaltıcı çalışmalar yapılmaktadır.

### 3.2. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pillerinde kullanılan elektrolit tipi, çalışma sıcaklığı aralığı ve kullanılan yakıt tipi yakıt pili sınıflandırmalarının temelini oluşturur.

Farklı ortamlara ve uygulamalara uyacak şekilde geliştirilmiş birçok farklı yakıt pili türü vardır. Genel olarak, iyi bir yakıt pili, yüksek güç yoğunluğuna ve verimliliğine, düşük üretim, işletme ve bakım maliyetlerine ve güvenli olma özelliklerine sahip olmalıdır (Matar, 2012).

En yaygın yakıt pili çeşitleri aşağıda verilmiştir.

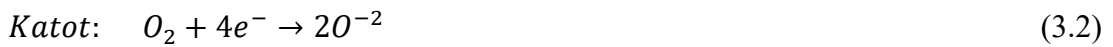
- Katı oksit yakıt pili
- Erimiş karbonat yakıt pili
- Fosforik asit yakıt pili
- Alkali yakıt pili
- Polimer elektrolit membran yakıt pili
- Doğrudan metanol yakıt pili



### 3.2.1. Katı oksit yakıt pili

Katı oksit yakıt pili, çeşitli yakıt pilleri ile karşılaştırıldığında 600 ile 1000°C arasında değişen en yüksek çalışma sıcaklığına sahiptir ve değer taşımayan malzemelerle hızlı kinetiği destekler. Katı oksit yakıt pilinin yüksek çalışma sıcaklığı malzemelerine katı gereklilikler getirir. Hidrokarbon yakıtlarından elektrik üretmek ve dönüştürücülerle entegre olmak için uygundur. Düşük maliyetli malzemelerin geliştirilmesi ve seramik yapıların düşük maliyetli imalatı araştırma konularının odak noktası olmuştur.

Bu yakıt pili tipi, uzak yerlerde bile büyük üniteler için uygun olduğu kabul edilir. Ayrıca araçlarda bile yardımcı güç üniteleri olarak uygulamalar bulmuştur. Elektrolit katı haldedir ve genellikle zirkonyum oksit bazlı sert bir seramik malzemeden yapılıdır. Yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle, pahalı katalizörler olmadan yüksek reaksiyon oranları elde edilebilir ve gazlar, örneğin doğal gaz, ayrı bir üniteye ihtiyaç duymadan doğrudan kullanılabilir veya dahili olarak yeniden düzenlenebilir. Dönüşüm verimliliği yaklaşık %60'tır. Ayrıca ek elektrik üretmek için bir buhar türbini ile entegre edilebilir. Yakıt olarak mutlaka saf hidrojen gerektirmez (Sundén, 2019). Katı oksit yakıt pili için (Denklem 3.1)'de anottaki, (Denklem 3.2)'de katottaki ve (Denklem 3.3)'te toplam reaksiyonlar gösterilmiştir.

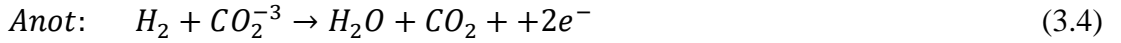


### 3.2.2. Erimiş karbonat yakıt pili

Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma sıcaklığı aralığı çok dar olup yaklaşık 650°C civarındadır. Karbonat elektrolitinin yeterli iletkenliğini elde etmek için yüksek çalışma sıcaklığına ihtiyaç duyulur. Bu yüksek sıcaklık sayesinde pilinin

elektrokimyasal oksidasyon ve redüksiyon işlemleri için soy metal katalizörlerine gerek duyulmamaktadır. Çalışma sıcaklığı daha fazla yakıt türünün ve daha ucuz katalizörlerin daha yüksek verimliliğini ve kullanım esnekliğini sağlar. Yakıt olarak hidrojen, basit karbonlar ve basit alkoller kullanılabilir (Sabet-Sharghi, 2011).

Bu tür yakıt pillerinde elektrolit olarak lityum alüminyum oksit (LiAlO<sub>2</sub>) seramik matrisinde tutulan sodyum, potasyum veya magnezyum karbonatlarıdır. Bu elektrolitler ucuz nikel bazlı katalizörler kullandıkları için ilgi çekici bir yakıt pili seçeneğidir. Katı oksit yakıt pilleri gibi, hidrokarbonları yeniden biçimlendirebilir ve böylece dönüştürülen hidrojeni yakıt olarak kullanabilirler. Erimiş karbonat yakıt pilleri için (Denklem 3.4)'te anottaki, (Denklem 3.5)'te katottaki ve (Denklem 3.6)'da toplam reaksiyonlar gösterilmiştir.



### 3.2.3. Fosforik asit yakıt pili

Bu yakıt pili tipi bir süredir ticari olarak faaliyet göstermektedir. Örneğin, hastaneler, oteller, ofisler, havaalanları ve okullar için uygulamalar yapılmaktadır. Dönüşüm verimliliği nispeten düşüktür, yaklaşık %40-50'dir. Çalışma sıcaklığı 150-200 °C aralığındadır. Elektrolit bir fosfor asididir. Bu yakıt pili tipi, özellikle yüksek sıcaklıklarda hidrojen yakıtının eşlik ettiği kirliliğe karşı sabır gösterir. Düşük sıcaklıkta, karbonmonoksit katalizör üzerindeki platin tabakasına zarar verebilir. Bu tip yakıt pili üniteleri genellikle büyük ve ağırdır, ancak teknoloji olgun olarak kabul edilir. Fosforik asit yakıt pili için (Denklem 3.7)'de anottaki, (Denklem 3.8)'de katottaki ve (Denklem 3.9)'da toplam reaksiyonlar gösterilmiştir.



### 3.2.4. Alkali yakıt pili

Bu yakıt pilleri uzay araçlarında astronotlar için içilebilir su üretimi ve elektrik ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanılmıştır. Elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi ve katalizör olarak çok çeşitli değerli olmayan metaller (Ni, metal oksitler) kullanılır. Bu tür yakıt pilleri %70 elektrik verimi ile çalışmaktadır. Bu yüksek verimliliğe rağmen alkali yakıt pilleri karbondioksit ile kolayca zehirlenebilir ve bu yüzden sadece saf reaktifler kullanılmalıdır. Bir başka engel ise sıvı elektrolit kullanımının yakıt pilini sızıntıya duyarlı hale getirmesidir. Bu zorlukları ortadan kaldırmak için günümüzde çalışmalar yapılmaktadır. Alkali yakıt pili için (Denklem 3.10)'da anottaki, (Denklem 3.11)'de katottaki ve (Denklem 3.12)'de toplam reaksiyonlar gösterilmiştir.



### 3.2.5. Proton değişim membranlı yakıt pili

Kullanılan malzemelerin yapısı nedeniyle, yaygın olarak proton değişim membranı (PEM) yakıt pili olarak da adlandırılan polimer elektrolit yakıt pili, tipik olarak 60-80 °C aralığında 100 °C'den daha düşük sıcaklıklarda çalışır. PEM yakıt pilinin açık devre voltajı (1,23 V), herhangi bir yakıt pili için en yüksek açık devre voltajdır, ancak pratik çalışma sırasında hiçbir zaman gerçekleşmemiştir. Bunun sebebi,

elektrotların dengede olmamasıdır. En sık gözlenen 1,1 V'tur. Pratik çalışma voltajı, karbon içeren korozyon reaksiyonlarını önlemek için çok daha düşüktür.

Bir proton değişim membranlı yakıt pilinin düşük çalışma sıcaklığının hem avantajları hem de dezavantajları vardır. Düşük sıcaklıkta çalışma avantajlıdır, çünkü pil, özellikle saf hidrojen yakıtı mevcut olduğunda, ortam koşullarından hızlı bir şekilde başlayabilir. Karbonmonoksit içeren yakıtın reforme edilmiş metan veya diğer hidrokarbonlardan akması bir dezavantajdır, çünkü karbon platin katalizör bölgelerine saldırır veya zehirlenir, katalitik aktiviteyi azaltır ve böylece pil performansı azalır (Williams, 2011).

Elektrolit, protonların hareketli olduğu katı bir polimerdir. Bu, yerdeki araçlar için güç kaynağı olarak tanıtılan yakıt pili türüdür. Düşük sıcaklıklarda iyi bir başlangıç davranışına sahiptir ve küçük ve kompakttır. Ayrıca taşınabilir ünitelerde ve büyük sabit enerji santrallerinde güç kaynağı olarak kabul edilir. Bir avantaj, elektrolitin bir polimerin ince bir membranı şeklinde katı bir faz olmasıdır. Çevreleyen katalizör platinden yapılmıştır. Bu pil hidrojen yakıtının saflığına duyarlıdır. İlk insanlı uzay aracında PEM yakıt pilleri kullanıldı. Platin katalizörü çok pahalıdır, ancak daha sonra nikel-kalay katalizörleri keşfedilmiştir. Bundan dolayı, yakıt pilleri uzay aracındaki piller için olası bir yedek olabilir.

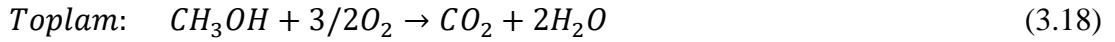
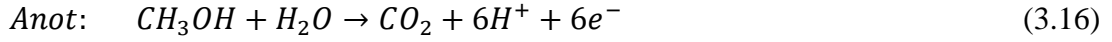
Günümüzde yakıt pilli araçlarda genellikle PEM türü yakıt pili kullanılmaktadır. Bunun bir nedeni, yüksek reaksiyon hızlarının olmasıdır. Yüksek hızlara ulaşıldığında güç yoğunluğu artmaktadır. Diğer bir nedeni ise düşük sıcaklıklarda çalışabilme özelliğinin olmasıdır. Bunun önemi yalıtımın kolay olması ve bu sıcaklığa ulaşmak için geçen sürenin az olmasıdır. Proton değişim membranlı yakıt pili için (Denklem 3.13)'te anottaki, (Denklem 3.14)'te katottaki ve (Denklem 3.15)'te toplam reaksiyonlar gösterilmiştir.





### 3.2.6. Doğrudan metanol yakıt pili

Doğrudan metanol yakıt pili (DMYH), sıvı metanolün kimyasal enerjisini düşük sıcaklıklarda çalışırken elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Çoğu yakıt pillerinde sisteme beslenen ana yakıt hidrojenidir, bu da yanıcılık ve depolama problemi oluşturur. Bu nedenle, son yıllarda araştırmalar doğrudan yakıtın elektrokimyasal oksidasyonu ile çalışan alkol yakıt pillerine yönelmiştir. Metanol depolama ve kullanım açısından umut verici özellikler sergiler (Schultz ve ark., 2001). PEM yakıt pilindeki gibi ayrı bir dönüştürücüye ihtiyaç yoktur. Bu yakıt pilleri taşınabilir bilgisayarlarda ve cep telefonlarında uygulanabilir. Doğrudan metanol yakıt pili için (Denklem 3.16)'da anottaki, (Denklem 3.17)'de katottaki ve (Denklem 3.18)'de toplam reaksiyonlar gösterilmiştir.



Bu yakıt pili çeşitlerinin genel özellikleri Tablo 3.1. ve Tablo 3.2.'de özet şeklinde verilmiştir.

Tablo 3.1. Yakıt pili çeşitlerinin özelliklerinin özeti (Mekhilef ve ark., 2012)

Yakıt pili türü	Alkali yakıt pili	Fosforik asit yakıt pili	Katı oksit yakıt pili
Yakıt	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>
Çalışma Sıcaklığı	90-100 °C	150-200 °C	600-1000 °C
Elektrolit	KOH sulu çözeltisi	Silisyum karbür matrisinde sıvı fosforik asit	Zirkonya üzerine tutturulmuş yittria
Yük Taşıyıcı	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	O <sup>-2</sup>

Tablo 3.1. (Devamı)

Bileşenler	Karbon bazlı	Karbon bazlı	Seramik bazlı
Verimlilik (%)	60	40	35-43
Avantajlar	- Çeşitli katalizörler kullanılabilir. - Basit tasarım - Yüksek katot performansı	- Yakıt kirliliğine karşı yüksek tolerans - İyi termal entegrasyon	- Yakıt esnekliği - Çeşitli katalizörler kullanılabilir. - İyi termal entegrasyon - Katı elektrolit
Dezavantajlar	- CO <sub>2</sub> 'in havadan uzaklaştırılması	- Değerli katalizör - Yavaş devreye girme	- Yavaş devreye girme - Bileşenlerin yüksek sıcaklıkta parçalanması

Tablo 3.2. Yakıt pili çeşitlerinin özelliklerinin özeti 2 (Mekhilef ve ark., 2012)

Yakıt pili türü	Erimiş karbonat yakıt pili	Proton değişim membranlı yakıt pili	Doğrudan metanol yakıt pili
Yakıt	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH
Çalışma Sıcaklığı	600-700 °C	50-100 °C	60-200 °C
Elektrolit	Lityum ve/veya potasyum karbonatların sıvı çözeltisi	Polimer membran	Polimer membran
Yük Taşıyıcı	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
Bileşenler	Paslanmaz çelik esaslı	Karbon bazlı	Karbon bazlı
Verimlilik	45-47	53-58	40
Avantajlar	- Yakıt esnekliği - Çeşitli katalizörler kullanılabilir. - CO/CO <sub>2</sub> toleransı	- Düşük sıcaklık - Hızlı devreye girme - Uzun ömür - Yüksek enerji yoğunluğu	- Dönüştürücü olmadan basit tasarım ve düşük maliyetli
Dezavantajlar	- Yüksek sıcaklıklarda korozyon - Bileşenlerin yüksek sıcaklıkta parçalanması	- Değerli katalizör - Yakıt kirliliğine duyarlı	- Düşük verimlilik - Değerli katalizör

### 3.3. Yakıt Pili Uygulamaları

Yakıt pilleri uygulamaları taşınabilir, ulaşım ve sabit uygulamalar olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. Yakıt pilinin çeşidi olası uygulama alanlarını belirler. Tablo

3.3.'te her yakıt pili çeşidi için güç aralıklarına göre yaygın uygulamaları özetlenmektedir. Yakıt pilleri, yakıt pili çeşidine bağlı olarak geniş bir güç aralığı üretebilir. Doğrudan metanol yakıt pili ve proton değişim membranlı yakıt pili cep telefonları ve bilgisayarlar gibi küçük bir güç aralığına sahip (1-100 W) taşınabilir elektronik cihazlar için kullanılabilir. Proton değişim membranlı yakıt pili, alkali yakıt pili, katı oksit yakıt pili ve fosforik asit yakıt pili dahil olmak üzere çeşitli yakıt pilleri, ulaşım (yakıt pili ile çalışan otomobiller ve otobüsler) ve askeri uygulamalar gibi orta güç aralığına sahip (1-100 kW) uygulamalarda kullanılabilir. Geniş güç aralığına sahip (1-10 MW) sabit güç uygulamaları için erimiş karbon yakıt pili, katı oksit yakıt pili, fosforik asit yakıt pili büyük miktarda güç sağlar.

Tablo 3.3. Yakıt pili çeşitlerinin güç aralıklarına göre yaygın uygulamalar (Özdinçer, 2017)

Yaygın uygulamalar	Taşınabilir (elektronik ekipman)			Ulaşım (arabalar, otobüsler), askeri			Sabit (dağıtılmış güç üretimi)	
	1	10	100	1 k	10 k	100 k	1 M	10 M
Ana avantajları	Pillerden daha yüksek enerji yoğunluğu, daha hızlı şarj			Sıfır emisyon potansiyeli, daha yüksek verimlilik			Daha yüksek verimlilik, daha az kirlilik, sessiz	
Güç (Watt)	1	10	100	1 k	10 k	100 k	1 M	10 M
Farklı yakıt pili çeşitlerinin uygulama aralığı	DMFC			AFC			MCFC	
	PEMFC			SOFC			PAFC	

### 3.4. Yakıt Pili Bileşenleri

Yakıt pilleri bir araya getirilmiş birkaç bileşenden oluşur.

- Proton değişim membranı (elektrolit)
- Katalizör tabakası
- Gaz difüzyon tabakası
- Akış alanı plakası (bipolar plaka)
- Conta

### 3.4.1. Proton değişim membranı (elektrolit)

Membran, yakıt pilinin kalbidir. Günümüzde en çok perflorosülfonik asit türü membran kullanılmaktadır. Ticari olarak bilinen adı ise Nafion'dur. Bu membranın en sık kullanılan membran olma nedeni mükemmel proton iletkenliği sergilemesidir. Nafion farklı kalınlıklarda satılmaktadır. Kalınlığına göre numaralandırılmıştır. Nafion 112, 115, 117 gibi isimlendirilmiş membran kalınlıkları mevcuttur. Bunlar arasında Nafion 112 en ince ve Nafion 115 ve Nafion 117 ise en kalın olanlarıdır. Nafion türünün seçimi yakıt pilinin çeşidine bağlıdır. Örneğin Nafion 117, doğrudan metanol yakıt pili için metanol geçişini en aza indirmek için kullanılır. Membranın sağlaması gereken işlevler bulunmaktadır. Bunlardan biri, membran yüksek proton iletkenliğine sahip olmalıdır. Anotta oluşan protonlar membrandan geçerek katoda ulaşmasını sağlar. Bu işlemler tamamen sulu (nemli) ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir. Bir diğeri ise elektronların membrandan geçişine izin verilmemesi istenmektedir ve bunun için elektriksel olarak yalıtımlı olmalıdır. PEM yakıt pilleri için gereken bir özellik olarak hidrojen ve oksijenin fiziksel olarak temas etmesini engellemelidir. Aynı şekilde diğer yakıt pilleri için bazı kimyasal türlerin geçişini ortadan kaldırmalıdır. Son olarak çalışma koşulları (sıcaklık, basınç vb.) altında mekanik, kimyasal, ısıl olarak dayanıklı olmalıdır (Barbir, 2005a).

### 3.4.2. Katalizör tabakası

Katalizör tabakası reaksiyonun gerçekleştiği yerdir. Reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olanlar reaktant (örneğin hidrojen ve oksijen), katalizör yani bir metal (platin), iyonomer (proton iletici) ve elektron ileticilerden (karbon) oluşmaktadır. Katalizör tabakasından beklenen özellikler vardır. Bunlardan biri gözenekliliğinin yüksek (%40 - %70) olmasıdır. Bunun istenmesinin amacı reaktantların rahat girip, ürünlerin rahat çıkması içindir. PEM yakıt pilleri için en çok kullanılan pahalı metal olan platinden oluşturulmuş katalizörlerdir. Günümüzde bu platin miktarını azaltmak için Pt-Co alaşımı kullanılmaktadır. Karbon destekli platin (C/Pt), platin siyahı (Pt/B) ve platin rutenyum (Pt/Ru) yakıt pillerinde en çok kullanılan katalizör çeşitleridir. Doğrudan metanol yakıt pili için anotta Pt/Ru, katotta Pt/B veya C/Pt



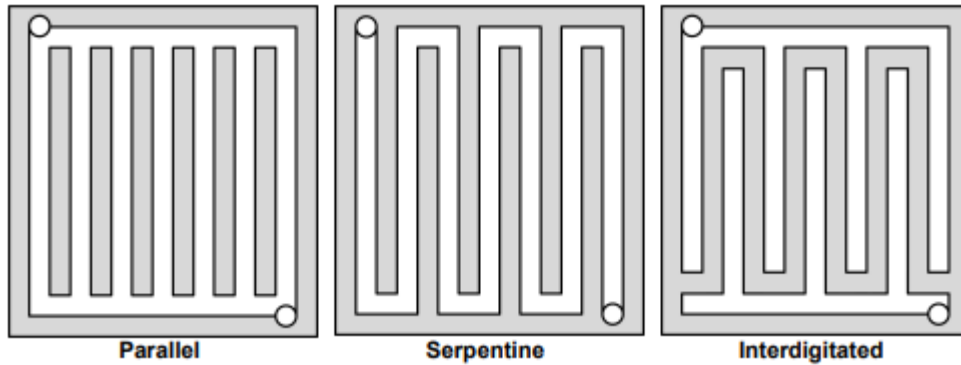
kullanılır. Rutenyum, karbonmonoksiti karbondioksit'e dönüştürerek karbonmonoksit'in platin üzerindeki zehirlenme etkilerini en aza indirmek için kullanılır (Matar, 2012).

### 3.4.3. Gaz difüzyon tabakası

Gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ile akış alanı tabakası arasında bulunan gözenekli bir tabakadır. Literatürde bazen destek tabakası olarak adlandırılır. Akış alanı tabakasından giren reaktantların katalizör tabakasına ulaşması için difüzyon, taşınım gibi mekanizmalarla taşınmasını sağlar. Su ve karbondioksit gibi ürünlerin uzaklaştırılmasına izin verir. Gaz difüzyon tabakasından elektronlarında geçmesi gerektiği için bu tabakanın iyi elektronik iletkenliğinin olması gerekmektedir. Günümüzde en çok kullanılan malzemeler karbon kağıdı veya karbon kumaşdır. Kalınlıkları 100-250 µm aralığındadır. Bu malzemelerin üzerine hidrofobik ve hidrofilik mikro tabakalar eklenerek su geçişinin optimizasyonu sağlanabilir. Çünkü su geçişi yakıt pilleri için önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır (Pinto ve ark., 2018).

### 3.4.4. Akış alanı plakası (bipolar plaka)

Akış alanı plakası farklı tasarımlarda olmaktadır. Bu tasarımların serpantin, paralel, paralel ve serpantin, birbirine geçmiş (interdigitated), ağ, spiral, sünger olarak adlandırılan çeşitleri bulunmaktadır. Bu tasarımlardaki amaç reaktantların katalizör tabakasına ulaşmasında veya ürünlerin uzaklaştırılmasında homojen dağılımı sağlamaktır. Aynı zamanda oluşan fazla suyun katotta taşma problemi yaratmadan katottan hızlıca uzaklaşmasını sağlamaktır. Yani kısaca özetlersek iyi tasarlanmış bir akış alanı plakası reaktantları eşit olarak dağıtmalı, akış yolu boyunca basınç düşüşünü en aza indirmeli ve pillerdeki taşma problemini en aza indirmek için suyu etkili bir şekilde uzaklaştırmalıdır. Günümüzde kullanılan malzemeler elektrik iletkenliği yüksek olan grafit veya paslanmaz çeliktir. Tasarımlar arasında en çok kullanılanları Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi paralel, serpantin ve birbirine geçmiş (interdigitated) olan çeşitleridir.



Şekil 3.2. Akış alanı plakası çeşitleri (Matar, 2012)

### 3.4.5. Conta

Contanın amacı sızdırmazlığı sağlamaktır. Farklı contalama metotları mevcut olmasına rağmen günümüzde kullanılanlardan biri membranın elektrotlara göre biraz daha büyük kesilip contanında elektrodun etrafında membran büyüklüğünde yerleştirilmesidir.

### 3.5. Yakıt Hücresinin Termodinamiği

Enerji dönüşüm cihazı olan yakıt hücresinin termodinamik analizi, kimyasal enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü anlamak için gereklidir. Bir yakıt hücresinin enerjisi Gibbs serbest enerjisi ile tanımlanır. Gibbs serbest enerjisi; hücrenin dışında gerçekleşen elektrik işi için gerekli olan enerjidir. Bu elektrik işi, elektronların dış bir devre boyunca hareket etmesini içerir. Yakıt hücresindeki maksimum elektrik işi ( $W_{el}$ ) sabit sıcaklık ve basınçta hücredeki elektrokimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerji değişimine eşittir ve (Denklem 3.19)'da belirtilmiştir.

$$W_{el} = \Delta G \quad (3.19)$$

Sıcaklığın 25°C, basıncın 1 atm olduğu koşullarda; Gibbs serbest enerjisi ve ideal hücre potansiyeli arasındaki ilişki (Denklem 3.20)'de verildiği gibidir.

$$\Delta G^\circ = -n F E^\circ \quad (3.20)$$

Bu denklemdeki  $n$  elektron sayısını,  $F$  Faraday sabitini (96485 C/mol) ve  $E^\circ$  ideal hücre potansiyelini göstermektedir.

(Denklem 3.21)'de belirtildiği gibi Gibbs serbest enerjisi ürünlerin ve reaktantların Gibbs serbest enerji oluşumlarından elde edilebilir.

$$\Delta G^\circ = G^\circ_{\text{ürünler}} - G^\circ_{\text{reaktantlar}} \quad (3.21)$$

Bu denklem; proton değişim membranlı yakıt hücresi için toplam reaksiyonu gösteren (Denklem 3.15) uygulandığında, ideal hücre potansiyeli değerinin 1,229 V olduğu (Denklem 3.22)'deki hesaplama ile elde edildiği görülmektedir. Bu değer yaklaşık olarak 1,23 V olarak alınır (Barbir, 2005b).

$$E^\circ = -\frac{\Delta G^\circ}{n F} = -\frac{-237,34 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{2 \cdot 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 1,229 \text{ V} \quad (3.22)$$

Doğrudan metanol yakıt hücresi için hesaplandığında ise ideal hücre potansiyelinin 1,213 V olduğu (Denklem 3.23) ile bulunmuştur.

$$E^\circ = -\frac{\Delta G^\circ}{n F} = -\frac{-702 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{6 \cdot 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 1,213 \text{ V} \quad (3.23)$$

### 3.6. Yakıt Hücresi Performansı

Yakıt hücresinin geliştirilmesinde, yakıt hücresinin performansının değerlendirilmesi için polarizasyon eğrisi ve benzeri yöntemler kullanılmaktadır. Polarizasyon eğrisi yakıt hücresinin performansını gösteren en önemli eğridir. Şekil 3.3. voltajın akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak gösterildiği bir yakıt hücresinin polarizasyon eğrisini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi x-ekseninde akım yoğunluğunun y-

ekseninde hücre voltajının olduğu eğridir. Bu eğri çalışma parametrelerine, membran elektron grubuna ve akış alanı tasarımına bağlıdır ve yakıt hücresi boyutlandırılırken ve tasarlanırken kullanılmaktadır. Polarizasyon eğrisinden elde edilebilen güç yoğunluğu eğrisi akım yoğunluğu ve voltajın çarpımı ile bulunur.

Bir hücrenin herhangi bir kayıp olmadan elde edebileceği en yüksek voltaj tersinir hücre potansiyelidir. Yani denge potansiyeli olarak bilinen Nernst voltajı yakıt hücresinin teorik olarak ulaşabileceği maksimum voltajdır. Termodinamiksel olarak hesaplanabilmesi için (Denklem 3.24) kullanılır (Yilanci ve ark., 2008).

$$V_{tersinir} = -\frac{\Delta G^\circ}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln \left\{ \frac{P_{CH_3OH} \cdot (P_{O_2})^{1,5}}{P_{CO_2} \cdot (P_{H_2O})^2} \right\} \quad (3.24)$$

Bu denklemde anot ve katottaki ürünler ile reaktantların kısmi basınçları hesaba katılmıştır.  $P_{CH_3OH}$  anottaki metanolün kısmi basıncının bar cinsinden değerini belirtmektedir.  $P_{H_2O}$  katottaki suyun kısmi basıncını gösterir ve sıvı su olduğunda 1 bar değeri alınır. Aynı şekilde  $P_{O_2}$  katottaki oksijenin kısmi basıncını temsil etmektedir. R, n, F değerleri ise sırasıyla ideal gaz sabitini (8,314 J/mol K), elektron sayısını, Faraday sabitini (96485 C/mol) göstermektedir. Metanol ve oksijen reaksiyonun potansiyelini gösteren (Denklem 3.23)'te hesaplanan değer eklenerek Nernst denklemi oluşturulur.

Gerçekte yakıt hücresi hesaplanan bu voltaja ulaşmamaktadır. Ulaşabildiği en yüksek voltaja açık devre voltajı adı verilmektedir. Yani akım yoğunluğunun sıfır olduğu noktadaki voltajın değeridir. Hücrenin voltajı; hücrenin iç direnci, yakıtın katot tarafına geçişi, elektronların membrandan geçişi gibi çeşitli dengesizlik etkilerinden dolayı oldukça hızlı bir şekilde düşer. Bu voltaj kayıpları aşırı potansiyel (v) olarak adlandırılır. Bu voltaj kayıplarına neden olan anot ve katot katalizöründe aktivasyon kayıpları ( $v_{act}$ ), elektrolitte ohmik kayıplar ( $v_{ohmik}$ ) ve elektrotlarda kütle geçişi ( $v_{con}$ ) sınırlamalarıdır. Bu kayıpların yakıt hücresinin polarizasyonu üzerindeki etkileri Şekil 3.3.'te gösterilmiştir. (Denklem 3.25), tersinmez voltaj kayıplarını

( $V_{tersinmez}$ ) gösterirken, (Denklem 3.26) ise hücrenin çalışma voltajını ( $V(i)$ ) göstermektedir.

$$V_{tersinmez} = v_{act} + v_{ohmik} + v_{con} \quad (3.25)$$

$$V(i) = E^{\circ} - V_{tersinmez} \quad (3.26)$$

Akım çekmeye başladıktan sonra voltaj önce hızla düşmeye başlar. Bu bölgeye “aktivasyon polarizasyon bölgesi” adı verilmektedir. Aktivasyon polarizasyonu, belirli sıcaklıkta katalizör etkinliğini ölçen ve katalizör yüzeyi üzerindeki elektrokimyasal reaksiyonu başlatmak için gerekli voltajdaki kayıplardır. Aktivasyon kayıplarını hesaplayan Tafel denklemi (Denklem 3.27) ifade edilmiştir.

$$v_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (3.27)$$

Burada  $\alpha$  yük transfer katsayısını,  $i$  akım yoğunluğunu,  $i_0$  reaksiyon değişim akım yoğunluğu ifade etmektedir. Reaksiyon değişim akım yoğunluğu ( $i_0$ ) dengedeki reaksiyonun elektrot aktivitesini ölçer. Anot ve katot aktivasyon aşırı potansiyeli için (Denklem 3.28)’de gösterildiği gibi Butler-Volmer denklemi ile ifade edilebilir.

$$v_{act-anot} + v_{act-katot} = \frac{RT}{n\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) |_{anot} + \frac{RT}{n\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) |_{katot} \quad (3.28)$$

Daha sonra akım artırılarak orta akım bölgesine gelinir. Bu bölgeye ise “ohmik polarizasyon bölgesi” adı verilmektedir. Proton ve elektron iletkenlerinin yük akışına karşı direnciden dolayı hücre voltajında kayıp meydana gelir. Buna ohmik polarizasyon denir. Elektrolitin elektriksel direnci, katalizör tabakası, gaz difüzyon tabakası, reaktant dağıtıcı plakalar, arayüzey temasları ve uç bağlantıları ohmik polarizasyonuna neden olur. Ohmik polarizasyonuna bağlı voltaj kaybına ohmik kayıp denir. Ohm yasasına göre ohmik polarizasyon (Denklem 3.29) ve (Denklem 3.30)’da tanımlanmıştır (Sabet-Sharghi, 2011).

$$v_{ohmik} = IR_{ohmik} = I(R_{elek} + R_{iyonik}) \quad (3.29)$$

$$v_{ohmik} = j(A_{hücre}R_{ohmik}) \quad (3.30)$$

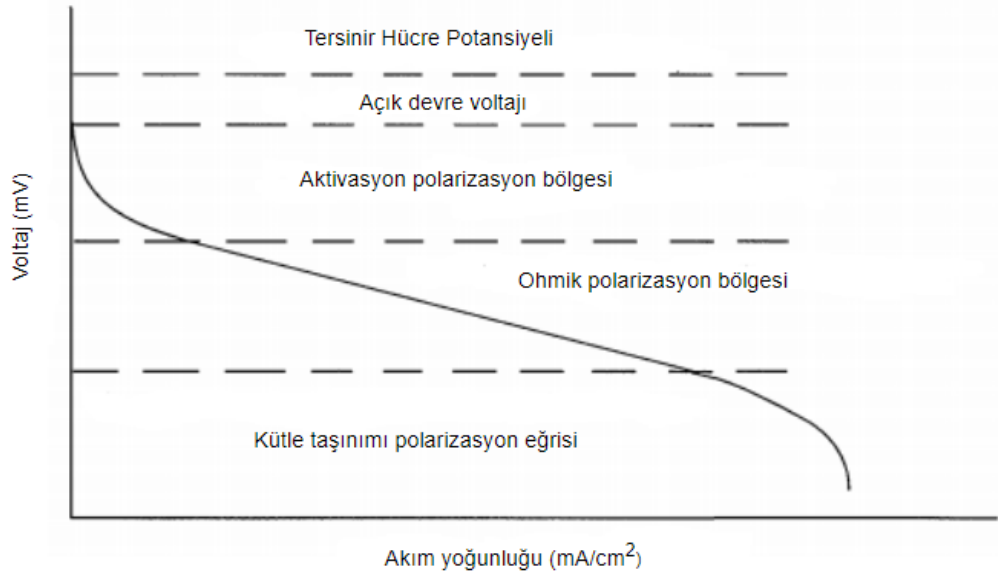
Son bölge ise “kütle taşınımı polarizasyon bölgesi” olarak isimlendirilir. Akım yoğunluğunun çok fazla arttırıldığı bu bölgede voltaj kaybı hızla düşmektedir. Yakıt hücresinin performansı, katalizör içindeki reaktant ve ürün konsantrasyonu ile belirlendiği için reaktant eksikliği nedeniyle performans kaybını önlemek amacıyla ürünlerin uygun bir şekilde çıkarılması önemlidir. Yakıt hücresi elektrotlarının ve akış yapılarının kütle taşınımını optimize etmek, konsantrasyon kaybının en aza indirgenmesine neden olur. Reaktant dağıtıcı kanallardaki kütle taşınımında konveksiyon hakimdir. Gaz difüzyon tabakalarındaki kütle taşınımında difüzyon hakimdir. Bir yakıt hücresindeki konsantrasyon kayıpları (Denklem 3.31) ve (Denklem 3.32) kullanılarak hesaplanabilir.

$$v_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_0}{C_i} \quad (3.31)$$

Burada  $C_i$  gaz difüzyon tabakası ile katalizör arayüzeyindeki reaktant konsantrasyonunu,  $C_0$  ise gerçek reaktant konsantrasyonunu temsil etmektedir.

$$v_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{I_L}{I_L - 1} \right) \quad (3.32)$$

Burada ise  $I_L$  sınırlayıcı akım ifade eder.



Şekil 3.3. Yakıt hücresinin genel polarizasyon eğrisi (Sabet-Sharghi, 2011)

Doğrudan metanol yakıt hücresinin teorik verimi ( $\eta_{hücre}$ ); (Denklem 3.33)'te gösterildiği gibi gerçek hücre potansiyelin ( $V_{hücre}$ ) termodinamik potansiyele ( $E^\circ$ ) oranıdır (Abdulkareem ve ark., 2012).

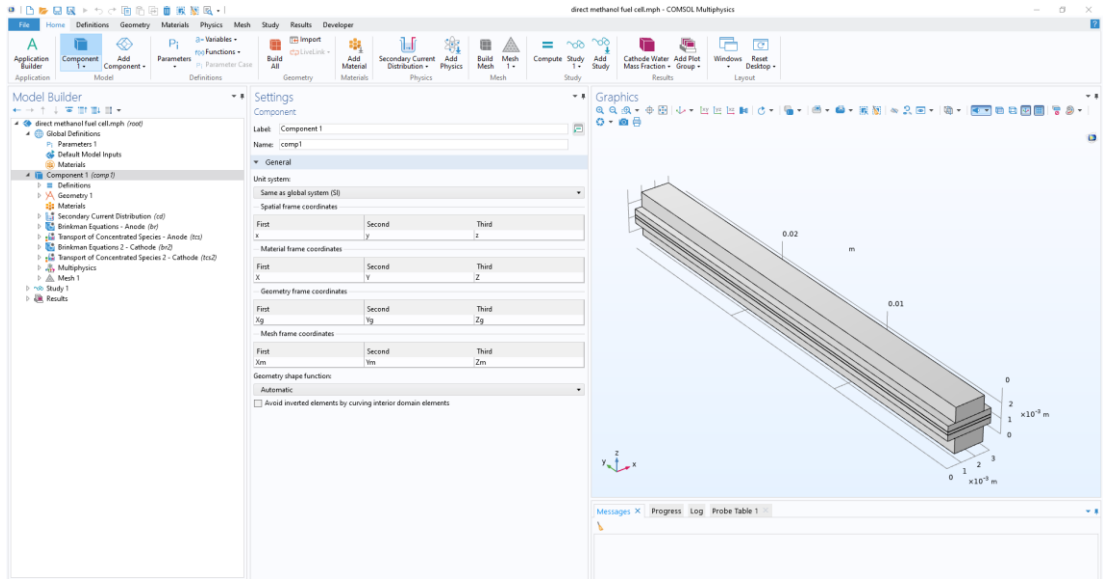
$$\eta_{hücre} = \frac{V_{hücre}}{E^\circ} \quad (3.33)$$

### 3.7. Yakıt Olarak Metanol

Metanol atmosferik basınçta kaynama sıcaklığı 64,7 °C olan sıvı hidrokarbondur. Sıvı hidrojen 9,36 MJ/L enerji yoğunluğuna sahip iken metanol yaklaşık 18 MJ/L volümetrik enerji yoğunluğuna sahiptir. Yüksek enerji yoğunluğunun yanı sıra kolay depolanması ve kullanılması, mobil uygulamalar için metanolün en önemli avantajlarıdır (Sabet-Sharghi, 2011). Metanolün kullanıma elverişli bir yakıt olmasının bir diğer nedeni, alkoller arasında en yüksek hidrojen-karbon oranına sahip olmasıdır. Bu sayede en az miktarda karbondioksit üretilirken, en yüksek enerji üretilir. Metanol ayrıca su ile karıştırılabilir ve böylece farklı konsantrasyonlarda metanol yakıt hücresine beslenebilmektedir (Zhang, 2006).

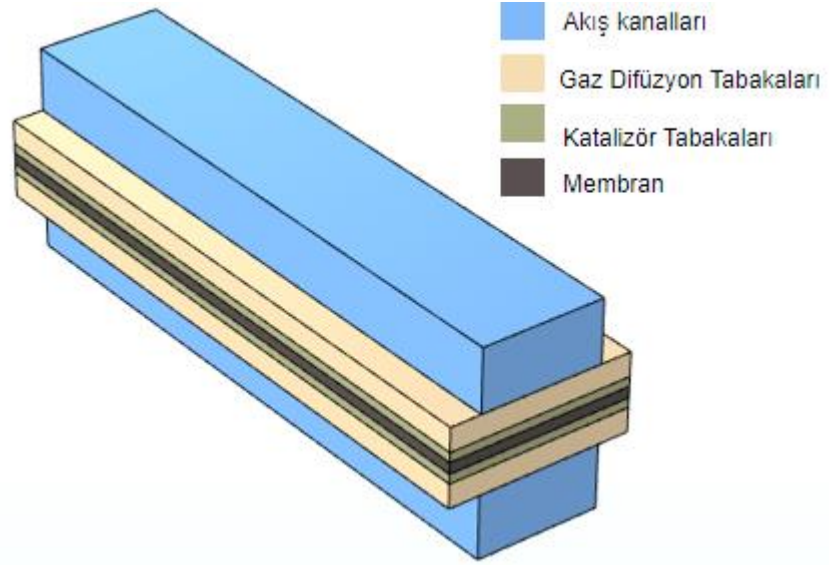
## BÖLÜM 4. DOĞRUDAN METANOL YAKIT HÜCRESİNİN MODELLENMESİ

Doğrudan metanol yakıt hücresi parametrelerinin performansa etkisini incelemek için üç boyutlu, tek fazlı, çok bileşenli bir yakıt hücresi modellemesi için sonlu elemanlar analizi ile çözüm yapan simülasyon yazılımı olan COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Şekil 4.1.'de COMSOL kullanıcı arayüzü ve Şekil 4.2.'de modelin şematik gösterimi gösterilmektedir.



Şekil 4.1. COMSOL Multiphysics kullanıcı arayüzü

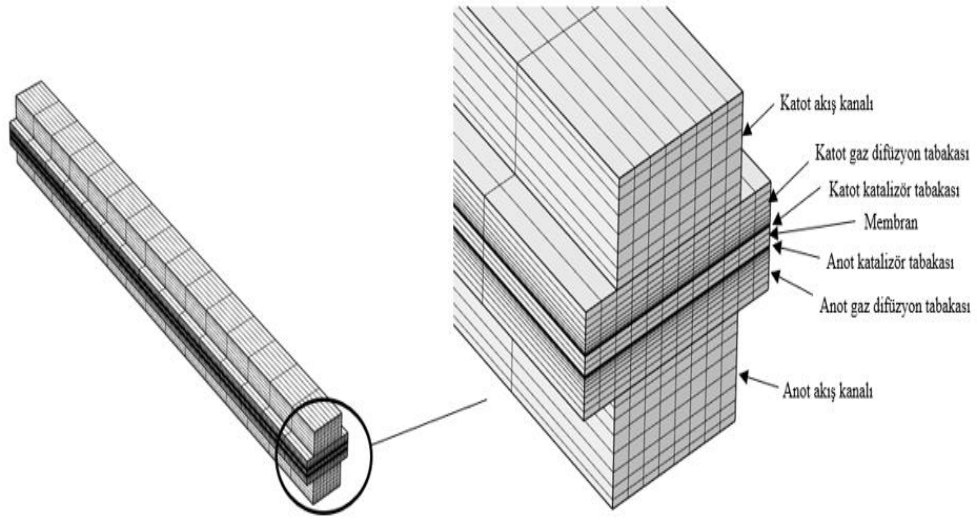




Şekil 4.2. Üç boyutlu modelin şematik gösterimi

#### 4.1. Geometri

COMSOL, modelleme aşamasında bir, iki ve üç boyutlu geometriler oluşturmak için bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) aracı sağlar. Geometri; üç boyutlu katı modellemede katı nesnelere kullanılarak, iki boyutlu sınır modellemede ise sınırlarını oluşturan çizgiler kullanılarak oluşturulur. Ayrıca, AutoCAD ve SolidWorks gibi diğer CAD yazılım paketlerinde çizilen mevcut geometrileri içe aktarma seçeneğine sahiptir. Şekil 4.3.'te modellenen üç boyutlu doğrudan metanol yakıt hücresinin geometrisi gösterilmektedir. Modelleme alanı anot ve katot akış kanallarından, gaz difüzyon tabakalarından, katalizör tabakalarından ve elektrolitten oluşmaktadır. Anot tarafında, akış kanalı içerisinde geçen nemli metanol daha sonra gözenekli gaz difüzyon tabakasında yayılarak katalizör tabakasına ulaşır. Katalizör tabakasında elektrokimyasal reaksiyon (Denklem 3.16)'da gösterildiği gibi gerçekleşir. Protonlar, su ve metanol geçişi membran boyunca aktarılır. Katot tarafında, akış kanalı içerisinde oksijen geçer ve daha sonra difüzyon ve taşınım yoluyla reaksiyon alanı olan katalizöre geçer. Burada oksijen anottan gelen protonlarla ve dış devreden gelen elektronlarla reaksiyona girer. Bu olayların sonucunda (Denklem 3.17)'deki gibi su oluşturulur.



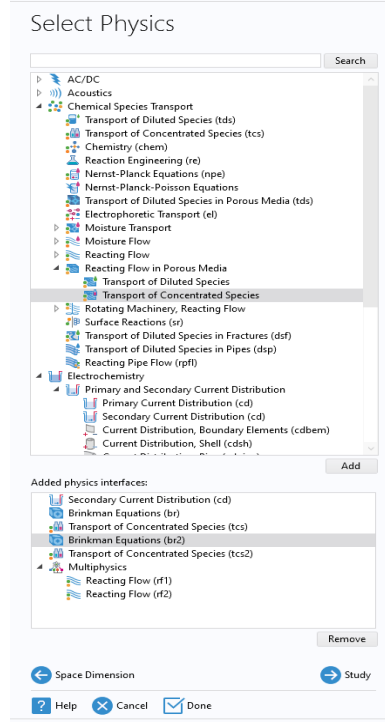
Şekil 4.3. Modelin ağ yapısında bileşenlerin gösterimi

Modelin geliştirilmesinde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Akış laminer, tam gelişmiş ve sıkıştırılamazdır.
- Sürekli rejim koşullarında çalışmaktadır.
- Süreç izotermaldir.
- Metanol anot tarafına ve membran bölgesinde yayılabilir.
- Tek fazlı varsayılmıştır.

## 4.2. Fizik

“Secondary Current Distribution”, “Transport of Concentrated Species” ve “Brinkman Equations” fizik arayüzleri yakıt hücresi simülasyonunun temelini oluşturur. Şekil 4.4.’te programda kullanılan fiziklerin seçimi ve Tablo 4.1.’de bilinmeyen değişkenler gösterilmektedir.



Şekil 4.4. COMSOL Multiphysics programında modelleme için kullanılan fizikler

“Secondary Current Distribution” fizik arayüzü “Electrochemistry” model fiziğinin altında bulunmaktadır. Bu arayüz yakıtın elektrokimyasal kinetiğini modellemek için kullanılır. Ohm yasası; gaz difüzyon tabakalarındaki ve katalizör tabakalarındaki elektrot potansiyelini ( $\phi_s$ ), katalizör tabakalarındaki ve membrandaki elektrolit potansiyelini ( $\phi_l$ ) çözmek için kullanılır. Sınır koşulları anotta  $\phi_s = 0$  ve katot tabakasında  $\phi_s$  hücre voltajı olarak ayarlanır. Dış sınırların geri kalanı elektriksel olarak yalıtılmıştır. Ohm yasasına göre elektrolit ve elektrot için akım yoğunluğu (Denklem 4.1) ve (Denklem 4.2)’de gösterildiği gibi ifade edilebilir. Burada  $\sigma_l$  ve  $\sigma_s$  iletkenliği (S/m),  $\phi_l$  ve  $\phi_s$  potansiyeli (V) göstermektedir.

$$i_l = -\sigma_l \nabla \phi_l \quad (4.1)$$

$$i_s = -\sigma_s \nabla \phi_s \quad (4.2)$$

Yük korunumu denklemi elektrolit ve elektrot için (Denklem 4.3) ve (Denklem 4.4)’te gösterilmiştir. Burada sırasıyla elektrolit ve elektrot için  $Q_l$  ve  $Q_s$  kaynak terimi göstermektedir. Elektrot ve elektrolit arayüzündeki yük transfer reaksiyonu

nedeniyle akım denge denklemlerinde kaynak terim eklenir. Programda elektrolit nötr olduğu varsayıldığı için gaz difüzyon tabakasında ve membranda elektrik yükünün tüketilmediği veya üretilmediği kabul edilmiştir. Bu yüzden kaynak terimler sıfır olarak alınmıştır.

$$\nabla \cdot i_l = Q_l \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot i_s = Q_s \quad (4.4)$$

Anot ve katot elektrot kinetiği için Butler-Volmer denklemi kullanılmaktadır. (Denklem 4.5)'te gösterildiği gibi akım yoğunluğu hesaplanabilmektedir.

$$i_{loc} = i_0 \left( \exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right) \quad (4.5)$$

Burada  $i_{loc}$  yerel akım yoğunluğunu ( $A/m^2$ ),  $i_0$  değişim akım yoğunluğunu ( $A/m^2$ ),  $\alpha_a$  ve  $\alpha_c$  sırasıyla anodik ve katodik yük transfer katsayısını,  $F$  Faraday sabitini,  $R$  ideal gaz sabitini ( $J/mol.K$ ),  $T$  sıcaklığı ( $K$ ),  $\eta$  aktivasyon aşırı gerilimini ( $V$ ) ifade etmektedir. Aktivasyon aşırı gerilimi ( $\eta$ ), elektrot ( $\phi_s$ ) ile elektrolit ( $\phi_l$ ) potansiyelleri ile ilişkilendirilebilir. Bu ilişki (Denklem 4.6)'da belirtilmiştir.

$$\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq} \quad (4.6)$$

Burada  $E_{eq}$  denge potansiyelini ( $V$ ) temsil etmektedir. Yerel akım yoğunluğu ile aktif spesifik yüzey alanının çarpımı ile volumetrik akım yoğunluğunu elde edildiği (Denklem 4.7)'de gösterilmiştir.

$$i_v = a_v i_{loc} \quad (4.7)$$

Bu denklemde  $i_v$  volumetrik akım yoğunluğunu ( $A/cm^3$ ),  $a_v$  aktif spesifik yüzey alanını ( $1/m$ ),  $i_{loc}$  ise yerel akım yoğunluğunu ( $A/cm^2$ ) ifade etmektedir.

“Brinkman Equations” fizik arayüzü basıncı ( $p$ ) ve hızı ( $u$ ) çözmek için kullanılır. Gözenekli ortamdaki akış, Brinkman denklemini oluşturan süreklilik denklemi ve momentum denkleminin bir kombinasyonu ile belirlenir. Sınır koşulları hem anot hem de katot kanalları için laminar giriş akış hızı ve çıkışta sıfır basınç şeklindedir. Kalan diğer duvarlara ise kaymamazlık şartı uygulanır. (Denklem 4.8)’de Brinkman denklemi gösterilmiştir.

$$\frac{1}{\varepsilon_p} \rho (u \cdot \nabla) u \frac{1}{\varepsilon_p} = \nabla \cdot [-pI + K] - \left( (\mu \kappa^{-1}) + \beta \rho |u| + \frac{\nabla(\rho u)}{\varepsilon_p^2} \right) u + F \quad (4.8)$$

Burada  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini (Pa.s),  $u$  hız vektörünü (m/s),  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $p$  basıncı (Pa),  $\varepsilon_p$  gözenekliliği,  $\kappa$  gözenekli ortamın geçirgenlik tensörünü ( $\text{m}^2$ ),  $F$  kuvvet terimini ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ ) göstermektedir.

“Transport of Concentrated Species” fizik arayüzü anottaki metanol kütle oranını ( $w_{MeOH}$ ), suyun kütle oranını ( $w_{H_2Oa}$ ) ve karbondioksitin kütle oranını ( $w_{CO_2}$ ), katottaki oksijenin kütle oranını ( $w_{O_2}$ ), nitrojenin kütle oranını ( $w_{N_2}$ ) ve suyun kütle oranını ( $w_{H_2Oc}$ ) çözmek için kullanılır. Bu arayüz katalizör tabakalarında, gaz difüzyon tabakalarında ve akış kanallarında uygulanır. Konveksiyonun, difüzyonun ve türlerin geçişinin modellenmesini sağlar. Programda difüzyon sürecini modellemede Mixture-averaged, Maxwell-Stefan ya da Fick kanunu kullanılabilir. Yapılan bu çalışmada Maxwell-Stefan denklemi kullanılarak çözüm yapılmıştır. Sınır koşulları olarak giriş için kütle fraksiyonları tanımlanmıştır. Diğer dış sınırlar için akışı olmadığı kabul edilmiştir. (Denklem 4.9)’da Maxwell-Stefan denklemi gösterilmiştir.

$$\nabla \cdot j_i + \rho (u \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (4.9)$$

Bu denklemdeki  $\rho$  karışım yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  karışımın kütle ortalama hızını (m/s),  $\omega_i$  kütle oranını,  $j_i$  ortalama kütle akışına göre kütle akışını ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ),  $R_i$  üretimi veya tüketimi tanımlayan bir oran ( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ) ifadesini göstermektedir. Alt indis olarak  $i$  ise karışımı oluşturan ve reaksiyona giren türleri ifade etmektedir.

(Denklem 4.10)'da  $j_i$  ortalama kütle akışına göre kütle akısı, genelleştirilmiş Fick denklemleri ile tanımlanmıştır.

$$j_i = - \left( \rho \omega_i \sum_k \tilde{D}_{ik} d_k + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right) \quad (4.10)$$

Burada  $\tilde{D}_{ik}$  çok bileşenli Fick yayını (m<sup>2</sup>/s), T sıcaklık (K),  $D_i^T$  ısı difüzyon katsayısı (kg/m.s),  $d_k$  k türüne etki eden yayınımlı itici güçtür. İdeal gaz karışımı için yayınımlı itici güç (Denklem 4.11)'de gösterilmiştir.

$$d_k = \nabla x_k + \frac{1}{p_A} [(x_k - w_k) \nabla p_A] \quad (4.11)$$

Mol oranı  $x_k$ , mutlak basınç (Pa)  $p_A$  olarak ifade edilmiştir. Mol oranının ( $x_k$ ) hesaplanması ise (Denklem 4.12)'de gösterilmiştir.

$$x_k = \frac{\omega_k}{M_k} M_n \quad (4.12)$$

Bu denklemdeki ortalama molar kütlesi ( $M$ ) (Denklem 4.13)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Birimi ise (kg/mol)'dür.

$$M_n = \left( \sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (4.13)$$

Tablo 4.1. COMSOL Multiphysics programındaki bilinmeyen değişkenlerin özeti

Değişkenler	Çözüm Modülü	Tanımlandığı Alan
$\phi_s, \phi_l$	Secondary Current Distribution	Gaz Difüzyon Tabakaları, Katalizör Tabakaları, Membran
$w_{MeOH}, w_{H_2O_a}, w_{O_2}, w_{N_2}, w_{H_2O_c}$	Transport of Concentrated Species	Akış Kanalları, Gaz Difüzyon Tabakaları, Katalizör Tabakaları
$u, p$	Brinkman Equations	Akış Kanalları, Gaz Difüzyon Tabakaları, Katalizör Tabakaları

### 4.3. Model Parametreleri

Doğrudan metanol yakıt hücresinin matematiksel modeli, literatürdeki referans alınan S.S. Matar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki geometrik parametreler, çalışma koşulları, giriş parametreleri, gaz difüzyon tabakalarının ve katalizör tabakalarının gözenekliliği, geçirgenliği, iletkenliği ve elektrokimyasal parametreler kullanılarak geliştirilmiştir. COMSOL Multiphysics programıyla modellenen yakıt hücresi için kullanılan parametreler Tablo 4.2.'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Model parametreleri

Parametre	Değer
Akış kanalı uzunluğu	30 mm
Akış kanalı genişliği	2 mm
Akış kanalı yüksekliği	1 mm
Gaz difüzyon tabakası genişliği	3 mm
Gaz difüzyon tabakası kalınlığı	0.381 mm
Membran kalınlığı	0.1778 mm
Katalizör tabakası kalınlığı	19 $\mu\text{m}$
Gaz difüzyon tabakası gözenekliliği	0,8
Gaz difüzyon tabakası geçirgenliği	$1,18 \times 10^{-11} \text{ m}^2$
Gaz difüzyon tabakası elektrik iletkenliği	222 S/m
Katalizör tabakası gözenekliliği	0,4
Katalizör tabakası geçirgenliği	$2,36 \times 10^{-12} \text{ m}^2$
Katalizör tabakası elektrik iletkenliği	222 S/m
Anot reaksiyon katsayısı	1
Katot reaksiyon katsayısı	1
Membran elektrik iletkenliği	9,825 S/m
Metanol mol ağırlığı	0,032 kg/mol
Oksijen mol ağırlığı	0,032 kg/mol
Su mol ağırlığı	0,018 kg/mol
Nitrojen mol ağırlığı	0,028 kg/mol

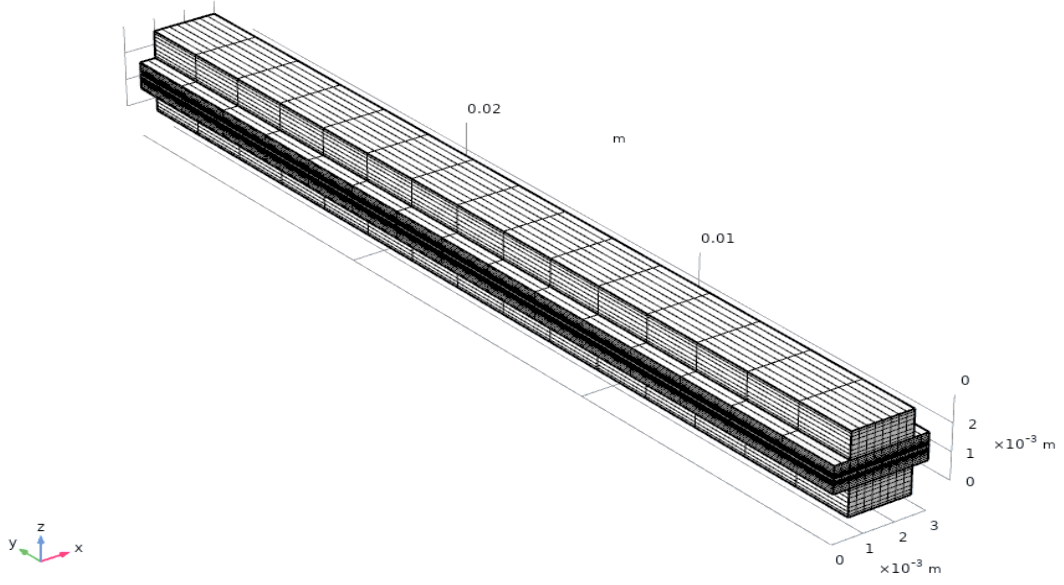
Tablo 4.2. (Devamı)

Anodik spesifik yüzey alanı	$8 \times 10^4$ 1/m
Anot viskozitesi	$1,19 \times 10^{-5}$ Pa.s
Katot viskozitesi	$2,46 \times 10^{-5}$ Pa.s
Hücre sıcaklığı	343,15 K
Referans basınç	1 atm
Metanol giriş debisi	6 ml/dk
Oksijen giriş debisi	600 ml/dk
Metanolün sudaki difüzyon katsayısı	$9,15 \times 10^{-5} \cdot (T/307,1[\text{K}])^{1,75}$ m <sup>2</sup> /s
Oksijenin sudaki difüzyon katsayısı	$2,82 \times 10^{-5} \cdot (T/308,1[\text{K}])^{1,75}$ m <sup>2</sup> /s

#### 4.4. Modelin Ağ Yapısının (Mesh) Oluşturulması

Doğrudan metanol yakıt hücre modelini bir bütün olarak değerlendirerek diferansiyel denklemleri uygulamak zordur. Bunun için COMSOL programında, yakıt hücresi küçük parçalara ayrılarak ve bu parçaların her birine basit denklemler uygulanarak yaklaşık olarak bir çözüm yapılmaktadır. Böylece modellemenin en önemli aşaması olarak değerlendirilen mesh yani ağ yapısı oluşturulmaktadır. Üç boyutlu modelleme yaparken programda prizma ve piramit vb. şekillerde ağ yapıları oluşturulabilir. Model için oluşturulan ağ yapısı Şekil 4.5.'te verilmiştir. Burada dikkate alınan bir diğer konu ise eleman sayısının optimum hale getirilmesidir. Eleman sayısını arttırmak her zaman daha iyi sonuçlar vereceği anlamına gelmemektedir. Bununla ilgili Bölüm 5.'te eleman sayısının modelin doğruluğuna etkisinin incelenmesine ait analiz sonuçları verilmiştir.





Şekil 4.5. Model ağ (mesh) yapısı

#### 4.5. Model İçin Çözücü Seçimi

Modelin geometrisi, fiziği ve mesh yapısı oluşturulduktan sonra çözümü gerçekleştirmek için çalışma ayarlarının yapılması gerekmektedir. Programda kullanılan model için zamana bağlı olmayan simülasyon gerçekleştirildi. Burada kullanılan çeşitli çözücüler vardır. Bunlar MUMPS, SPOLES ve PARDISO olmak üzere üç tanedir. Programdaki çözücülerin seçim görünümü Şekil 4.6.'da verilmiştir. Yapılan modellemeye göre performansları farklılık göstermektedir. Oluşturulan yakıt hücresi için en iyi performansı gösteren MUMPS olmuştur.

Model çözümünün gerçekleştirilmesi için çoklu fizik çözüm ayarlarının yapılması ve 0,3 V ve 0,8 V değerleri arasında çözümün gerçekleştirilmesi için yapılan ayarlar Şekil 4.7.'de verilmiştir.

Settings

Direct

Compute to Selected = Compute

Label: Direct

General

Solver: MUMPS

Memory allocation factor: MUMPS

Preordering algorithm: PARDISO  
SPOOLES  
Dense matrix

Row preordering

Reuse preordering

Use pivoting: On

Pivot threshold: 0.1

Block low rank factorization

Block low rank factorization tolerance: 1E-8

Compression type: Normal

Out-of-core: Automatic

Memory fraction for out-of-core: 0.99

In-core memory method: Automatic

Minimum in-core memory (MB): 512

Used fraction of total memory: 0.8

Internal memory usage factor: 3

Error

Changes from Default Settings

Şekil 4.6. Çözücü çeşitleri

Model Builder

Settings

Stationary

Compute Update Solution

Label: Stationary 1

Study Settings

Results While Solving

Physics and Variables Selection

Modify model configuration for study step

Physics interface	Solve for	Discretization
Secondary Current Distribution (cd)	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings
Brinkman Equations - Anode (br)	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings
Transport of Concentrated Species - An...	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings
Brinkman Equations 2 - Cathode (br2)	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings
Transport of Concentrated Species 2 - C...	<input checked="" type="checkbox"/>	Physics settings

Multiphysics couplings

Multiphysics couplings	Solve for
Reacting Flow 1 (rf1)	<input checked="" type="checkbox"/>
Reacting Flow 2 (rf2)	<input checked="" type="checkbox"/>

Values of Dependent Variables

Mesh Selection

Adaptation and Error Estimates

Study Extensions

Auxiliary sweep

Sweep type: Specified combinations

Parameter name	Parameter value list	Parameter unit
V_cell (Cell voltag)	range(0.8,-0.05,0.3)	

Run continuation for: Last parameter

Define load cases

Load case

direct methanol fuel cell.mph (root)

Global Definitions

- Parameters 1
- Default Model Inputs
- Materials

Component 1 (comp1)

- Definitions
- Geometry 1
- Materials
- Secondary Current Distribution (cd)
- Brinkman Equations - Anode (br)
- Transport of Concentrated Species - Anode (tcs)
- Brinkman Equations 2 - Cathode (br2)
- Transport of Concentrated Species 2 - Cathode (tcs2)
- Multiphysics
- Mesh 1

Study 1

- Step 1: Stationary 1
- Solver Configurations
- Results

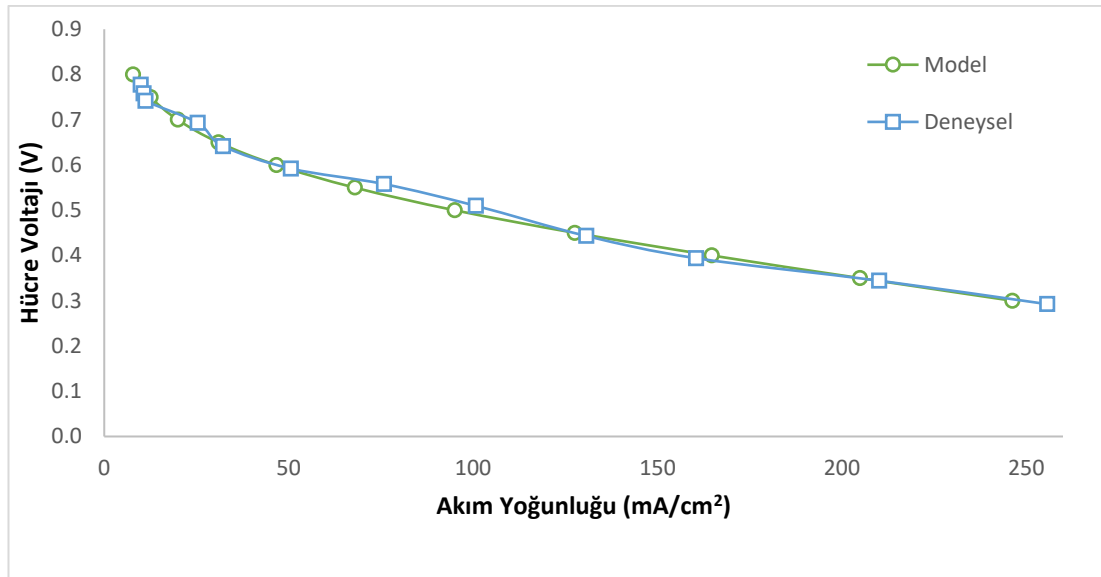
Şekil 4.7. Fizik arayüzlerinin çözüme eklenmesi

## **BÖLÜM 5. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME**

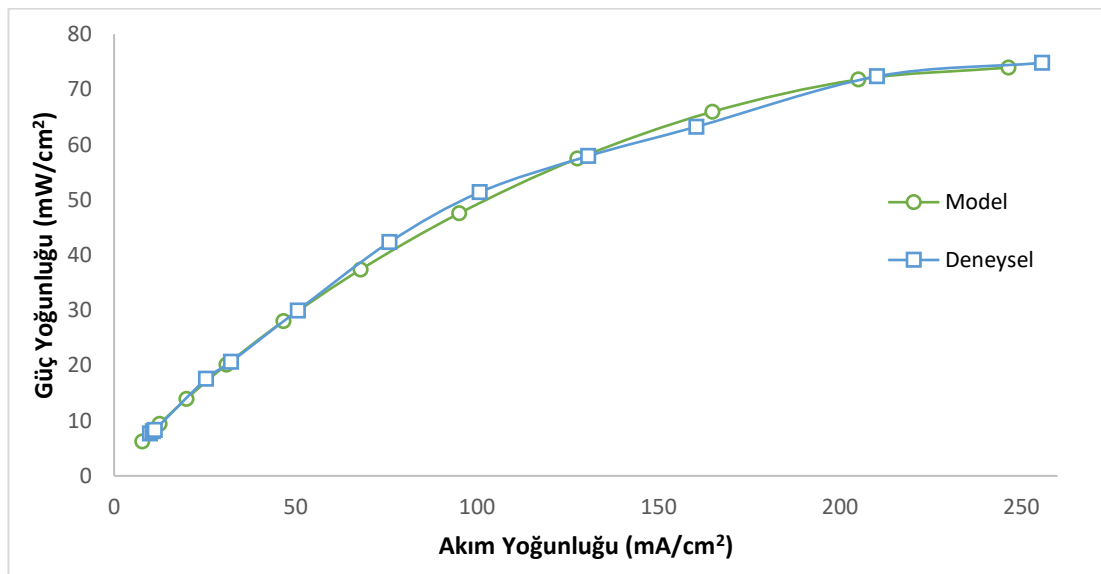
Yapılan modelleme çalışması, referans alınan literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu karşılaştırmanın ardından doğrudan metanol yakıt hücresinin performansına etkilerini incelemek için model üzerinde çeşitli çalışma koşullarına ve geometrik özelliklere göre parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda hücre sıcaklığının, metanol akış hızının, oksijen akış hızının, anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin, katottaki kullanılan oksidanın, katot basıncının, membran kalınlığının, anot katalizör tabakası kalınlığının, akış kanalı genişliğinin yakıt hücresi performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda incelenen parametreler için polarizasyon eğrileri, güç yoğunluğu eğrileri ve parametrelerdeki değişimin reaktant ve ürünlerin kütle oranlarının dağılımlarına etkisi gösterilmiştir.

### **5.1. Yakıt Hücresi Modelinin Doğrulanması**

Doğrudan metanol yakıt hücresi modellemesinde kullanılan üç boyutlu model S.S. Matar tarafından yapılan deneysel çalışmada kullanılan parametrelere bağlı kalınarak yapılmıştır. Referans alınan deneysel verilerde kullanılan hücre voltaj aralığı 0,3 V ve 0,8 V olduğu için aynı aralıkta çalıştırılan simülasyon programındaki modelin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.1.'de polarizasyon eğrisi olarak ve Şekil 5.2.'de güç yoğunluğu eğrisi olarak verilmiştir. Her iki eğriye bakıldığında oluşturulan model sonuçları ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1. Yakıt hücresi modelinin deneysel verilerle doğrulanması (polarizasyon eğrisi)

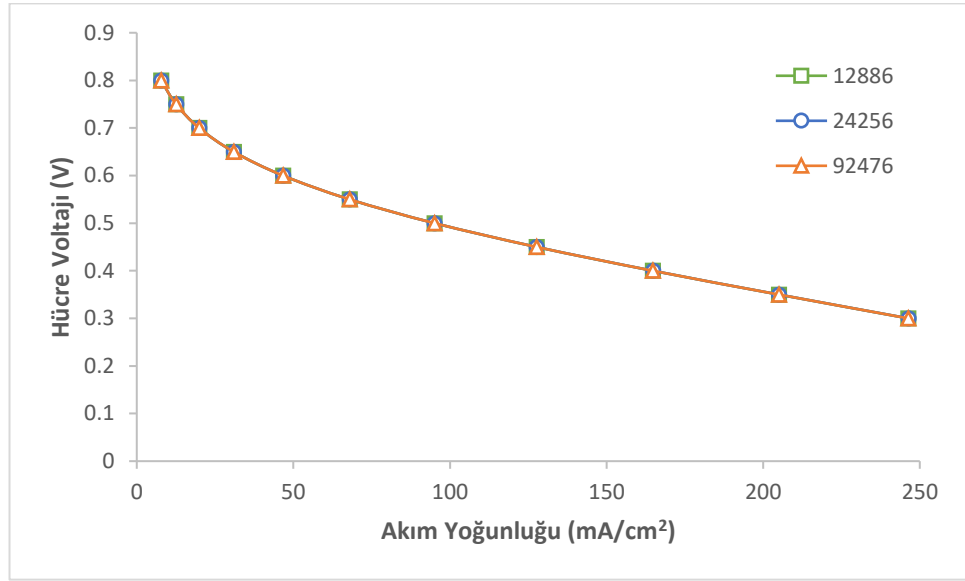


Şekil 5.2. Yakıt hücresi modelinin deneysel verilerle doğrulanması (güç yoğunluğu eğrisi)

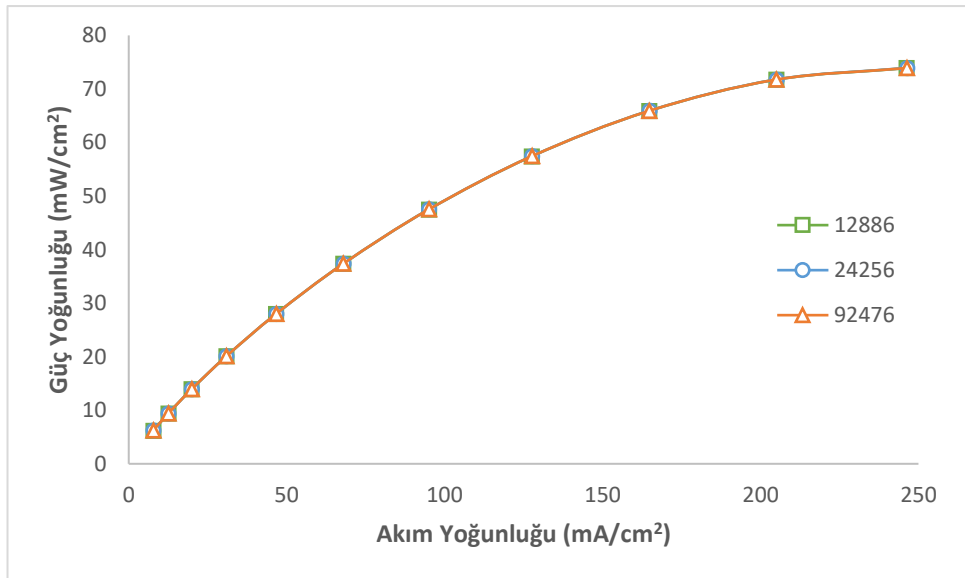
## 5.2. Eleman Sayısının Yakıt Hücresi Modelinin Doğruluğuna Etkisi

COMSOL Multiphysics programı ile mesh oluşturulurken kullanılan eleman sayısına göre elde edilen sonuçların değişimi araştırılmalıdır. Bu nedenle model; 12886, 24256, 92476 eleman kullanılarak çözülmüştür. Elde edilen verilere göre, eleman sayısının yakıt hücresi modelinin doğruluğuna etkisi Şekil 5.3.'te polarizasyon eğrisi

olarak ve Şekil 5.4.'te güç yoğunluğu eğrisi olarak gösterilmiştir. Eğriler incelediğinde eleman sayısının artırılması, analiz sonuçlarını etkilememiştir. Zaten analiz yaparken eleman sayısının çok fazla artırılması, hem işlem yapılan bilgisayarın yükünü arttırmakta hem de çözüm süresini uzatmaktadır. Sonuç olarak çok yüksek oranlarda yapılan mesh dağılımı, gereksinimler göz önüne alınarak yapılmalıdır.



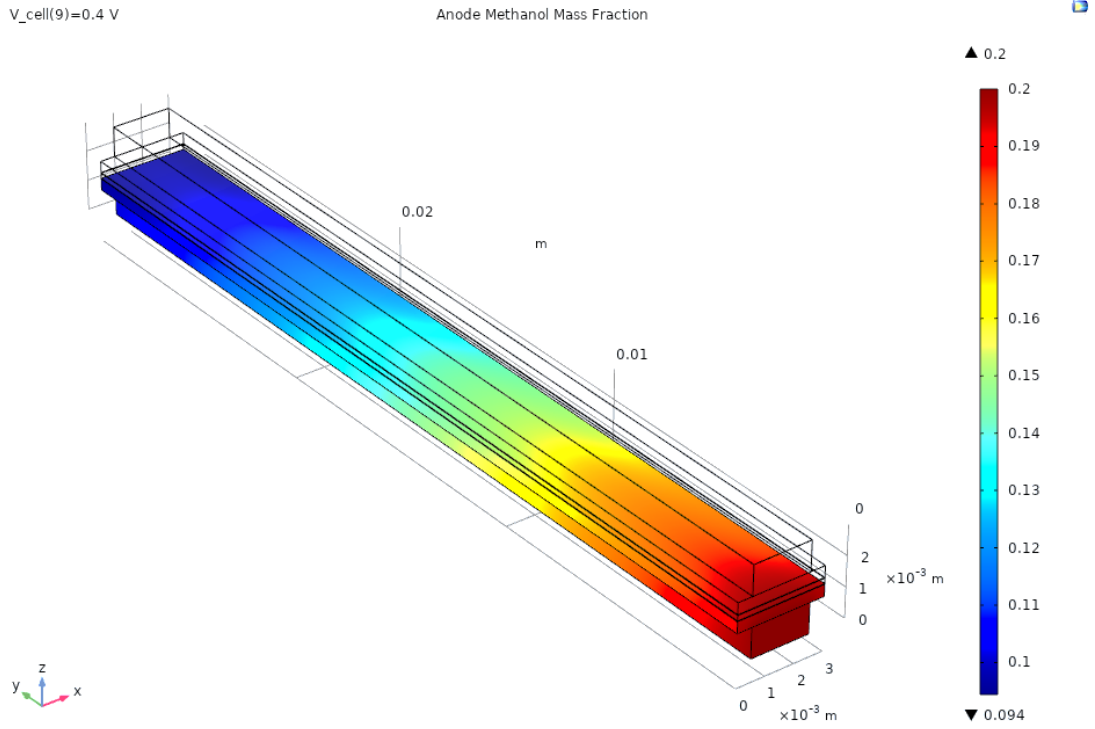
Şekil 5.3. Model ağ (mesh) yapısının akım yoğunluğuna etkisi



Şekil 5.4. Model ağ (mesh) yapısının güç yoğunluğuna etkisi

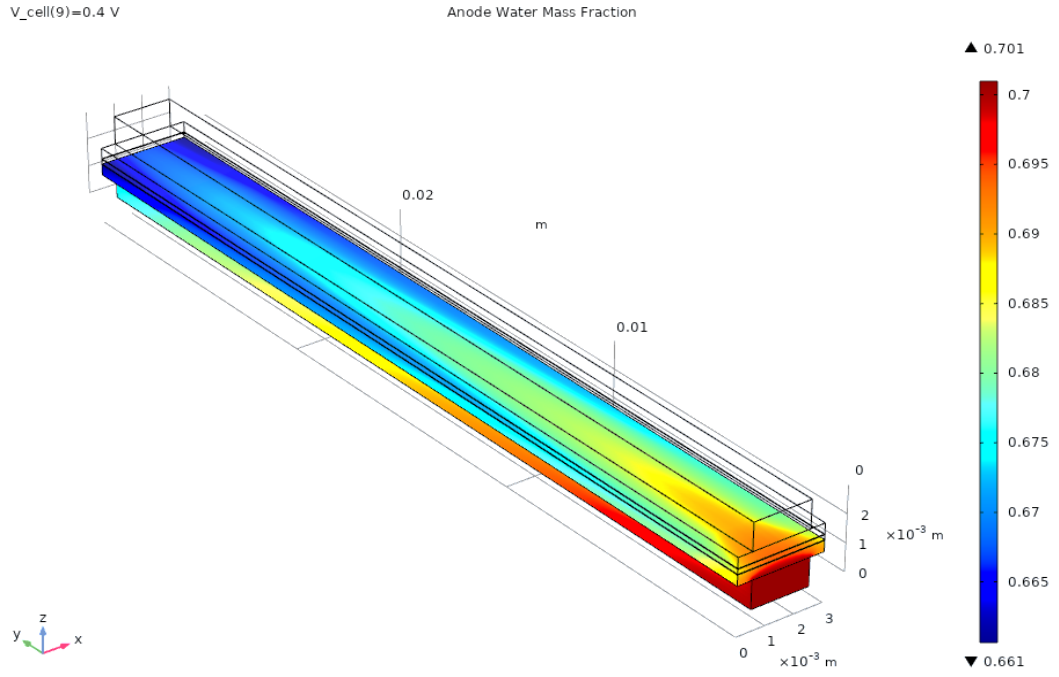
### 5.3. Reaktantların ve Ürünlerin Kütle Oranları

(Denklem 3.16)'da gösterildiği gibi anot tarafında gerçekleşen reaksiyonda reaktantlardan biri metanoldür. Reaktantlarda tepkimeye girdikleri için kütle oranında azalma meydana gelmektedir. Şekil 5.5.'te metanolün kütle oranındaki bu azalma gösterilmektedir.



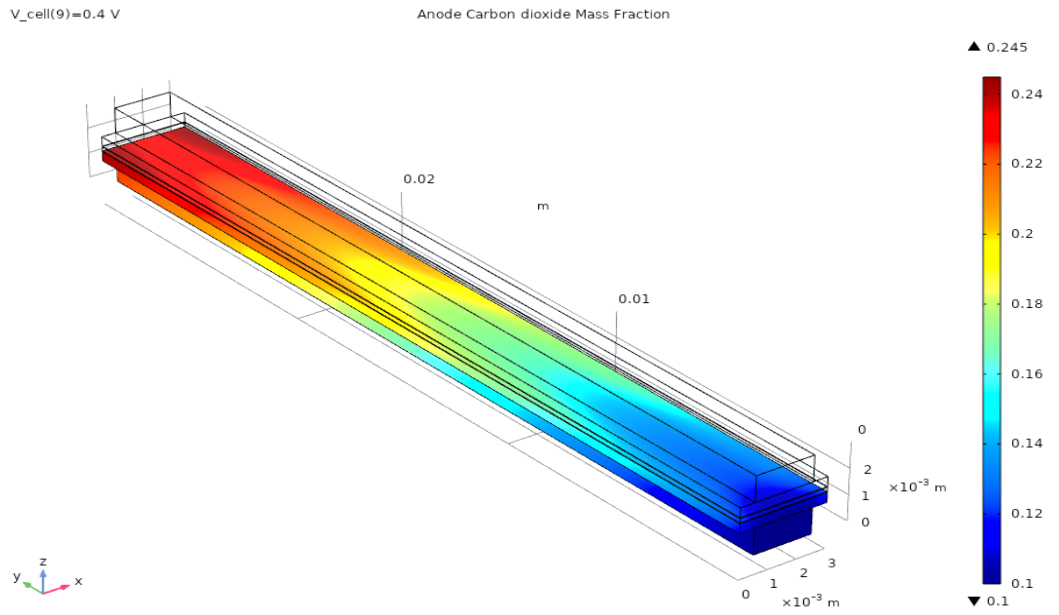
Şekil 5.5. Anot tarafındaki metanolün kütle oranının değişimi

Aynı şekilde (Denklem 3.16)'ya bakıldığında anot tarafında gerçekleşen reaksiyondaki bir diğer reaktant sudur. Tepkime sonucu ürünlerin oluşmasıyla reaktantların kütle oranlarında azalma meydana gelir. Suyun kütle oranındaki bu azalma Şekil 5.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Anot tarafındaki suyun kütle oranının değişimi

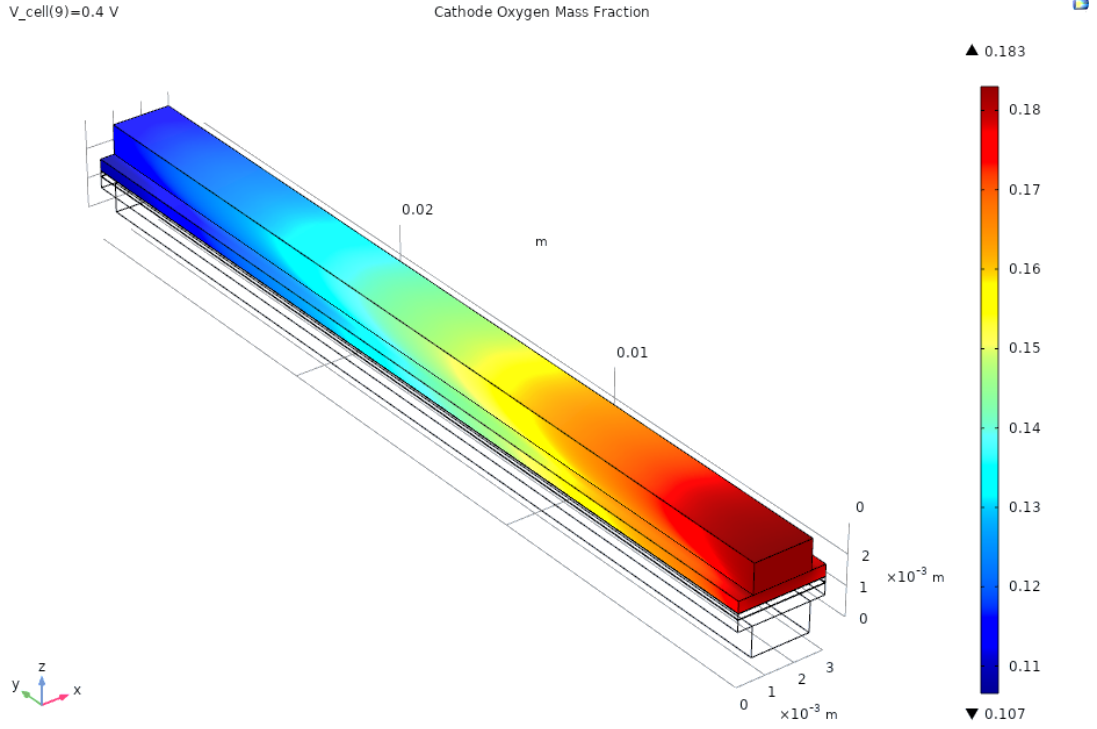
Anot tarafındaki katalizörde gerçekleşen metanol oksidasyonu ile oluşan ürün ise karbondioksittir. Karbondioksitin kütle oranındaki artış Şekil 5.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Anot tarafındaki karbondioksitin kütle oranının değişimi

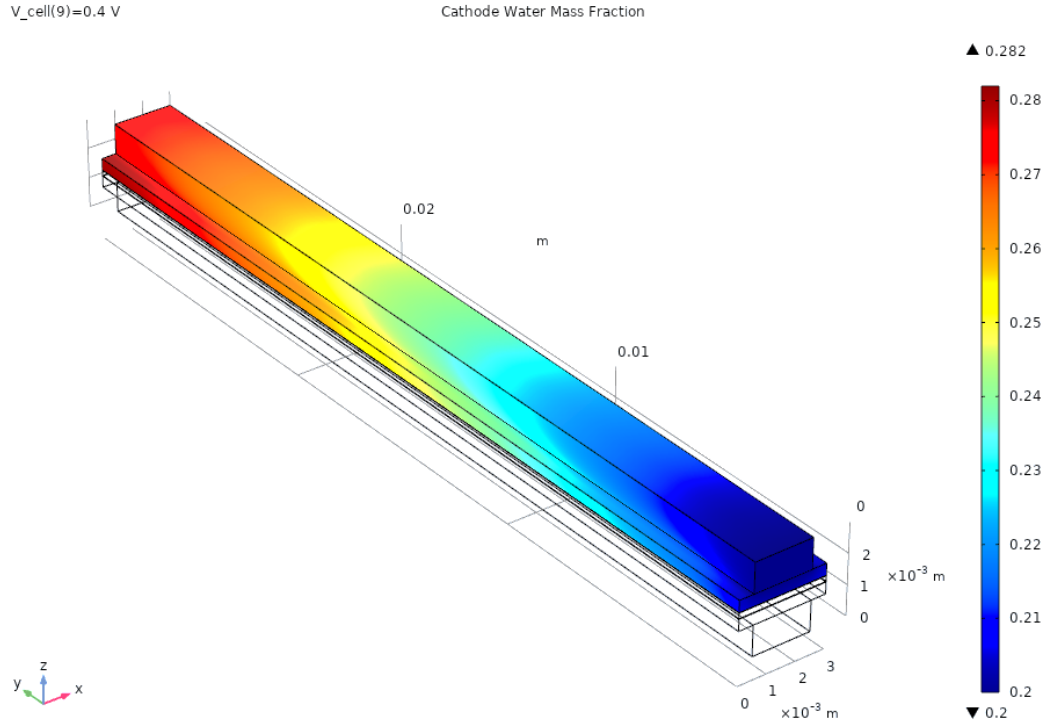


(Denklem 3.17)'de gösterildiği gibi katot tarafında gerçekleşen reaksiyonda reaktant oksijendir. Reaktant tepkimeye girdiği için anot tarafının çıkışında kütle oranında azalma meydana gelmektedir. Şekil 5.8.'de oksijenin kütle oranındaki bu azalma gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Katot tarafındaki oksijenin kütle oranının değişimi

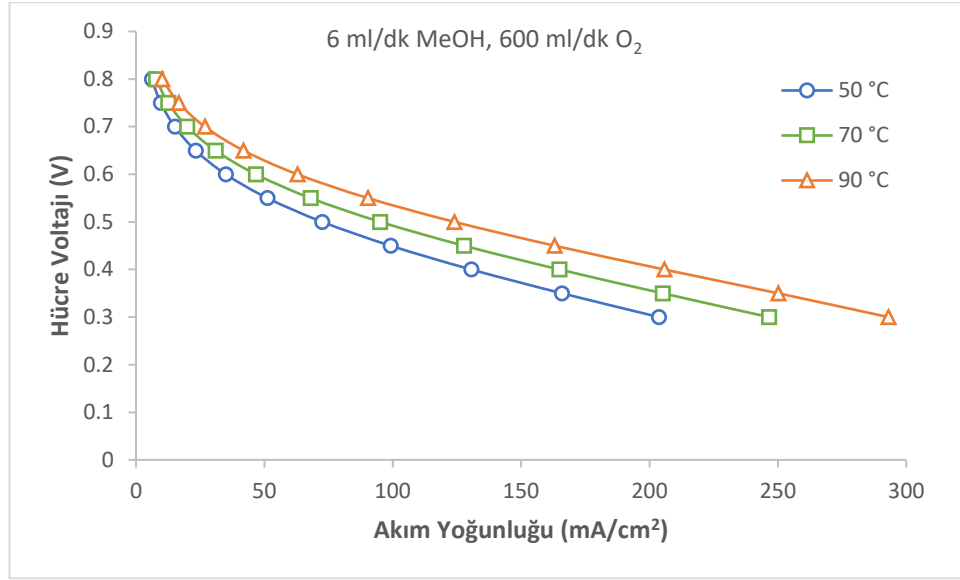
Katot tarafındaki katalizörde gerçekleşen oksijen redüksiyonu ile oluşan ürün ise sudur. Suyun kütle oranındaki artış Şekil 5.9.'da gösterilmektedir.



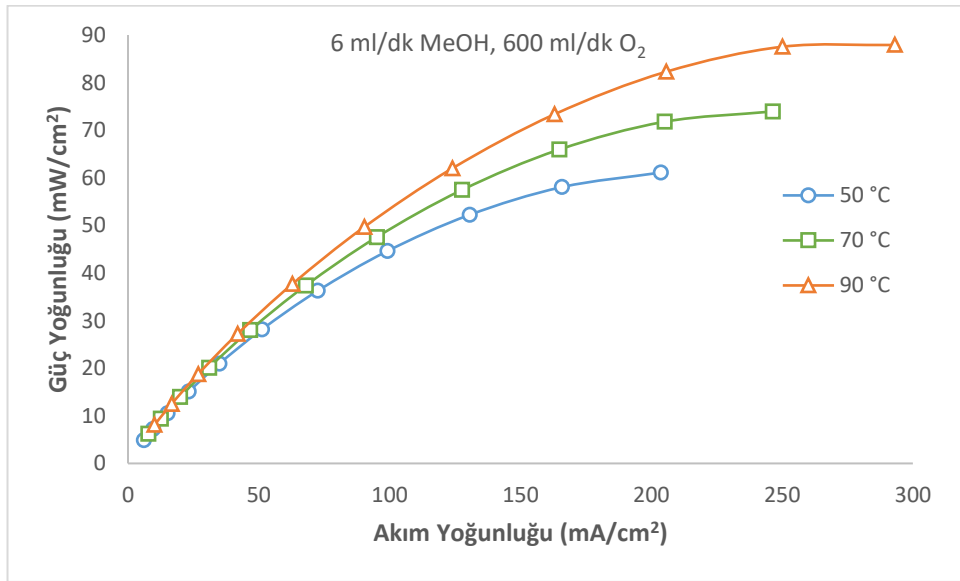
Şekil 5.9. Katot tarafındaki suyun kütle oranının değişimi

#### 5.4. Hücre Sıcaklığının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Hücre sıcaklığı, doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Hücre sıcaklığının etkisini incelemek için model üç farklı sıcaklıkta (50 °C, 70 °C ve 90 °C) simülasyon programında analiz edilmiştir. Bu sıcaklıklardaki analiz sonuçları Şekil 5.10.'da polarizasyon eğrisi olarak ve Şekil 5.11.'de güç yoğunluğu eğrisi olarak gösterilmiştir. Yakıt hücresi en iyi performansı 90 °C'de göstermiştir. Bunun nedeni; artan sıcaklığın katalizör aktivitesini artırması, elektrokimyasal reaksiyon hızını artırması, katalizöre kütle geçişini ve metanol difüzyon katsayısını artırmasıdır. Aynı zamanda membran direncini düşürmektedir. Bunların sonucunda doğrudan metanol yakıt hücresinin performansında artış olur. Her ne kadar hücre sıcaklığının artışı performans üzerinde olumlu bir etki gösterse de yakıt hücresinin belirlenen sıcaklığa ulaşması için geçen sürenin artmasından dolayı en uygun değer parametrelerin birbirlerine göre etkileri de değerlendirilerek optimize edilmelidir. Tablo 5.1.'de farklı hücre sıcaklıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Hücre sıcaklığının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)

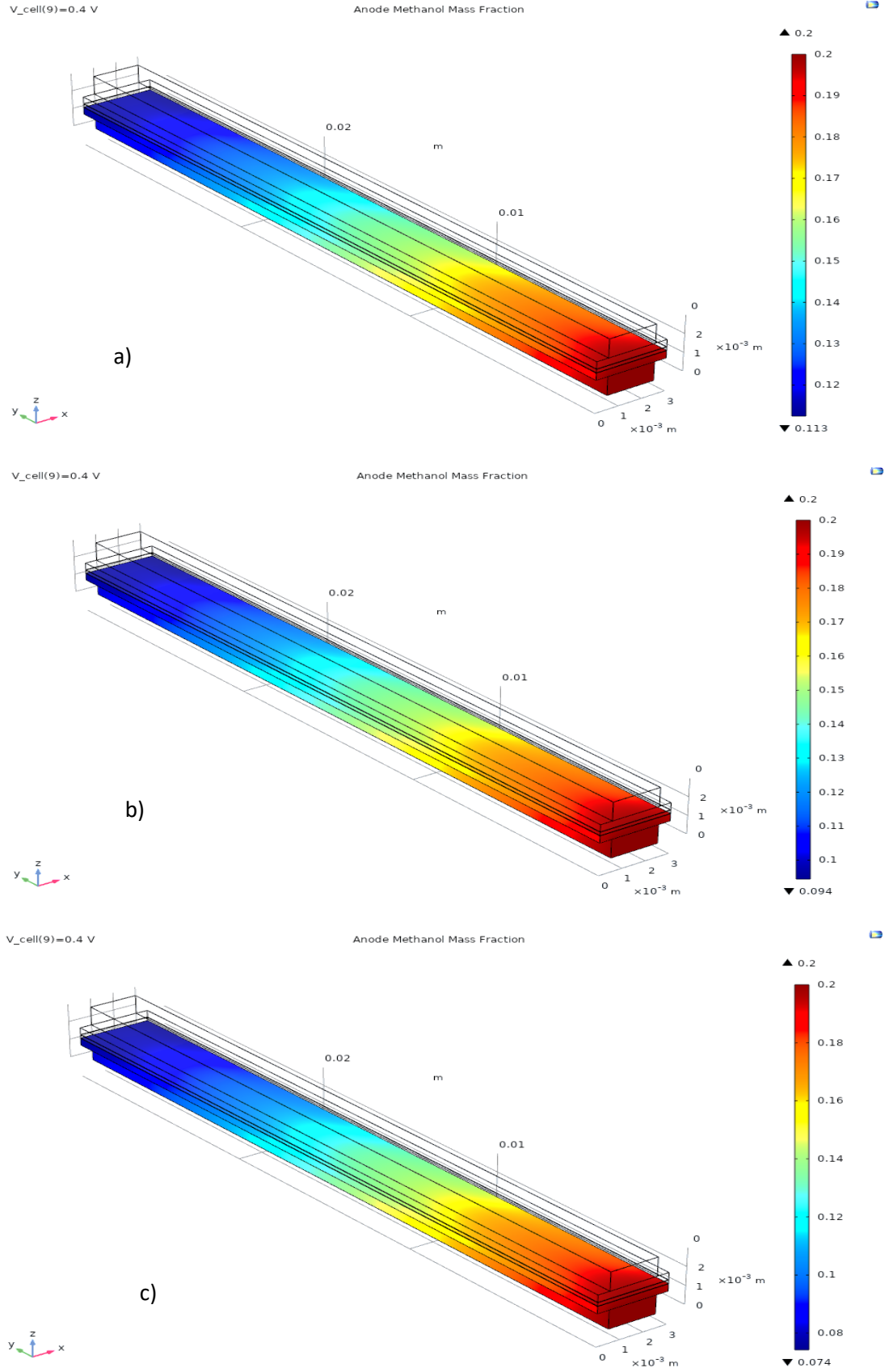


Şekil 5.11. Hücre sıcaklığının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

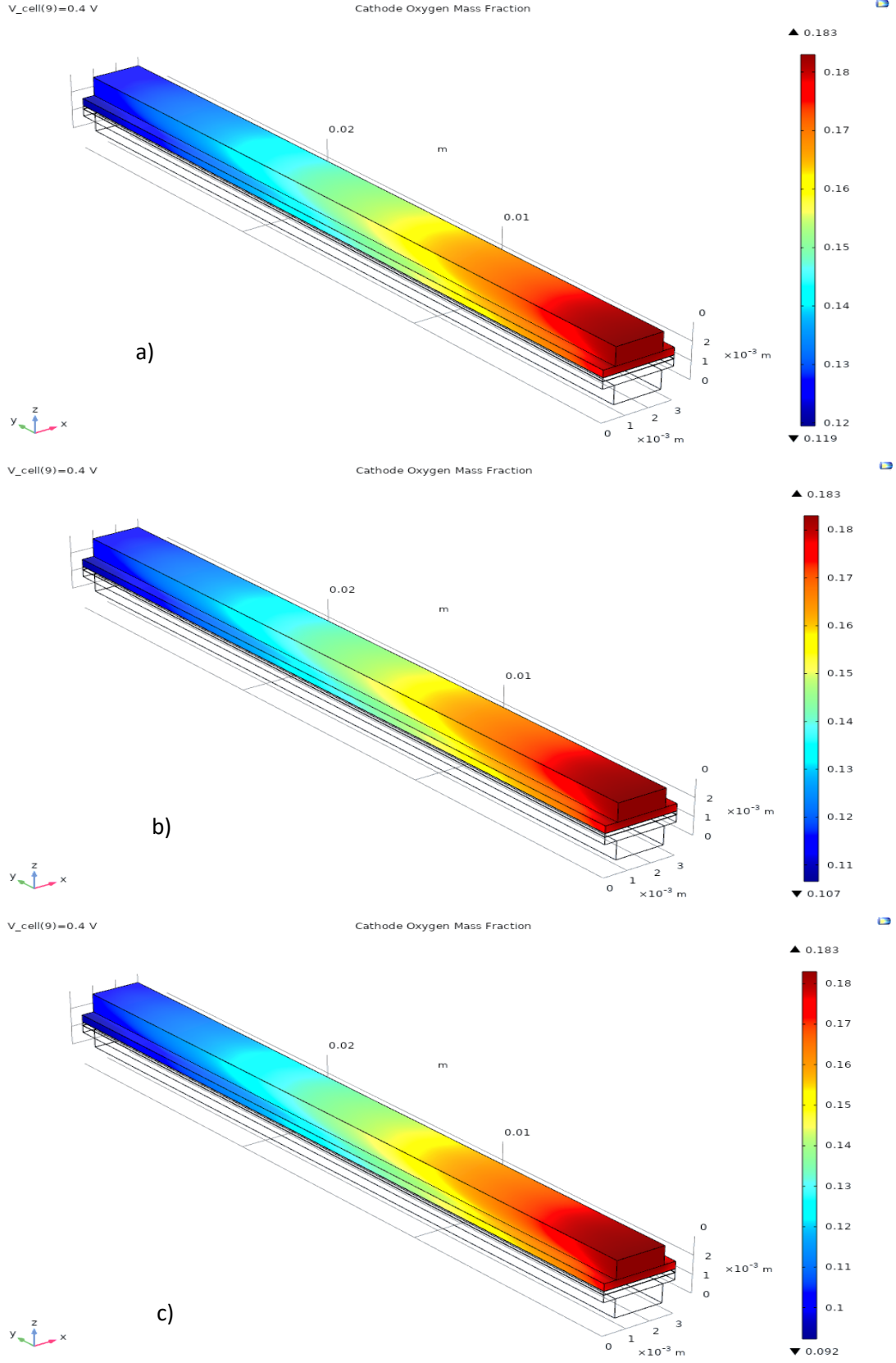
Tablo 5.1. Farklı hücre sıcaklıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Hücre Sıcaklığı (°C)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
50	61,107
70	73,944
90	87,903

İncelenen her bir hücre sıcaklığı için anot tarafındaki metanol kütle oranındaki değişim ve katot tarafındaki oksijenin kütle oranındaki değişim Şekil 5.12. ve Şekil 5.13.'te gösterilmiştir. Modellemede katota metanol geçişi olmadığı kabul edildiği için hücre sıcaklığının etkisi incelendiğinde artışın faydalı olduğu görülse de normal şartlarda metanol geçişinde, sıcaklığın artmasıyla beraber artış olabilir, bu da yakıt kullanımının ve yakıt hücresi verimliliğinin azalmasına yol açar. Şekil 5.12. incelendiğinde hücre sıcaklığı 50 °C'den 90 °C'ye çıkarıldığında metanolün harcanma miktarı artmaktadır. Aynı durum Şekil 5.13.'e bakıldığında katot tarafındaki oksijen miktarındaki azalmanın hücre sıcaklığındaki artışla birlikte arttığı görülmektedir. Anot tarafındaki diğer reaktant olan su için durum aynı şekildedir, yani hücre sıcaklığının artışıyla miktarındaki azalma artmaktadır. Ürün olarak anot tarafındaki karbondioksitin ve katot tarafındaki suyun miktarlarındaki artış hücre sıcaklığının yükselmesiyle artmaktadır.



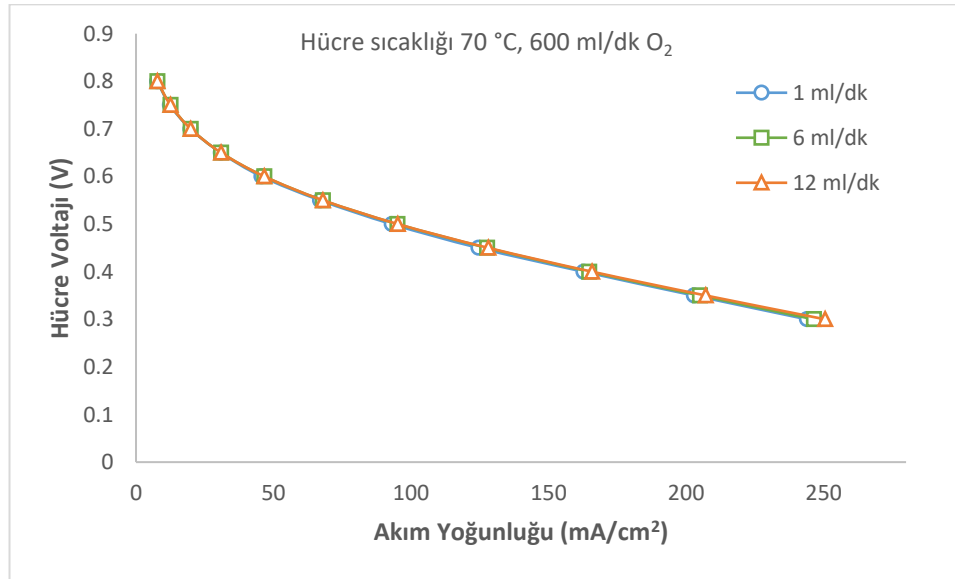
Şekil 5.12. Hücree sıcaklığının anottaki metanolün kütle oranı dağılımına etkisi a) 50 °C b) 70 °C c) 90 °C



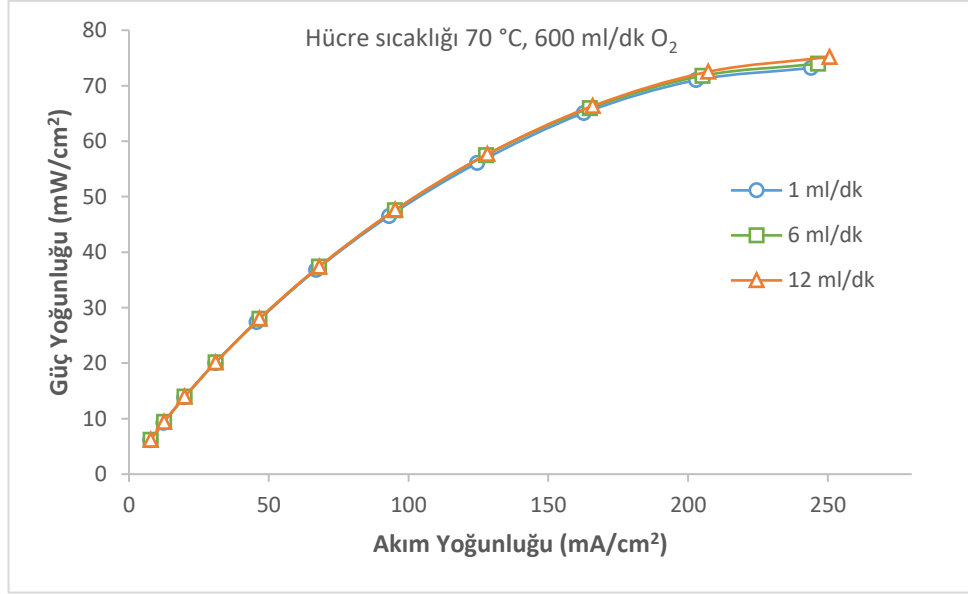
Şekil 5.13. Hücre sıcaklığının katottaki oksijenin kütle oranı dağılımına etkisi a) 50 °C b) 70 °C c) 90 °C

### 5.5. Anot Akış Kanalı Girişindeki Metanol Hızının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Metanolün kütle transferi, metanol geçişi ve ürün olarak çıkan karbondioksidin uzaklaştırılması olaylarının gerçekleşmesine neden olan metanol akış hızı doğrudan metanol yakıt hücresinin performansına etki eden bir parametredir (Scott ve ark., 1999). Şekil 5.14. ve Şekil 5.15.'te farklı metanol akış hızlarıyla analiz edilen doğrudan metanol yakıt hücresinin polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrileri gösterilmektedir. Çalışma koşulları 70 °C hücre sıcaklığında sırasıyla 1 ml/dk, 6 ml/dk ve 12 ml/dk olmak üzere 3 farklı akış hızında model test edilmiştir. Grafikler doğrudan metanol yakıt hücresinin performansında, metanol akış hızının artmasıyla çok önemli bir fark gözlenmemiştir. Bunun nedeni, hem metanol geçişinin olmadığı kabul edilmesi hem de metanol akış hızı analizinde kullanılan değerlerin arasındaki farkın çok büyük olmadığından kaynaklanmaktadır. Tablo 5.2.'de farklı metanol akış hızlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Anot akış kanalı girişindeki metanol akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)



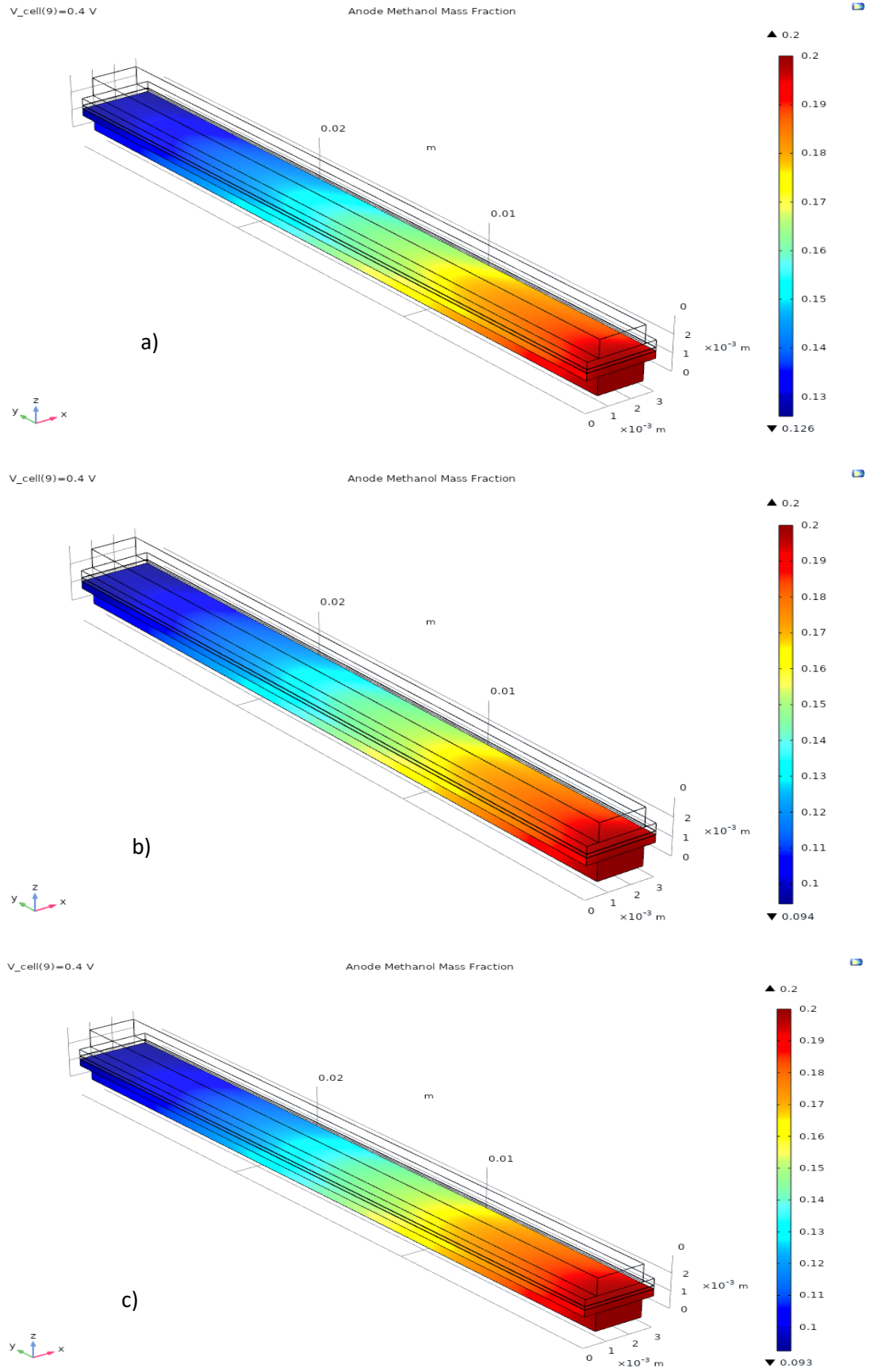
Şekil 5.15. Anot akış kanalı girişindeki metanol akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

Tablo 5.2. Farklı metanol akış hızlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Metanol Akış Hızı (ml/dk)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
1	73,191
6	73,944
12	75,183

Simülasyon programında incelenen her bir metanol akış hızı için anot tarafındaki metanol kütle oranındaki değişim Şekil 5.16.'da gösterilmiştir. Şekil 5.16. incelendiğinde anot akış kanalı girişindeki metanol akış hızı 1 ml/dk'dan 12 ml/dk'ya çıkarıldığında metanolün harcanma miktarı artmaktadır. Anot tarafındaki diğer reaktant olan su için durum aynı şekildedir, yani metanol akış hızının artışıyla suyun miktarındaki azalma artmaktadır. Ürün olarak anot tarafındaki karbondioksit miktarındaki değişim, metanol akış hızının artmasıyla yükselmektedir.

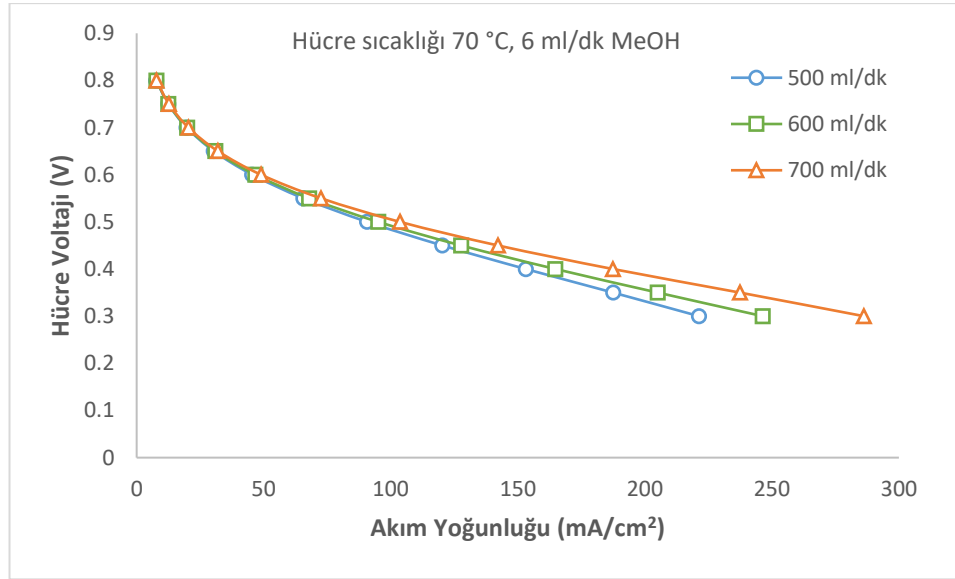




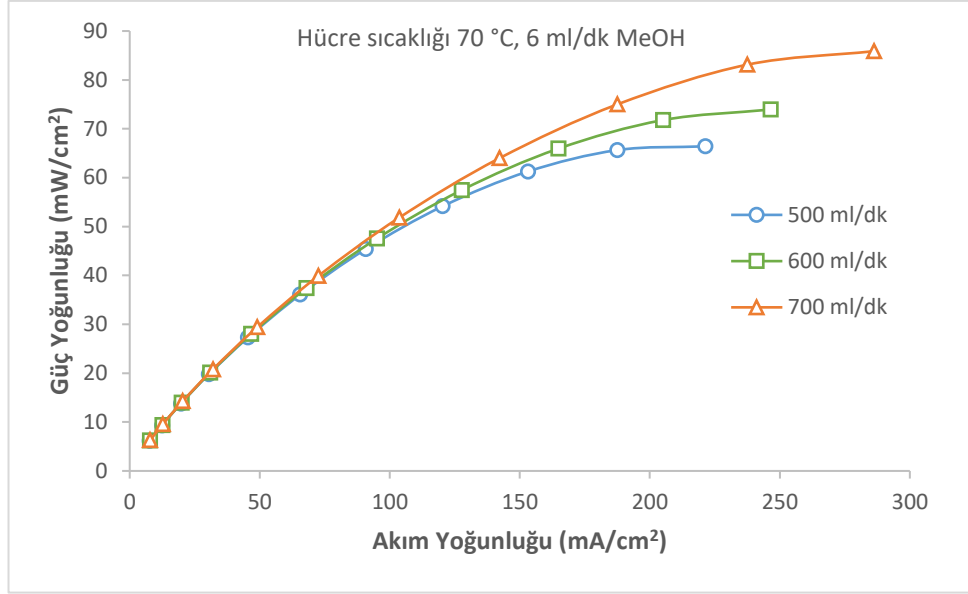
Şekil 5.16. Metanol akış hızının anottaki metanolün kütle oranı dağılımına etkisi a)1 ml/dk b)6 ml/dk c)12 ml/dk

### 5.6. Katot Akış Kanalı Girişindeki Oksijen Hızının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Oksijenin kütle transferi ve suyun uzaklaştırılması olaylarının gerçekleşmesine neden olan oksijen akış hızı doğrudan metanol yakıt hücresinin performansına etki eden bir parametredir (Chen, 2010). Şekil 5.17. ve Şekil 5.18. farklı oksijen akış hızlarıyla çalıştırılan doğrudan metanol yakıt hücresinin polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrilerini gösterir. Çalışma koşulları 70 °C hücre sıcaklığında sırasıyla 500 ml/dk, 600 ml/dk ve 700 ml/dk olmak üzere 3 farklı akış hızında model test edilmiştir. Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.'de gösterildiği gibi artan oksijen akış hızı, doğrudan metanol yakıt hücresinin performansında olumlu bir etki göstermiştir. Çünkü oksijen hızının artışı, oksijenin taşınımını ve suyun gaz difüzyon tabakasından ve kanallardan uzaklaştırılmasını hızlandırır. Tablo 5.3.'te farklı oksijen akış hızlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Katot akış kanalı girişindeki oksijen akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)

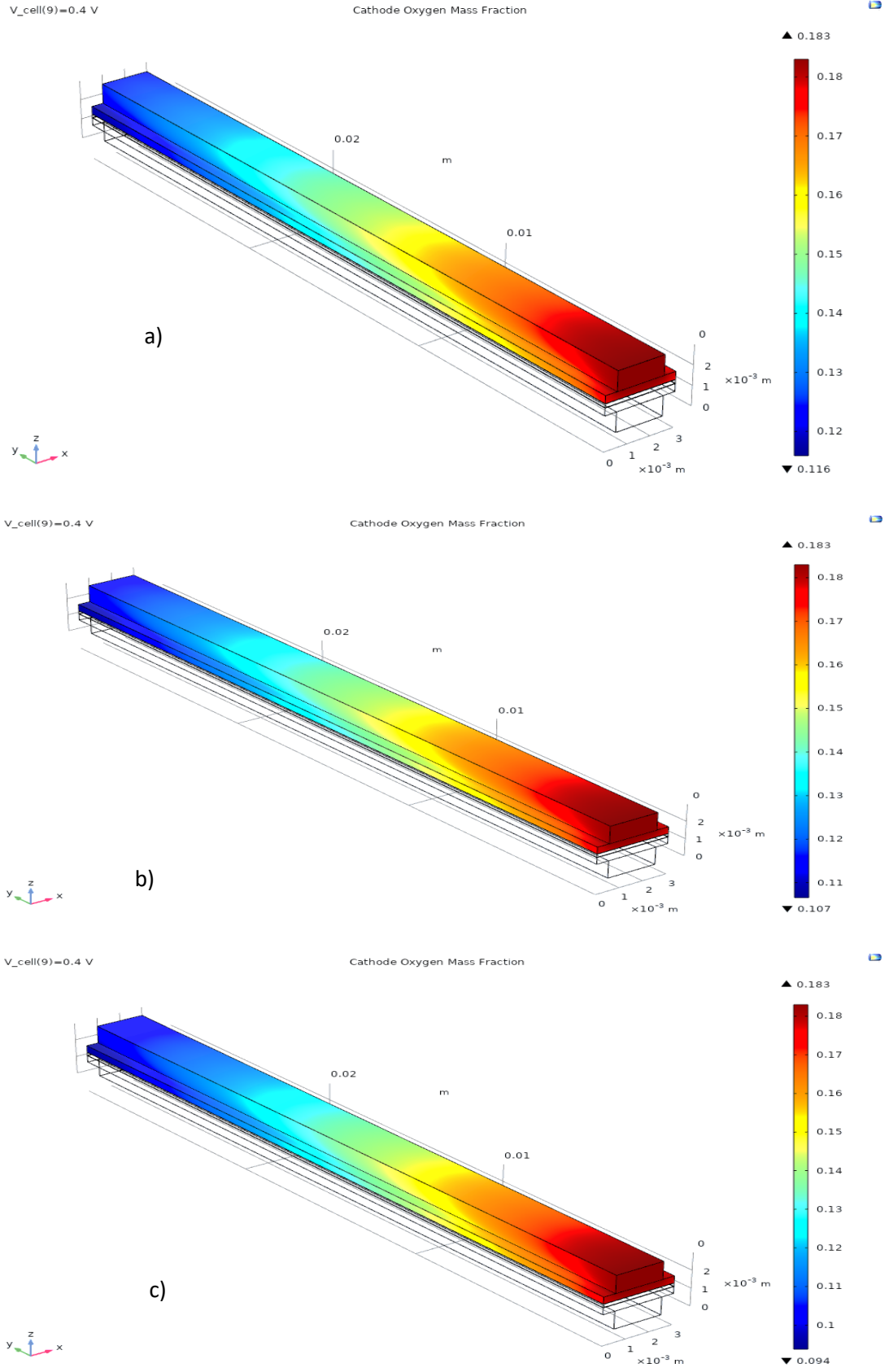


Şekil 5.18. Katot akış kanalı girişindeki oksijen akış hızının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

Tablo 5.3. Farklı oksijen akış hızlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Oksijen Akış Hızı (ml/dk)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
500	66,411
600	73,944
700	85,875

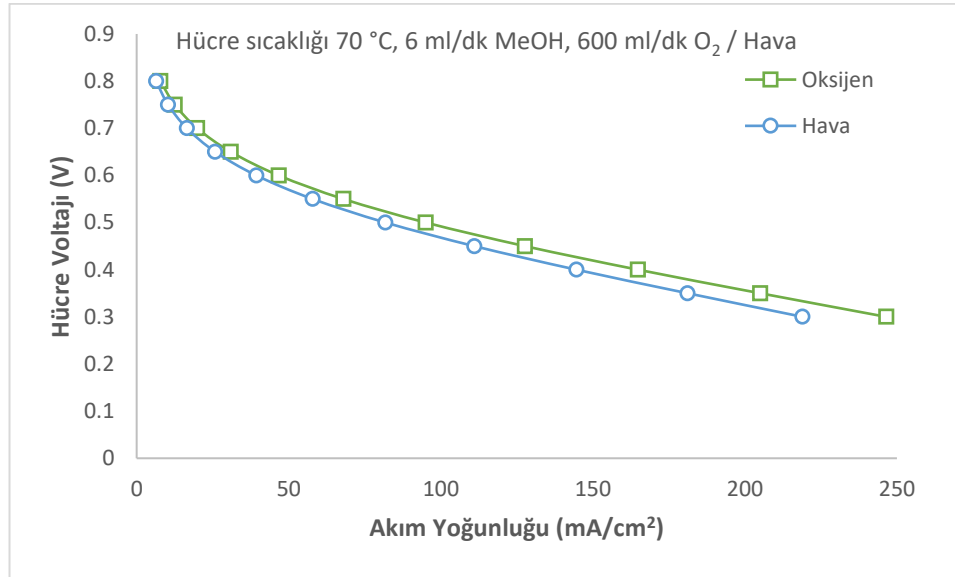
İncelenen her bir oksijen akış hızı için katot tarafındaki oksijen kütle oranındaki değişim Şekil 5.19.'da gösterilmiştir. Şekil 5.19. incelendiğinde katot akış kanalı girişindeki oksijen akış hızı 500 ml/dk'dan 700 ml/dk'ya çıkarıldığında oksijenin harcama miktarı artmaktadır. Katot tarafındaki ürün olan suyun kütle oranındaki değişim ise oksijen akış hızının artmasıyla yükselmektedir.



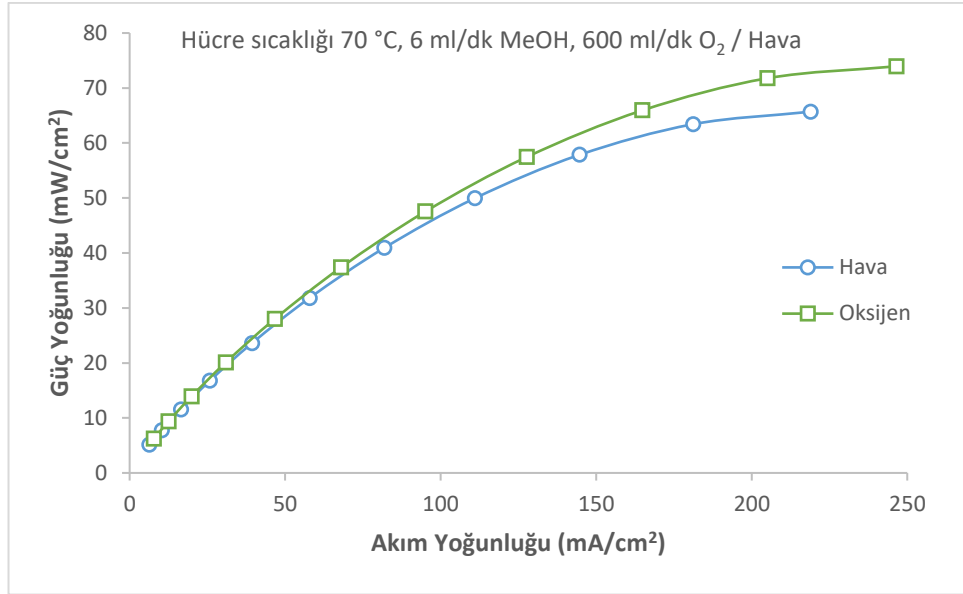
Şekil 5.19. Oksijen akış hızının katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a)500 ml/dk b)600 ml/dk c)700 ml/dk

### 5.7. Katottaki Oksidanın Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Katot tarafındaki reaktanın türünün yakıt hücresi performansı üzerindeki etkilerini incelemek için katot reaktanı olarak oksijen ve hava kullanılmasıyla iki farklı inceleme yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 5.20. ve Şekil 5.21.'de polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrileri olarak gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre oksijen oksidan olarak kullanıldığında elde edilen güç yoğunluğu havaninkine göre daha yüksektir. Bunun nedeni, Ge ve Liu'ya (2005) göre katot tarafına yeterli oksijen kaynağı olduğunda, metanol geçişinin etkisinin azalmasıdır. Katota nüfuz eden metanolün daha hızlı oksitlenebileceği zaman, oksijen indirgenme reaksiyonu için daha fazla reaksiyon alanının serbest kalacağı düşünülmektedir. Yapılan analizde ise metanol geçişinin olmadığı kabul edilmiştir. Burada hava içerisindeki azot gibi bileşenlerin seyreltici etkisinden dolayı güç yoğunluğu düşük çıkmıştır. Ama saf oksijen kullanıldığında daha fazla oksijen tepkimeye girdiği için elde edilen güç yoğunluğu daha fazladır. Tablo 5.4.'te oksijen ve hava kullanıldığında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Katottaki oksidanın yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)



Şekil 5.21. Katottaki oksidanın yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

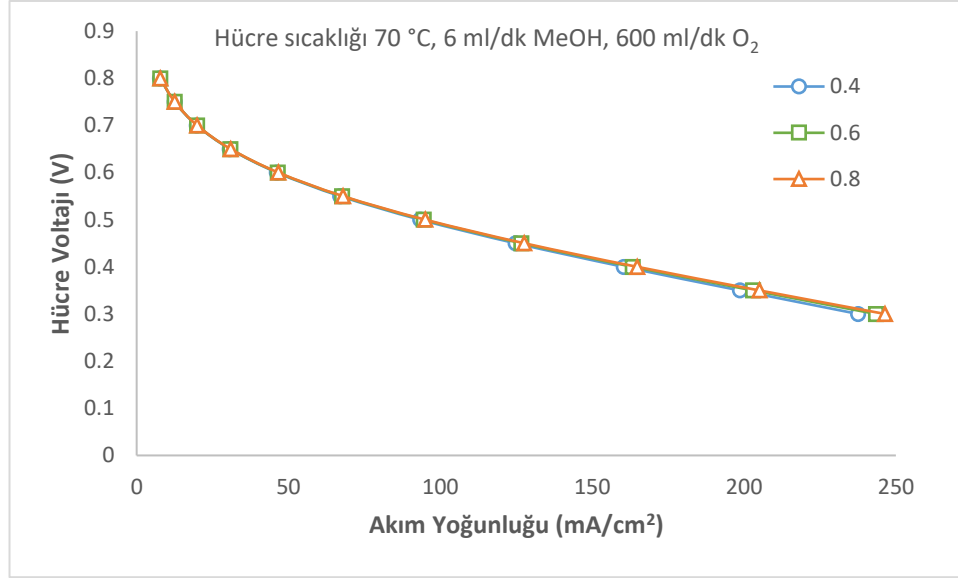
Tablo 5.4. Oksijen ve hava kullanıldığında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Kullanılan Oksidan	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
Oksijen	65,694
Hava	73,944

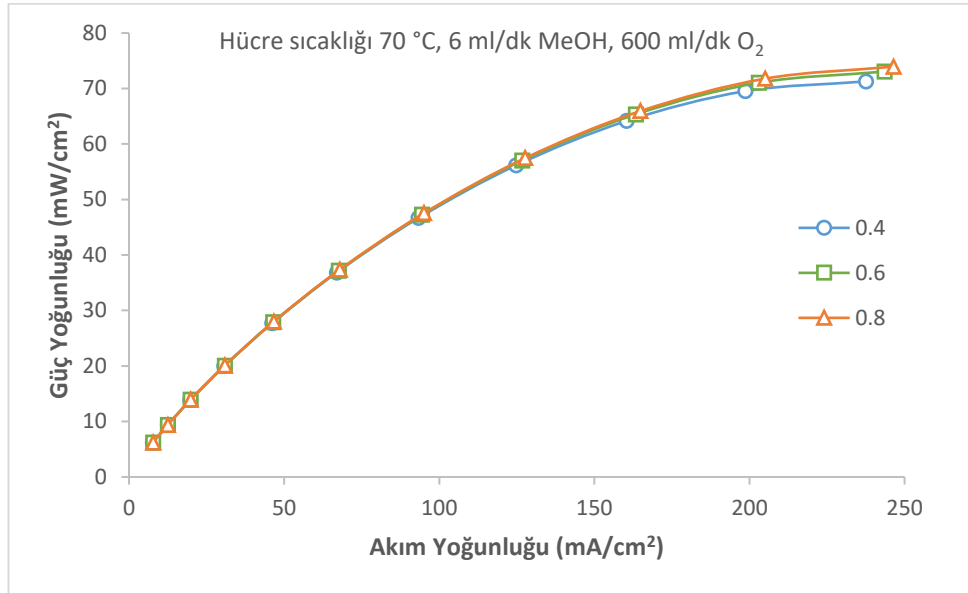
### 5.8. Anot Gaz Difüzyon Tabakası Gözenekliliğinin Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin etkisini incelemek için model üç farklı gözeneklilik değerinde (0,4; 0,6; 0,8) simülasyon programında analiz edilmiştir. Bu gözeneklilik değerlerindeki analiz sonuçları Şekil 5.22.'de polarizasyon eğrisi olarak ve Şekil 5.23.'te güç yoğunluğu eğrisi olarak gösterilmiştir. Simülasyona göre yakıt hücresi en iyi performansı 0,8 değerindeki gözeneklilikte göstermiştir. Bunun nedeni; gözenekliliğin artmasıyla reaksiyon alanına ulaşan metanolün miktarının artması ve aktif alanının genişlemesidir. Simülasyondaki varsayımlardan biri metanol geçişinin olmadığı kabul edilse de gözenekliliğin artmasıyla metanol akışına karşı direnç azaldığı için metanol geçişi artmaktadır. Metanol konsantrasyonuna, metanol akış hızına ve diğer tasarım parametrelerinin boyutlarına (kalınlıklarına, genişliklerine) göre en uygun değer; bu parametrelerin birbirlerine göre etkileri de değerlendirilerek

optimize edilmelidir. Anot difüzyon tabakasındaki gözenekliliğin artışı, anot difüzyon tabakasının kalınlığının azalmasının etkisine benzer olduğuna dair literatürde çalışma bulunmaktadır (Jayakumar ve ark., 2015). Bundan dolayı ikisi içinde en yüksek performansı oluşturacak değerler seçilmelidir.



Şekil 5.22. Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)



Şekil 5.23. Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

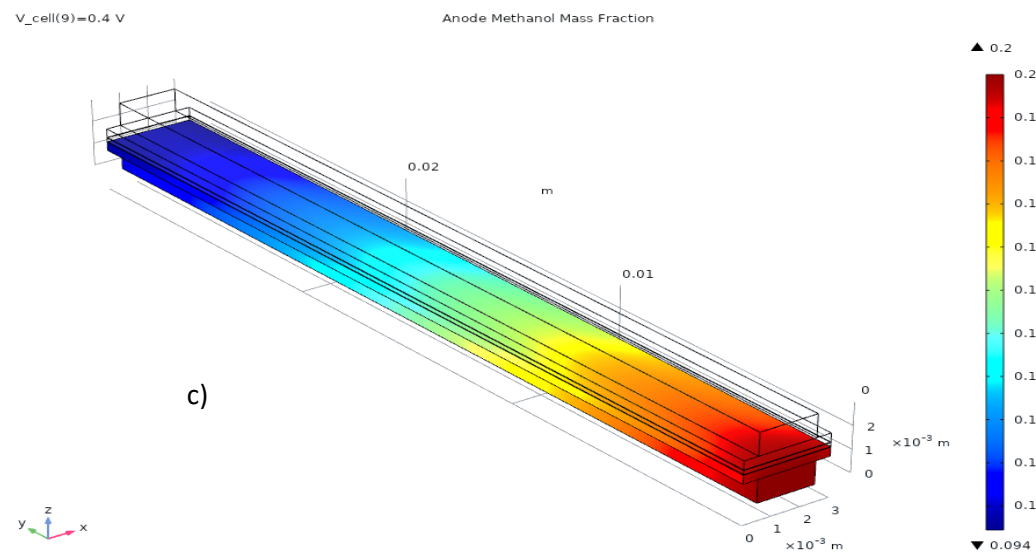
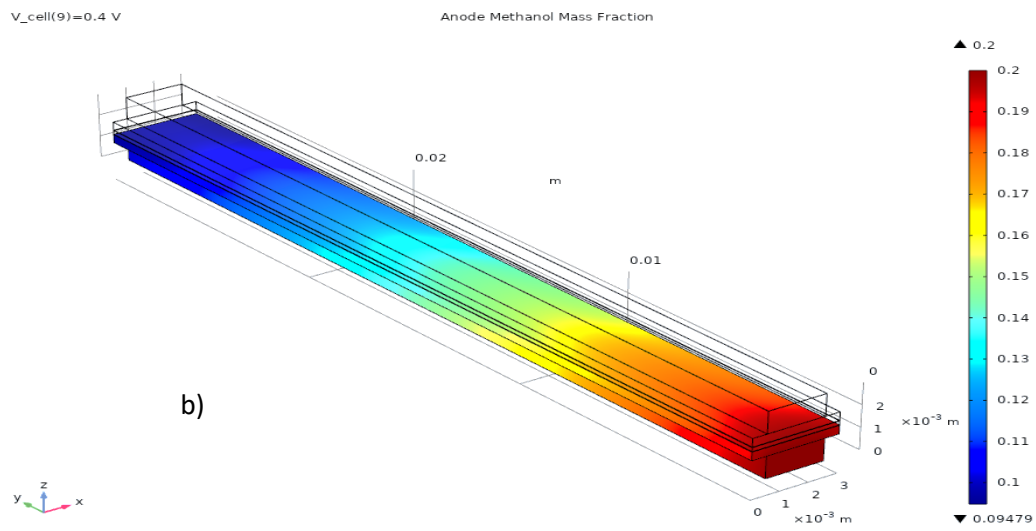
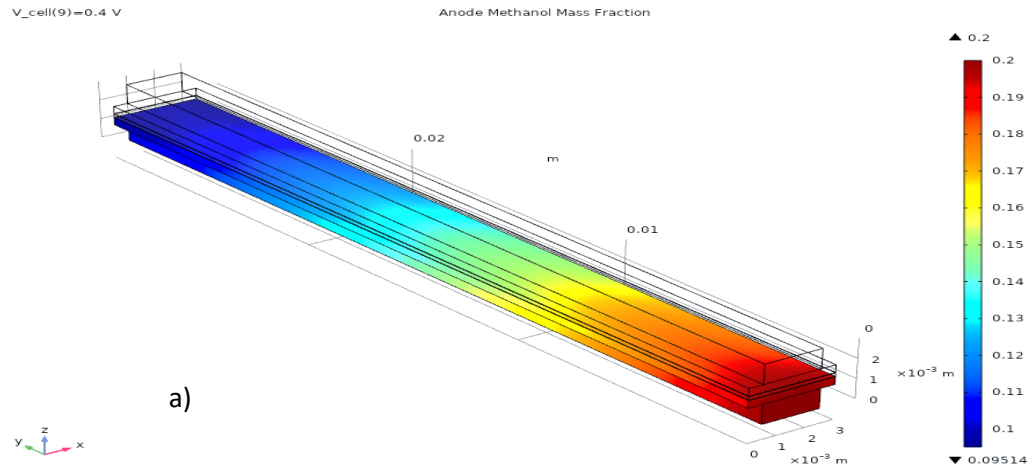
Tablo 5.5.'te farklı anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Farklı anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

<b>Anot Gaz Difüzyon Tabakası Gözenekliliği</b>	<b>En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm<sup>2</sup>)</b>
0,4	71,286
0,6	73,056
0,8	73,944

İncelenen her bir anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliği için anot tarafındaki metanol kütle oranındaki değişim Şekil 5.24.'te gösterilmiştir ve gözenekliliğin artmasıyla metanolün harcanma miktarı artmaktadır.

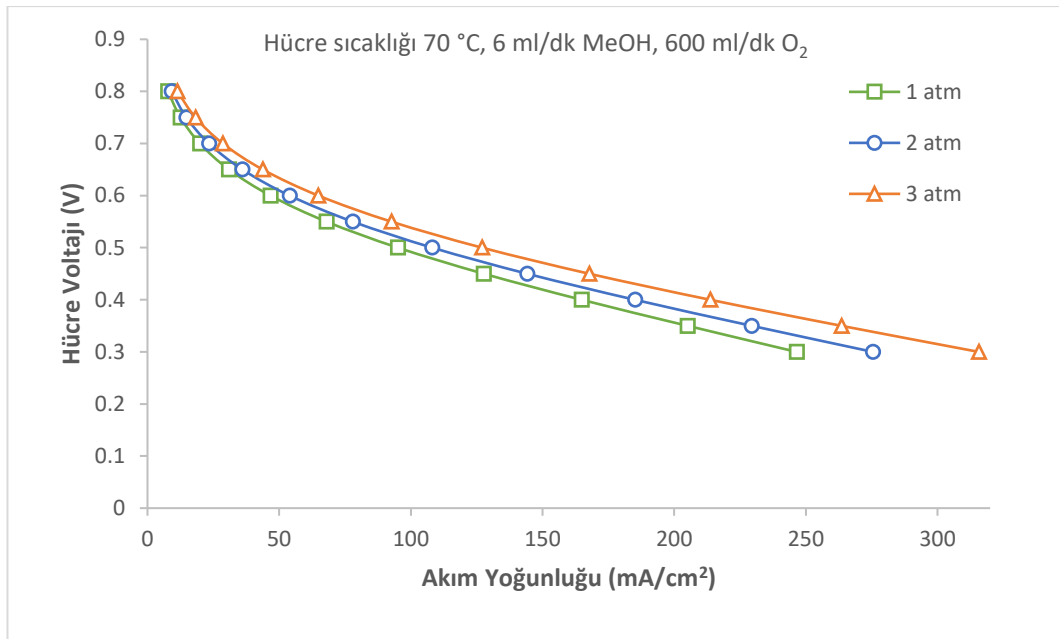




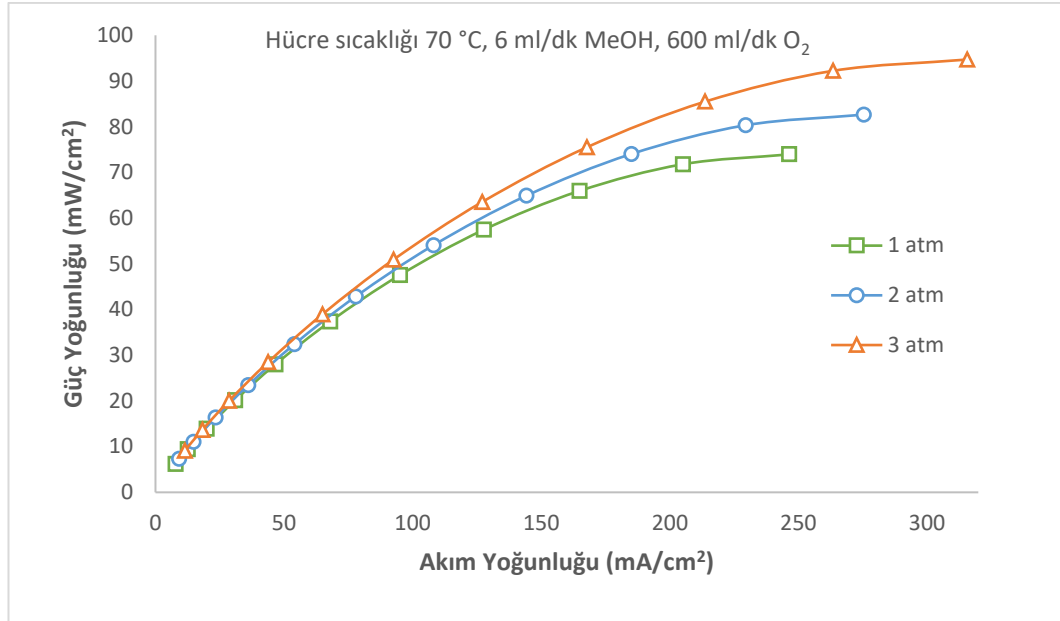
Şekil 5.24. Anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a)0.4 b)0.6 c)0.8

### 5.9. Katot Basıncının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Katot basıncının etkisini incelemek için model üç farklı basınçta (1 atm, 2 atm ve 3 atm) simülasyon programında analiz edilmiştir. Bu basınçlardaki analiz sonuçları Şekil 5.25.'te polarizasyon eğrisi olarak ve Şekil 5.26.'da güç yoğunluğu eğrisi olarak gösterilmiştir. Katot basıncının etkisi hücre voltajı azaldıkça daha belirgin hale gelmiştir. Simülasyona göre yakıt hücresi en iyi performansı 3 atm basınçta göstermiştir. Bunun nedeni; oksidan olan oksijenin difüzyon etkilerini arttırmasıdır.



Şekil 5.25. Katot basıncının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)



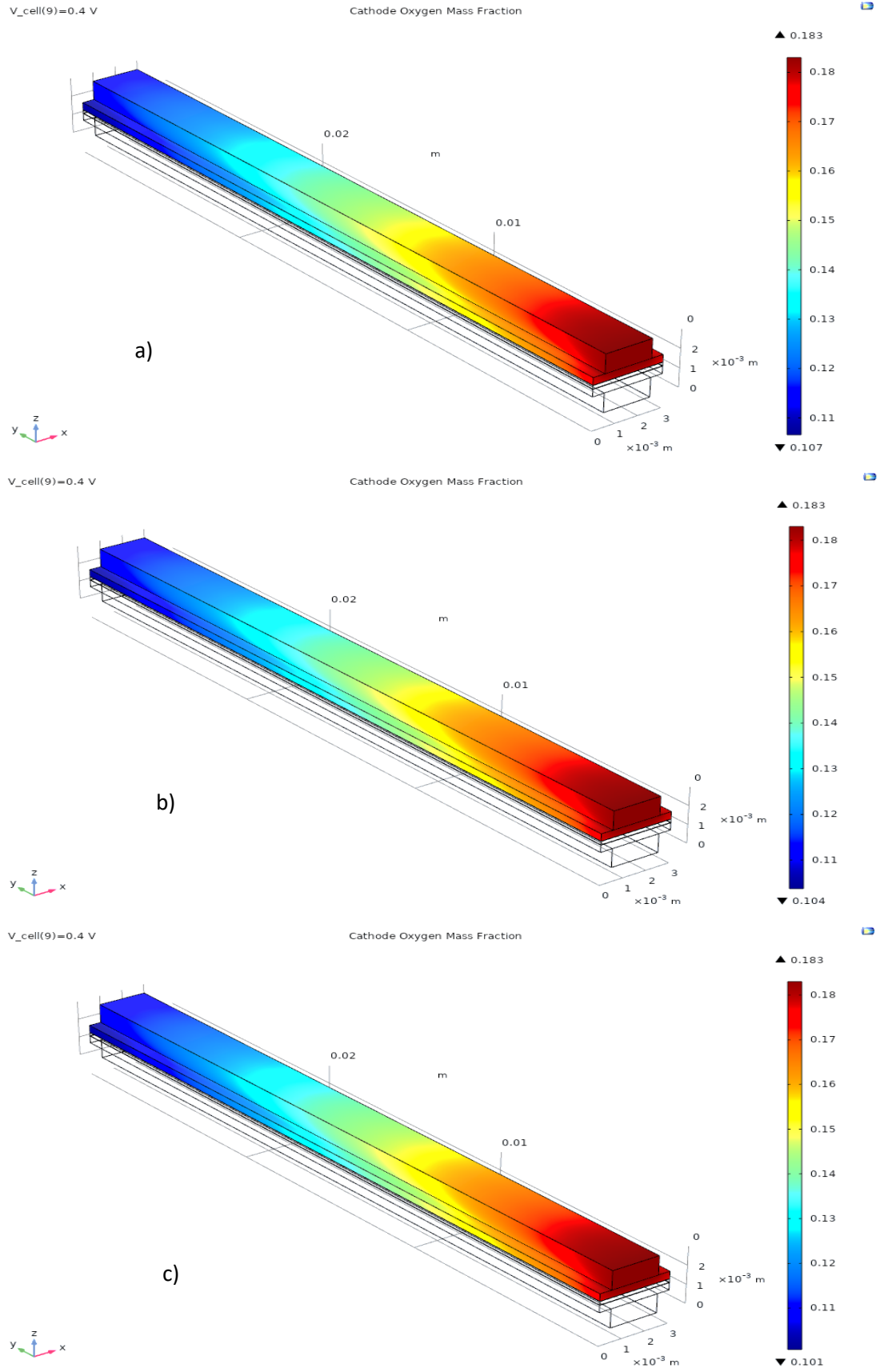
Şekil 5.26. Katot basıncının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

Tablo 5.6.'da farklı katot basınçlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.6. Farklı katot basınçlarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Katot Basıncı (atm)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
1	73,944
2	82,641
3	94,692

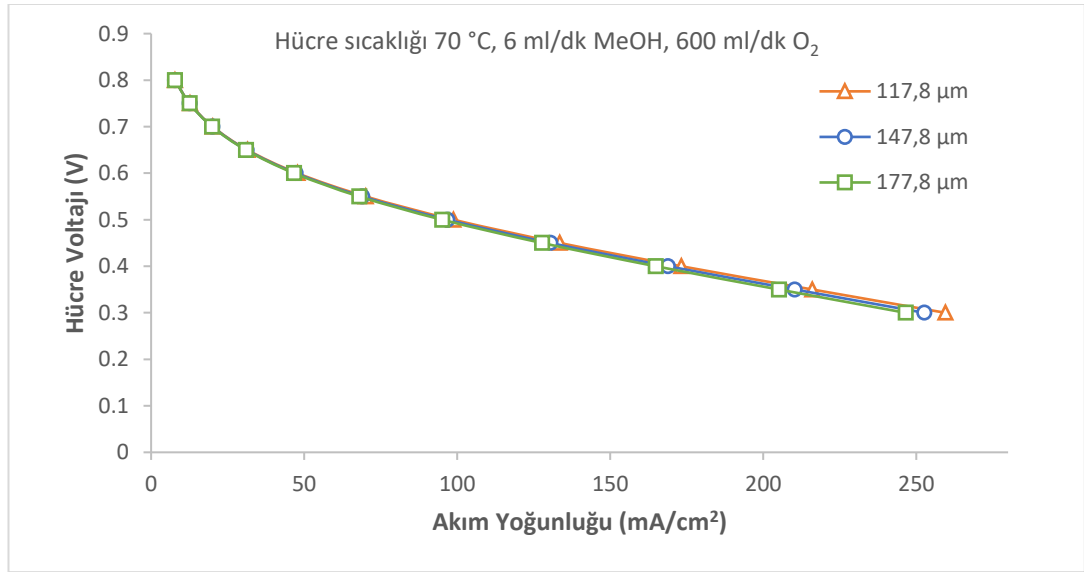
İncelenen her bir katot basıncı için katot tarafındaki oksijen kütle oranındaki değişim Şekil 5.27.'de gösterilmiştir. Şekil 5.27. incelendiğinde katot basıncı 1 atm'den 3 atm'ye çıkarıldığında oksijenin harcanma miktarı artmaktadır.



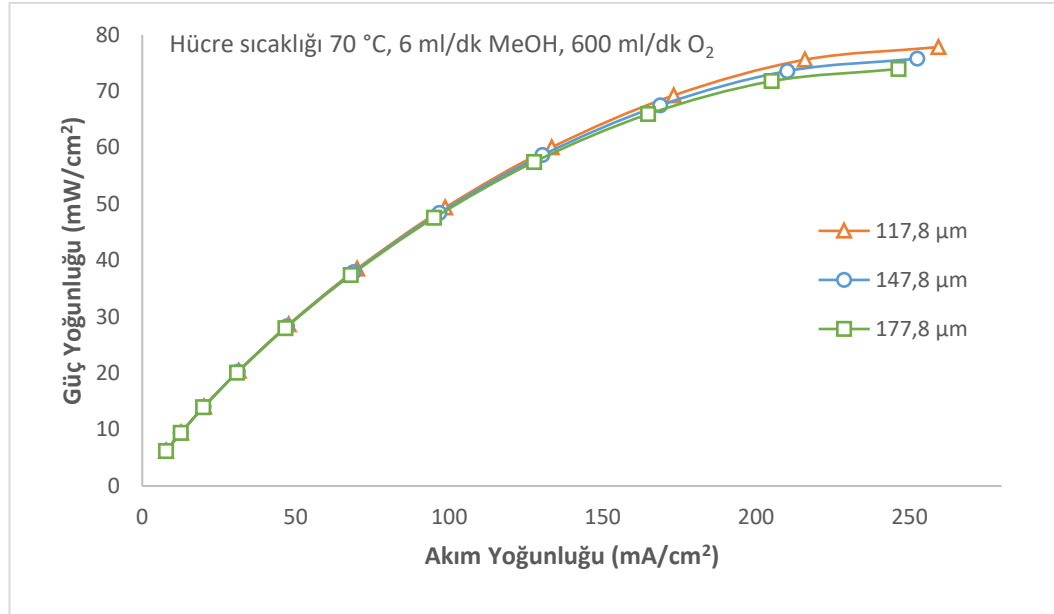
Şekil 5.27. Katot basıncının katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a)1 atm b)2 atm c)3 atm

### 5.10. Membran Kalınlığının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Membran kalınlığının etkisini incelemek için model üç farklı gözeneklilik değerinde simülasyon programında analiz edilmiştir. Sırasıyla 117,8  $\mu\text{m}$ , 147,8  $\mu\text{m}$  ve 177,8  $\mu\text{m}$  değerlerine ayarlanarak çözüm yapılmıştır. Üç farklı membran kalınlığı için yakıt hücresi performansları Şekil 5.28. ve Şekil 5.29.'da verilmiştir. Simülasyona göre yakıt hücresi en iyi performansı 117,8  $\mu\text{m}$  değerindeki membran kalınlığında göstermiştir. Analiz yaparken metanol geçişinin olmadığı kabul edildiği için proton geçişine karşı direncinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Metanol geçişinin olduğu kabul eden çalışmalar vardır. Bu çalışmalarda; çok ince membranın, metanol geçişine neden olmasından kaynaklı güç yoğunluğunda azalma meydana geldiği sonucuna varmışlardır (Deng ve ark., 2014).



Şekil 5.28. Membran kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)



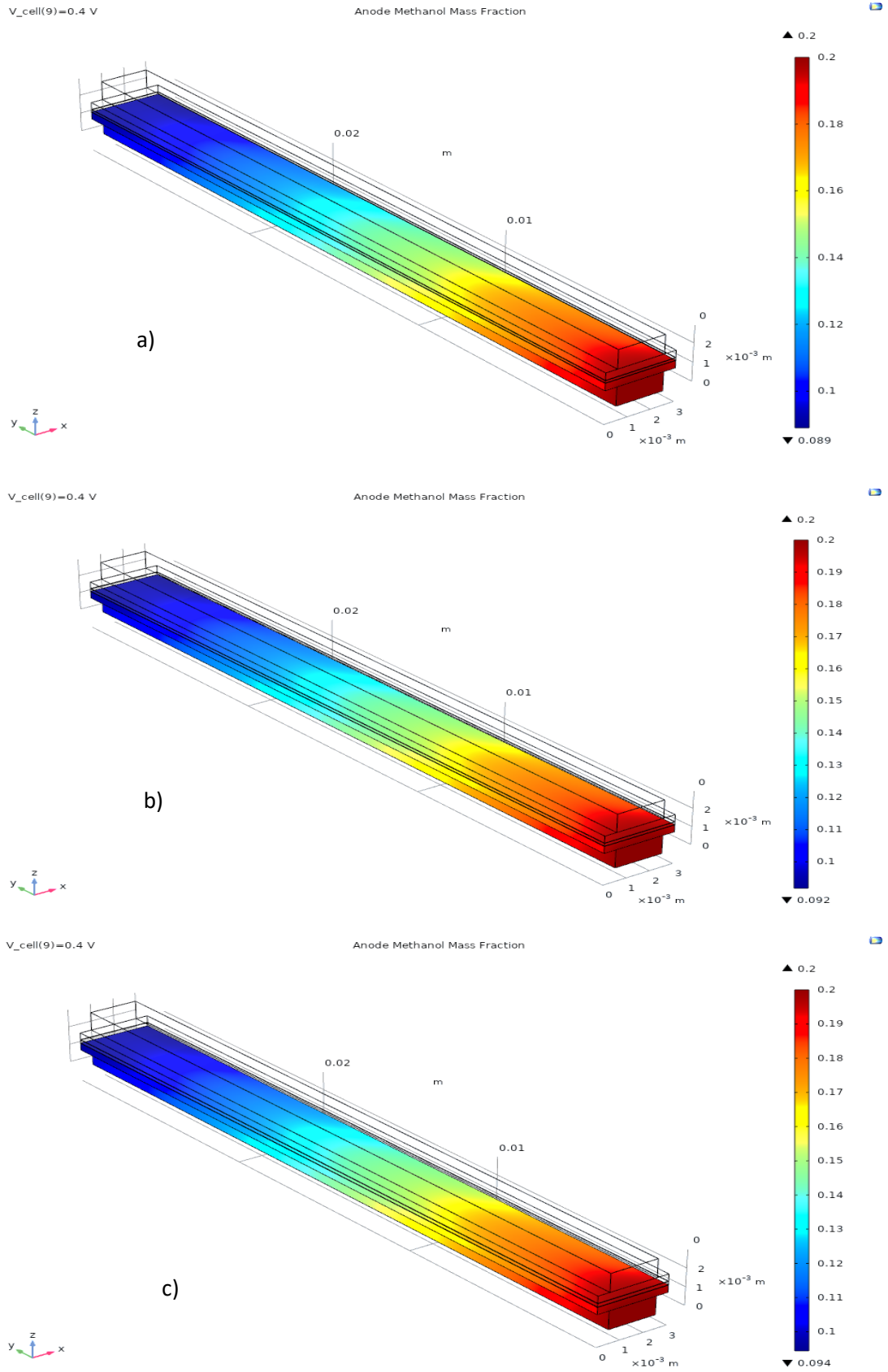
Şekil 5.29. Membran kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

Tablo 5.7.'de farklı membran kalınlıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.

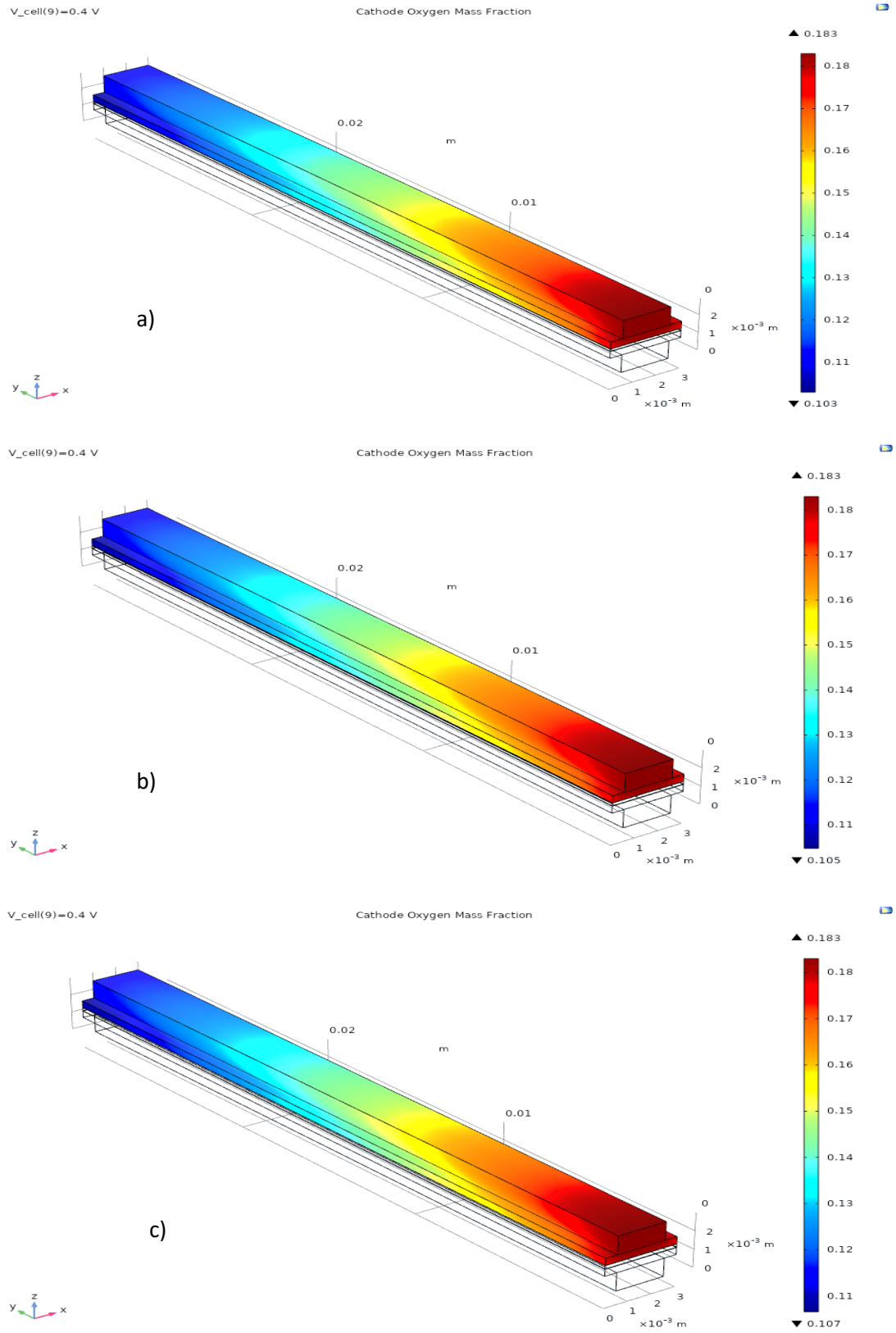
Tablo 5.7. Farklı membran kalınlıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Membran Kalınlığı (μm)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
177,8 μm	73,944
147,8 μm	75,774
117,8 μm	77,832

İncelenen her bir membran kalınlığı için anot tarafındaki metanol kütle oranındaki değişim ve katot tarafındaki oksijenin kütle oranındaki değişim Şekil 5.30. ve Şekil 5.31.'de gösterilmiştir. Şekil 5.30. incelendiğinde membran kalınlığı 177,8 μm'den 117,8 μm'ye azaltıldığında metanolün harcanma miktarı artmaktadır. Aynı durum Şekil 5.31.'e bakıldığında katot tarafındaki oksijen miktarındaki azalmanın membran kalınlığının azalmasıyla birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 5.30. Membran kalınlığının anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a)117,8  $\mu\text{m}$  b)147,8  $\mu\text{m}$  c)177,8  $\mu\text{m}$

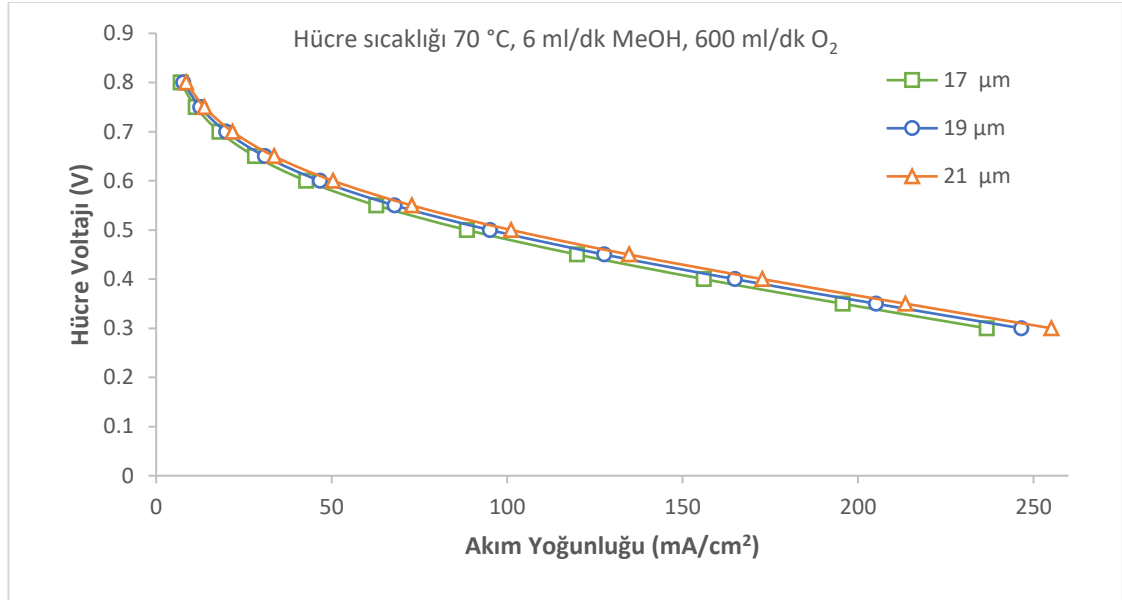


Şekil 5.31. Membran kalınlığının katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a) 117,8  $\mu\text{m}$  b) 147,8  $\mu\text{m}$  c) 177,8  $\mu\text{m}$

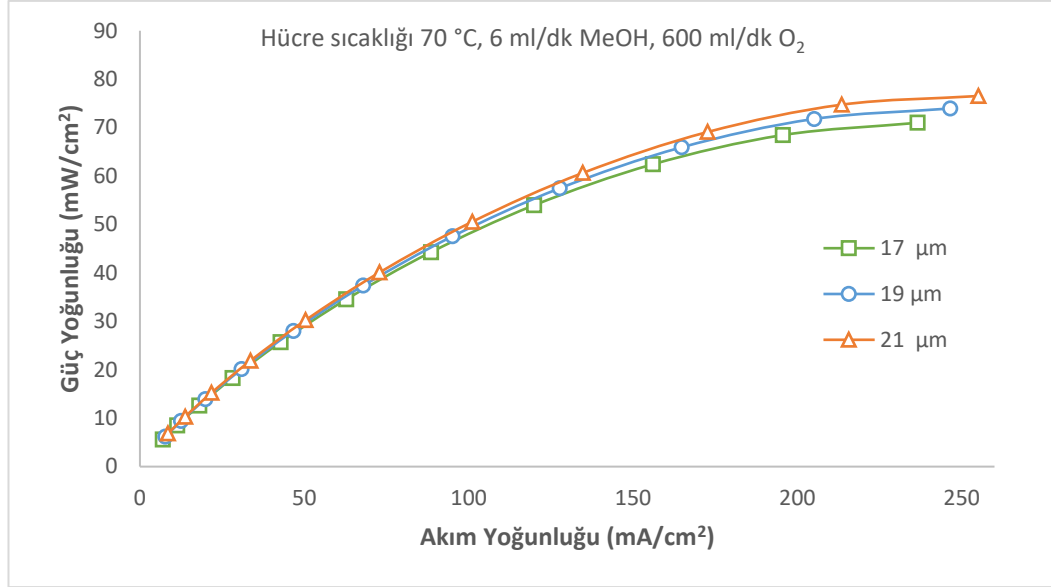


### 5.11. Anot Katalizör Tabakası Kalınlığının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Anot katalizör tabakası kalınlığı, doğrudan metanol yakıt hücresinin performansını etkileyen bir tasarım parametresidir. Bu kalınlıkların etkisini incelemek için model üç farklı değerde (17  $\mu\text{m}$ , 19  $\mu\text{m}$  ve 21  $\mu\text{m}$ ) simülasyon programında analiz edilmiştir. Bu kalınlıklardaki analiz sonuçları Şekil 5.32.'de polarizasyon eğrisi olarak ve Şekil 5.33.'te güç yoğunluğu eğrisi olarak gösterilmiştir. Katalizör tabakası kalınlığı, kullanılan katalizör miktarının geometrik olarak yansımasıdır. Bu yüzden katalizör tabakasındaki artış yakıt hücresi performansında artışa neden olmaktadır.



Şekil 5.32. Anot katalizör tabakası kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)



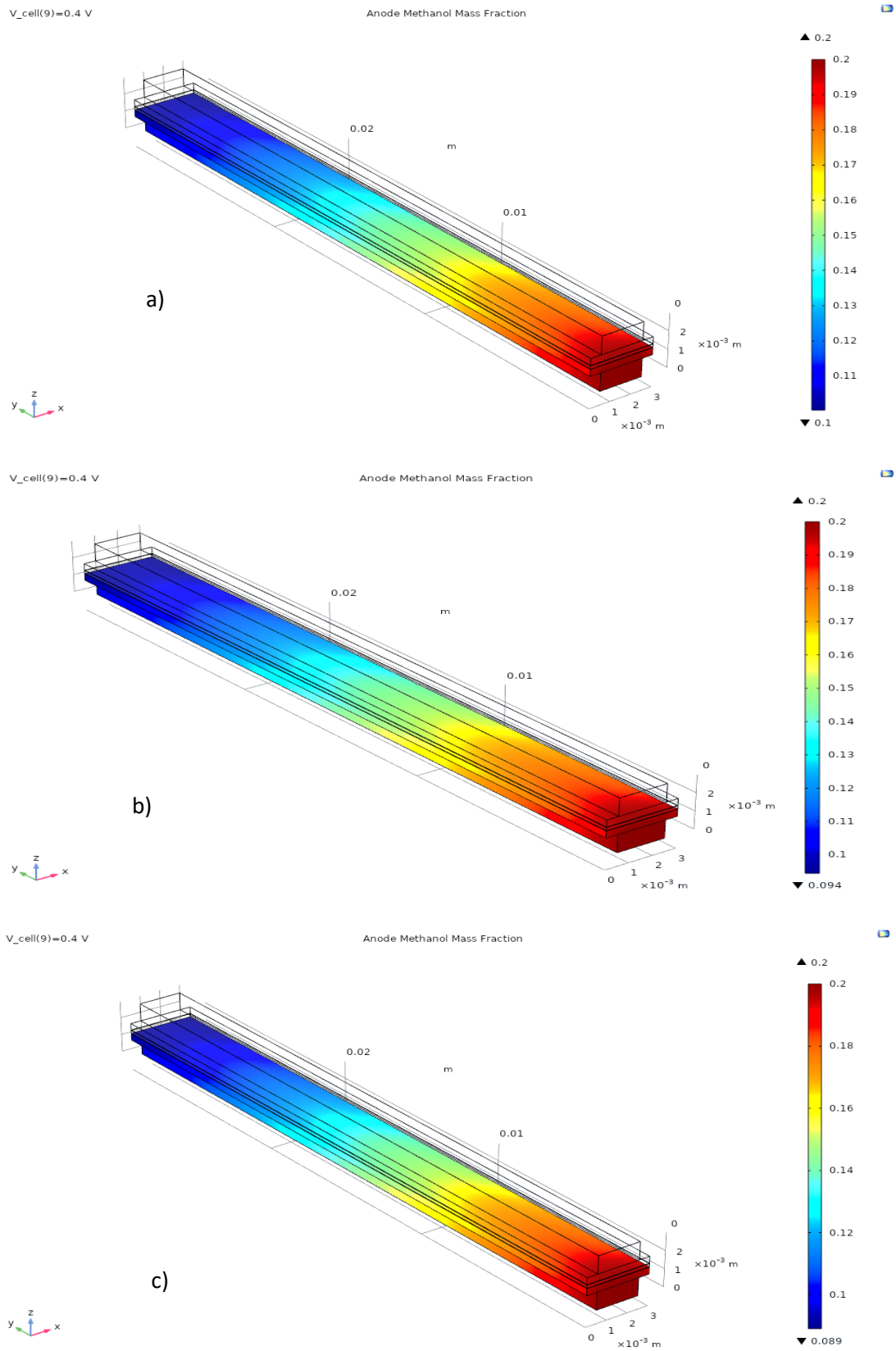
Şekil 5.33. Anot katalizör tabakası kalınlığının yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

Tablo 5.8.'de farklı anot katalizör tabakası kalınlıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.8. Farklı anot katalizör tabakası kalınlıklarında elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

<b>Anot Katalizör Tabakası Kalınlığı (μm)</b>	<b>En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm<sup>2</sup>)</b>
17 μm	70,992
19 μm	73,944
21 μm	76,524

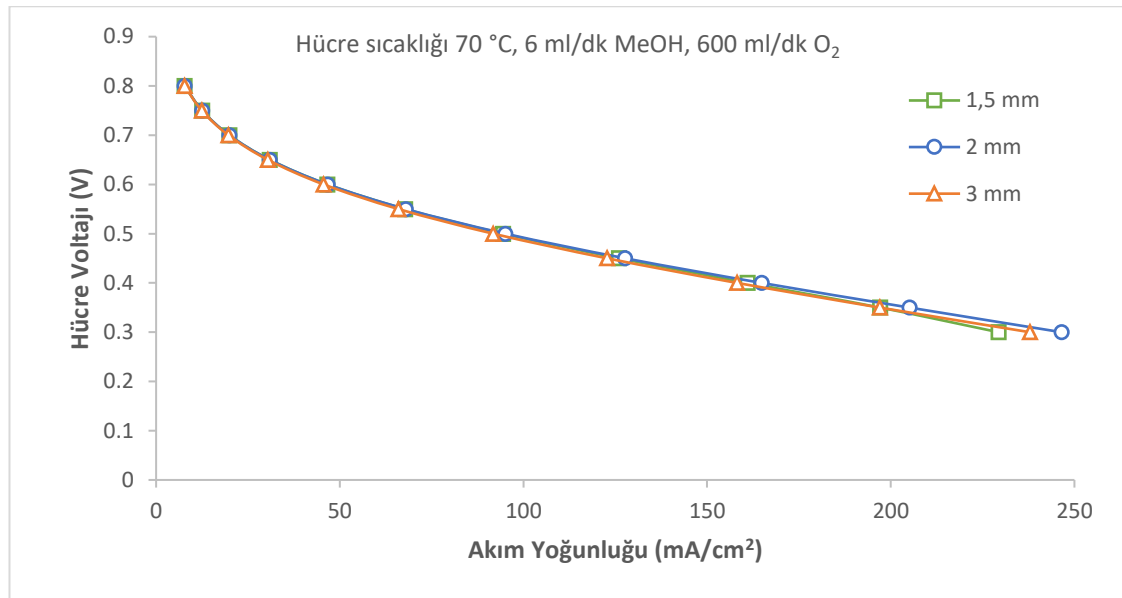
İncelenen her bir anot katalizör tabakası kalınlığı için anot tarafındaki metanol kütle oranındaki değişim Şekil 5.34.'te gösterilmiştir. Şekil 5.34. incelendiğinde katalizör tabakası kalınlığı arttıkça metanol kütle oranında daha fazla düşüş meydana gelmiştir.



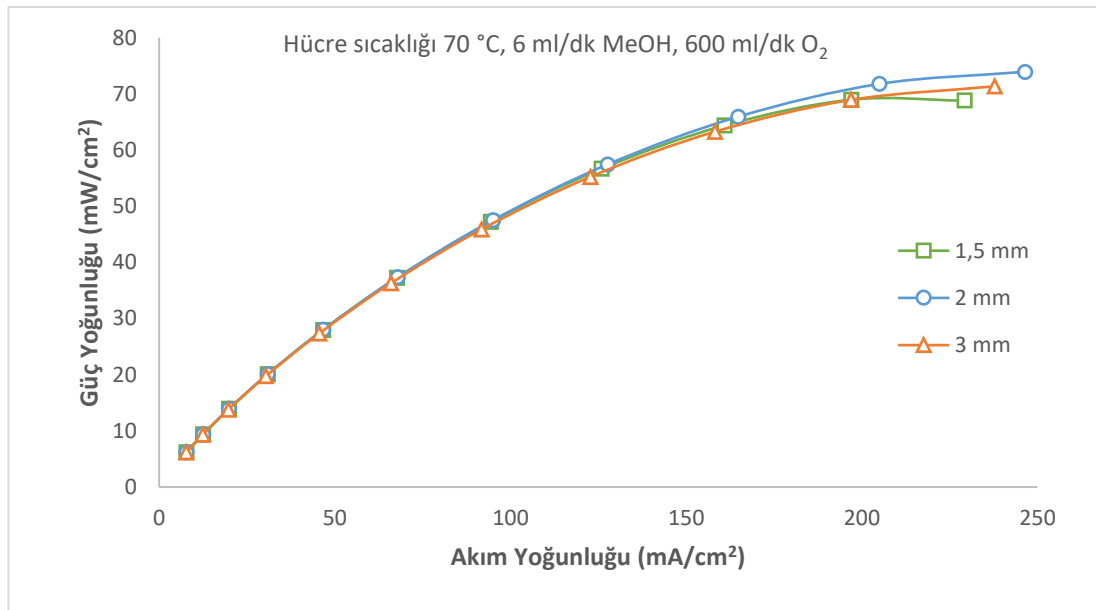
Şekil 5.34. Anot katalizör tabakası kalınlığının anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a) 17  $\mu\text{m}$  b) 19  $\mu\text{m}$  c) 21  $\mu\text{m}$

### 5.12. Akış Kanalı Genişliğinin Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

Geometrik parametrelerden biri olan akış kanalı genişliğinin, doğrudan metanol yakıt hücresinin performansına etkisini incelemek için 1,5 mm, 2 mm ve 3 mm değerlerinde analiz yapılmıştır. Şekil 5.35. ve Şekil 5.36. incelendiğinde, akış kanalı genişliği yakıt hücresi performansı üzerinde yüksek bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, akış kanalı genişliğinin oldukça dar olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 5.9.'da farklı akış kanalı genişliklerinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.35. Akış kanalı genişliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (polarizasyon eğrisi)

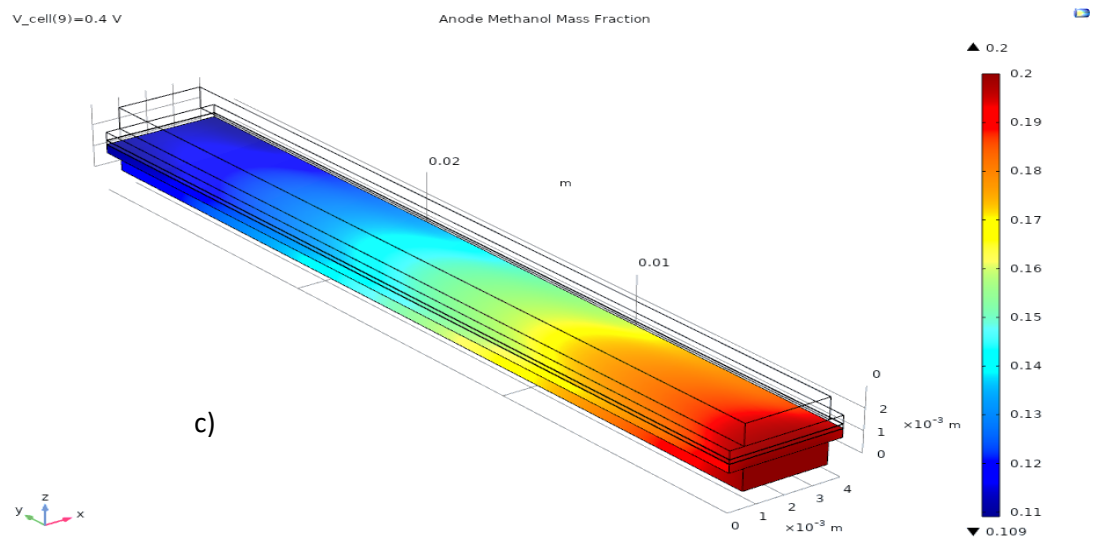
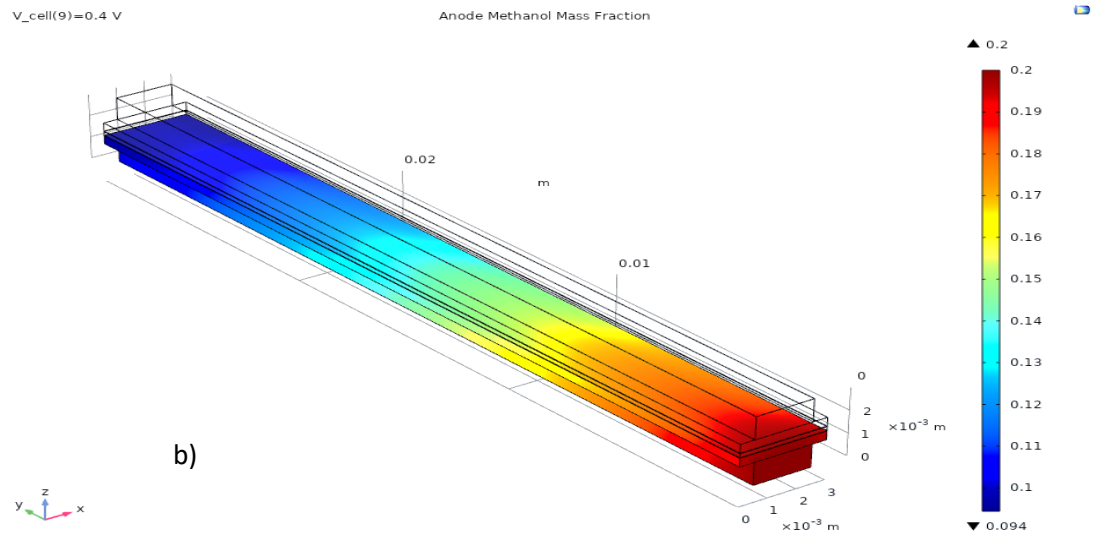
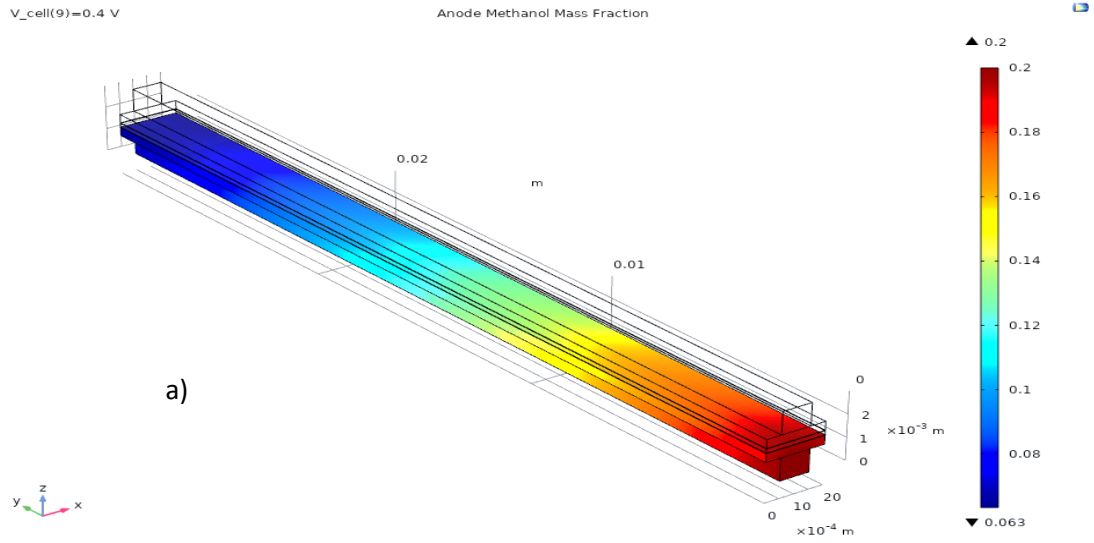


Şekil 5.36. Akış kanalı genişliğinin yakıt hücresi performansına etkisi (güç yoğunluğu eğrisi)

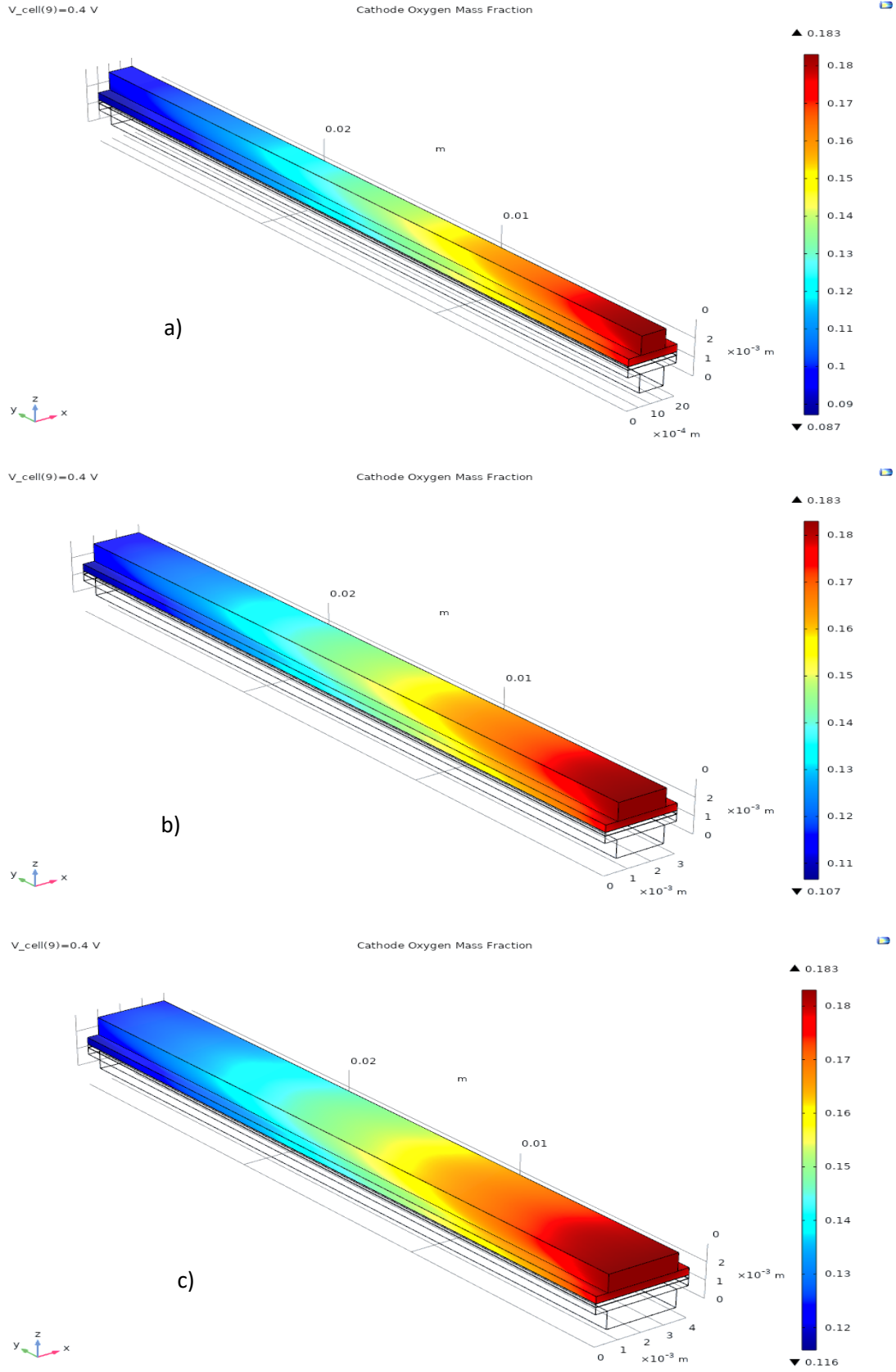
Tablo 5.9. Farklı akış kanalı genişliklerinde elde edilen en yüksek güç yoğunluğu değerleri

Akış Kanalı Genişlikleri (mm)	En Yüksek Güç Yoğunluğu (mW/cm <sup>2</sup> )
1,5 mm	68,796
2 mm	73,944
3 mm	71,355

İncelenen her bir akış kanalı genişliği için anot tarafındaki metanol ve katot tarafındaki oksijenin kütle oranındaki değişim Şekil 5.37. ve Şekil 5.38.'de gösterilmiştir. Şekil 5.37. incelendiğinde akış kanalı genişliği 1,5 mm'den 3 mm'ye çıkarıldığında metanolün harcanma miktarı azalmaktadır. Aynı durum Şekil 5.38.'e bakıldığında katot tarafındaki oksijen miktarındaki azalmanın akış kanalı genişliğindeki artışla birlikte azaldığı görülmektedir. Burada reaktantların kütle oranlarındaki dağılımlar, dar genişliğe sahip akış kanalında yüksek performansın elde edileceğini göstermektedir. Ama grafikler incelendiğinde durumun böyle olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, akış kanalının genişlemesiyle reaksiyon alanının da genişlemesidir. Yani reaksiyon alanının genişlemesiyle yakıt hücresi performansından artış görülmüştür.



Şekil 5.37. Akış kanalı genişliğinin anottaki metanol kütle oranı dağılımına etkisi a)1,5 mm b)2 mm c)3 mm



Şekil 5.38. Akış kanalı genişliğinin katottaki oksijen kütle oranı dağılımına etkisi a)1,5 mm b)2 mm c)3 mm

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Bu tezde, gelecek için umut verici bir teknoloji olan yakıt hücreleri üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada; doğrudan metanol yakıt hücresinin matematiksel modeli kullanılmış olup çalışma ve tasarım parametrelerinin, akım yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna etkileri incelenmiştir. COMSOL Multiphysics programı kullanılarak üç boyutlu, izotermal doğrudan metanol yakıt hücresi modeli oluşturuldu. Referans alınan literatürdeki deneysel çalışmada kullanılan parametrelerle modellenen doğrudan metanol yakıt hücresi modeli, deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Uygun mesh yapısı ve eleman sayısı belirlenerek çözümleme tekrarlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre ağ bağımsızlığının olduğu gösterilmiştir. Daha sonra bu modelde çalışma ve tasarım parametrelerinden olan hücre sıcaklığının, metanol akış hızının, oksijen akış hızının, katottaki oksidanın, anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin, katot basıncının, membran kalınlığının, anot katalizör tabakası kalınlığının ve akış kanalı genişliğinin etkileri incelenmiştir. Farklı hücre voltajlarında simülasyonun çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrileri olarak gösterilmiştir. Parametrelerin her bir değeri için anot ve katot tarafındaki reaktantların ve ürünlerin kütle oranlarındaki değişimi görsel olarak eklenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde anot tarafındaki yakıt olarak kullanılan metanol reaktantının ve diğer bir reaktant olan suyun kütle oranının çıkışa doğru azaldığı görülmektedir. Ürün olarak oluşan karbondioksidin ise çıkışa doğru kütle oranında artış görülmektedir. Katot tarafında ise reaktant olan oksijenin kütle oranının çıkışa doğru azaldığı görülmektedir. Katot tarafında gerçekleşen oksijen redüksiyonu sonucu oluşan suyun kütle oranının arttığı görülmektedir. Literatürdeki incelemeler sonucunda hücre performansına en fazla etki eden çalışma ve tasarım parametreleri sırasıyla incelenmiştir. Sıcaklığın artması, anot akış kanalı girişindeki metanol akış



hızının artması, katot akış kanalı girişindeki oksijen akış hızının artması, katotta kullanılan oksidanın oksijen olması, anot gaz difüzyon tabakası gözenekliliğinin artması, katot basıncının artması, anot katalizör tabakası kalınlığının artması, akış kanalı genişliğinin artması, membran kalınlığının azalması modellenen üç boyutlu doğrudan metanol yakıt hücresinin akım yoğunluğunu ve güç yoğunluğunu arttırmıştır.

Genel olarak yukarıdaki ifadelerden anlaşıldığı üzere birçok parametrenin farklı değerleri için yakıt hücresinin akım yoğunlukları ve güç yoğunlukları değişkenlik göstermektedir. Bu tezde yapılan analizler sonucunda, hücre sıcaklığı 70 °C, metanol akış hızı 6 ml/dk, oksijen akış hızı 600 ml/dk ve katot basıncı 3 atm değerlerine sahip olduğunda en yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu değer 94,6 mW/cm<sup>2</sup>'dir.

## KAYNAKLAR

- Abdelkareem, M. A. et al. (2019) 'Comparative analysis of liquid versus vapor-feed passive direct methanol fuel cells', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, pp. 563–584.
- Abdulkareem, A. S. et al. (2012) 'Development of composite proton exchange membrane from polystyrene butadiene rubber and carbon nanoballs for fuel cell application', in *Energy Procedia*. Elsevier, pp. 2026–2037.
- Alizadeh, E. et al. (2013) 'Effect of Channel Depth and Cell Temperature on the Performance of a Direct Methanol Fuel Cell', *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 10(3).
- Almheiri, S. and Liu, H. (2015) 'Direct measurement of methanol crossover fluxes under land and channel in direct methanol fuel cells', *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), pp. 10969–10978.
- Alrashidi, A. and Liu, H. (2021) 'Laser-perforated anode gas diffusion layers for direct methanol fuel cells', *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Atacan, O. F., Ouellette, D. and Colpan, C. O. (2017) 'Two-dimensional multiphase non-isothermal modeling of a flowing electrolyte – Direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), pp. 2669–2679.
- Barbir, F. (2005) 'CHAPTER 4 - Main Cell Components, Materials Properties and Processes', in Barbir, F. B. T.-P. E. M. F. C. (ed.). Burlington: Academic Press, pp. 73–113.
- Barbir, F. (2005) 'Fuel Cell Basic Chemistry and Thermodynamics', in *PEM Fuel Cells*. Elsevier, pp. 17–32.
- Biswas, M. A. R. et al. (2014) 'Systematic approach for modeling methanol mass transport on the anode side of direct methanol fuel cells', *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), pp. 8009–8025.
- Braz, B. A. et al. (2019) 'Effect of the current collector design on the performance of a passive direct methanol fuel cell', *Electrochimica Acta*, 300, pp. 306–315.
- Braz, B. A., Oliveira, V. B. and Pinto, A. M. F. R. (2020) 'Optimization of a passive direct methanol fuel cell with different current collector materials', *Energy*, 208, p. 118394.
- Chen, S., Ye, F. and Lin, W. (2010) 'Effect of operating conditions on the performance of a direct methanol fuel cell with PtRuMo/CNTs as anode catalyst', *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(15), pp. 8225–8233.

- Cheng, Y. et al. (2020) 'Significantly enhanced performance of direct methanol fuel cells at elevated temperatures', *Journal of Power Sources*, 450, p. 227620.
- Colpan, C. O. and Ouellette, D. (2018) 'Three dimensional modeling of a FE-DMFC short-stack', *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(11), pp. 5951–5960.
- Colpan, C. O., Fung, A. and Hamdullahpur, F. (2012) '2D modeling of a flowing-electrolyte direct methanol fuel cell', *Journal of Power Sources*, 209, pp. 301–311.
- Das, S. et al. (2020) '1 - Introduction to direct methanol fuel cells', in Dutta, K. B. T.-D. M. F. C. T. (ed.). Elsevier, pp. 1–12.
- Deng, H. et al. (2014) 'An analytical model for alkaline membrane direct methanol fuel cell', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 74, pp. 376–390.
- El-Zoheiry, R. M., Mori, S. and Ahmed, M. (2019) 'Using multi-path spiral flow fields to enhance under-rib mass transport in direct methanol fuel cells', *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(58), pp. 30663–30681.
- Falcão, D. S. et al. (2015) 'Development and performance analysis of a metallic passive micro-direct methanol fuel cell for portable applications', *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(15), pp. 5408–5415.
- García-Salaberri, P. A. and Vera, M. (2016) 'On the effect of operating conditions in liquid-feed direct methanol fuel cells: A multiphysics modeling approach', *Energy*, 113, pp. 1265–1287.
- Ge, J. and Liu, H. (2005) 'Experimental studies of a direct methanol fuel cell', *Journal of Power Sources*, 142(1), pp. 56–69.
- Geiger, A. (2002) Characterization and development of direct methanol fuel cells, ProQuest Dissertations and Theses. Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich (Switzerland).
- Giacoppo, G., Cipiti, F. and Barbera, O. (2020) '14 - Mathematical modeling approaches in direct methanol fuel cells', in Dutta, K. B. T.-D. M. F. C. T. (ed.). Elsevier, pp. 423–441.
- Guo, T. et al. (2015) 'Transient analysis of passive direct methanol fuel cells with different operation and design parameters', *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(43), pp. 14978–14995.
- Gwak, G. et al. (2015) 'Analyzing the effects of fluctuating methanol feed concentration in active-type direct methanol fuel cell (DMFC) systems', *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(15), pp. 5396–5407.
- Gwak, G. et al. (2018) 'Studies of the methanol crossover and cell performance behaviors of high temperature-direct methanol fuel cells (HT-DMFCs)', *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(30), pp. 13999–14011.
- Hamnett, A. (1997) 'Mechanism and electrocatalysis in the direct methanol fuel cell', *Catalysis Today*, 38(4), pp. 445–457.
- He, Y. L., Miao, Z. and Yang, W. W. (2012) 'Characteristics of heat and mass transport in a passive direct methanol fuel cell operated with concentrated methanol', *Journal of Power Sources*, 208, pp. 180–186.

- Hsieh, S. S. and Her, B. S. (2007) 'Heat transfer and pressure drop in serpentine  $\mu$ DMFC flow channels', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(25–26), pp. 5323–5327.
- Hu, X. Q. et al. (2019) 'Power generation enhancement in direct methanol fuel cells using non-uniform cross-sectional serpentine channels', *Energy Conversion and Management*, 188, pp. 438–446.
- Hwang, Y.-S. et al. (2014) 'Effect of compression thickness on performance of gas diffusion layer of direct methanol fuel cells', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(3), pp. 215–221.
- Ismail, A. et al. (2019) 'Development of optimisation model for direct methanol fuel cells via cell integrated network', *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(58), pp. 30606–30617.
- Jayakumar, A. et al. (2015) 'A technical review on gas diffusion, mechanism and medium of PEM fuel cell', *Ionics*, 21(1), pp. 1–18.
- Ji, F. et al. (2017) 'A novel method for analysis and prediction of methanol mass transfer in direct methanol fuel cell', *Energy Conversion and Management*, 154, pp. 482–490.
- Jiang, J. et al. (2019) 'Modeling of high-efficient direct methanol fuel cells with order-structured catalyst layer', *Applied Energy*, 252, p. 113431.
- Jung, S. (2013) 'Non-isothermal multi-dimensional direct methanol fuel cell model with micro-porous layers mitigating water/methanol crossover', *Journal of Power Sources*, 231, pp. 60–81.
- Karaoglan, M. U. et al. (2021) 'Comparison of single-cell testing, short-stack testing and mathematical modeling methods for a direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(6), pp. 4844–4856.
- Ko, J., Chippar, P. and Ju, H. (2010) 'A one-dimensional, two-phase model for direct methanol fuel cells - Part I: Model development and parametric study', *Energy*, 35(5), pp. 2149–2159.
- Lee, J. et al. (2017) 'Numerical modeling and simulations of active direct methanol fuel cell (DMFC) systems under various ambient temperatures and operating conditions', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), pp. 1736–1750.
- Liu, G. et al. (2016) 'Effect of fabrication and operating parameters on electrochemical property of anode and cathode for direct methanol fuel cells', *Energy Conversion and Management*, 122, pp. 366–371.
- Liu, G. et al. (2020) 'Cathode catalyst layer with nanofiber microstructure for direct methanol fuel cells', *Energy Conversion and Management*, 218, p. 113013.
- Liu, W. (2005) *Methanol, water and heat transport in direct methanol fuel cells for portable power*, ProQuest Dissertations and Theses. The Pennsylvania State University.
- Matar, S. and Liu, H. (2010) 'Effect of cathode catalyst layer thickness on methanol cross-over in a DMFC', *Electrochimica Acta*, 56(1), pp. 600–606.

- Matar, S. S. (2012) Methanol crossover in direct methanol fuel cells, ProQuest Dissertations and Theses. University of Miami.
- Mekhilef, S., Saidur, R. and Safari, A. (2012) 'Comparative study of different fuel cell technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), pp. 981–989.
- Mudiraj, S. P. (2015) Advanced Model-Based Control Design for Direct Methanol Fuel Cell Systems, ProQuest Dissertations and Theses. University of Florida.
- Narayanan, S. R. et al. (1996) 'Recent advances in PEM liquid-feed direct methanol fuel cells', in *Proceedings of 11th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, pp. 113–122.
- Olah, G. A. (2005) 'Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy', *Angewandte Chemie International Edition*, 44(18), pp. 2636–2639.
- Oliveira, V. B., Rangel, C. M. and Pinto, A. M. F. R. (2010) 'Effect of anode and cathode flow field design on the performance of a direct methanol fuel cell', *Chemical Engineering Journal*, 157(1), pp. 174–180.
- Ouellette, D. et al. (2018) 'Assessment of different bio-inspired flow fields for direct methanol fuel cells through 3D modeling and experimental studies', *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), pp. 1152–1170.
- Ouellette, D., Gencalp, U. and Colpan, C. O. (2017) 'Effect of cathode flow field configuration on the performance of flowing electrolyte-direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), pp. 2680–2690.
- Özdiñçer, B. (2017) Novel Support Materials for Direct Methanol Fuel Cell Catalysts, PQDT - Global. The University of Manchester (United Kingdom).
- Pinto, A. M. F. R., Oliveira, V. B. and Falcão, D. S. (2018) '6 - Development of direct alcohol fuel cells components', in Pinto, A. M. F. R., Oliveira, V. B., and Falcão, D. S. B. T.-D. A. F. C. for P. A. (eds). Academic Press, pp. 209–244.
- Raj, V. (2020) '16 - Direct methanol fuel cells in portable applications: materials, designs, operating parameters, and practical steps toward commercialization', in Dutta, K. B. T.-D. M. F. C. T. (ed.). Elsevier, pp. 495–525.
- Ramesh, V. and Krishnamurthy, B. (2018) 'Modeling the transient temperature distribution in a direct methanol fuel cell', *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 809, pp. 1–7.
- Sabet-Sharghi, N. (2011) Experimental Analysis of a Single Cell Flowing Electrolyte-Direct Methanol Fuel Cell, ProQuest Dissertations and Theses. Carleton University (Canada).
- Sabet-Sharghi, N. (2011) Experimental Analysis of a Single Cell Flowing Electrolyte-Direct Methanol Fuel Cell, ProQuest Dissertations and Theses. Carleton University (Canada).
- Sazali, N. et al. (2020) 'New Perspectives on Fuel Cell Technology: A Brief Review', *Membranes*, 10(5), p. 99.

- Schultz, T., Zhou, S. and Sundmacher, K. (2001) 'Current Status of and Recent Developments in the Direct Methanol Fuel Cell', *Chemical Engineering & Technology*, 24(12), pp. 1223–1233.
- Scott, K. et al. (1999) 'Limiting current behaviour of the direct methanol fuel cell', *Electrochimica Acta*, 45(6), pp. 945–957.
- Sebastián, D. et al. (2016) 'Performance analysis of a non-platinum group metal catalyst based on iron-aminoantipyrine for direct methanol fuel cells', *Applied Catalysis B: Environmental*, 182, pp. 297–305.
- Su, X. et al. (2020) 'CO<sub>2</sub> bubble behaviors and two-phase flow characteristics in single-serpentine sinusoidal corrugated channels of direct methanol fuel cell', *Journal of Power Sources*, 450, p. 227621.
- Sudaroli, B. M. and Kolar, A. K. (2014) 'Heat and mass transfer characteristics of direct methanol fuel cell: Experiments and model', in *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, pp. 359–366.
- Sundén, B. (2019) 'Chapter 8 - Fuel cell types - overview', in *Sundén Batteries and Fuel Cells*, B. B. T.-H. (ed.). Academic Press, pp. 123–144.
- Tafaoli-Masoule, M., Bahrami, A. and Elsayed, E. M. (2014) 'Optimum design parameters and operating condition for maximum power of a direct methanol fuel cell using analytical model and genetic algorithm', *Energy*, 70, pp. 643–652.
- Takmeel, Q. (2016) 3D anodes for direct methanol fuel cells: Science and synthesis, ProQuest Dissertations and Theses. University of Florida.
- Tan, W. C. et al. (2018) 'Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, pp. 181–197.
- Wan, N. (2017) 'High performance direct methanol fuel cell with thin electrolyte membrane', *Journal of Power Sources*, 354, pp. 167–171.
- Wang, B. Y. et al. (2013) 'Cell performance modeling of direct methanol fuel cells using proton-exchange solid electrolytes: Effective reactant diffusion coefficients in porous diffusion layers', *Journal of Power Sources*, 227, pp. 275–283.
- Wang, L. et al. (2013) 'Non-isothermal modeling of a small passive direct methanol fuel cell in vertical operation with anode natural convection effect', *Energy*, 58, pp. 283–295.
- Wang, L. et al. (2021) 'Evaluation of structural aspects and operation environments on the performance of passive micro direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), pp. 2594–2605.
- Wang, M. et al. (2018) 'A study on fuel additive of methanol for room temperature direct methanol fuel cells', *Energy Conversion and Management*, 168, pp. 270–275.

- Wang, Y. (2007) A monolithic hybrid direct methanol fuel cell & an equivalent nonlinear electric circuit model for direct methanol fuel cell, ProQuest Dissertations and Theses. The Florida State University.
- Wei, L., Yuan, X. and Jiang, F. (2018) 'A three-dimensional non-isothermal model for a membraneless direct methanol redox fuel cell', *Journal of Power Sources*, 385, pp. 130–140.
- Weinzierl, C. and Krewer, U. (2016) 'Model-based analysis of water management at anode of alkaline direct methanol fuel cells', *Chemical Engineering Science*, 143, pp. 181–193.
- Williams, M. C. (2011) 'Chapter 2 - Fuel Cells', in Shekhawat, D., Spivey, J. J., and Berry, D. A. B. T.-F. C. T. for F. P. (eds). Amsterdam: Elsevier, pp. 11–27.
- Wu, Q. X. and Zhao, T. S. (2011) 'Characteristics of water transport through the membrane in direct methanol fuel cells operating with neat methanol', *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(9), pp. 5644–5654.
- Wu, Q. X. et al. (2013) 'A sandwich structured membrane for direct methanol fuel cells operating with neat methanol', *Applied Energy*, 106, pp. 301–306.
- Wu, Q. X. et al. (2014) 'Effects of design parameters on the performance of passive direct methanol fuel cells fed with concentrated fuel', *Electrochimica Acta*, 133, pp. 8–15.
- Xie, X. et al. (2018) 'Modeling of passive vapor feed alkaline membrane direct methanol fuel cell', *Applied Thermal Engineering*, 131, pp. 920–932.
- Xu, C. et al. (2010) 'Methanol and water crossover in a passive liquid-feed direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(4), pp. 1769–1777.
- Yang, Q. et al. (2011) 'A semi-empirical model considering the influence of operating parameters on performance for a direct methanol fuel cell', *Journal of Power Sources*, 196(24), pp. 10640–10651.
- Yang, W. W., He, Y. L. and Li, Y. S. (2012) 'Modeling of dynamic operating behaviors in a liquid-feed direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(23), pp. 18412–18424.
- Yilanci, A., Dincer, I. and Ozturka, H. K. (2008) 'Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system', *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24), pp. 7538–7552.
- Yin, K. M. (2015) 'One-dimensional steady state algebraic model on the passive direct methanol fuel cell with consideration of the intermediate liquid electrolyte', *Journal of Power Sources*, 282, pp. 368–377.
- Yu, B. and Zhao, H. (2012) 'Study on Influence of Geometric Parameters on DMFC Performance Based on Experiments and CFD Simulations', *Applied Mechanics and Materials*, 217–219, pp. 754–758.
- Yuan, W. et al. (2016) 'Visualization of two-phase flow and temperature characteristics of an active liquid-feed direct methanol fuel cell with diverse flow fields', *Applied Energy*, 179, pp. 85–98.

- Yuan, W. et al. (2020) 'Enhanced water management via the optimization of cathode microporous layer using 3D graphene frameworks for direct methanol fuel cell', *Journal of Power Sources*, 451, p. 227800.
- Yuan, Z. and Yang, J. (2015) 'The effect of temperature on the output characteristics of micro direct methanol fuel cell', *Journal of Power Sources*, 285, pp. 318–324.
- Yuan, Z. et al. (2016) 'The micro-scale analysis of the micro direct methanol fuel cell', *Energy*, 100, pp. 10–17.
- Yuan, Z. et al. (2018) 'The effect of gravity on inner transport and cell performance in passive micro direct methanol fuel cell', *Energy*, 150, pp. 28–37.
- Yuan, Z. et al. (2019) 'The whole process, bubble dynamic analysis in two-phase transport of the passive miniature direct methanol fuel cells', *Journal of Power Sources*, 416, pp. 9–20.
- Zhang, X. (2006) 'Preparation and characterization of proton exchange membranes for direct methanol fuel cells', TDX (Tesis Doctorals en Xarxa).
- Zhang, Y. et al. (2011) 'Effect of design and operating parameters on dynamic response of a micro direct methanol fuel cell', *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(3), pp. 2230–2236.
- Zhang, Z. et al. (2015) 'Moisturized anode and water management in a passive vapor-feed direct methanol fuel cell operated with neat methanol', *Journal of Power Sources*, 297, pp. 33–44.
- Zhao, G. (2017) Preparation and Characterization of Heteroatom-doped Carbon Catalysts and Ordered Mesoporous Carbon Supports for Direct Methanol Fuel Cells, PQDT - Global. Hong Kong University of Science and Technology (Hong Kong).
- Zhao, X. et al. (2015) 'High-temperature passive direct methanol fuel cells operating with concentrated fuels', *Journal of Power Sources*, 273, pp. 517–521.



## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Şeyda YEGENOĞLU

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Makine Mühendisliği	2018
Lise	Tes-İş Adapazarı Anadolu Lisesi	2014

### İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2021-Halen	Sakarya Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

### YABANCI DİL

İngilizce

### ESERLER

1. Yegenoğlu, Ş., Taymaz, İ. 2021. Çalışma ve Tasarım Parametrelerinin Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi Performansına Etkisinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle İncelenmesi. 10. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Ankara, 189-198.