

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUDAN ETANOL YAKIT PİLLERİNDE YAKIT  
PİLİ PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA  
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ethem SÖKMEZ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İmdat TAYMAZ**

**Ocak 2021**

## **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.

Ethem SÖKMEZ

12.12.2020

## **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 ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

## BÖLÜM 2.

KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	4
2.1. Yakıt Pili .....	4
2.1.1. Yakıt pilinin tarihteki gelişimi .....	5
2.1.2. Yakıt pilinin sağladığı olumlu özellikler ve olumsuz özellikler. ....	7
2.1.3. Yakıt pili türleri .....	9
2.1.4. Alkali yakıt pilleri.....	9
2.1.5. Fosforik asit yakıt pilleri.....	10
2.1.6. Erimiş karbonat yakıt pilleri.....	11
2.1.7. Katı oksit yakıt pilleri.....	12
2.1.8. Polimer elektrolit membran yakıt pilleri (PEMYP).....	13
2.1.9. Doğrudan alkol yakıt pilleri (DAYP).....	15
2.2. Yakıt Pili Bileşenleri.....	16
2.2.1. Polimer elektrolit membran.....	16

2.2.2. Katalizör katmanı.....	16
2.2.3. Gaz difüzyon katmanı.....	17
2.2.4. Bipolar plakalar .....	17
2.2.5. Conta .....	18
2.3. Yakıt Pili Kimyasal ve Termodinamiksel Eşitlikler .....	18
2.3.1. Reaksiyon ısısı .....	19
2.3.2. Teorik elektrik işi .....	20
2.3.3. Teorik yakıt pili potansiyeli .....	20
2.3.4. Teorik yakıt pili verimi .....	22
2.4. Doğrudan Etanol Yakıt Pilleri (DEYP) .....	22
2.4.1. Proton değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili .....	23
2.4.2. Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili .....	25
2.4.3. Alkali anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili ...	26
2.5. Yakıt Olarak Etanol .....	26
2.6. Doğrudan Etanol Yakıt Pili Literatür Özeti .....	27

### BÖLÜM 3.

MATEMATİKSEL MODELLEME .....	36
3.1. Model Geometrisi .....	36
3.2. Model Fiziklerinin Programa Tanımlanması .....	37
3.3. Model Denklemleri .....	39
3.3.1. Elektron / iyon yükü dengesi .....	40
3.3.2. Yük transferi kinetiği .....	40
3.3.3. Elektrolitte yük transferi .....	40
3.3.4. Serbest ve gözenekli elektrotta kütle transferi .....	40
3.3.5. Gözenekli elektrot ve akış kanallarında kütle dengesi .....	41
3.4. Model Parametreleri .....	41
3.5. Modelin Ağ Yapısının (mesh) Oluşturulması .....	43
3.6. Modelin Çözücü Ayarlarını Oluşturulması .....	44

## BÖLÜM 4.

ANALİZ SONUÇLARI .....	46
4.1. Modelin Doğrulanması .....	46
4.2. Üç Boyutlu Doğrudan Etanol Yakıt Piliinde Reaktantların ve Ürünlerin Kütle Oranları .....	48
4.3. Sıcaklığın Yakıt Pili Performansına Etkisi .....	52
4.4. Katottaki Oksidanın Yakıt Pili Performansına Etkisi .....	54
4.5. Anot Kanal Girişindeki Yakıt Hızının Yakıt Pili Performansına Etkisi	56
4.6. Katot Kanal Girişindeki Hava Hızının Yakıt Pili Performansına Etkisi	57
4.7. Gözenekliliğin Yakıt Pili Performansına Etkisi .....	59
4.8. Katot Basıncının Yakıt Pili Performansına Etkisi .....	60
4.9. Membran Kalınlığının Yakıt Pili Performansına Etkisi .....	61

## BÖLÜM 5.

DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA .....	64
KAYNAKLAR .....	66
ÖZGEÇMİŞ .....	73

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
c	: Konsantrasyon (mol m <sup>-3</sup> )
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	: Etanol
D	: Difüzyon katsayısı (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
DAYP	: Doğrudan alkol yakıt pilleri
DEYP	: Doğrudan etanol yakıt pili
EtOH	: Etanol
F	: Faraday sabiti (C mol <sup>-1</sup> )
H <sub>2</sub> O	: Su
I	: Akım yoğunluğu (mA cm <sup>-2</sup> )
O <sub>2</sub>	: Oksijen
P	: Güç yoğunluğu (mW cm <sup>-2</sup> )
p	: Basınç (Pa)
V	: Hücre voltajı (V)
Z	: Elektron sayısı
i <sub>a</sub>	: Anot akım yoğunluğu (mA cm <sup>-2</sup> )
i <sub>0</sub>	: Akım yoğunluğu değişimi (mA cm <sup>-2</sup> )
N <sub>i</sub>	: Elektrolitte yük transferi (mol m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
P	: Basınç (Pa)
u	: Hız (m s <sup>-1</sup> )
α	: Simetri faktörü
η	: Dinamik viskozite
η <sub>a</sub>	: Anodik aşırıgerilim
ε <sub>p</sub>	: Gözeneklilik
κ	: Geçirgenlik (m <sup>2</sup> )
Φ	: Elektrolit potansiyeli (V)

$\rho$  : Yoğunluk ( $\text{kg m}^3$ )  
 $\sigma$  : İletkenlik ( $\text{S m}^{-1}$ )  
 $\Pi$  : Tensör



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yakıttan tek adımda elektrik enerjisi üreten yakıt pili .....	5
Şekil 2.2. Yakıt pili tarih zaman çizelgesi .....	6
Şekil 2.3. Apollo 13 uzay aracında bulunan yakıt pilleri .....	7
Şekil 2.4. Alkali yakıt pili şematik resmi .....	10
Şekil 2.5. Fosforik asit yakıt pili şematik resmi .....	11
Şekil 2.6. Erimiş karbonat yakıt pilinin şematik resmi .....	12
Şekil 2.7. Katı oksit yakıt pilinin şematik resmi .....	13
Şekil 2.8. PEMYP şematik gösterimi .....	14
Şekil 2.9. Bipolar plaka .....	18
Şekil 2.10. Doğrudan etanol yakıt pili çalışma prensibi.....	24
Şekil 2.11. Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pilinin şematik resmi .....	26
Şekil 3.1. Üç boyutlu etanol yakıt hücresi model geometrisi .....	37
Şekil 3.2. Comsol multiphysics programında fizik seçimi .....	38
Şekil 3.3. Model fiziksel alanlarının tanımlanması .....	38
Şekil 3.4. Modelin fiziksel alanının şematik resmi .....	39
Şekil 3.5. Denklemlerin programa girilmesi .....	41
Şekil 3.6. Model ağ (mesh) yapısı .....	43
Şekil 3.7. Model ağ (mesh) yapısı detay .....	44
Şekil 3.8. Çoklu fizik çözüm ayarlarının yapılması .....	45
Şekil 4.1. Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pili modelinin doğrulanması hücre voltage – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	47
Şekil 4.2. Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pili modelinin doğrulanması güç yoğunluğu - akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	47
Şekil 4.3. Anot akış kanalında etanolün kütle oranı.....	48
Şekil 4.4. Anot akış kanalında H <sub>2</sub> O'nun kütle oranı.....	49
Şekil 4.5. Anot akış kanalında CO <sub>2</sub> 'nin kütle oranı .....	50

Şekil 4.6. Katot akış kanalında O <sub>2</sub> 'nin kütle oranı .....	51
Şekil 4.7. Katot akış kanalında H <sub>2</sub> O'nun kütle oranı .....	52
Şekil 4.8. Sıcaklığın yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	53
Şekil 4.9. Sıcaklığın yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	54
Şekil 4.10. Katottaki oksidanın etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği	55
Şekil 4.11. Katottaki oksidanın etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	56
Şekil 4.12. Anot kanal girişindeki yakıt hızının etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	57
Şekil 4.13. Anot kanal girişindeki yakıt hızının etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	57
Şekil 4.14. Katot kanal girişindeki hava hızının etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	58
Şekil 4.15. Katot kanal girişindeki hava hızının etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	58
Şekil 4.16. Gözenekliliğin yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	59
Şekil 4.17. Gözenekliliğin yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	60
Şekil 4.18. Katot basıncının yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	60
Şekil 4.19. Katot basıncının yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	61
Şekil 4.20. Membran kalınlığının yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği .....	62
Şekil 4.21. Membran kalınlığının yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği .....	63

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri .....	15
Tablo 2.2. Yakıt olarak hidrojen, etanol ve metanolün karşılaştırılması .....	27
Tablo 3.1. Model parametreleri .....	42
Tablo 3.2. Farklı ağ sayılarında 0,4 V'ta elde edilen akım yoğunluğu değerleri .....	44

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Yakıt pili, Doğrudan etanol yakıt pili, Comsol multiphysics, Modelleme, Üç boyutlu model

Daha temiz bir çevre için fosil yakıtlara bağlı kalmadan yeni enerji kaynaklarının geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Yakıt pilleri, yakıt olarak hidrojenin ve çeşitli yakıtların kullanıldığı, günümüzün alternatif enerji üretim teknolojilerinden birisidir. Yakıt olarak kullanılacak alkoller içerisinde etanol, sürdürülebilir enerji sistemleri için cazip bir yakıt olarak ortaya çıkıyor. Düşük toksit özelliği, yenilenebilir proseslerle üretilmesi ve yüksek teorik enerji yoğunluğu gibi özellikleri sayesinde birçok avantaj sunmasıyla son yıllarda tercih edilen yakıtlardan birisi olmuştur. Bu çalışmada yakıt olarak etanol kullanılan doğrudan etanol yakıt pili için Comsol Multiphysics programı kullanılarak 3 boyutlu model oluşturulmuştur. Model, literatürdeki çoğu yakıt pili modelinden farklı olarak tekrar hücresi olarak değil tam bir yakıt pili olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan model literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Doğrudan etanol yakıt pilinin performansını iyileştirmek için doğrulanan model üzerinde sıcaklığın, katottaki oksidanın, havanın ve yakıtın kanal girişlerindeki hızlarının, gözenekliliğin, katot basıncının ve membran kalınlığı gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda sıcaklığın, yakıtın kanal girişindeki hızının, gözenekliliğin, katot basıncının artışının yakıt hücresi performansını arttırdığı ve ayrıca membran kalınlığının azaltılmasının ve oksidan olarak oksijenin kullanılmasının da yakıt pili performansını arttırdığı bulunmuştur.

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

## **SUMMARY**

Keywords: Fuel cell, Direct ethanol fuel cell, Comsol multiphysics, Modeling, Three-dimensional model

For a cleaner environment, it has become necessary to develop new energy sources without relying on fossil fuels. Fuel cells are one of today's alternative energy production technologies, where hydrogen and various fuels are used as fuel. Among alcohols that can be used as fuel, ethanol emerges as an attractive fuel for sustainable energy systems. It has been one of the preferred fuels in recent years, with its low toxicity feature, its ability to be produced with renewable processes and its high theoretical energy density, offering many advantages. In this study, a 3D model was created using Comsol Multiphysics program for direct ethanol fuel cell using ethanol as fuel. Unlike most fuel cell models in the literature, the model was created as a complete fuel cell, not a repeat cell. The created model has been verified by comparing it with experimental data in the literature. In order to improve the performance of direct ethanol fuel cell, the effects of temperature, oxidant at the cathode, velocities of air and fuel at the channel inlets, porosity, cathode pressure and membrane thickness were investigated on the validated model. As a result of the study, it has been found that the increase of temperature, the speed of the fuel in the channel inlet, porosity, and cathode pressure increase the performance of the fuel cell, and also the reduction of membrane thickness and the use of oxygen as an oxidant increase the performance of the fuel cell.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji üretmek için kullandığımız fosil yakıtlara bağlılığımız geri dönüşü olmayan ciddi sonuçlara yol açmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için daha fazla fosil yakıtların kullanılması sonucu ortaya çıkan ve ekosisteme ciddi zararlar veren kirletici emisyonlar, çevre hassasiyeti ve artan ihtiyaçların karşılanması yönünde endişe verici sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Ortaya çıkan bu çevre hassasiyeti ve giderek azalmakta olan bu kaynakların sınırlı olması insanları, sürdürülebilir ekosisteme zarar vermeyen daha verimli enerji üretim teknikleri bulmaya yöneltmiştir [1,2]. Artan enerji ihtiyacını karşılayacak ve çevreye verdiğimiz zararı azaltacak olan yenilenebilir enerji üretim kaynaklarından en umut verici olanlarından biri yakıt pildir. Yakıt pili yakıtlarda bulunan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal bir cihazdır. Yakıt pillerinde bataryaların aksine pile yakıt beslendiği sürece elektrik enerjisi üretilir. Çevreye daha düşük kirletici emisyonların verilmesi, kompakt olması ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması yakıt pillerinin avantajlarından bazılarıdır [3]. Yakıt pillerindeki gelişmelerle birlikte mobil cihazlarda yakıt pillerinin sahip olduğu enerji yoğunluğu, lityum pillerinin sahip olduğu enerji yoğunluğuna göre 3 ila 10 kat daha fazladır. İçten yanmalı motorlarda %30 verimle çalışan benzinli ve %50 verimle çalışan dizel içten yanmalı motorlarına göre yakıt pilleri %50'den daha fazla verimlilikle çalışmaktadır ve daha az emisyon açığa çıkarmaktadır [4].

Yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmaların çoğu enerji kaynağı olarak hidrojeni kullanan yakıt pilleri üzerine odaklanmaktadır. Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı yakıt pillerinde ürün olarak açığa sadece suyun çıkması hidrojenin çevreci bir yakıt olmasını sağlar. Ayrıca hidrojen kullanan yakıt pillerinin basit yapıda olması, düşük maliyetli olması ve uzun ömürlü olması hidrojen kullanan yakıt pillerini çekici yapan

özelliklerden bazılarıdır. Ancak hidrojeni, fosil yakıtlardan ve suyun elektrolizi yardımıyla elde edebiliriz. Diğer bir problem ise hidrojenin nakliyesi ve dağıtımını için verimli depolama yöntemlerinin ve altyapısının yetersiz olmasıdır. Alkol kullanılan yakıt pillerinde etanol ve metanol gibi sıvı yakıtların kullanılması hidrojende olduğu gibi yeni bir depolama ve taşıma alt yapısı kurma ihtiyacını ortadan kaldıracak ve mevcut petrol dağıtım şebekesiyle yakıtların depolanması ve nakliyesi kolay hale gelecektir. Doğrudan alkollü yakıt pilleri (DAYP) bütanol, metanol ve etanol gibi sıvı alkolde depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür [5]. Doğrudan alkollü yakıt pilleri (DAYP) hidrojen kullanan yakıt pillerine göre daha yüksek enerji yoğunluğu içerir ( $6000 - 8000 \text{ W h kg}^{-1}$ ) [6]. Doğrudan alkollü yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda yakıt olarak metanol kullanılan yakıt pillerine odaklanmaktadır. Metanolün diğer alkol yakıt pillerine göre daha yüksek elektrot kinetiklerine sahip olması onu çekici hale getirmektedir. Ancak metanolün toksik özellikte olması geniş kullanım alanlarında ciddi çevresel sorunlara neden olabilir ve bu da metanol yakıt pillerinin geliştirilmesinin önündeki sınırlayıcı faktörlerden birisidir. Daha çevreci olan ve biyokütleden elde edilebilen etanol daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve daha kolay temin edilebileceğinden yakıt pilleri için alternatif bir yakıt olarak görülmektedir. Etanol ayrıca metanole göre daha düşük membrandan geçiş oranına sahiptir ve katot performansını metanolden daha az etkiler. Yakıtların depolanması ve nakliyesi için mevcut alt yapı metanol ve hidrojene göre etanole daha kolay uygulanabilir olduğu için araçlarda kullanılabilecek yakıt pilleri için etanol daha cazip bir yakıt olarak görülmektedir. Doğrudan etanol yakıt pillerinin (DEYP) önemli problemlerinden bazıları doğrudan metanol yakıt pillerinde (DMYP) de olduğu gibi anot kinetiklerinin yavaş olması ve membrandan katot tarafına yakıt geçişinin olmasıdır [7].

Yakıt pillerinin tasarımını optimize etmek ve yakıt pillerinin geliştirilmesi için matematiksel modellere ihtiyaç duyulur. Yakıt pillerinin çalışma prensiplerini ve performanslarını belirlemek ve iyileştirmek, voltaj ve akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi elde etmek için matemaiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır [8]. Bu doğrultuda bu çalışma da doğrudan etanol yakıt pilinin tasarım parametrelerinin

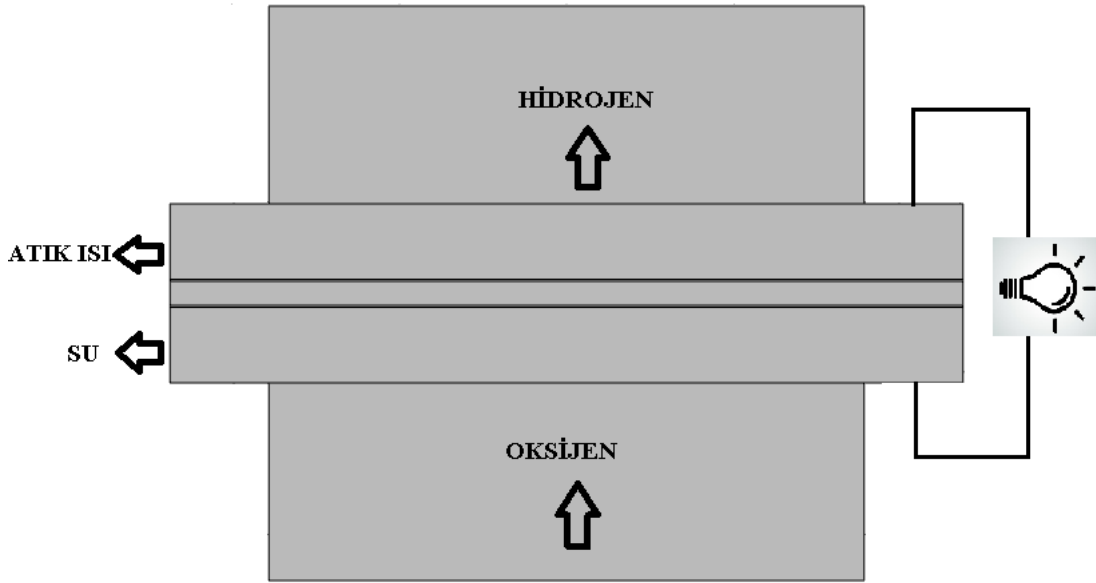
incelenmesi ve geliştirilmesi için üç boyutlu bir model geliştirilmiş ve yakıt pili parametrelerinin performansa etkileri incelenmiştir.



## **BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Yakıt Pili**

Artan dünya nüfusu sonucu insanların, enerjiye olan ihtiyaçları da günden güne artmaktadır. Enerji ihtiyaçlarının karşılanması için insanlar, uzun zamandır fosil yakıtları yakarak enerji ihtiyaçlarını karşılamaktadırlar. Fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan zararlı emisyonlar geri dönüşü olmayan olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu olumsuz etkiler dünya üzerindeki tüm canlıları tehdit etmektedir. Bu yüzden günden güne artan enerji ihtiyaçlarının karşılanması için çevreye zarar vermeyen alternatif enerji üretim kaynaklarının kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Gelecek için umut vaat eden alternatif enerji üretim kaynaklarından birisi de yakıt pilidir. Yakıt pili yakıtta bulunan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik akımına dönüştüren bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüsüdür. Bu dönüşüm çok adımlı enerji dönüşüm cihazlarına kıyasla daha basit ve daha ucuz ayrıca enerji dönüşümünü farklı adımlar kullanarak gerçekleştirmediği için daha verimlidir. Yakıt pilinde, içten yanmalı motorların aksine herhangi bir hareketli parça olmadan Şekil 2.1.'deki gibi tek adımda doğrudan elektrik enerjisi üretilir.

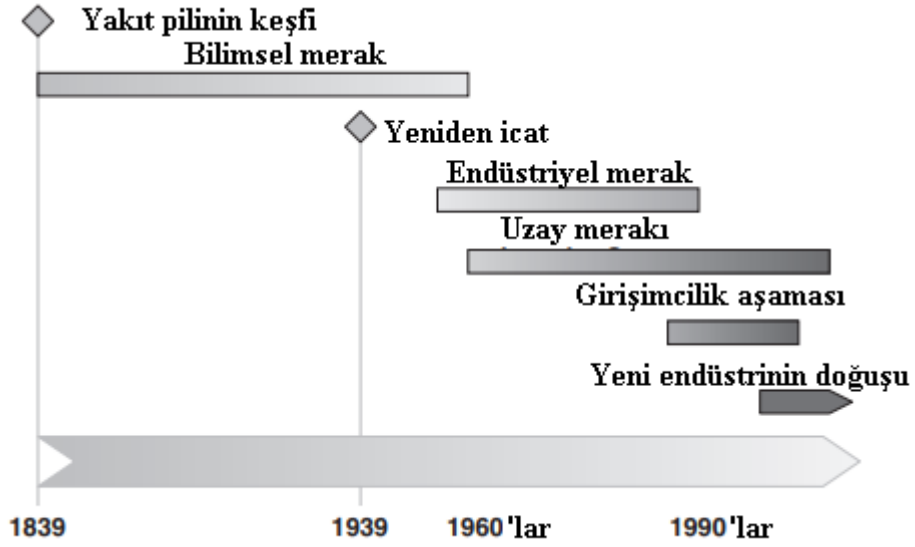


Şekil 2.1. Yakıttan tek adımda elektrik enerjisi üreten yakıt pili.

Yakıt pilleri ve bataryalar bazı yönleriyle birbirlerine benzerler. Yakıt pilleri de bataryalar gibi elektrolit, negatif ve pozitif olmak üzere iki elektrottan oluşur. Yakıt pillerinde de bataryalar gibi elektrik enerjisi elektrokimyasal reaksiyonlarla üretilir. Yakıt pillerinin bataryalardan farkı ise elektrik enerjisinin üretilebilmesi için sürekli olarak yakıt ve oksidanın yakıt piline beslenmesi gerekmektedir. Tipik olarak yakıt pillerinde kullanılan reaktantlar hidrojen ve oksijendir [9].

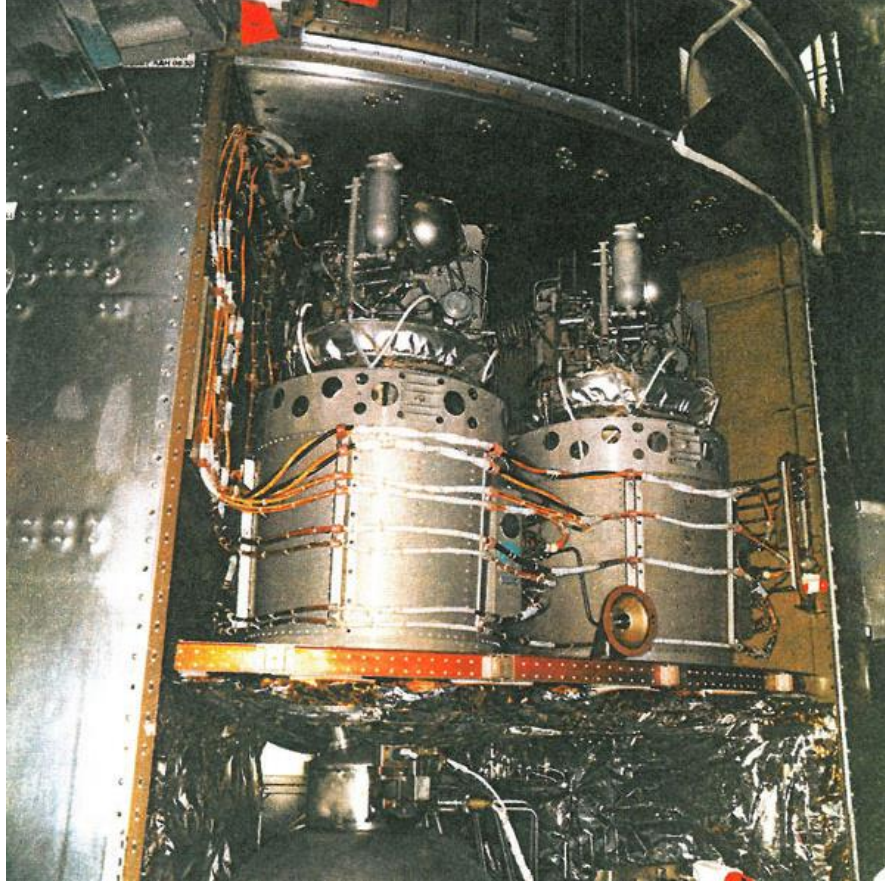
### 2.1.1. Yakıt pilinin tarihteki gelişimi

Yakıt piliyle ilgili olarak ilk çalışma Galli bilim adamı Sir William Grove tarafından 1839 yılında yapılmıştır. Grove 1842 yılında hidrojen ve oksijenin birleştirilmesiyle elektrik enerjisi ürettiği ilk yakıt pilini geliştirdi [10]. İngiliz mühendis olan Francis T. Bacon 1932 yılında pratik yakıt pilleri üzerinde çalışmaya başladı ve 1952 yılında 5 kW'lık bir yakıt pili yığını geliştirdi. Yakıt pilinin tarih içerisindeki gelişimini gösteren tarih çizelgesi Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Yakıt pili tarih zaman çizelgesi [9].

Uzay uygulamalarında ilk olarak ABD’de pratik yakıt pilleri kullanılmaya başlanmıştır. General Electric 1960’lı yılların başlarında uzay çalışmalarında kullanmak üzere Gemini programında kullanılan yaşam desteği, rehberlik ve iletişim için gerekli enerjiyi karşılamak için elektrik üreten ilk polimer membrana sahip yakıt pilini geliştirdi. Apollo 13 uzay aracında kullanılan yakıt pili Şekil 2.3.’te verilmiştir.



Şekil 2.3. Apollo 13 uzay aracında bulunan yakıt pilleri [11].

General Motors 1960'lı yılların ortasında yakıt piliyle çalışan bir minibüs geliştirdi. 1989 yılında Perry Energy Systems şirketi polimer elektrolit membran yakıt piliyle çalışan bir denizaltı geliştirdi. 1993 yılında Ballard Power Systems yakıt piliyle çalışan otobüsleri tanıttı. 1993 yılında Perry Energy Systems polimer elektrolit membran yakıt piliyle çalışan otomobili tanıttı [9].

### 2.1.2. Yakıt pilinin sağladığı olumlu özellikler ve olumsuz özellikler

Yakıt pilleri, taşınabilir kompakt olan ve halihazırda bataryalarla güç sağlanan tüm cihazlara güç sağlayabilir. Kullanım ömrü kısıtlı olan bataryaların aksine yakıt ve oksidan sağlandığı sürece bir yakıt hücresinden güç sağlanabilir. Gelecekte yakıt pilleri alanında yapılacak çalışmalarla cep telefonu, laptop gibi bataryalardan güç alan cihazlara güç vermesi beklenmektedir.

Yakıt pilleri, günümüzde kullanılmakta olan yanmaya dayalı olan klasik enerji dönüşüm teknolojilerine göre birçok avantaja sahiptir. Çevreye geri dönüşü olmayan zararlar veren kirlenici emisyon salınımı nispeten daha azdır. Yakıt olarak hidrojen kullanılan yakıt pillerinde reaksiyon sonucu atık olarak ısı ve su ortaya çıkar ve çevreye zarar verecek herhangi bir atık ortaya çıkmaz.

Yakıt pillerinin sağladığı olumlu özellikler:

1. Klasik enerji üretim yöntemlerine göre gürültüsüz çalışırlar.
2. Çevreye verdikleri zarar minimum seviyededir.
3. Yakıt pillerinde kullanılan yakıt alternatiflerinin fazla olması.
4. Kompakt yapıya sahip olup mobil uygulamalarda kullanılabilmesi.
5. Ortaya çıkan atık ısılar tekrar kullanılabilir.
6. Ara kademelere gerek olmadan doğrudan enerji dönüşümü.
7. Hareketli parça içermemeleri.
8. Düşük emisyonla sahip olmaları.

Karşılaşılan en büyük olumsuzluk yakıt pili üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Mevcut durumda yakıt pilleri geleneksel yakıt kaynaklarıyla maliyet açısından rekabet edememektedir. Hidrojenin yeterli miktarda bulunmasına rağmen depolanması ve dağıtımının zor olması yakıt pillerinin olumsuz özelliklerinden bazılarıdır [12].

Yakıt pillerinin olumsuz özellikleri:

1. Gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan kullanımı yaygın değildir.
2. Katalizörlerin yüksek maliyetleri nedeniyle üretimi pahalıdır.
3. Hidrojenin depolanma sorunlarının bulunması.
4. Kullanılan bazı yakıtların dağıtım alt yapılarının yeterli olmaması.
5. Mevcut olan yakıt pili teknolojisinin çoğunun prototip halinde olmasıdır ve seri üretimin yaygın olmamasıdır.

### 2.1.3. Yakıt pili türleri

Yakıt pilleri çalışma prensipleri benzer olmasına rağmen yakıt pilleri içerdikleri elektrolitin yapısına göre adlandırılırlar. Yapılan sınıflandırmaya göre yakıt pili içerisinde oluşan elektrokimyasal reaksiyonların türü, tepkime için gerekli olan katalizör çeşidi, yakıt pilinin çalıştığı sıcaklık değerleri ve enerji dönüşümü için gerekli yakıt ve diğer faktörler belirlenir. İçerdikleri elektrolite göre başlıca yakıt pilleri aşağıda verilmiştir.

1. Alkali yakıt pili
2. Fosforik asit yakıt pili
3. Erimiş karbonat yakıt pili
4. Katı oksit yakıt pili
5. Polimer elektrolit membran yakıt pili

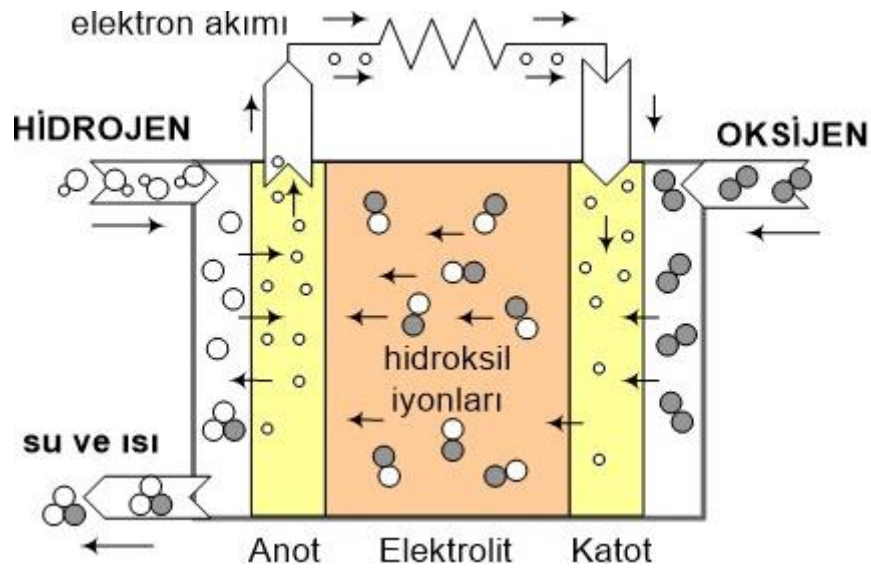
### 2.1.4. Alkali yakıt pilleri

Bu tür yakıt pilleri ABD uzay projelerinde uzay aracı için gerekli elektrik enerjisi ve su üretiminin karşılanması için geliştirilen ilk yakıt pili çalışmalarından birisidir. Bu yakıt pilleri elektrolit için suda çözülmüş sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit çözeltileri kullanırlar. Yakıt pilinin anot ve katot kısımlarında katalizör kısımları değerli olmayan metallere oluşabilir [13].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrolit olarak polimer membran kullanan alkalın yakıt pilleri geliştirilmiştir. Bu alkalın yakıt pillerinde daha öncelerde kullanılan asit membranın yerine alkalın membran kullanılmasının haricinde klasik polimer elektrolit membran yakıt hücrelerine benzerdir.

Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı yakıt pilinde oksitleyici olarak havadaki oksijen kullanılır. Bu yakıt pilleri çalışma sıcaklığı olarak 100 °C'nin altında çalışır metal ve bazı plastiklerden imal edilebilir. Yakıt pilinde kullanılan elektrotlar karbon ve nikel

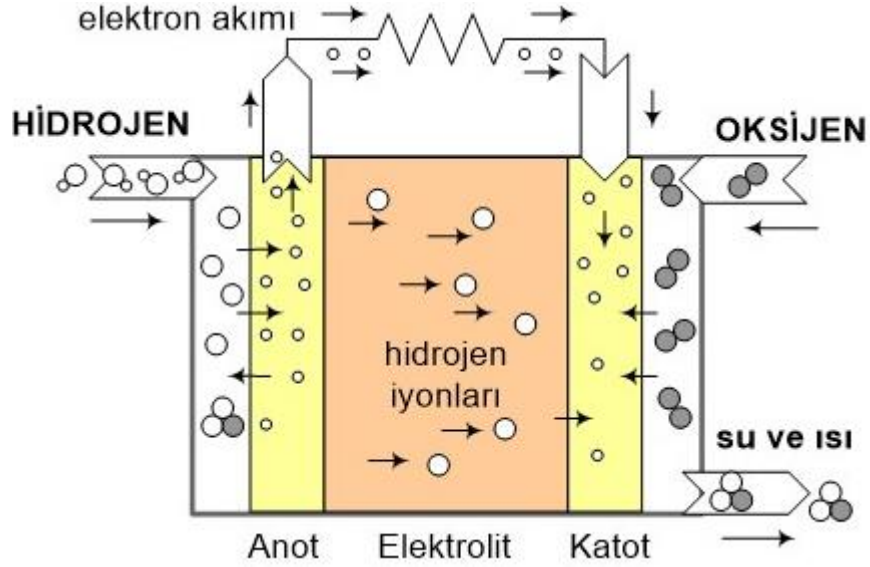
gibi metallere yapılabilir. Reaksiyon sonucu açığa çıkan suyu elektrotlar yardımıyla veya buharlaştırıcıyla buharlaştırılarak sistemden uzaklaştırılması gerekir. Bu yakıt pilindeki önemli faktörlerden birisi  $\text{CO}_2$  zehirlenmesinden önemli derecede etkilenmesidir. Havanın içerdiği az miktarlardaki  $\text{CO}_2$  bile karbonat oluşumuna neden olduğu için yakıt pili performansını ve dayanıklılığını etkileyebilir. Alkalin yakıt pilleri W ile kW ölçeğindeki uygulamalar için dikkate alınmalıdır [14]. Alkalin yakıt pilinin şematik resmi Şekil 2.4.'te verilmiştir.



### 2.1.5. Fosforik asit yakıt pilleri

Bu yakıt pilleri elektrolit için sıvı fosforik asit kullanırlar. Bu asit teflon bağlı silikon karbür matrisinde yer alır ve platin içeren gözenekli elektrotlar kullanırlar. Bu yakıt pilleri  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilirler. Bu yakıt pilleri yakıt olarak hidrojen ve oksitleyici olarak oksijen kullanırlar. Yakıt pilinde kullanılan elektrotlar katalize karbondan oluşur ve seri üretim devresi oluşturmak için arka arkaya çiftler şeklinde dizilirler. Bu yakıt pilinin iskeletini oluşturan yapı grafitten oluşturulmuştur ve bu da maliyeti arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan bu yakıt pillerinde yapısal tasarım için bazı problemler vardır. Özellikle destek pompaları ve sensörler sıcaklıktan etkilenirler. Fosforik asit yakıt pilleri çıkış gücü 200 kW ve 11 MW arasındadır. Ticari açıdan en çok kullanılan yakıt pillerindedir. Kullandığı

bazı alanlar hastaneler, okullar, güç fabrikaları gibi çeşitli alanlarda olabilir [14]. Fosforik asit şematik resmi Şekil 2.5.'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Fosforik asit yakıt pili şematik resmi [15].

### 2.1.6. Erimiş karbonat yakıt pilleri

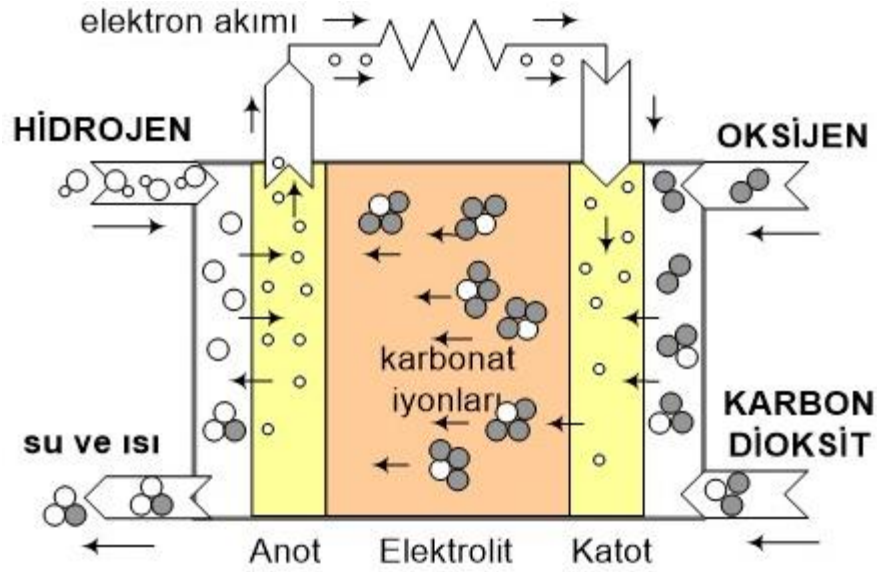
Bu tür yakıt pilleri kömür ve doğalgaz bazlı enerji santralleri elektrik üniteleri ve endüstriyel ve askeri uygulamalar için geliştirilmektedir. Erimiş karbonat yakıt pilleri elektrolit olarak gözenekli yapıda, kimyasal olarak inert seramik lityum alüminyum oksit matris içerisinde süspansiyon edilmiş erimiş karbonat tuzu karışımı kullanan yüksek sıcaklıklarda çalışan yakıt pilleridir.

Bu yakıt pillerinde yakıt olarak, sudan ve fosil yakıttan elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit karışımı kullanılır. Elektrolit olarak 650 °C' çalışma sıcaklığı gerektiren erimiş potasyum lityum karbonattan oluşur. Bu yakıt pilleri çalışma sıcaklığına ulaşmanın zaman almasından dolayı araçlarda kullanmak için uygun değildir.

Yakıt pilinde kullanılan elektrotlar genellikle metaldir ve koruma sistemi genelde metallere veya özel plastik malzemelerden yapılabilir. Bu yakıt pillerinde hidrojen



ve karbon monoksit ilk olarak karbonat elektrolit ile birleştirilerek daha sonrada oksidan olarak oksitleyici oksijenle birleştirilerek su buharı ve karbondioksit üretilir. Bu yakıt pilleri büyük elektrik santrallerinde kullanılmaktadır. Bu yakıt pillerinde verimlilik oranı %45'tir. Yüksek sıcaklıklarda çalışan bu yakıt pillerinde uzun ömürlü sistem parçalarının üretilmesi tasarımsal sorunlara yol açmaktadır [14]. Erimiş karbonat yakıt pilinin şematik resmi Şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Erimiş karbonat yakıt pilinin şematik resmi [15].

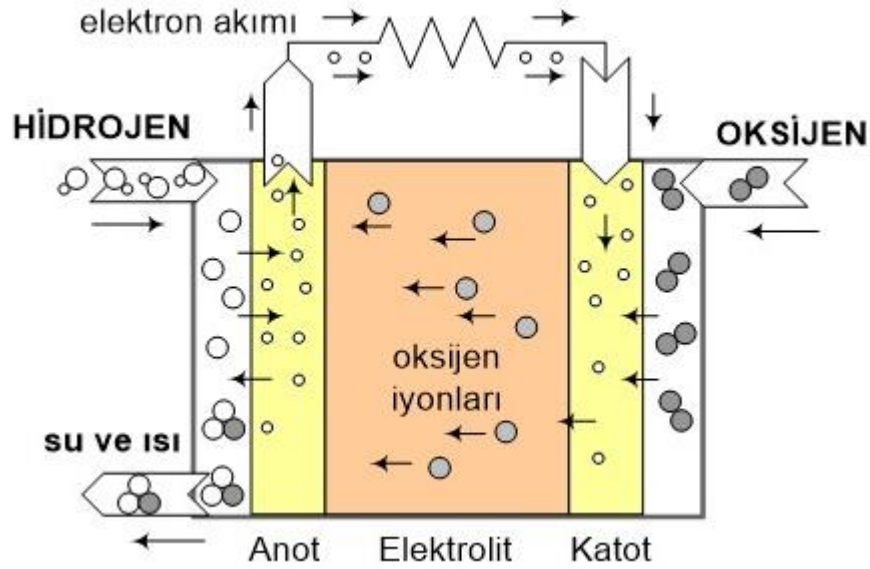
### 2.1.7. Katı oksit yakıt pilleri

Bu yakıt pilleri bazı açıdan erimiş karbonat yakıt pillerine benzer. Bu yakıt pillerinde de yakıt olarak, erimiş karbonat yakıt pillerinde kullanıldığı gibi karbonmonoksit ile birleştirilmiş hidrojen kullanılmaktadır. Elektrokimyasal reaksiyonlar farklı yoldan gerçekleştirilirken ürün olarak su buharı ve karbondioksit oluşacaktır. Yaklaşık 1000 °C' gibi yüksek sıcaklıklarda çalıştığından elektrot reaksiyonları daha kolay bir şekilde gerçekleşir. Yüksek sıcaklıkta çalıştıklarından dolayı değerli metalden oluşan katalizörlere ihtiyaçları yoktur.

Erimiş karbonat yakıt pillerindeki gibi yüksek sıcaklık aralığında çalıştığından yakıt pili için uzun ömürlü parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Katı oksit yakıt pillerinde

kullanılan elektrolit sert, gözeneksiz bir miktar nikel içeren seramik bileşikten oluşmaktadır. Bu yakıt pillerinde kullanılan elektrolit yittria ile işlenmiş zirkonya gibi iyon ileten bir oksittir.

Bu yakıt pilleri yakıt olarak kullanılabilen karbonmonoksitten zehirlenmezler. Bu sayede katı oksit yakıt pillerinde kömür, doğalgaz gibi yakıtlar kullanılabilir. Katı oksit yakıt pilleri sabit güç üretim uygulamalarında kullanılırlar ve mobil sistemler için uygun değildir [14]. Katı oksit yakıt pilinin şematik resmi Şekil 2.7.'de verilmiştir.



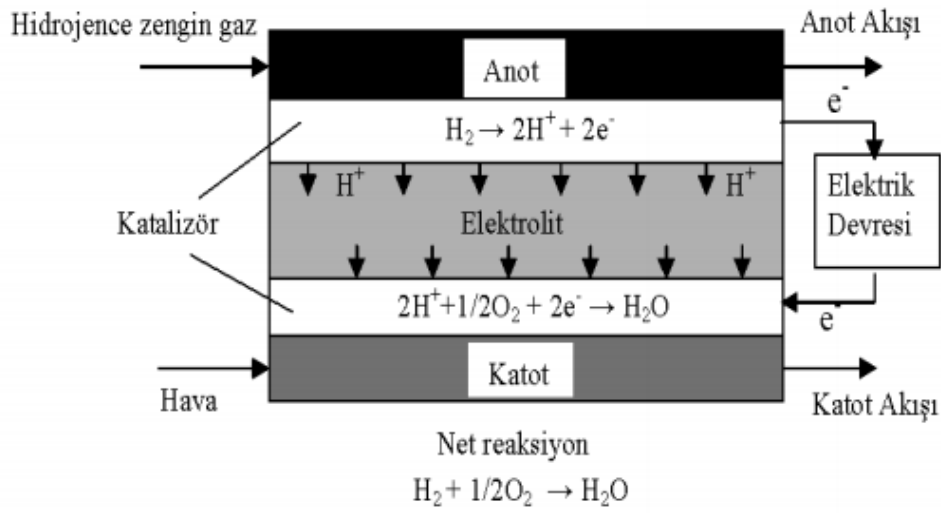
Şekil 2.7. Katı oksit yakıt pilinin şematik resmi [15].

### 2.1.8. Polimer elektrolit membran yakıt pilleri (PEMYP)

Polimer elektrolit membran yakıt pilleri proton değişim membranlı yakıt pilleri olarak adlandırılır. Bu yakıt pilleri elektrolit olarak protonları anottan katoda ileten ince geçirgen bir polimer elektrolit membran kullanırlar. Bu membran düşük sıcaklıklarda da çalışabilir.

PEMYP'nin temel bileşenleri anot ve katot elektrotları ve bunları ayıran polimer membran elektrottur. Reaksiyonu hızlandırmak için membranın her iki tarafında da

katalizörler (genellikle platin) kullanılır. Elektrot, membran ve katalizör birlikte membran elektrot grubunu oluşturur. Anot tarafından beslenen hidrojen anot katalizöründe elektronlarına ve protonlarına ayrılır. Elektronlar dış devre yardımıyla katota iletilirler. Protonlar polimer elektrolit membrandan geçerek katot tarafına geçer. Katot tabakasına beslenen havadan gelen oksijenler, membrandan geçen protonlar ve dış devreden gelen elektronlar elektrokimyasal reaksiyona girerek suyu ve ısıyı oluştururlar. Şekil 2.8.'de PEMYP'nin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.8. PEMYP şematik gösterimi [16].

Polimer elektrolit membran yakıt pilinde kullanılan hidrojenin depolanma ve taşınma problemleri farklı yakıt arayışlarına sebep olmuştur. Depolanması ve taşınması daha kolay olan metanol ve etanol gibi alkol yakıtların kullanıldığı farklı polimer elektrolit membran yakıt pilleri geliştirilmiştir [9].

Yakıt pillerinin özelliklerinin verildiği Tablo 2.1. aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri [16].

Yakıt Hücresi	Fosforik asit yakıt pili	Katı oksit Yakıt pili	Erimiş karbonat yakıt pili	Alkali yakıt pili	Polimer elektrolit membran yakıt pili
<b>Elektrolit</b>	Fosforik asit	Zirkonya üzerine tutturulmuş yittria	Karbonat	Potasyum hidroksit	İyon değiştirici polimer membran
<b>Çalışma sıcaklığı (°C)</b>	200	650-1000	600-700	100-250	50-100
<b>Yük taşıyıcı</b>	H <sup>+</sup>	O <sub>2</sub> <sup>-2</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>
<b>Katalizör</b>	Platin	Perovskites	Nikel	Nikel,gümüş	platin
<b>Güç üretim Verimi(%)</b>	37-42	60	45-60	60-70	42-73
<b>Uygulama alanları</b>	Ticari uygulamalar	Ticari ve sanayi	Elektrik santralleri	Uzay çalışmaları	Ulaşım,askeri sistemler

### 2.1.9. Doğrudan alkol yakıt pilleri (DAYP)

Polimer elektrolit membran yakıt pilleri her ne kadar cazip avantajlar sunsada yakıt olarak kullanılan hidrojenin depolanması çözümlenmesi gereken problemlerden birisidir. Ayrıca hidrojenin dağıtımını için gerekli alt yapının yeterli olmamasıda alternatif yakıt arayışlarına sebep olmuştur. Bu konuda yapılan çalışmalar alternatif enerji kaynakları için kullanılacak yakıtlar için alkollerin iyi bir enerji taşıyıcısı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Sıvı alkollerin hidrojen gibi depolanma ve taşınma problemlerinin olmaması alkollerin, yakıt pillerinde tercih edilmesine sebep olan avantajlardan bazılarıdır.

Metanol, etanol ve çeşitli alkollerin yakıt olarak kullanıldığı doğrudan alkol yakıt pilleri genelde oksitleyici olarak oksijenin kullanıldığı yakıt pili çeşididir. Etanol ve metanolün mevcut yakıt depolama ve dağıtım alt yapılarına uygun olması bu yakıt pillerini ön plana çıkarmaktadır. Taşınabilir cihazlar ve mobil uygulamalar için oldukça çekici olan bu yakıt pilleri son yıllarda oldukça ilgi görmektedir [17].

## 2.2. Yakıt Pili Bileşenleri

Polimer elektrolit membran yakıt pilinin temel bileşenleri aşağıda verilmiştir:

1. Polimer elektrolit membran
2. Katalizör katmanı
3. Gaz difüzyon katmanı
4. Bipolalar plakalar
5. Gaz sızdırmaz conta

### 2.2.1. Polimer elektrolit membran

Polimer elektrolit membran aynı zamanda proton değişim membranı olarakta adlandırılır. Anot ve katot arasında bulunan membrane yalnızca pozitif yüklü iyonların anot tarafından katoda geçişine izin verirken elektronların geçişine izin vermez. Membran sadece elektrokimyasal reaksiyonlarda gerekli olan iyonların geçişine izin vererek kilit rol oynar [18].

### 2.2.2. Katalizör katmanı

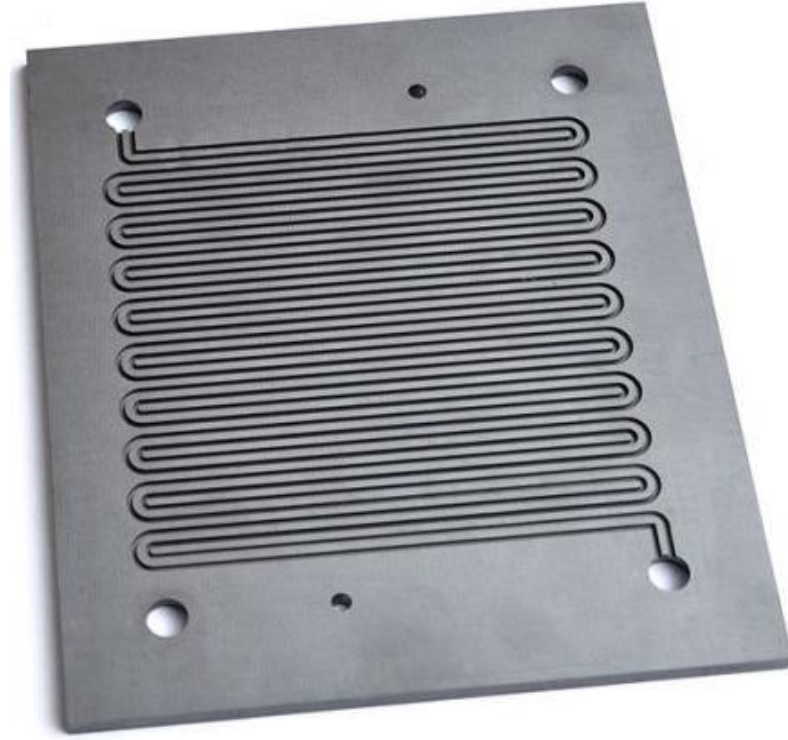
Polimer elektrolit membranının hem anot tarafına hemde katot tarafına birer katalizör katmanı eklenir. Klasik olarak katalizör katmanları geniş yüzey alana sahip karbon destek üzerinde dağılmış küçük boyutlu platin parçacıklarından oluşur. Karbonla desteklenen platin katalizör iyon iletme özelliğine sahip iyonomer ile karıştırılır ve membran ile gaz difüzyon tabakaları arasına sıkıştırılır. Yakıt pilinin anot kısmında katalizör tabakasına ulaşan hidrojen molekülleri protonlarına ve elektronlarına ayrılır. Katot bölümünde, anot tarafından gelen protonlar katalizör tabakasında katottan gelen oksijen ve elektronlarla reaksiyona girerek suyu oluşturur [18].

### 2.2.3. Gaz difüzyon katmanı

Gaz difüzyon katmanı katalizör katmanının dış kısmında yer alır ve yakıt pili reaktantlarının katalizör katmanına taşınmasını sağlar. Gaz difüzyon katmanları genelde içinde karbon fiberlerin politetrafloroetilen (PTFE) ile kaplandığı karbon kağıttan meydana gelir. Gazlar difüzyon katmanında bulunan gözeneklerden yayılırlar. Bazı durumlarda Gaz difüzyon katmanının iç kısmı mikro gözenekli katman adı verilen ince yüksek yüzey alanına sahip karbon tabakayla kaplanır. Bu tabaka membrane iletkenliği için suyun korunması ve gözeneklerin açık tutulması için suyun salınımı arasındaki dengeyi sağlar. Bi polar plakaların her iki tarafında gazların membrane elektrot grubuna geçişini sağlamaya yarayan, plakaya işlenmiş kanallardan oluşur. Bu kanallara akış alanı denir [18].

### 2.2.4. Bipolar plakalar

Her bir membran elektrot grubundan oluşan hücre normal çalışma koşulları altında 1 V'ta daha az voltaj üretir ve uygulamaların çoğunda bu voltajdan daha yüksek voltaj gerekir. Gerekli çıkış voltajını sağlamak için birden fazla membran elektrot grubu birbiri üzerine yerleştirilerek seri olarak bağlanırlar. Oluşan yığındaki her bir hücreyi komşu hücrelerden ayırmak için bipolar plakalar kullanılır. Bu plakalar metalden, karbon veya kompozit malzemelerden yapılabilirler. Bu plakalar hücreler arasında elektrik iletimini sağlar ve ayrıca yakıt pili yığına fiziksel destek sağlarlar [18]. Aşağıda Şekil 2.9.'da bipolar plakanın resmi verilmiştir.



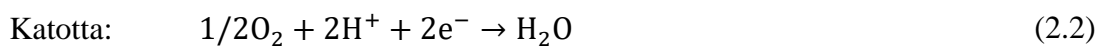
Şekil 2.9. Bipolar plaka

### 2.2.5. Conta

Yakıt pili yığnında kullanılan membran elektrot grupları bipolar plakalar arasında sıkıştırılır. Yakıt pili dışına yakıtın sızmasını engellemek için membran elektrot grubunun etrafına contalar eklenmelidir. Contalar kauçuksu polimerlerden yapılırlar [18].

### 2.3. Yakıt Pili Kimyasal ve Termodinamiksel Eşitlikler

Yakıt pillerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar kullanılan polimer elektrolit membranın 2 tarafında anot ve katot elektrotlarında aynı anda gerçekleşir. Yakıt pilinin anot ve katot kısımlarında gerçekleşen temel reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.





### 2.3.1. Reaksiyon ısısı

Yakıt pilinde gerçekleşen hidrojenin yanması ekzotermik bir reaksiyondur. Yanma sürecinde açığa enerji çıkar:



Gerçekleşen kimyasal reaksiyonun ısısı(entalpi), reaksiyon sonucu açığa çıkan ürünlerin ve tepkimeye giren reaktantların oluşum ısıları arasındaki farka eşittir.

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - 1/2 (h_f)_{O_2} \quad (2.5)$$

Sıvı haldeki suyun 25 °C'deki oluşum ısısı -286 kJ/mol ve elementlerin oluşum ısıları 0'a eşittir ve bu yüzden reaksiyon ısısı:

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - 1/2 (h_f)_{O_2} = -286 \text{ kJ mol}^{-1} - 0 - 0 \quad (2.6)$$

$$= -286 \text{ kJ mol}^{-1}$$

Kimyasal reaksiyonun entalpisinin negatif çıkması, reaksiyonda dışarıya ısı çıktığını ifade eder ve denklem aşağıdaki gibi düzenlenir [9]:





### 2.3.2. Teorik elektrik işi

Hidrojenin reaksiyon ısısı yakıt pilinde giren enerjinin ölçüsü olarak ifade edilebilir. Bu enerji hidrojenen elde edilebilecek en yüksek enerjidir. Bu enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez. Gerçekleşen kimyasal reaksiyonlarda entropide üretilir. Üretilen entropi hidrojenin üst ısı değerinin tamamının faydalı işe (elektrik) dönüşmesini engeller. Yakıt pilinde elektriğe dönüştürülebilen reaksiyon entalpisi (hidrojenin üst ısı değeri) kısmı Gibbs serbest enerjisine karşılık gelir ve bu aşağıda ifade edilmiştir:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.8)$$

Reaksiyon sonucu oluşan entropi ( $\Delta S$ )'den kaynaklı enerjinin dönüştürülmesinde tersinmez kayıplar vardır.  $\Delta S$ , reaksiyon sonucu açığa çıkan ürünlerin entropileri ile reaksiyona giren reaktantların entropileri arasındaki farktır.

$$\Delta S = (s_f)_{H_2O} - (s_f)_{H_2} - 1/2 (s_f)_{O_2} \quad (2.9)$$

Bu yüzden 25 °C'de 286,02 kJ/mol<sup>-1</sup> mevcut enerjinin 237,34 kJ/mol<sup>-1</sup> 'lük kısmı elektrik enerjisine geriye kalan 48,68 kJ/mol<sup>-1</sup> ise ısı enerjisine dönüştürülür [9].

### 2.3.3. Teorik yakıt pili potansiyeli

Elektrik işi potansiyelin ve yükün sonucunda oluşur.

$$W_{el} = q E \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denklemde:

$W_{el}$  = elektrik işi (J mol<sup>-1</sup>)

$q$  = yük (Coulombs mol<sup>-1</sup>)

$E$  = potansiyel (Volt)

1 mol hidrojenin tüketilmesi sonucunda yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonda aktarılan yük:

$$q = n N_{avg} q_{el} \quad (2.11)$$

Bu denklemde:

$n$  = molekül başına elektron sayısı ( $H_2$  için molekül başına 2 elektron)

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

$q_{el}$  = 1 elektronun yükü =  $1,602 \times 10^{-19}$  coulombs/mol

Avagadro sayısı ve 1 elektronun yükünün çarpımı faraday sabiti olarak bilinir:

$F = 96.485$  coulombs / electron-mol

Elektrik işi yukardaki veriler ışığında düzenlenirse:

$$W_{el} = n F E \quad (2.12)$$

Yukarıda da ifade edildiği gibi yakıt pilinde reaksiyonlar sonucu üretilen en yüksek elektrik enerjisi miktarı Gibbs serbest enerjisine ( $\Delta G$ ) karşılık gelir.

$$W_{el} = - \Delta G \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklem 2.12 ve 2.13 kullanılarak yakıt pilinin teorik potansiyeli yazılabilir:

$$E = \frac{- \Delta G}{n F} \quad (2.14)$$

Veriler yukardaki denklemde yerine yazılırsa yakıt pilinin teorik potansiyeli [9]:

$$E = \frac{- \Delta G}{n F} = \frac{237,340 \text{ Jmol}^{-1}}{2 \cdot 96.485 \text{ As mol}^{-1}} = 1,23 \text{ volt} \quad (2.15)$$

### 2.3.4. Teorik yakıt pili verimi

Enerjinin bir formdan başka bir forma dönüştürülmesini sağlayan cihazlarda verimlilik cihazın sağladığı faydalı enerjinin cihaza olan enerji girişi arasındaki oranla ifade edilir. Yakıt pillerinde bu durum açığa çıkan faydalı enerji olan elektrik enerjisinin yakıt piline enerji girişi olan hidrojenin entalpisine (üst ısıl değeri) oranıdır. Gibbs serbest enerjisinin tamamının yakıt pilinde elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini kabul edersek maksimum (teorik) verim aşağıdaki gibi hesaplanır [9]:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = \%83 \quad (2.16)$$

### 2.4. Doğrudan Etanol Yakıt Pilleri (DEYP)

Doğrudan etanol yakıt pilleri (DEYP), yakıt olarak doğrudan etanolün kullanıldığı proton değişim membranı kullanan doğrudan alkol yakıt pilleri (DAYP) grubuna aittir. Bir doğrudan etanol yakıt pilinin çalışma prensibi, proton değişim membranlı yakıt pilinin basit formuna benzer [20].

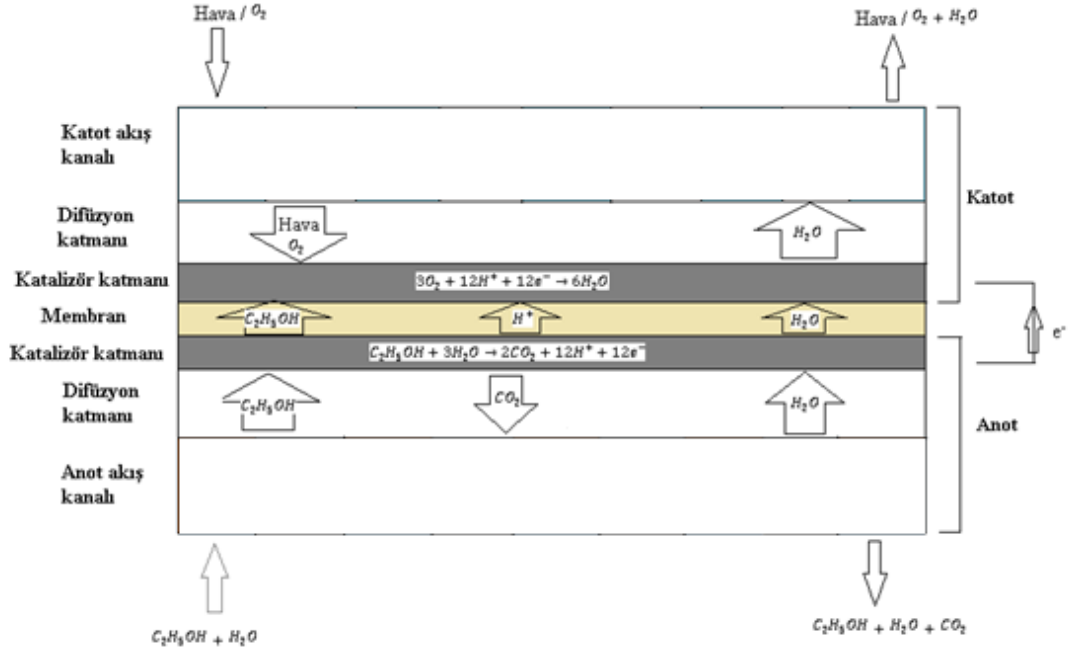
Doğrudan etanol yakıt pillerinde Proton değişim membranlı ve Anyon değişim membranlı olmak üzere temel olarak iki tür vardır. Proton değişim membranlı yakıt pillerinde karşılaşılan önemli problemlerden biri anottaki etanol oksidasyon reaksiyonunun yavaş gerçekleşmesidir. Etanol oksidasyon reaksiyonunun yavaş kinetiğini geliştirmek için yapılan asidik ortamın kullanılması ve Pt katalizörleri yavaş reaksiyon kinetiği sorununu çözememiştir. Anyon değişim membranlı yakıt pilleri anottaki etanol oksidasyon reaksiyonunda ve katottaki oksijenin indirgenme reaksiyonunda, proton değişim membranlı yakıt pillerinde gerçekleşen reaksiyonlara oranla daha hızlı kinetikler ortaya çıkarmıştır.

Hidrojenin özgül enerjisi 32,8 kWh / kg'dır. Etanolün özgül enerjisi ise 8,03 kWh / kg'dır. Ancak iki yakıtın yoğunluğuda işin içine katılırsa hidrojenin enerji yoğunluğu

0,18 kWh / L iken etanolün enerji yoğunluğu ise 6,28 kWh / L' dir. Tersinir koşullar altında doğrudan etanol yakıt pilinin, üretilen elektrik enerjisinin sabit basınçtaki yanma ısısına oranı olan teorik enerji verimliliği %97'dir. Ancak doğrudan etanol yakıt pillerinde hücre voltajı akım yoğunluğundan önemli ölçüde etkilenir ve daha düşüktür. Bu yüzden doğrudan etanol yakıt pilleri için pratik verimlilikten de bahsedilir. 0.5 V ve 100 mA / cm<sup>2</sup> de çalışan ve etanol oksidasyonunun tamamının CO<sub>2</sub>'ye olduğu bir yakıt pilinde verimlilik %40 seviyelerindedir ve buda dizel içten yanmalı motor ile aynı orandadır.

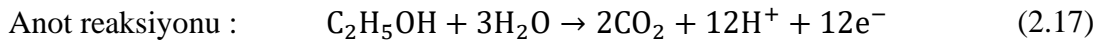
#### **2.4.1. Proton değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili**

Bu tür doğrudan etanol yakıt pilinin çalışma prensibi, proton değişim membranlı yakıt pilinin basit formuna benzer. Doğrudan etanol yakıt pilinde anot tarafına beslenen etanol-su karışımı elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu karbondioksit, protonlar ve elektronları oluşturur. Yakıt pilinde kullanılan proton değişimli membran sayesinde protonlar membran aracılığıyla katot tarafına geçerken membrandan geçemeyen elektronlar ise dış bir devre yardımıyla katota geçerek potansiyel fark oluşturur. Katot tarafında hava, membrandan geçen protonlar ve dış devreden gelen elektronlar ile elektrokimyasal reaksiyona girerek suyu oluşturur [21]. Doğrudan etanol yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 2.10.'da verilmiştir.



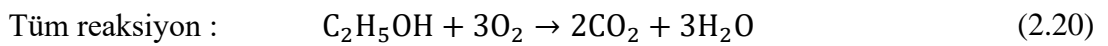
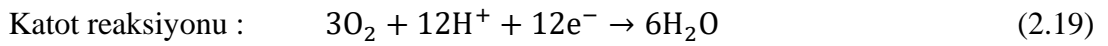
Şekil 2.10. Doğrudan etanol yakıt pili çalışma prensibi

Yakıt pili içerisinde oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar aşağıda ifade edilmiştir [22]:



Hücresinin standart potansiyeli  $E^\circ$  Nernst denklemine göre açığa çıkan elektron sayısına göre belirlendiğinden açığa çıkan 12 elektron dikkat çekicidir.

$$\text{Nernst denklemi : } \quad E^\circ = - \frac{\Delta G}{n F} \quad (2.18)$$

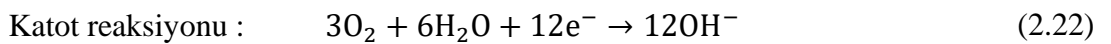
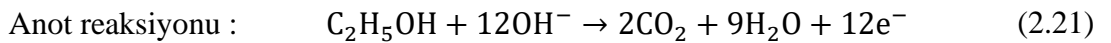


Denklemlerde görüldüğü gibi proton değişim membranlı yakıt pillerinden farklı olarak proton değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pilinde CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır.

#### 2.4.2. Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili

Bu yakıt pili anyon değişim membranı kullanan alkali yakıt piline benzemektedir. Alkali ortam kullanılan doğrudan etanol yakıt pillerinde etanolün oksidasyon reaksiyonu ve oksijenin indirgenme reaksiyonu, asidik ortamdakine göre daha iyi performans sergiler. Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pilleri katalizör olarak daha ucuz metallerin kullanılmasına uygundur. Maliyetin azaltılması için daha ucuz katalizörler kullanılabilir. Hidroksit iyonunun katottan anota doğru iletilmesi ve iyon iletiminin ters çevrilmesiyle etanolün membrandan geçiş oranında azaltılabilir.

Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pillerinde, proton değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pillerindeki genel reaksiyonlar ortaya çıkmaktadır. Ancak anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pillerinde etanol suyun yerine alkali bir çözelti kullanılarak seyreltilir. Aşağıda anot ve katot reaksiyonları verilmiştir.

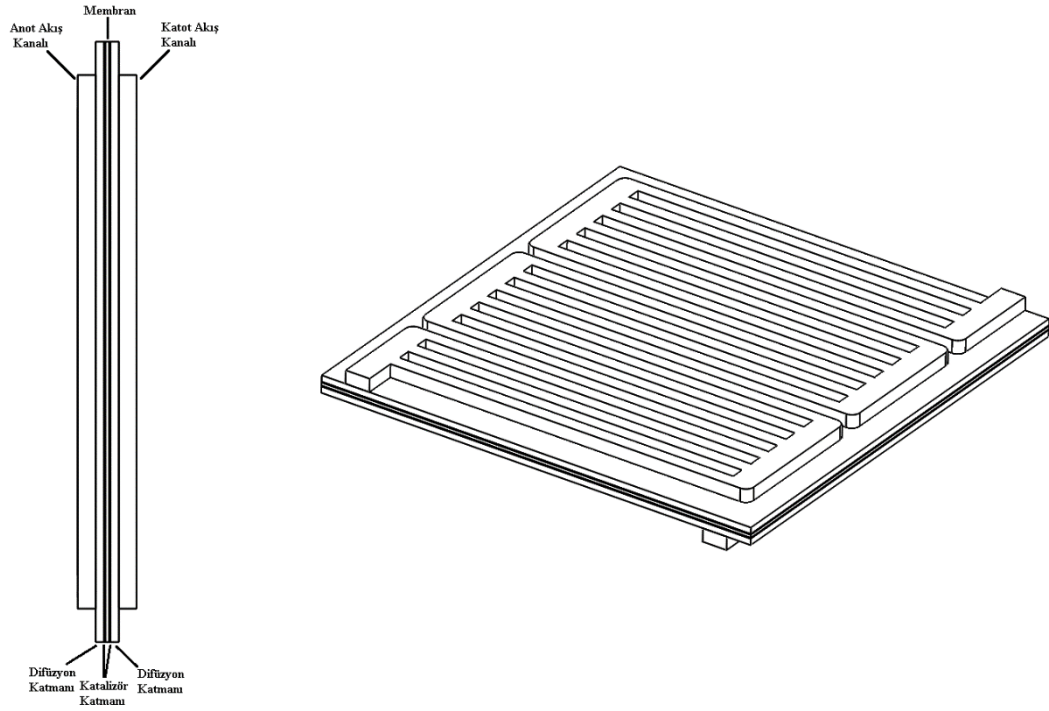


Hidroksit iyonlarının kaynağı genelde kullanılan NaOH VE KOH'dır. Kullanılan Anyon değişim membranı aracılığıyla OH<sup>-</sup> iyonları katottan anoda taşınır. Anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pillerinde kullanılan alkali ortam sayesinde asidik ortama göre daha az aşındırıcı ortam ve daha uzun dayanıklılık sağlanabilir. Bu yakıt pillerinde oksijen indirgenme reaksiyonunun daha hızlı kinetğe sahip olması Pt kullanılmayan daha ucuz katalizörlerin kullanılmasına olanak sağlar [23].

### 2.4.3. Alkali anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt pili

Doğrudan etanol yakıt pillerinin performansını iyileştirmek için düşük sıcaklıklarda anot katalizörlerinin performansını arttırmak için alkali ve asidik ortamın tek bir yakıt pilinde kullanıldığı alkali anyon değişim membranlı yakıt pilleri geliştirilmiştir. Bu yakıt pillerinde anotta alkali ortam ve katotta asidik ortam kullanılmaktadır. Kullanılan proton değişimli membran, anyon değişimli membrana göre daha iyi termal kararlılığa ve iyonik iletkenliğe sahiptir. Bu yakıt pilleri doğrudan etanol yakıt pillerinde elde edilen güç yoğunluklarını yüksek seviyelere taşımıştır.

Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pilinin şematik resmi Şekil 2.11.'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pilinin şematik resmi

## 2.5. Yakıt Olarak Etanol

Doğrudan etanol yakıt pili teknolojisini değerlendirmek için kullanılan yakıt olan etanolün gözden geçirilmesi gereklidir. Etanol, yakıt pili teknolojisi dışında da hali hazırda kullanılmakta olan pazarlarda ve ayrıca üretimi ve dağıtımının mevcut yakıt

alt yapılarına uyumluluğu nedeniyle araç endüstrisi için kullanılabilir yakıtlardan birisidir. Etanolün yakıt pilleri için çekici bir yakıt olmasının sebeplerinden bazıları yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve toksik yapıda olmaması sayılabilir. Etanolün kullanılmasının dezavantajlarından bazıları hala şüpheli olarak görülen çevresel etkileridir. Tablo 2.2.'de hidrojen, metanol ve etanolün yakıt pilleri için özellikleri kıyaslanmıştır.

Tablo 2.2. Yakıt olarak hidrojen, etanol ve metanolün karşılaştırılması [24]

	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>Metanol</b>	<b>Etanol</b>
<b>Teorik özgül enerji (kWh/kg)</b>	32,8	6,07	8,03
<b>Elektrik enerji yoğunluğu (kWh/L)</b>	1,3	4,3	6,4
<b>Toksik özellik</b>	Hayır	Evet	Hayır
<b>Patlayıcılık</b>	Evet	Hayır	Hayır
<b>Depolama</b>	Zor	Kolay	Kolay
<b>Yanıcılık</b>	Evet	Evet	Evet
<b>Kaynak</b>	Fosil yakıtlar	Fosil Yakıtlar	Şeker, biyokütle

## 2.6. Doğrudan Etanol Yakıt Pili Literatür Özeti

Wnuk ve Lewera [25] Pt/C ve PtRu/C katalizörleri kullanılan bir DEFC'nin anot tarafında oluşan ürün dağılımı analiz ettiler. Farklı hücre koşullarında (voltaaj, sıcaklık, vb.) kullanılan katalizörlerin seçiciliğini değerlendirdiler. Oksijen geçişi ve bunun üç ana etanol oksidasyon ürününün (asetaldehit, asetik asit ve CO<sub>2</sub>) üzerindeki etkisini incelediler. Sonuç olarak oksijen geçirgenliğinin, çalışan bir etanol yakıt pili için anot zehirlenmesine yol açmadığı için yararlı olduğu kanısına vardılar.

Sheng ve ark. [26] Pt/Rh (1 1 1) arayüzünün atomik seviyelerde doğrudan etanol yakıt hücrelerinde etanol elektrooksidasyonuna nasıl bir katkı sağladığını araştırmışlardır. Bu çalışma metal/metal arayüzlerin önemini vurgulamakta ve etanol elektrooksidasyon reaksiyonları için aktif katalizörlerin tasarımında bu tür ara yüzey katalizörlerinin görüntülenmesine yardımcı olmaktadır.



Azam ve ark. [27] farklı sıcaklıklar, farklı yakıt konsantrasyonları, farklı etanol debileri ve farklı hava debileri gibi parametrelerin doğrudan etanol yakıt hücresi üzerindeki etkisinin incelenmesi için parametrik çalışma yapmışlardır. Etanol geçişinin optimizasyonu, oksidan debisinin oranı ve sıcaklığın anot ve katottaki kütle transferini arttırabileceğini ve bunda elektrokimyasal reaksiyonları ve DEFC performansını arttırabileceğini bulmuşlardır.

Mondal ve ark. [28] PtCo elektrokatalizörlerinin üretilmesi için farklı yöntemleri incelediler. Katalizör matrislerini EDX, XRD, TEM ve BET teknikleriyle yapısal morfoloji ve bileşim analizine tabi tuttular. EG (etilen glikol) indirgeme ile geliştirilen matristeki Co'nun etanol oksidasyonu için daha iyi katalitik sonuç verdiğini buldular.

Promanan ve ark. [29] azot katkılı grafen destekleyici üzerindeki PdNi, PdCo, PdCu ve PdNiCo'nun ikili ve üçlü alaşımlarını, Doğrudan etanol yakıt hücrelerinde (DEFC) oksijen indirgeme reaksiyonunun (ORR) aktivitesini arttırmak için hazırladılar. N-katkılı grafen üzerindeki PdNiCo'nun DEFC'de yeni nesil katot malzemeleri olarak kullanım için iyi katalizörler olabileceğini buldular.

Estrada ve ark. [30] oksijen indirgenme reaksiyonunu seçici olarak gerçekleştirmek için Ag-Pt katotunu kullanarak yüksek etanol konsantrasyonunda incelediler. 2 M'e kadar yüksek etanol konsantrasyonu varlığında bile oksijen indirgeme reaksiyonunun seçici olarak gerçekleştirme kabiliyeti gösterdiğini buldular.

Wang ve ark. [31] karbon fiber dolgular üzerinde desteklenen Pt-SnO<sub>2</sub> katalizörleri, taşıyıcı olarak poliakrilonitril (PAN) ve gözenek oluşturucu madde olarak polivinilden florür (PVDF) ile elektrospinning yöntemiyle hazırladılar. Kompozitlerin fiziksel, kimyasal özelliklerini ve katalitik performansı, XRD, SEM, BET, kronoamperometri ve AC empedansı ile karakterize ettiler.

Monreal ve ark. [32] etanol elektrooksidasyon reaksiyonu anot polarizasyonunu ve ürün seçicilik verilerini tahmin edebilen izotermal tek fazlı 1 boyutlu model

geliştirdiler. Etanol oksidasyon reaksiyonunun ayrıntılı kinetik açıklaması, etanol yakıt hücrelerinin çalışmasını karakterize eden dört verimin (teorik, gerilim, faradaik ve enerji kullanımı) hesaplanmasını sağladılar.

Altarawneh ve ark. [33] proton değişim membranlı elektroliz hücresinde performans ve ürün dağılımını ölçerek doğrudan etanol yakıt hücreleri (DEFC) için bir octahedral PtNi katalizör geliştirdiler. PtNi/C katalizörün, Pt/C veya ticari PtRu/C 'dan daha yüksak DEFC verimi sağladığını buldular.

Gomes ve ark. [34] doğrudan etanol yakıt hücresindeki (DEFC) akışı analiz etmeyi amaçlamışlardır. Reaktif akışın sayısal simülasyonu merkezi sonlu fark yöntemine dayanarak gerçekleştirmişlerdir. Denklemleri Crank-Nicolson metodu kullanarak ayırıklaştırmıştılar.

De Souza ve ark. [35] yaptıkları çalışmada, potansiyellerin üzerindeki kayıpların hesaplanması için zamana ve alana bağlı türlerin akışını ve konsantrasyonunu dikkate alan doğrudan etanol yakıt hücresi (DEFC) için matematiksel bir model geliştirdiler. Hücresinin voltaj ve güç yoğunluğunu farklı katalizörler, sıcaklıklar ve etanol konsantrasyonları ile hesapladılar.

Chandra ve ark. [36] ilk kez bir ethanol-dikromat yakıt-oksidan mikroakışkan yakıt hücresini bir kağıt iskelet üzerine uyguladılar. Seri bağlanmış iki hücreden oluşan bir yığın 40 dakika boyunca 3 mm kırmızı ışık yayan diyotu aydınlatmışır. Bu çalışmayla, mikro-analitik cihazlara güç vermek için pillere alternatif olarak bu hücresinin potansiyelini göstermişlerdir.

Guo ve ark. [37] alkali ortamdaki Pd<sub>2</sub>Ru/C ve Pd/C katalizörleri üzerindeki etanol oksidasyon reaksiyonunu (EOR) döngüsel voltammetri, kronoamperometri, tek yakıt hücresi testi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmişlerdir. Pd/C ile karşılaştırıldığında, Pd<sub>2</sub>Ru/C 'nin asetaldehit formasyonunu desteklediğini ve bunun oksidasyonunu engellediğini göstermişlerdir. Bu kapsamlı çalışmada, alkali ortamlarda EOR için Pd<sub>2</sub>Ru/C' deki

Ru rolleri için yeni bir anlayış sunmuşlar ve yakıt hücrelerinin Pd<sub>2</sub>Ru/C ile performansın düşmesinin nedenlerini açıklamışlardır.

Osmieri ve ark. [38] oksijen indirgenme reaksiyonu (ORR) için bir Fe-N-C asil olmayan metal (NNM) katalizörü Fe (II) -flalosiyanin kullanılarak sert şablonlama yöntemi ile hazırladılar. ORR'nin temel olarak direkt olarak OH<sup>-</sup> 'ye doğrudan 4e<sup>-</sup> indirgenmesinden sonra gerçekleştiğini ve Fe-N-C katalizörünün yüksek oranda etanol toleransı gösterdiği ve umut verici bir stabilite gösterdiğini buldular.

Herranz ve ark. [39] bir dizi poli (vinil alkol)-poli karışımı (benzimidazol) (PVA: PBI) membranlarını döküm yöntemi kullanılarak farklı PVA ve PBI (2:1, 4:1, 6:1 ve 8:1) oranları ile sentezlediler. PVA:PBI 4:1 membranının yakıt hücresindeki en iyi davranışa sahip olduğunu buldular, aynı koşullarda katkılı PBI'dan yaklaşık %50 daha iyi olduğunu gösterdiler. Bu önemli sonuçların, bu membranları gelecekte alkalın polimer elektrolit membran yakıt hücrelerinde (APEMFC) uygulanması için umut verici olduğunu gösterdiler.

Tsang ve ark. [40] nikel köpük plaka (Pd-Pt/GA/NFP) üzerinde biriktirilmiş, boyutlandırılmış, bağlayıcı içermeyen bimetalik bir Pd-Pt yüklü grafen aerojel hazırladılar ve oda sıcaklığında bir alkalın doğrudan etanol yakıt hücresi (DEFC) için bir elektrot olarak kullandılar. Yakıt konsantrasyonunun ve metal bileşimin DEFC 'nin çıkış gücü yoğunluğu üzerindeki etkisini sistematik olarak incelediler.

Tan ve ark. [41] grafen oksit (PdNi/EGO) kompozitinde desteklenen paladyum-nikelden oluşan bir katalizör sentezlediler. PdNi/EGO anot katalizörü ile yapılan bir tek hücreli anyon değiştirme membranı PdNi, PdNi/C ile desteklenmeyen ve ticari Pd/C katalizöründen daha yüksek güç yoğunluğu gösterdiğini bulmuşlardır.

Rauf ve ark. [42] benzo-guanamin, siyanürik asit ve melaminden oluşan çoklu azot kompleksinin yüksek sıcaklıktaki pirolizi yoluyla kapsüllenmiş Fe-nonopartiküller ile bambu benzeri N-katkılı karbon nanotüplerin sentezini araştırmışlar. Bu katalizörlerin yüksek dayanıklılık ve etanol toleransı sergilediğini bulmuşlardır.

Alkalin membranlı doğrudan etanol yakıt hücresine uygulandığında cazip uygulama potansiyeli gösterdiğini bulmuşlar.

Grimmer ve ark. [43]  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{Fe}_{0.2}\text{Co}_{0.8})\text{O}_3$  ve  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  bazlı katot katalizörleri sol-jel yöntemiyle sentezlediler. Bu katot katalizörlerini yarı hücre konfigürasyonunda test ettiler ve alkalin doğrudan etanol yakıt hücrelerinde (ADEFEC) referans materyali olarak  $\text{MnO}_2$  ile karşılaştırdılar.  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}(\text{Fe}_{0.2}\text{Co}_{0.8})\text{O}_3$  katalizörünün değerli metal içermeyen  $\text{MnO}_2$  katalizöründen daha iyi performans gösterdiğini buldular.

Allan ve ark. [44] bağıl nemin, ticari olarak temin edilebilen iki yakıt hücresi katalizörünün algılama performansı üzerindeki etkisini bir etanol sensör cihazında araştırmışlardır. Pt/C-PVC MEA, Pt-PVC MEA'yı performansta geride bıraktığını, ancak Pt-PVC'nin kararlılığının daha üstün olduğunu bulmuşlardır.

Ishitobi ve ark. [45] DEFC için aktif anot katalizörü olarak Pt-Sn'ı,  $\text{SiO}_2$  gömülü karbon nanofiber üzerinde desteklemişlerdir. Kompozit katalizör,  $\text{Pt}_3\text{Sn}_1/\text{SECNF}$ , ticari Pt/C (Pt/Ccom)'nın aktivitesinden 3,7 kat daha yüksek kütle aktivitesi gösterdiğini bulmuşlar.

Cornejo ve ark. [46] PtCu elektrokatalizörü sentezlediler. Alkalin ortamda etanolün elektro oksidasyonu için hazırlanan elektrokatalizörün elektrokatalitik etkinliğini araştırdılar. PtCu elektrokatalizörü bir anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt hücresinde (AEM-DEFC) anot olarak, Pt/C 'a kıyasla yaklaşık 2 kat daha yüksek bir güç yoğunluğu sergileyen anot olarak kullanılabileceğini buldular.

Oliveira ve ark. [47] pasif beslemeli bir DEFC'de meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonları ve tüm transfer olaylarını (ısı ve kütle transferi) dikkate alan kararlı durum ve tek boyutlu bir modeli açıkladılar. Bu modelin, farklı kimyasal türlerin konsantrasyon profillerini ve ayrıca farklı katmanlardaki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için kullanılabileceğini belirttiler. Ayrıca modelin, çalışma koşullarının ve

tasarım parametrelerinin etanol ve su geçiş hızı üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tahmin edebileceğini ifade ettiler.

Monreal ve ark. [48] doğrudan etanol yakıt hücresinin anodu için tek boyutlu bir model önermişlerdir. Literatürden elde edilen anot polarizasyonu ve ürün seçicilik verilerini kullanarak reaksiyon sabitlerini belirlemek için çok amaçlı genetik algoritma kullandılar. Burada geliştirilen metodolojiyi kullanarak reaksiyon sabitlerini ayarlayarak, farklı katalizör katmanları modellenabilir ve seçicilikleri başarılı bir şekilde yeniden üretilebileceğini ifade ettiler.

Charoen ve ark. [49] program Tasarım Uzmanı 7.0.0 ' ı kullanarak yüzey tepki yöntemiyle maksimum güç yoğunluğunu elde etmek için doğrudan metanol yakıt hücreleri (DMFC) ve doğrudan etanol yakıt hücreleri (DEFC) için en iyi koşullarını bulmaya çalıştılar. Çalışma sıcaklığı 30-70 °C aralığında, debi 5-50 ml/min aralığında ve alkol konsantrasyonu 0.5 -3 M aralığında olmak üzere üç bağımsız değişkeni ele aldılar. Tepki sonucu, daha yüksek çalışma sıcaklıklarının ve daha yüksek alkol konsantrasyonlarının hem DMFC hem de DEFC 'de maksimum güç yoğunluğunda bir artışa yol açtığını ortaya çıkardılar.

Kanninen ve ark. [50] PtRu'nun üç farklı şekilde değiştirilmiş, etanol oksidasyonunu destekleyen birkaç duvarlı karbon nanotüp (FWCNT) üzerindeki performansını çeşitli sıcaklıklarda (0–60 °C) alkali ortamlarda hem dönen disk elektrotu (RDE) hem de doğrudan etanol yakıt hücresinde (DEFC) hesapladılar. FWCNT, oksidatif işlem (O-FWCNT), anilin kaplama (A -FWCNT) ve N-katkılı karbon tabakası (N-FWCNT) ile modifiye ettiler. Katalizör desteği ile yakıt hücresi katalizör katmanındaki iyonomer arasındaki etkileşimlerin, verimli kütle transferi için uygun bir gözenek yapısı oluşturulmasında önemli olduğunu vurguladılar.

Gomes ve Bortoli [51] üç boyutlu model geliştirdiler. Geliştirdikleri modelin yakıt hücresinin tüm katmanlarındaki akışı tahmin edebilir ve için de meydana gelen fiziksel ve kimyasal olayların daha iyi analizine izin verebileceğini ifade ettiler. Ek olarak, türlerin mol oranlarının hesaplanması, difüzyon katmanının, giriş kanalı ve

katalizör katmanı arasındaki yakıtın kütle transferinde büyük bir etkiye sahip olduğunu gözlemlediler.

Yang ve ark. [52] Alkalın doğrudan etanol yakıt hücresinde birleştirilmiş taşınım ve elektrokimyasal reaksiyonların modellenmesi için indirgenmiş iki boyutlu bir model sundular. Deneysel verilere göre onaylandıktan sonra modelin, türlerin taşınım davranışlarını araştırmak ve anot aşırı potansiyeli ve genel hücre performansı üzerindeki çalışma parametrelerinin etkisini incelemek için kullanılabileceğini ifade ettiler.

Li ve Zhao [53] iki adet arka arkaya bağımsız tank ve tek hücreden oluşan pasif bir anyon değişim membranlı doğrudan etanol yakıt hücresi (AEM DEFC) yığınına araştırdılar. Bu özel tasarım sadece yığının ağırlığında ve hacminde bir azalma sağlamakla kalmaz, aynı zamanda iki hücre arasında meydana gelen sıvı alkalinin geçiş reaksiyonunda önlediğini ifade ettiler.

Huang ve ark. [54] alkalın direkt etanol yakıt hücrelerinde (ADEFC) bir polivinil alkol (PVA) /fonksiyonel karbon nano tüplerinin (m-CNT) uygulanmasını araştırdılar. ADEFC literatür verileri arasında en yüksek olan sülfonatlı membran elektrolitler kullanan proton değişimli doğrudan etanol yakıt hücrelerinden birkaç kat daha yüksek maksimum güç yoğunluğu değeri elde ettiklerini ifade ettiler. Bu nedenle KOH katkılı PVA/m-CNT elektroliti ADEFC 'ler için uygun bir katı elektrolit ve alkalın yakıt hücresi uygulamalarında ticarileşme potansiyeline sahip olduğunu ifade ettiler.

Wu ve ark. [55] Organik/inorganik kompozit membranları farklı montmorillonitlerle ile ve havada 293 K'da döküm yöntemiyle proton iletkenliklerinin ve etanol geçirgenlik kabiliyetlerinin dengesi ile nasyon çözeltisi ile hazırladılar. Membranların etanol geçirgenliği ve proton iletkenliğini karşılaştırmalı olarak incelediler.

Satorre ve ark. [56] alkali ortamda karbon destekli paladyum bazlı katalizörlerin etanol oksidasyon reaksiyonuna karşı etkinliğini araştırdılar. Bu katalizörlerin

katalitik aktivitesinin ayrıca yarı hücreli ve alkalın membranlı doğrudan etanol yakıt hücresinde (AMDEFC) test ettiler. Pd<sub>12</sub>Ru/C için maksimum güç yoğunluğunun Pd/C katalizör tarafından elde edilen değerin neredeyse iki katı olduğunu buldular.

Abdullah ve ark. [57] alkali anyon değiştirme membranı içeren sıvı beslemeli bir DEAFc için matematiksel model geliştirmişlerdir. Modelin bir alkalın anyon değişim membranı aracılığıyla etanol geçişi nedeniyle oluşan katottaki etanol oksidasyonunun karışık potansiyel etkilerini açıkladığını ifade ettiler.

Ji Q ve ark. [58] Ortalama 2.7 nm partikül boyutuna sahip karbon nanotüpler (PdAg/CNT) üzerinde desteklenen PdAg katalizörünü, doğrudan alkol yakıt hücrelerinde alkol oksidasyon reaksiyonu için sulu bir faz indirgeme yöntemiyle hazırladılar. Ag'nin, aldehit (formaldehit, asetaldehit ve glikoksilat) oksidasyonuna karşı mükemmel aktivite gösterdiğini ve bu nedenle Ag'nin ara ürün aldehit oksidasyonunu teşvik etmesi nedeniyle PdAg/CNT üzerinde alkol oksidasyonunda artış gösterdiğini buldular. Ayrıca PdAg/CNT C<sub>3</sub> gliserolün C<sub>2</sub> oksalat ile C-C bağ bölünmesine katkıda bulunarak, gliserol oksidasyonunun yakıt verimliliğini de arttırdığını ifade ettiler.

Majidi ve Pickup [59] doğrudan etanol yakıt hücresinin (DEFC) enerji verimliliğinin, anotta etanol molekülü başına salınan ortalama elektron sayısı (n-değeri) ile doğru orantılı olduğunu ifade ettiler. DEFC donanımında n-değerinin ölçülmesine yönelik bir yaklaşım sundular.

Figueiredo ve ark. [60] ticari PtRu/C mürekkebine Sb tuzu eklenerek hazırlanan PtRu/C-Sb malzemelerini, etanol oksidasyonu için katalizörler olarak incelemişlerdir. Hazırlanan trimetalik katalizörlerin, çok çeşitli yüzey kaplamaları yoluyla etanol oksidasyonu için iyileştirilmiş özellikler gösterdiğini buldular. Bu katalizör hazırlama yöntemiyle, katalizörlerin PtRu katalizörlerine göre 2 kat daha fazla ve saf Pt anotlarına göre 6 kat daha fazla akım yoğunlukları gösterdiğini buldular.

Goel ve [61] Basu tek boyutlu kararlı bir durumdaki doğrudan etanol yakıt hücresinin (DEFC) performansını analiz etmek için matematiksel model geliştirdiler. Modelin farklı anot katalizörleri için DEFC'nin akım-voltaj verilerini iyi bir şekilde tahmin ettiğini ifade ettiler.

S. Abdullah ve ark. [62] güç performans eğrisini elde etmek için kavramsal bir tasarım geliştirdiler.

Modibedi ve ark. [63] pasif alkalın doğrudan etanol yakıt hücresinde (ADEFC) Vulcan XC-72 (çok düşük bir yüklemde, ağırlıkça %8 Pd) üzerinde Pd nanokatalizörünü hazırladılar ve incelediler.

Jablonski ve [64] Lewera Yakıt hücresine birkaç saniye boyunca (yüksek yük periyodu) bir direnç ( $1 \Omega$ ) ile periyodik olarak kısa devre yaptırmışlar, ardından direnç bağlantısı kesildiğinde 100 saniyeye kadar düşük bir yük periyodu izletmişler. Genel olarak elektrik kısa devresinin tekrarlanmasıyla hücre performansında sabit bir artış elde edildiğini ifade etmişler.

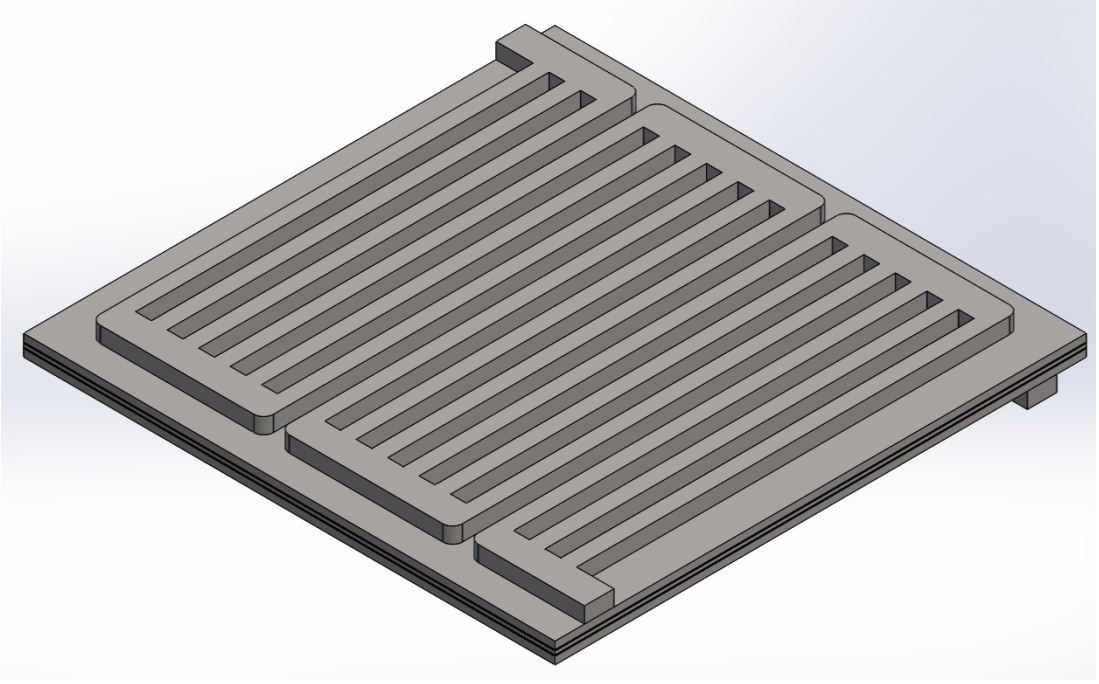


## **BÖLÜM 3. MATEMATİKSEL MODELLEME**

Doğrudan etanol yakıt pilinde yakıt pilinin tüm katmanlarında gerçekleşen olayları gözlemleyebilmek için üç boyutlu modelin geliştirilmesi gereklidir. Yapılan bu çalışmada doğrudan etanol yakıt pili çalışma parametrelerini incelemek için Comsol multiphysics programında üç boyutlu model geliştirildi. Model, literatürde bulunan deneysel veriler kullanılarak doğrulandı ve doğrudan etanol yakıt pilinin performansını iyileştirmek için model üzerinde sıcaklığın etkisi, havanın ve yakıtın kanal girişlerindeki hızlarının etkisi, gözenekliliğin etkisi, katot basıncının etkisi, membran kalınlığı gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir.

### **3.1. Model Geometrisi**

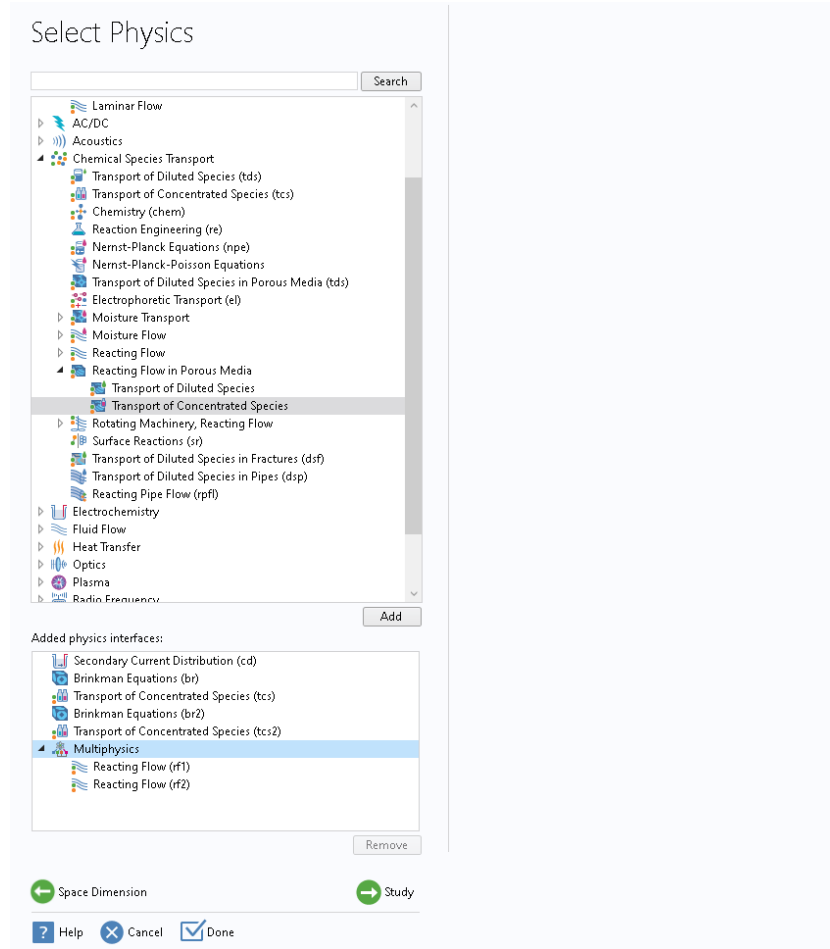
Bu çalışmada kullanılan geometri literatürde yapılan tekrar hücrelerinin aksine tam ölçekli bir yakıt pilini modellemektedir. Modelde kullanılan asimetric akış kanallarına sahip geometri Solidworks programında tasarlanmıştır. Model geometrisi aşağıda Şekil 3.1.'de verilmiştir:



Şekil 3.1. Üç boyutlu etanol yakıt hücresi model geometrisi

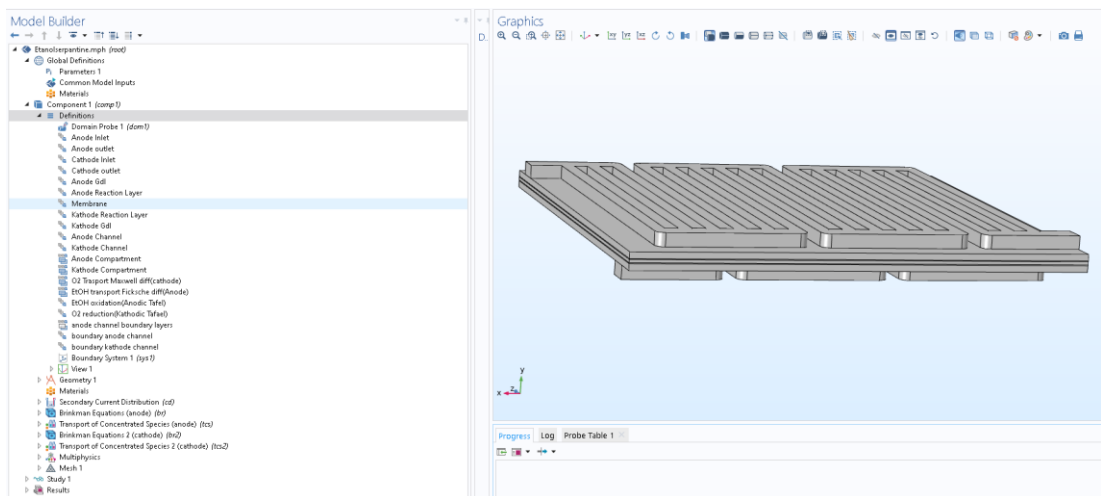
### 3.2. Model Fiziklerinin Programa Tanımlanması

Comsol multiphysics programında model oluşturma sihirbazında modelde kullanılacak fizikler seçildi. Fizik seçimi Şekil 3.2.'de verilmiştir.



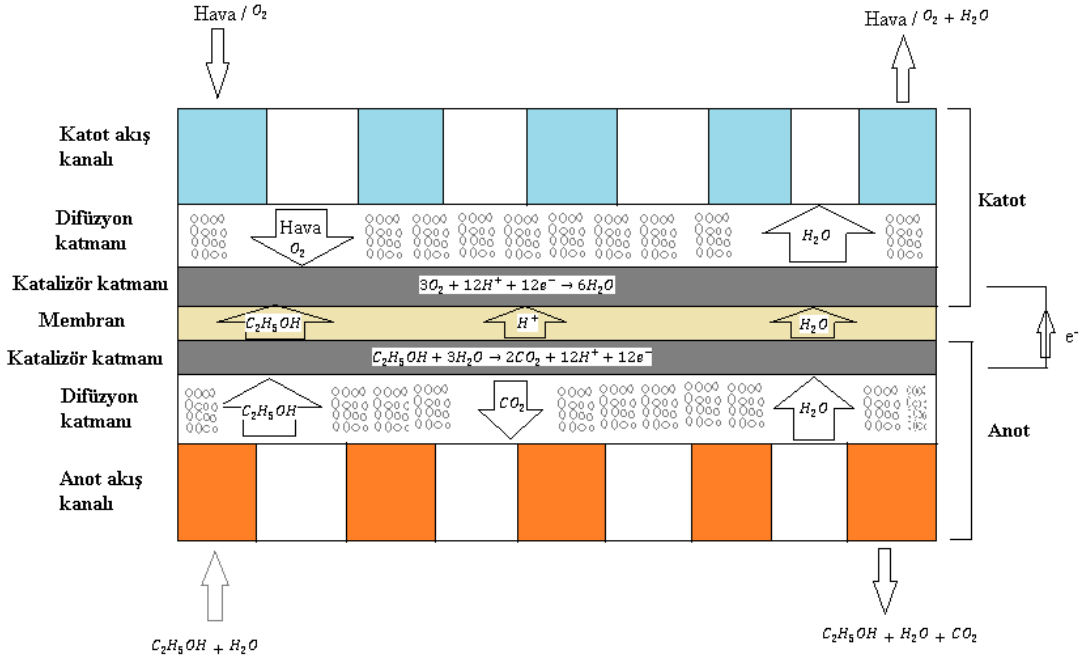
Şekil 3.2. Comsol multiphysics programında fizik seçimi

Comsol multiphysics programı aracılığıyla modelin fiziksel alanları aşağıdaki Şekil 3.3.'deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.3. Model fiziksel alanlarının tanımlanması

Doğrudan etanol yakıt pili için geliştirilen modelin fiziksel alanının şematik resmi aşağıdaki Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Modelin fiziksel alanının şematik resmi

### 3.3. Model Denklemleri

Bu çalışmada kullanılan matematiksel modelde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

1. İki fazlı etkileri dikkate alınmamıştır.
2. Yakıt pili düzgün rejim koşullarında çalışmaktadır.
3. Karbondioksit elektrokimyasal reaksiyonun ana ürünüdür.
4. Katotta atmosferik hava kullanılmıştır.
5. Etanol anot katmanı ve membran bölgesinde yayılabilir.

Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pili modelinde kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir:

### 3.3.1. Elektron / İyon yükü dengesi

Ohm kanunu: 
$$I = \sigma \Delta V \quad (3.1)$$

Burada  $I$  = akım (A),  $\sigma$  = iletkenlik,  $V$  = potansiyel (V)' i göstermektedir.

### 3.3.2. Yük transferi kinetiği

Tafel eşitliği: 
$$i_{loc} = i_0 10^{\eta/Aa} \quad , \quad i_{loc} = -i_0 10^{\eta/Ac} \quad (3.2)$$

Burada  $i_{loc}$  = yerel akım yoğunluğu ( $\text{Am}^{-2}$ ),  $i_0$  = akım yoğunluğu değişimi ( $\text{Am}^{-2}$ ),  $\eta$  = aşırı gerilim(V)'i göstermektedir.

### 3.3.3. Elektrolitte yük transferi

Nernst-Planck eşitliği: 
$$N_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_i F c_i \nabla \phi + c_i u \quad (3.3)$$

Burada  $N_i$  = elektrolitte yük transferi ( $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $D$  = difüzyon katsayısı ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ),  $c$  = konsantrasyon,  $z$  = elektron sayısı,  $F$  = faraday sabiti ( $\text{C mol}^{-1}$ ),  $\phi$  = elektrolit potansiyelini göstermektedir.

### 3.3.4. Serbest ve gözenekli elektrotta kütle transferi

Navier-Stokes eşitliği: 
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot [ -\eta \cdot (\nabla u + \nabla u^T) + p l ] = -\rho ( u \cdot \nabla ) u \quad (3.4)$$

Brinkman eşitliği: 
$$\frac{\rho}{\epsilon_p} \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ -\eta \frac{\rho}{\epsilon_p} (\nabla u + \nabla u^T) + p l \right] = -\frac{\rho}{k} u \quad (3.5)$$

Burada  $\rho$  =yoğunluk,  $\eta$  = dinamik viskozite (Pa s),  $\epsilon_p$  = gözeneklilik,  $k$  = geçirgenlik ( $\text{m}^2$ )'i göstermektedir.

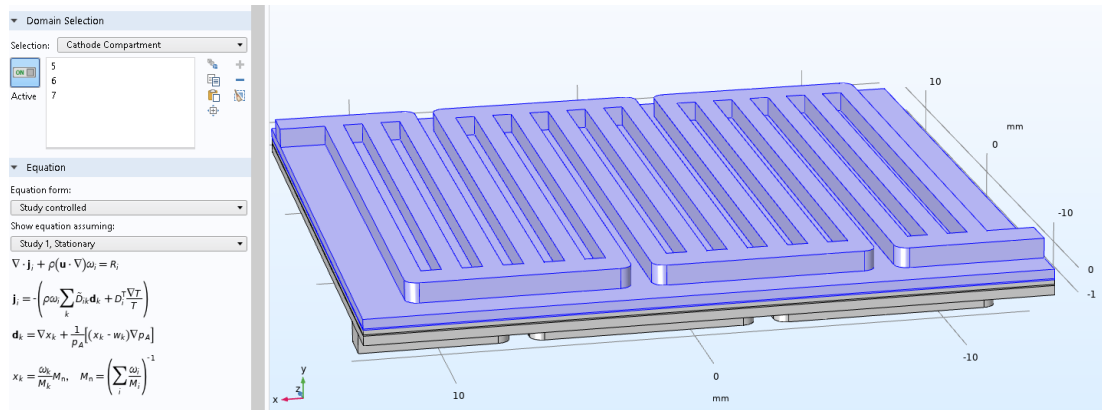
### 3.3.5. Gözenekli elektrot ve akış kanallarında kütle dengesi

Fick kanunu: 
$$-\nabla \cdot (-D \cdot \nabla c + c \cdot u) = 0 \quad (3.6)$$

Maxwell-Stefan eşitliği: 
$$-\nabla \cdot \left[ -\rho w_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \left\{ \frac{M}{M_j} \left( \nabla w_j + w_j \frac{\nabla M}{M} \right) + \left( x_j - w_j \frac{\Delta p}{p} \right) \right\} + w_i \rho u \right] = 0 \quad (3.7)$$

Burada M = mol ağırlığı, w = kütle kesri, x = mol kesrini göstermektedir.

Model denklemlerinin Comsol multiphysics programına girilmesi aşağıda Şekil 3.5.'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Denklemlerin programa girilmesi

### 3.4. Model Parametreleri

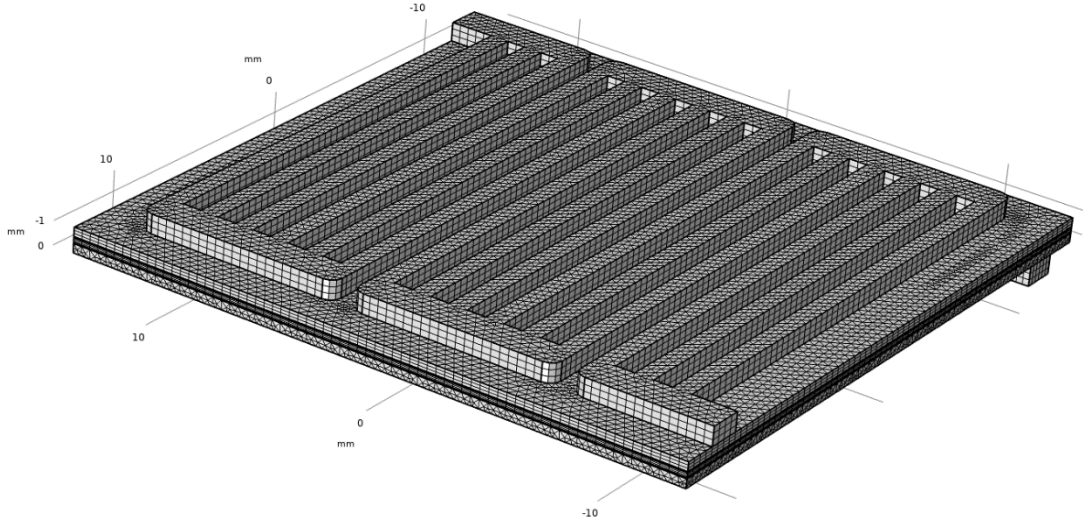
Comsol multiphysics programıyla doğrudan etanol yakıt pili modelindeki parametreler programa girilmiştir. Parametreler aşağıda Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Model parametreleri

Parametre	Değer
Akış kanalı genişliği	$0,8 \times 10^{-2}$ m
Akış kanalı yüksekliği	$0,8 \times 10^{-2}$ m
Tekrar elemanı genişliği	$0,8 \times 10^{-2}$ m
Enine kanal genişliği	$1,5 \times 10^{-3}$ m
Gözenekli elektrot kalınlığı	$50 \times 10^{-6}$
Difüzyon katmanı kalınlığı	$380 \times 10^{-6}$
Anot difüzyon tabakası gözenekliliği	0,4 [65]
Katod difüzyon tabakası gözenekliliği	0,4 [65]
Anot katalizör tabakası gözenekliliği	0,4 [65]
Katod katalizör tabakası gözenekliliği	0,4 [65]
Anot ve Katod difüzyon tabakası geçirgenliği	$2 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> [66]
Anot ve Katod katalizör tabakası geçirgenliği	$10^{-13}$ m <sup>2</sup> [67]
Membran uzunluğu	0,027 m
Membran genişliği	0,027 m
Membran elektronik iletkenliği	$14,16$ S m <sup>-1</sup> [68]
Anot ve Katod difüzyon tabakası elektronik iletkenliği	$300$ S m <sup>-1</sup> [69]
Etanol mol ağırlığı	$46,068$ g mol <sup>-1</sup> [70]
Karbondioksit mol ağırlığı	$44,01$ g mol <sup>-1</sup> [70]
Su mol ağırlığı	$18,015$ g mol <sup>-1</sup> [70]
Anot referans akım yoğunluğu	$4,8$ mA cm <sup>-2</sup> [71]
Etanolün su içindeki difüzyon katsayısı	$4,7 \times 10^{-5}$ cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> [72]
Etanolün membran içindeki difüzyon katsayısı	$1,76 \times 10^{-6}$ cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> [72]
Oksijenin gaz içindeki difüzyon katsayısı	$2,98 \times 10^{-5}$ cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> [73]
Membran kalınlığı	$183 \times 10^{-6}$ [26]
Yakıt pili sıcaklığı	$90$ °C [74]
Anot ve katod referans basıncı	$1$ atm [74]
Etanol giriş debisi	$1$ ml/dk [74]
Hava giriş debisi	$25$ ml/dk [74]

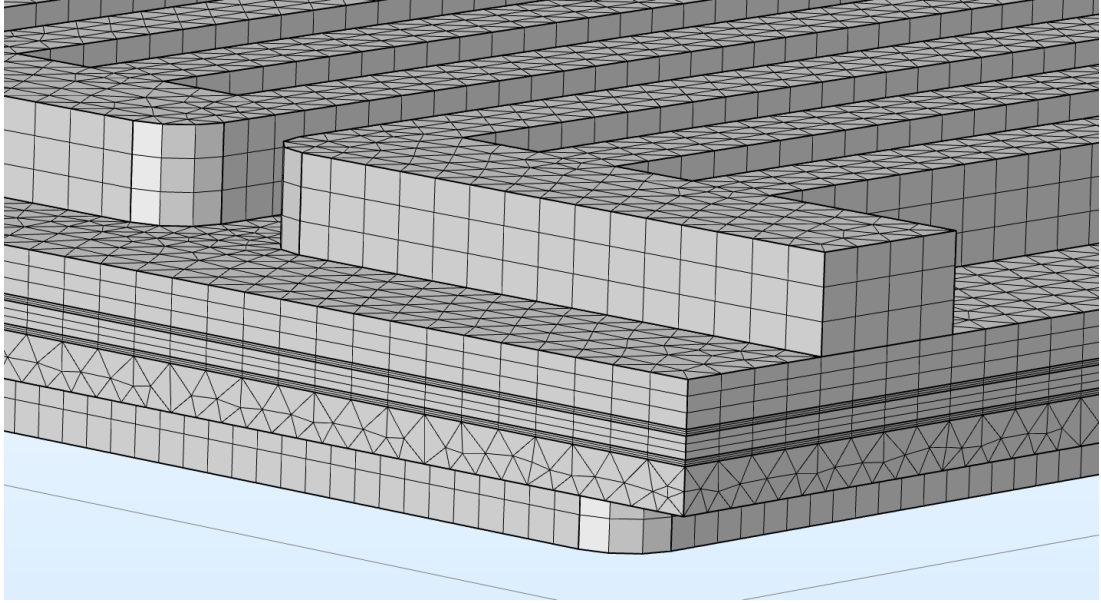
### 3.5. Modelin Ağ Yapısının (mesh) Oluşturulması

Modelleme yapılırken daha kısa sürede daha doğru sonuçların alınması ağ yapısının dikkatli bir şekilde oluşturulmasına bağlıdır. Bu çalışmada Comsol Multiphysics kütüphanesindeki çeşitli örnekler incelenerek modelde kullanılan fiziklere en uygun ağ yapısı oluşturulmuştur. Model için oluşturulan ağ yapısı Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Model ağ (mesh) yapısı





Şekil 3.7. Model ağ (mesh) yapısı detay

Comsol ile yapılan çözümlerin ağ sayısından bağımsız olduğunu göstermek için 3 farklı mesh yapısında çözümler yapılmıştır. Farklı mesh yapılarındaki 0.4 V'taki akım yoğunluğu değerleri aşağıda Tablo 3.2.'de verilmiştir.

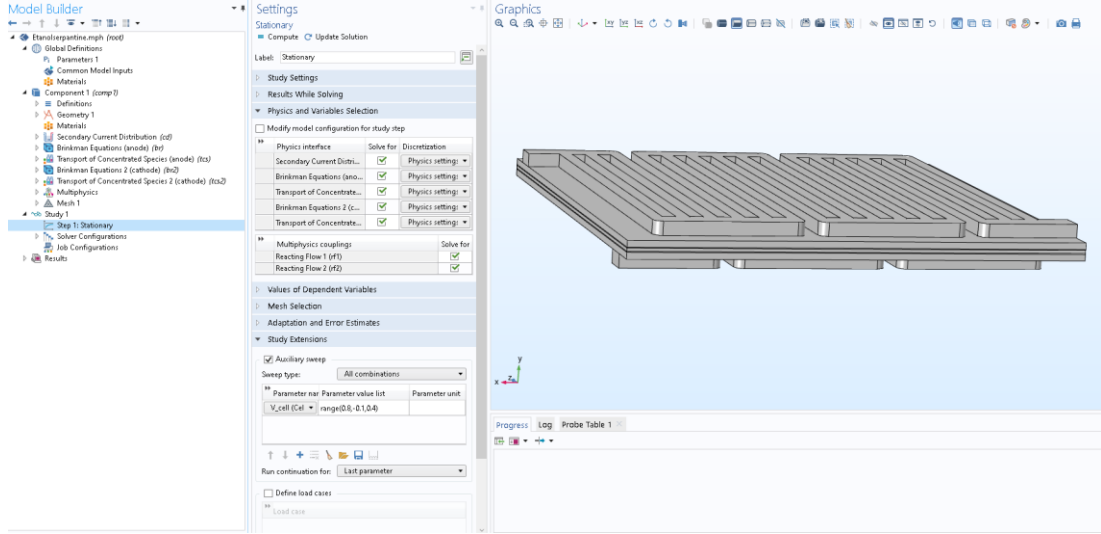
Tablo 3.2. Farklı ağ sayılarında 0,4 V'ta elde edilen akım yoğunluğu değerleri

	Ağ sayısı	Akım yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )
Ağ yapısı 1	50100	149,32
Ağ yapısı 2	391815	152,13
Ağ yapısı 3	3189904	152,15

Sonuçlar incelendiğinde Ağ yapısı 2'nin çözüm için uygun olduğuna karar verilmiştir.

### 3.6. Modelin Çözücü Ayarlarını Oluşturulması

Model çözümünün gerçekleştirilmesi için çoklu fizik çözüm ayarlarının yapılması ve 0.4 V ve 0.8 V değerleri arasında parameterik çözümün gerçekleştirilmesi için yapılan ayarlar Şekil 3.8.'de verilmiştir.



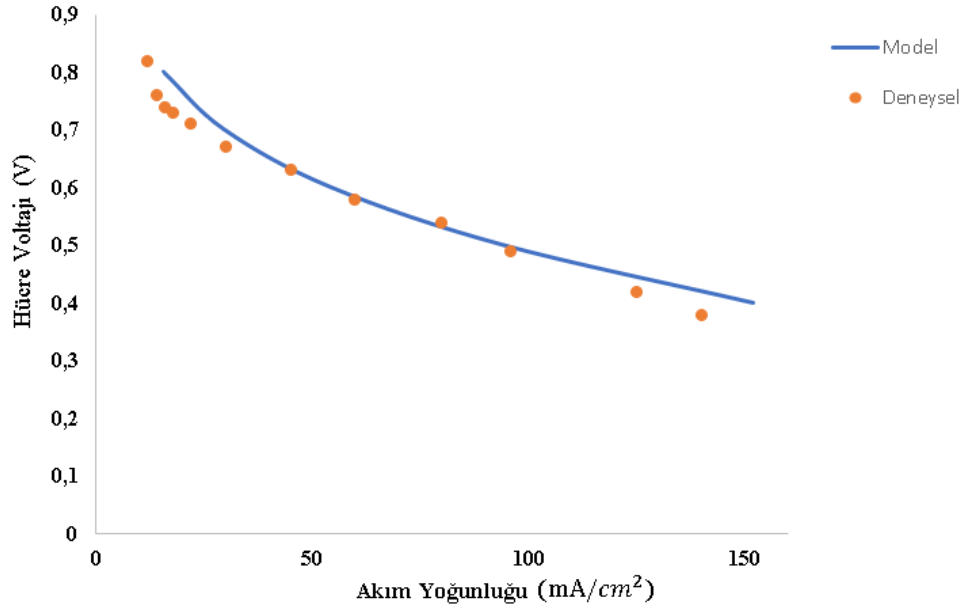
Şekil 3.8. Çoklu fizik çözüm ayarlarının yapılması

## **BÖLÜM 4. ANALİZ SONUÇLARI**

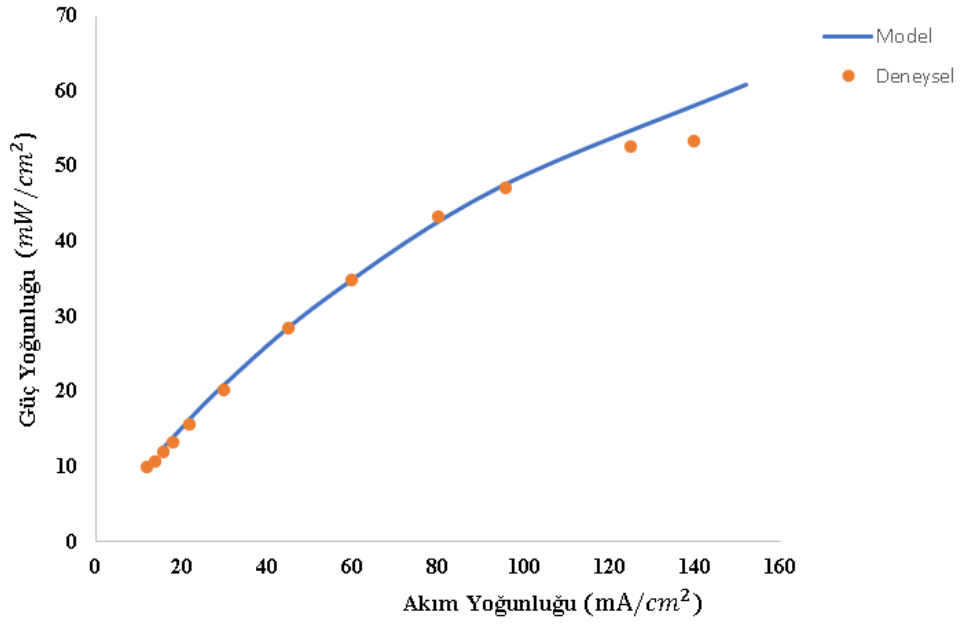
Oluşturulan model literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Doğrudan etanol yakıt pilinin performansını iyileştirmek için doğrulanan model üzerinde sıcaklığın etkisi, katottaki oksidanın etkisi, havanın ve yakıtın kanal girişlerindeki hızlarının etkisi, gözenekliliğin etkisi, katot basıncının etkisi, membran kalınlığı gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda incelenen parametrelere bağlı olarak polarizasyon eğrileri ve güç yoğunluğu eğrileri elde edilmiş ve değerlendirilmiştir.

### **4.1. Modelin Doğrulanması**

Doğrudan etanol yakıt pili için geliştirilen üç boyutlu model Zhou ve ark. [74] tarafından yayınlanan deneysel verilerle karşılaştırıldı. Deneysel veriler ile 0,4 V ve 0,8 V hücre voltajları arasındaki modelin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pili modelinin doğrulanması hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

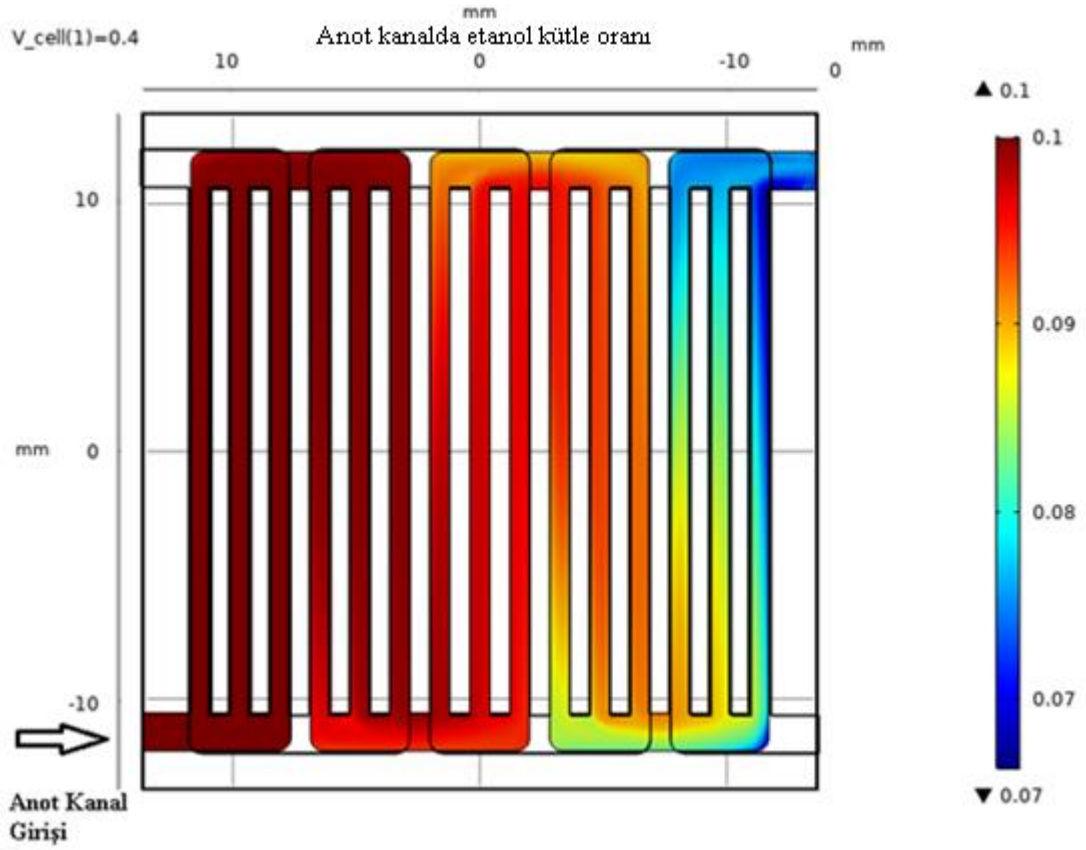


Şekil 4.2. Üç boyutlu doğrudan etanol yakıt pili modelinin doğrulanması güç yoğunluğu - akım yoğunluğu (P-I) grafiği

Grafikler incelendiğinde deneysel ve model verileri arasında iyi bir uyum vardır. Elektrokimyasal reaksiyonlar için kullanılan basitleştirilmiş denklemlerden dolayı küçük farklar oluşmaktadır.

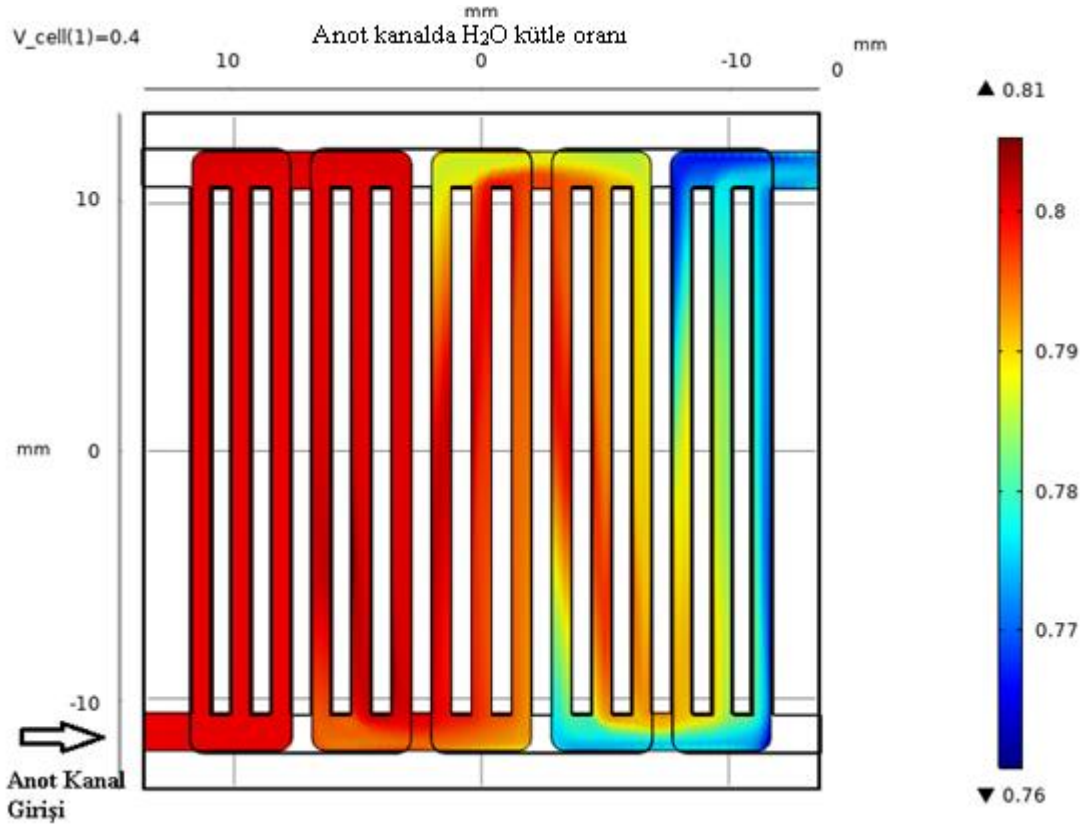
## 4.2. Üç Boyutlu Doğrudan Etanol Yakıt Piline Reaktantların Ve Ürünlerin Kütle Oranları

Anot akış kanalında etanolün kütle oranı incelendiğinde, anot katalizör tabakasına ulaşan etanolün elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oksidasyonundan dolayı kanal çıkışında kütle oranında azalma meydana gelmektedir. Akış kanalında meydana gelen bu azalma Şekil 4.3.'te görülmektedir.



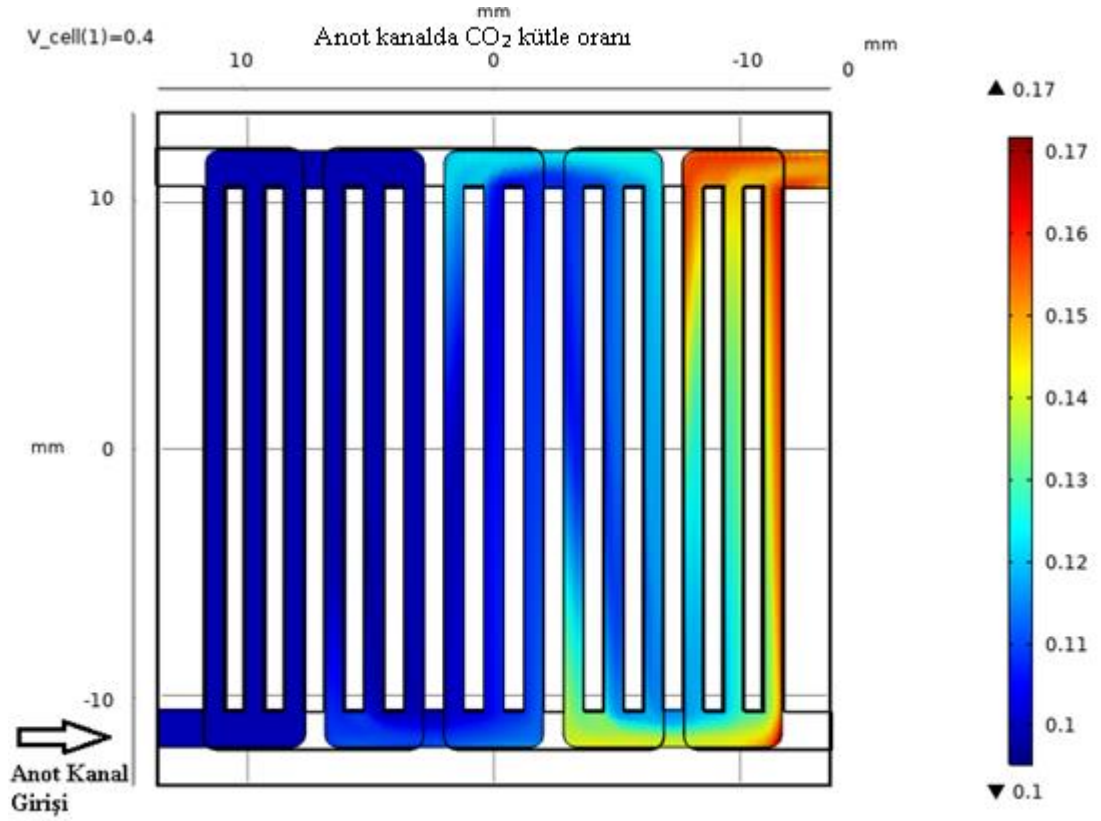
Şekil 4.3. Anot akış kanalında etanolün kütle oranı

Anot akış kanalında  $H_2O$ 'nun kütle oranı incelendiğinde anot katalizör yüzeyine ulaşan suyun etanolün oksidasyon reaksiyonunda kullanılmasından dolayı kanal çıkışına doğru kütle oranında azalma meydana gelmektedir. Bu azalma Şekil 4.4.'te görülmektedir.



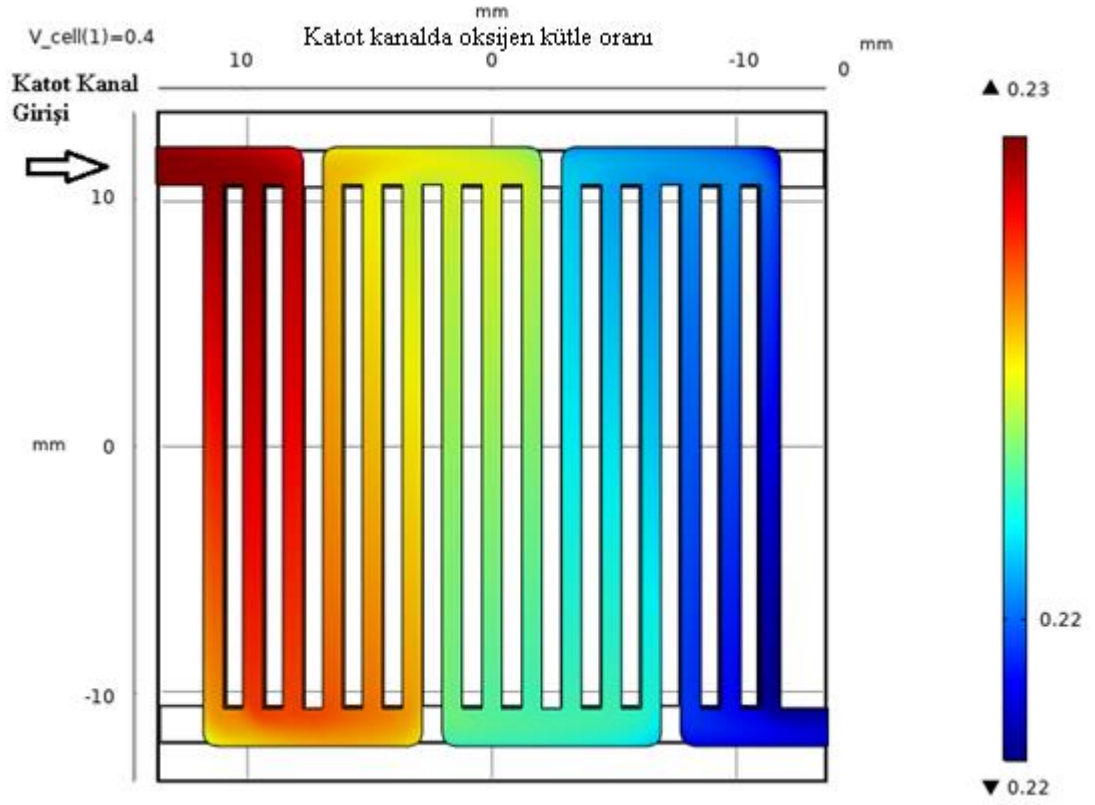
Şekil 4.4. Anot akış kanalında  $H_2O$ 'nun kütle oranı

Anot katalizör tabakasında meydana gelen etanolün oksidasyon tepkimesi sonucu oluşan  $CO_2$ 'nin kütle oranının kanal çıkışına doğru arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Anot akış kanalında CO<sub>2</sub>'nin kütle oranı

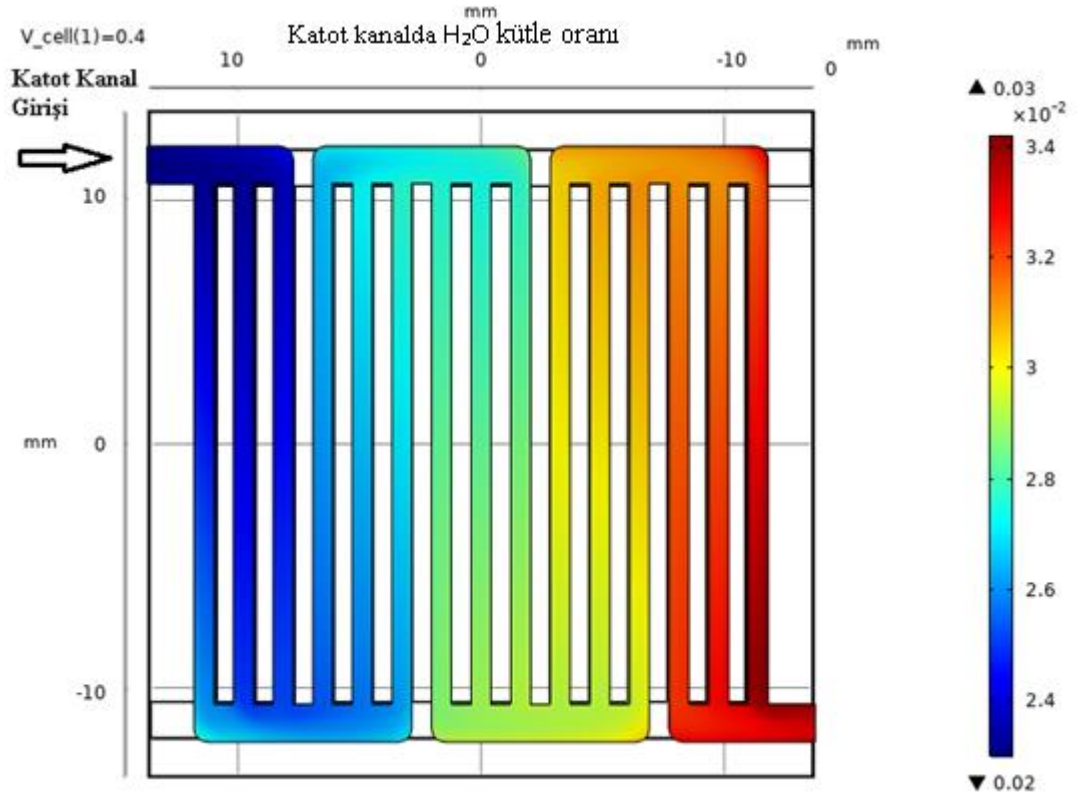
Katot akış kanalında oksijenin kütle oranı incelendiğinde, katot katalizör tabakasına ulaşan O<sub>2</sub>'nin elektrokimyasal reaksiyonda kullanılması dolayısıyla katot kanal çıkışına doğru kütle oranında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu azalma Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6.Katod akış kanalında O<sub>2</sub>'nin kütle oranı

Katod akış kanalında H<sub>2</sub>O' nun kütle oranı incelendiğinde, katod katalizör tabakasında oksijenin indirgenme reaksiyonu sonucunda H<sub>2</sub>O' nun açığa çıkmasından dolayı katod kanal çıkışına doğru kütle oranında artış meydana gelmiştir. Bu artış Şekil 4.7.'de verilmiştir.

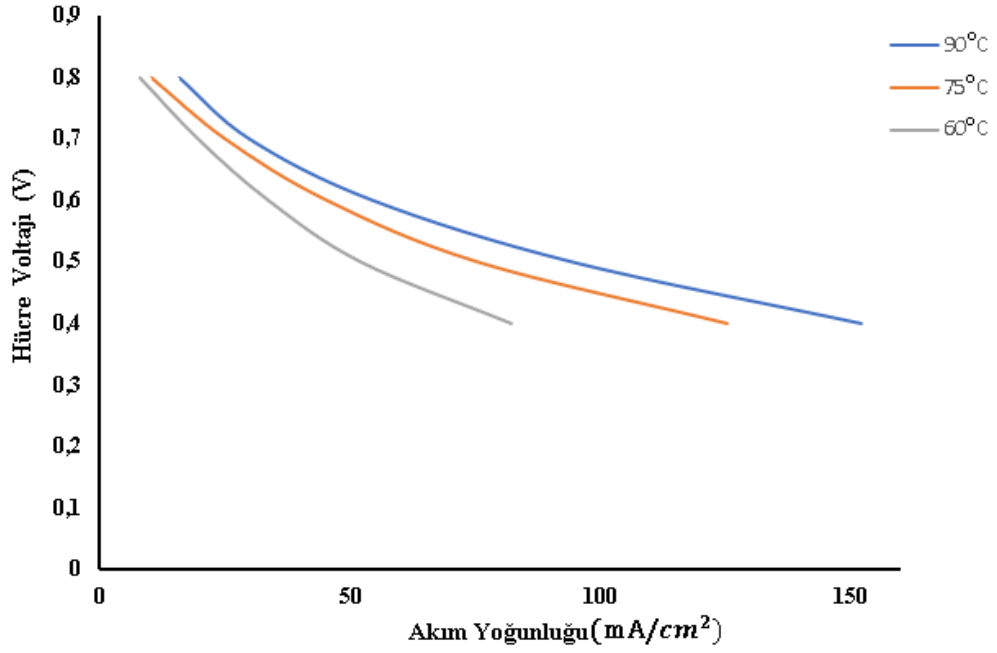




Şekil 4.7. Katot akış kanalında  $H_2O$ 'nun kütle oranı

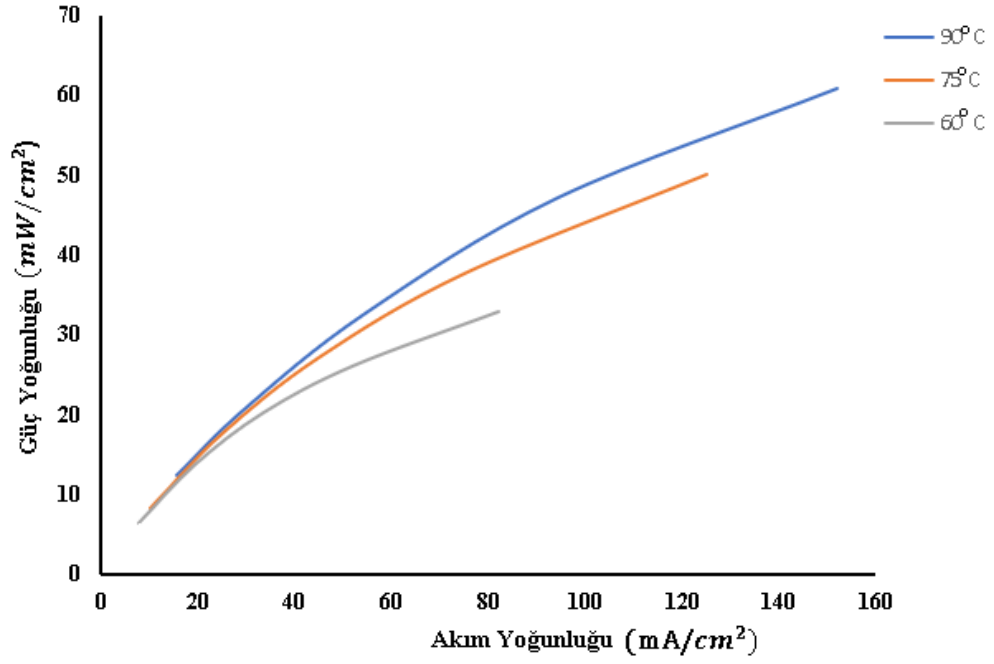
### 4.3. Sıcaklığın Yakıt Pili Performansına Etkisi

Oluşturulan üç boyutlu modelde sıcaklığın etkisini incelemek için  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  de çözümler yapılmıştır. Bu üç farklı sıcaklıktaki sonuçlar Şekil 4.8.'de ve Şekil 4.9.'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  'de çalışan yakıt pili  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  'dekilere göre aynı hücre voltajında daha yüksek akım yoğunluğu değerleri vermektedir.



Şekil 4.8. Sıcaklığın yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

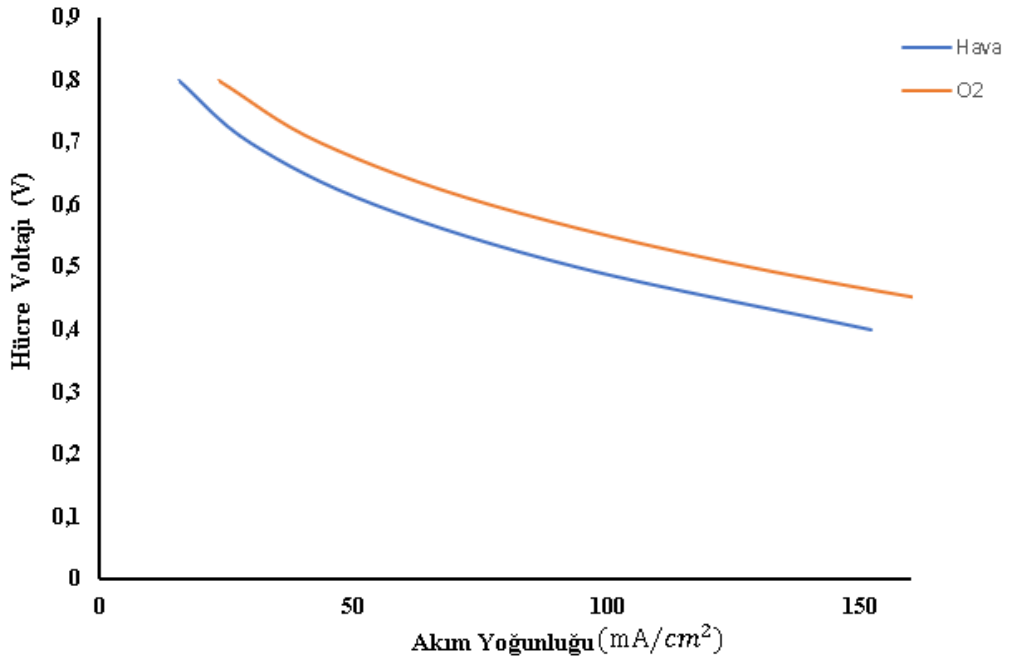
Şekil 4.9. incelendiğinde 90 °C ' de diğer sıcaklıklara göre aynı akım yoğunluğunda daha yüksek güç yoğunlukları elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre doğrudan etanol yakıt pilinde sıcaklığın artışının yakıt pili performansını arttırdığı bulunmuştur. Bunun sebebi artan sıcaklığın H<sup>+</sup> iyonlarının membrandan geçişini kolaylaştırmasıdır. Anot katalizör tabakasına ulaşan daha fazla H<sup>+</sup> iyonunun elektrokimyasal reaksiyonları arttırması sonucu doğrudan etanol yakıt pilinin performansında artış olur.



Şekil 4.9. Sıcaklığın yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

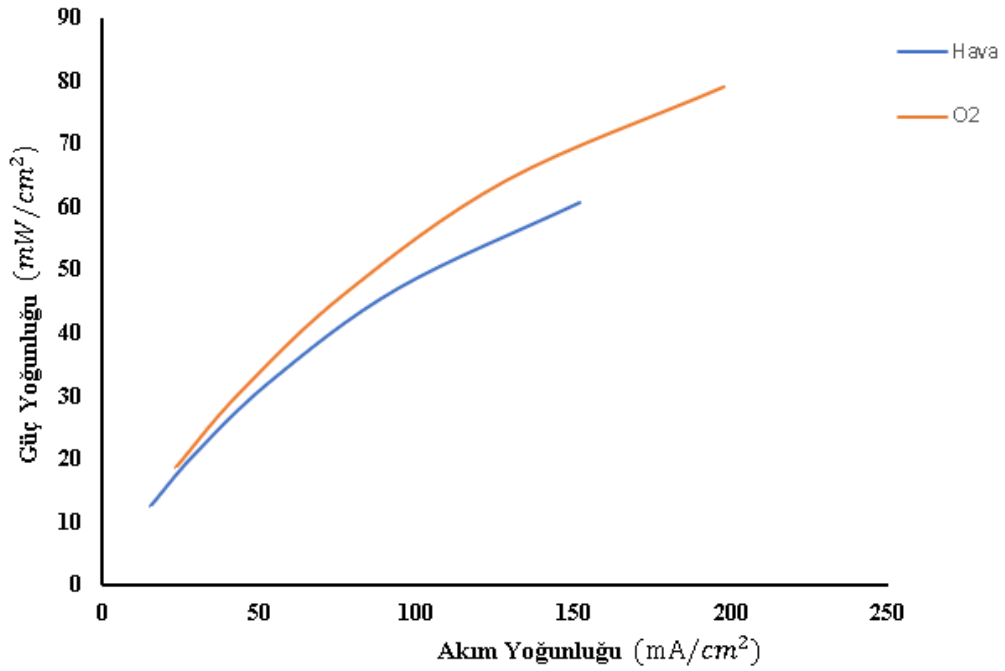
#### 4.4. Katottaki Oksidanın Yakıt Pili Performansına Etkisi

Doğrudan etanol yakıt pili için oluşturulan üç boyutlu modelde katot tarafına beslenen oksidanın yakıt pili performansına etkisini incelemek için katot kanalına beslenen oksijen ve havanın yakıt pili performansları incelendi. Bu iki farklı oksidanın performans sonuçları Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Katottaki oksidanın etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

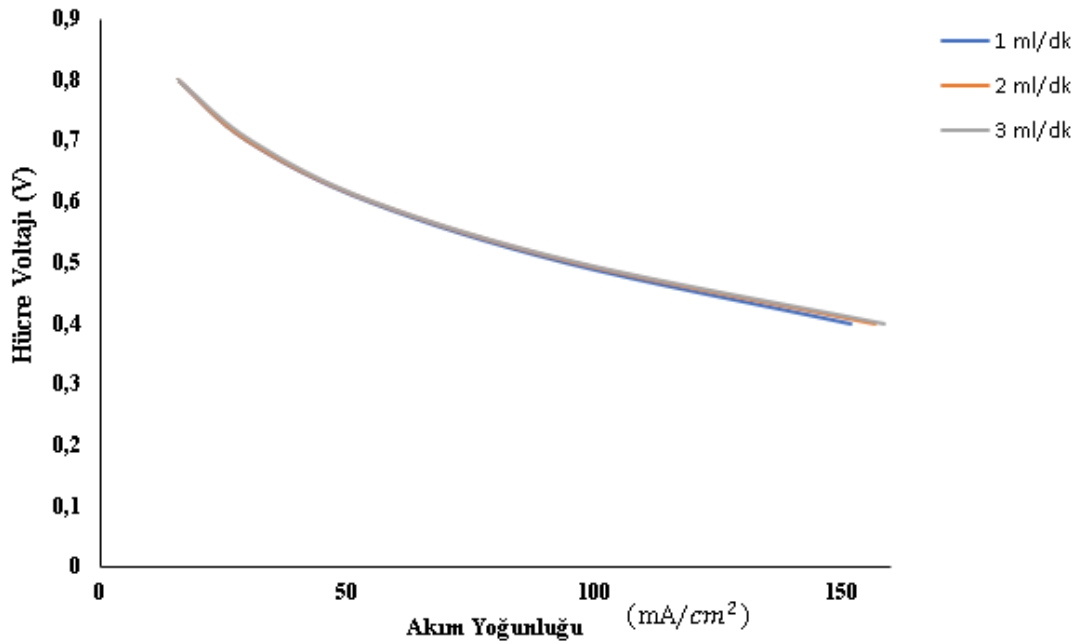
Elde edilen sonuçlara göre oksidan olarak hava yerine oksijenin beslenmesi durumunda Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi aynı hücre voltajlarında daha yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.11. incelendiğinde oksidan olarak oksijenin kullanıldığı durumlarda aynı akım yoğunluklarında daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bunun sebebi hava yerine oksijen kullanıldığında katot katalizör yüzeyine ulaşan oksijen miktarının artmasıdır. Katot katalizör tabakasında artan elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu doğrudan etanol yakıt pilinin daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir.



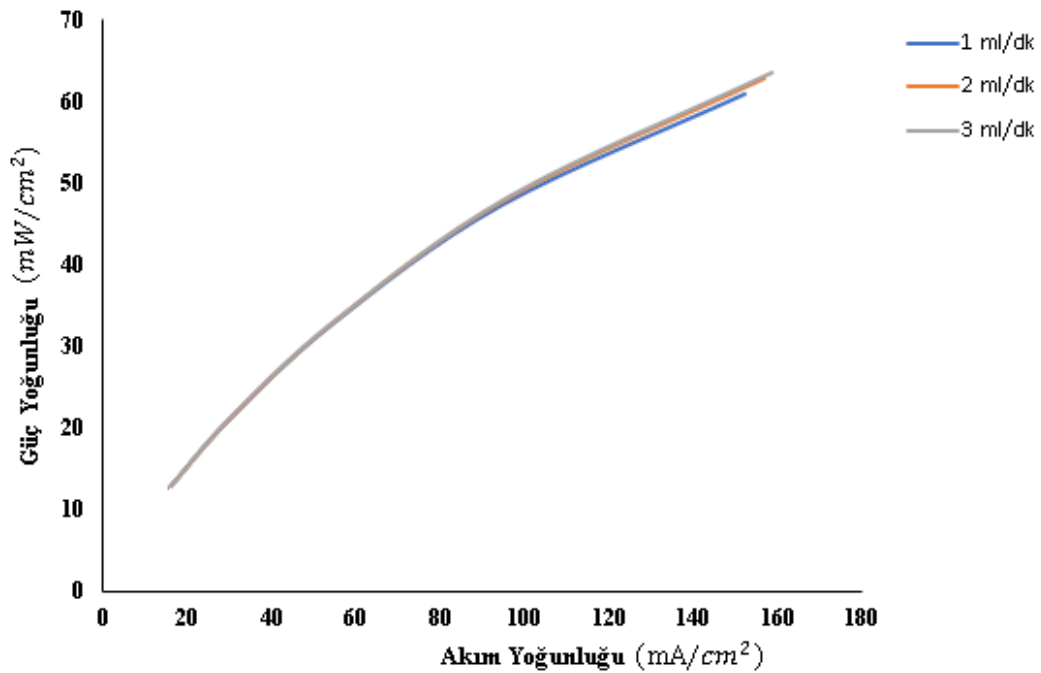
Şekil 4.11. Katottaki oksidanın etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

#### 4.5. Anot Kanal Girişindeki Yakıt Hızının Yakıt Pili Performansına Etkisi

Oluşturulan üç boyutlu modelde anot kanal girişindeki yakıt hızının yakıt pili performansına etkisini incelemek için anot kanalına 1 mldk<sup>-1</sup>, 2 mldk<sup>-1</sup> ve 3 mldk<sup>-1</sup> olmak üzere 3 farklı debide etanol çözeltisi beslenmiştir. Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi 3 ml/dk etanol beslenen yakıt pilinde aynı hücre voltajlarında daha yüksek akım yoğunlukları elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.13. incelendiğinde 3 ml/dk yakıt beslenen yakıt pilinde aynı akım yoğunluklarında daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Anot kanal girişindeki akış hızının artırılmasının yakıt pili performansını arttırdığı bulunmuştur. Bunun sebebi artan etanol yakıt giriş hızının difüzyon etkilerini arttırması ve anot katalizör tabakasına ulaşan etanol miktarının artmasıdır. Ancak membrandan etanol geçişinin artışı ve etanolün kullanılmadan kanaldan ayrılması gibi etkenler göz önüne alınmalıdır. Ayrıca yüksek hızlara çıkıldıkça sızdırmazlıkla ilgili problemlerde ortaya çıkabilir.



Şekil 4.12. Anot kanal girişindeki yakıt hızının etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

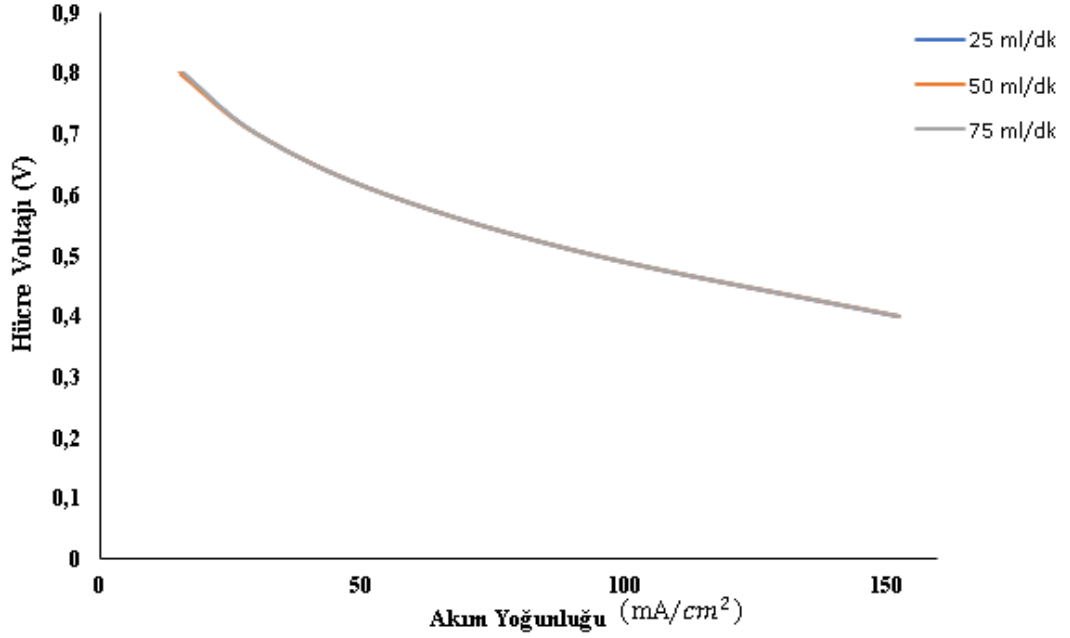


Şekil 4.13. Anot kanal girişindeki yakıt hızının etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

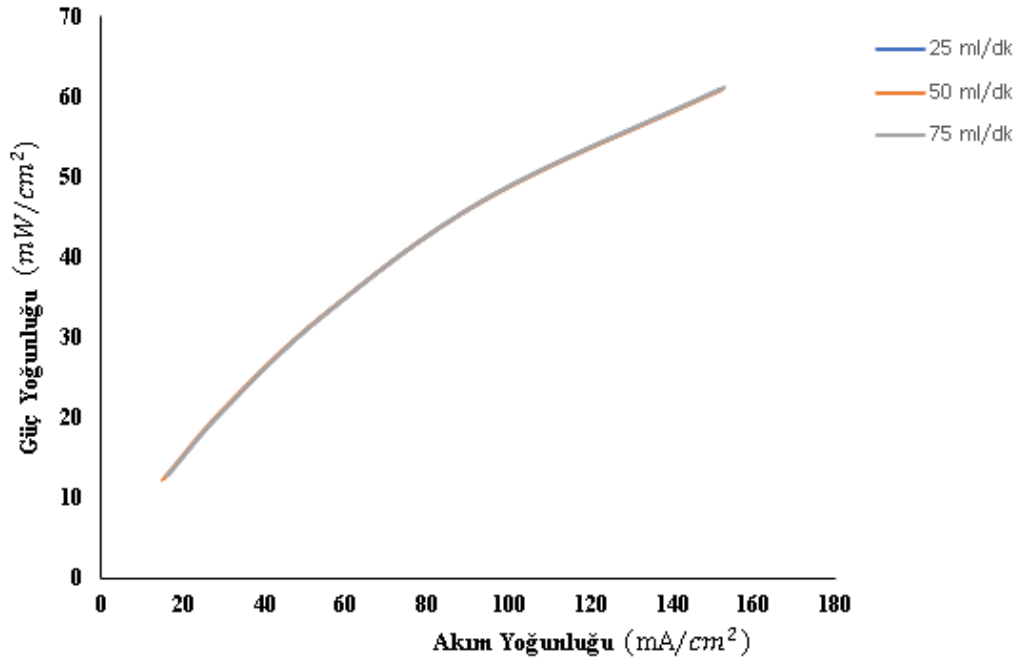
#### 4.6. Katot Kanal Girişindeki Hava Hızının Yakıt Pili Performansına Etkisi

Oluşturulan üç boyutlu modelde katot kanal girişindeki hava hızının yakıt pili performansına etkisini incelemek için katot kanalına 25 mldk<sup>-1</sup>, 50 mldk<sup>-1</sup> ve 75 mldk<sup>-1</sup> olmak üzere 3 farklı debide hava beslenmiştir. Katot kanal girişindeki havanın

hızının artırılmasının yakıt pili performansına kayda değer bir olumlu etkide olmadığı gözlemlenmiştir. Bu etki Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'de görülmektedir.



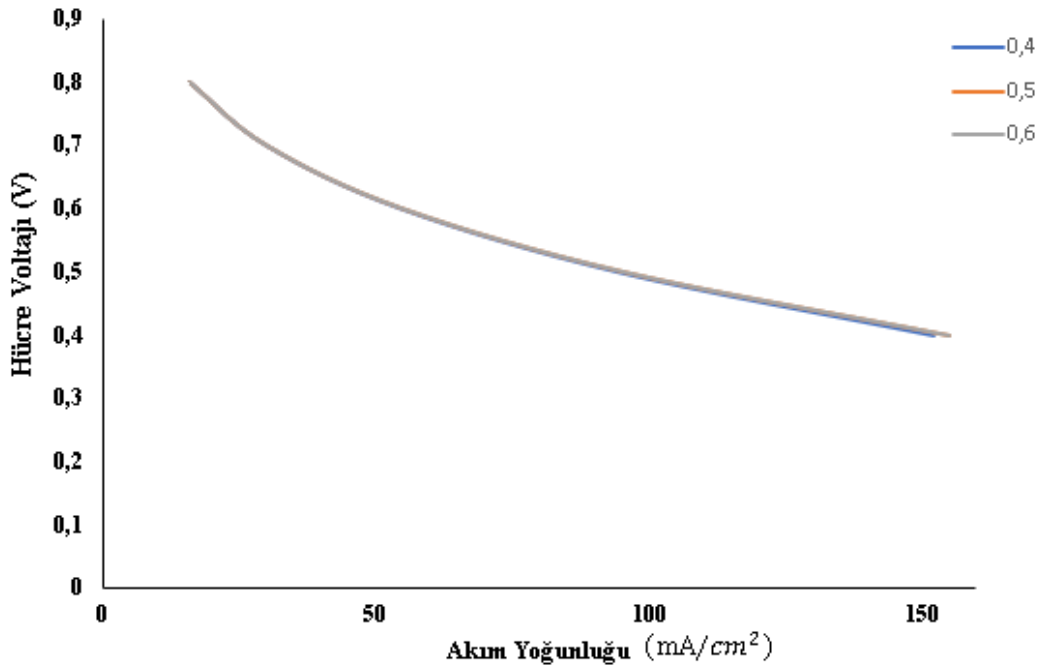
Şekil 4.14. Katot kanal girişindeki hava hızının etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği



Şekil 4.15. Katot kanal girişindeki hava hızının etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

#### 4.7. Gözenekliliğin Yakıt Pili Performansına Etkisi

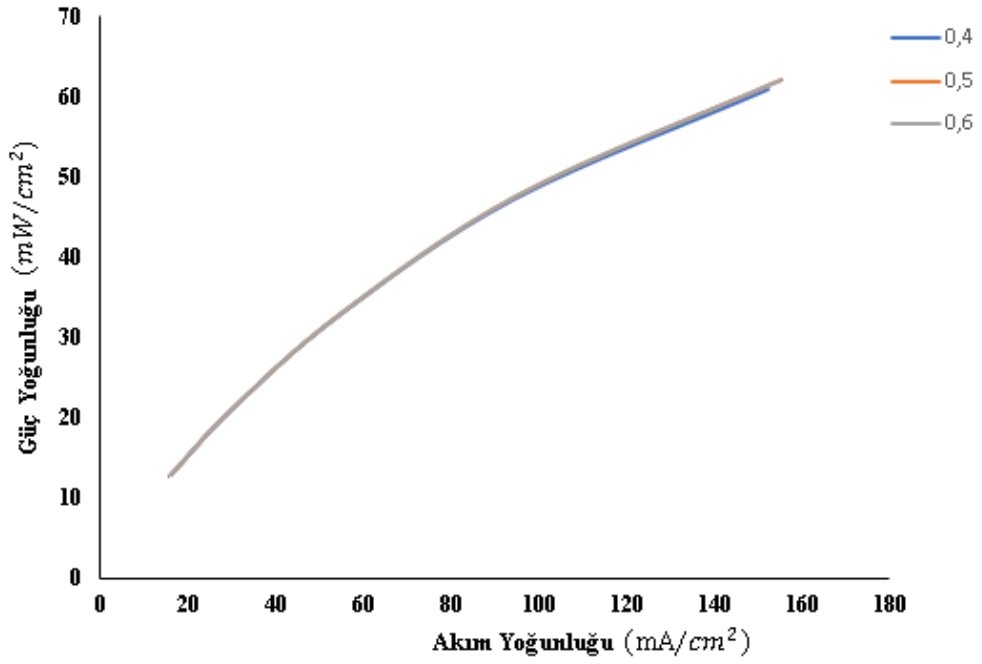
Doğrudan etanol yakıt pillerinde anot difüzyon tabakasının gözenekliliğinin yakıt pili performansına etkisini incelemek için oluşturulan modelde anot difüzyon katmanı gözenekliliği 0,4, 0,5 ve 0,6 olarak ayarlanıp model çözümlenmiştir. Bu üç farklı gözeneklilik için sonuçlar Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Gözenekliliğin yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

Şekil 4.16.'da görüldüğü gibi anot difüzyon tabakasının gözenekliliği 0,6 için aynı hücre voltajı değerlerinde daha yüksek akım yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.17.'de görüldüğü gibi aynı akım yoğunluğu değerlerinde daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmektedir. Elde edilen verilere göre anot difüzyon katmanı gözenekliliğinin artması etanolün aktif alanda daha geniş alanlara yayılması ve anot katalizör tabakasına daha fazla etanolün ulaşmasını sağlar ve anot katalizör tabakasındaki artan elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu daha yüksek performans elde edilir. Gözenekliliğin artması yakıt pili performansı için olumlu bir etki yaratsada çok belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır.

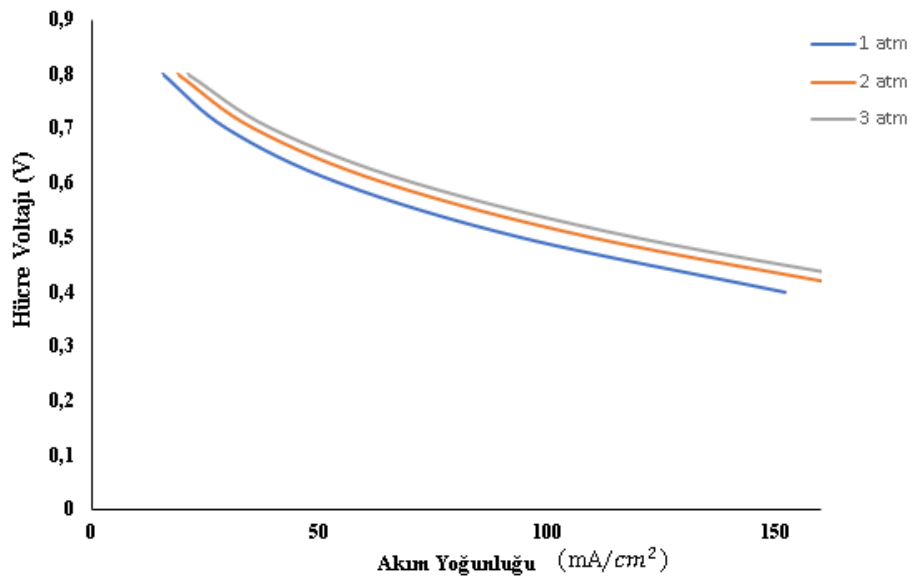




Şekil 4.17. Gözenekliliğin yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

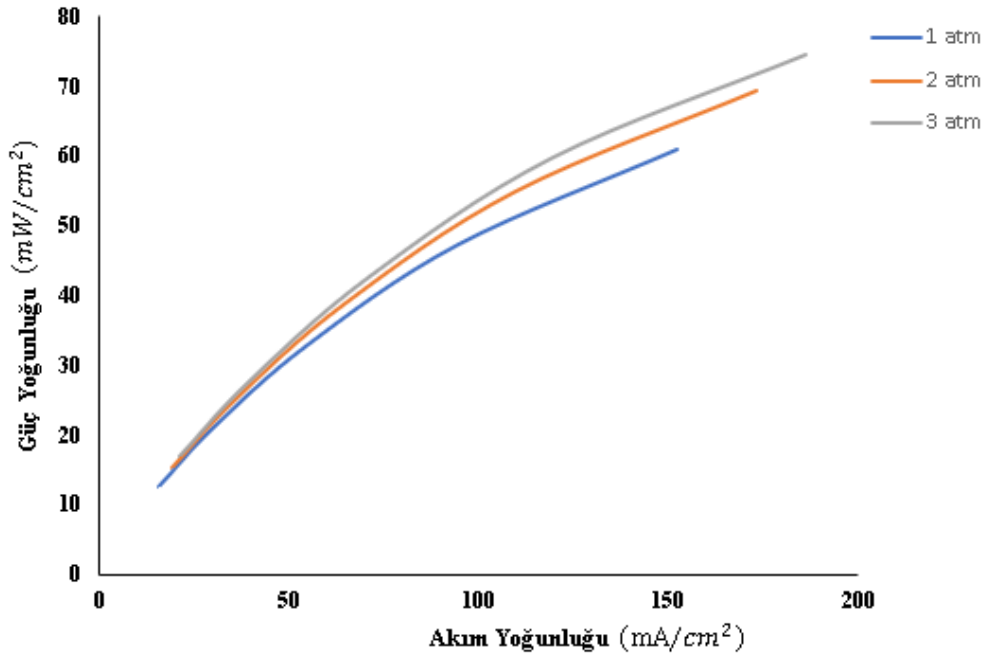
#### 4.8. Katot Basıncının Yakıt Pili Performansına Etkisi

Oluşturulan üç boyutlu modelde katot basıncının yakıt pili performansına etkisini incelemek için katot basıncı 1 atm, 2 atm ve 3 atm basınçlarına ayarlandı. Artan basıncın yakıt pili performansına etkisi Şekil 4.18. ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.18. Katot basıncının yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

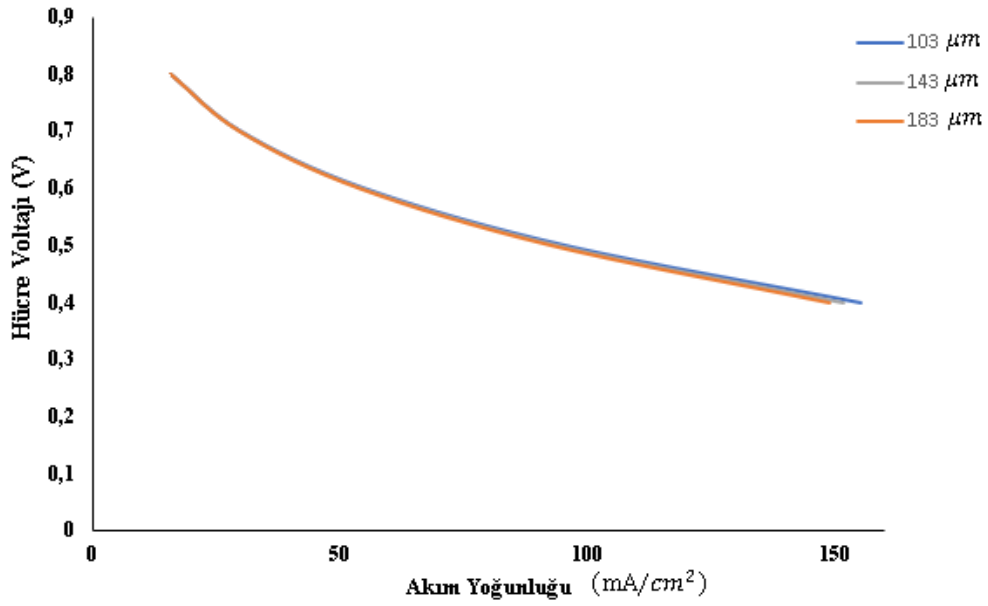
Şekil 4.18. incelendiğinde 3 atm katot basıncında çalışan yakıt pilinin aynı hücre voltajlarında daha yüksek akım yoğunluğu sağladığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.19. incelendiğinde 3 atm katot basıncında çalışan yakıt pilinin aynı akım yoğunluklarında daha yüksek güç yoğunluğu elde ettiği görülmektedir. Elde edilen verilere göre katot basıncının artırılmasının difüzyon etkilerine yaptığı olumlu etkilerden dolayı yakıt pili performansında artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.19. Katot basıncının yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

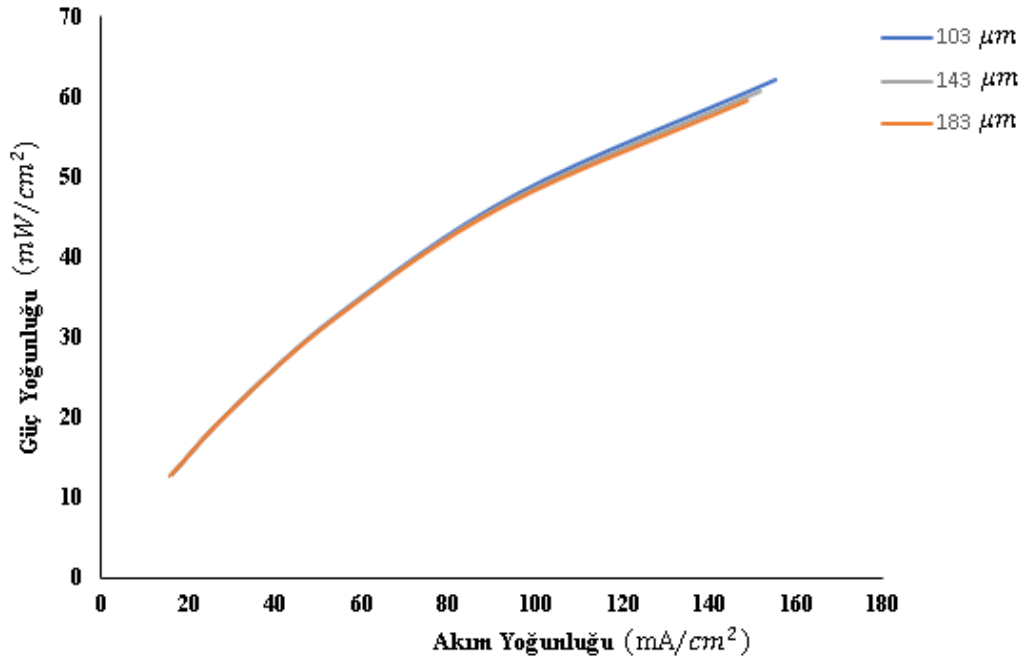
#### 4.9. Membran Kalınlığının Yakıt Pili Performansına Etkisi

Doğrudan etanol yakıt pilinde membran kalınlığının yakıt pili performansına etkisini incelemek için oluşturulan modelde, membran kalınlığı 103  $\mu\text{m}$ , 143  $\mu\text{m}$  ve 183  $\mu\text{m}$  kalınlığına ayarlanarak çözüm yapılmıştır. Üç farklı membran kalınlığı için yakıt pili performansları Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Membran kalınlığının yakıt pili performansına etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

Şekil 4.20.'de görüldüğü gibi 103 µm membran kalınlığına sahip yakıt pili aynı hücre voltajlarında daha yüksek akım yoğunluğu değerleri vermiştir. Ayrıca Şekil 4.21. incelendiğinde 103 µm membran kalınlığına sahip yakıt pili aynı akım yoğunluklarında daha yüksek güç yoğunluğu değerleri vermiştir. Elde edilen verilere göre membran kalınlığının azaltılmasının yakıt pili performansını arttırdığı bulunmuştur. Membran kalınlığının azaltılması anot katalizör tabakasında elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan H<sup>+</sup> iyonlarının membrandan geçişini kolaylaştırdığından dolayı yakıt pili performansını arttırdığı bulunmuştur.



Şekil 4.21. Membran kalınlığının yakıt pili performansına etkisi güç yoğunluğu – akım yoğunluğu (P-I) grafiği

## BÖLÜM 5. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Farklı çalışma koşulları altında yakıt pili performansını arttıran parametrelerin incelenmesi için Comsol Multiphysics programıyla üç boyulu doğrudan etanol yakıt pili modeli oluşturuldu. Oluşturulan doğrudan etanol yakıt pili modeli literatürde bulunan veriler kullanılarak doğrulandı. Doğrulan model üzerinde sıcaklığın etkisi, katottaki oksidanın etkisi, havanın ve yakıtın kanal girişlerindeki hızlarının etkisi, gözenekliliğin etkisi, katot basıncının etkisi, membran kalınlığı gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda hüce voltajı- akım yoğunluğu (V-I) ve güç yoğunluğu- akım yoğunluğu (P-I) grafikleri elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmalara göre anot akış kanalında etanol kütle oranının kanal çıkışına doğru azaldığı görülmektedir. Aynı şekilde anot akış kanalında H<sub>2</sub>O kütle oranının kanal çıkışına doğru azaldığı görülmüştür. Anot akış kanalında CO<sub>2</sub> kütle oranının ise kanal çıkışına doğru arttığı görülmüştür. Katot akış kanalı incelendiğinde ise katot akış kanalında O<sub>2</sub> kütle oranının kanal çıkışına doğru azaldığı görülmüştür. Katot akış kanalında H<sub>2</sub>O'nun kütle oranı incelendiğinde kanal çıkışına doğru arttığı görülmüştür. Yakıt pili parametrelerinin değiştirilmesi sonucu elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın artışının yakıt pili performansını arttırdığı görülmüştür. Katotta oksidan olarak hava yerine oksijen kullanıldığında yakıt pili performansını arttırdığı görülmüştür. Anotta akış kanalında yakıt giriş hızının artmasının yakıt pili performansını arttırdığı görülmüştür. Ancak katottaki akış kanalında hava giriş hızının artmasının yakıt pili performansına kayda değer bir etki oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Anot difüzyon katmanı gözenekliliği artırıldığında yakıt pili performansının arttığı gözlemlenmiştir. Katot basıncının yakıt pili performansına etkisi incelendiğinde katot basıncının artışının yakıt pili performansını arttırdığı gözlemlenmiştir. Membran kalınlığının yakıt pili performansına etkisi incelendiğinde membran kalınlığının azaltılmasının yakıt pili performansını arttırdığı sonuçlarına varılmıştır.

Doğrudan etanol yakıt pilleri gelecek için umut vadeden yakıt pillerindedir. Hidrojenin depolanma ve nakliye sorunları bizleri alternatif yakıtlar kullanmaya yönlendirmektedir. Etanol şeker ve biyokütle gibi organik malzemelerden üretilebildiği için çevreci bir yakıt olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde kullandığımız yakıt depolama ve dağıtım alt yapısına uygunluğu etanolü alternatif kaynakların başında getirmektedir. Dünyada artan çevre hassasiyeti bizleri daha çevreci daha verimli enerji kaynakları kullanmaya yönlendirmektedir. Daha temiz bir çevre için çevreci kaynakların kullanılması tüm insanların yararına olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] Evans MK. The economic impact of the demand for ethanol, Proceedings of the Midwestern Governors Conference. U.S.A: Lombard, IL; 1997.
- [2] Hernandez L, Kafarov V. Use of bioethanol for sustainable electrical energy production. *Int J Hydrogen Energy* 2009;34: 7041-50.
- [3] Zakaria Z, Kamarudin S, Timmiati S. Membranes for direct ethanol fuel cells: an overview. *Appl Energy* 2016; 163:334-42.
- [4] Abdullah S, Kamarudin S, Hasran U, Masdar M, Daud W. Modeling and simulation of a direct ethanol fuel cell: an overview. *J Power Sources* 2014;262: 401–6.
- [5] Leo TJ, Raso MA, Navarro E, Blanca Sanchez de la, Villanueva M, Moreno B. Response of a direct methanol fuel cell to fuel change. *Int J Hydrogen Energy* 2010; 35:11642-8.
- [6] Li YS, Zhao TS, Liang ZX. Performance of alkaline electrolytemembrane-based direct ethanol fuel cells. *J Power Sources* 2009; 187:387-92.
- [7] Badwal S, Giddey S, Kulkarni A, Goel J, Basu S. Direct ethanol fuel cells for transport and stationary applications- a comprehensive review. *Appl Energy* 2015; 145:80–103.
- [8] Le AD, Zhou B, Shiu H-R, Lee C-I, Chang W-C. Numerical simulation and experimental validation of liquid water behaviors in a proton exchange membrane fuel cell cathode with serpentine channels. *J Power Sources* 2010;195(21):7302–15.
- [9] Frano Barbir PEM fuel Cells 2nd Edition Theory and Practice Academic Press 2012, 9780123983725.
- [10] Grove WR. On a Gaseous Voltaic Battery. *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science* 1842;21(Series 3):417–20.

- [11] <https://history.nasa.gov/afj/ap13fj/a13-sm-damage.html>, Erişim Tarihi 05.12.2020
- [12] <https://www.adroitmarketresearch.com/blogs/fuel-cells-overview-advantages-and-disadvantages>, Erişim tarihi 20.11.2020
- [13] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>, Erişim Tarihi 05.12.2020
- [14] <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell/Types-of-fuel-cells>, Erişim Tarihi 05.12.2020
- [15] [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/6\\_70.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/6_70.html), Erişim Tarihi 05.12.2020
- [16] Yıldız Ö, Platin İçermeyen İkili Geçiş Metallerinin Doğrudan Etanol Yakıt Hücresinde Uygulanma Potansiyellerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2009
- [17] Tsiakaras, P.E., “PtM/C (M = Sn, Ru, Pd, W) based anode direct ethanol–PEMFCs: Structural characteristics and cell performance”, *Journal of Power Sources* 171:107–112 (2007).
- [18] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell>, Erişim Tarihi 06.12.2020
- [19] <https://yilianguoji.en.made-in-china.com/product/nBRmHrxxmoUl/China-Graphite-Bipolar-Plate-for-Fuel-Cell-Pem.html>, Erişim tarihi 06.12.2020
- [20] Song S, Wang G, Zhou W, Zhao X, Sun G, Xin Q, et al. The effect of the MEA preparation procedure on both ethanol crossover and DEFC performance. *J Power Sources* 2005;140(1):103-10.
- [21] Al-Baghdadi MAS. Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations. *Renew Energy* 2005;30(10):1587-99.
- [22] Abdullah S, Kamarudin S, Hasran U, Masdar M, Daud W. Development of a conceptual design model of a direct ethanol fuel cell (DEFC). *Int J Hydrogen Energy* 2015;40(35):11943-8.
- [23] L. An et al., *Int. J. Hydrogen Energy* 36 (2011) 13089.
- [24] J.P. Wagner, in *Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications*, 2003, Wiley.



- [25] Pawel Wnuk ve Adam Lewera On-line analysis of ethanol electrochemical oxidation process in a low-temperature direct ethanol fuel cell. *Electrochimica Acta* Volume 330, 10 January 2020, 135256
- [26] Tian Sheng, Zi-Wei Ma, Shi-Gang Sun. Insights into the Pt/Rh (1 1 1) interface for direct ethanol fuel cells. *Applied Surface Science* 502(2020) 144093
- [27] A.M.I.N. Azam, S.H. Lee, M.S. Masdar, A.M. Zainoodin, S.K. Kamarudin. Parametric study on direct ethanol fuel cell (DEFC) performance and fuel crossover. *International Journal Of Hyydrojen Energy* 44 (2019) 8566-8574
- [28] Achintya Mondal, Abhishek De, Jayati Datta. Selective methodology for developing PtCo NPs and performance screening for energy efficient electro-catalysis in direct ethanol fuel cell. *International Journal Of Hyydrojen Energy* 44 (2019) 10996-11011
- [29] Theeraporn Promanan, Siwat Thungpraserta, Thapanee Sarakonsri. N-doped graphene supporting Pd-based binary and ternary alloys as cathode catalysts for direct ethanol fuel cells. *Materials Today: Proceedings* 17 (2019) 1332–1343
- [30] M.J. Estrada-Soli's, J.C. Abrego-Martinez, A. Moreno-Zuria, L.G. Arriaga, Shuhui Sun, F.M. Cuevas-Muniz, Mohamed Mohamedi. Use of a bilayer platinum-silver cathode to selectively perform the oxygen reduction reaction in a high concentration mixed-reactant microfluidic direct ethanol fuel cell. *International Journal Of Hyydrojen Energy* 44 (2019) 18372-18381
- [31] Xuhong Wang, Xiuli Hu, Jialei Huang, Wenjun Zhang, Wangjin Ji, Yang Hui, Xiayi Yaoa. Electrospinning synthesis of porous carbon fiber supported Pt-SnO<sub>2</sub> anode catalyst for direct ethanol fuel cell. *Solid State Sviences* 94 (2019) 64-69
- [32] Juan Sánchez-Monreal, Pablo A. García-Salaberri, Marcos Vera. A mathematical model for direct ethanol fuel cells based on detailed ethanol electro-oxidation kinetics. *Aplied Energy* 251(2019)113264
- [33] Rakan M. Altarawneh, Tobias M. Brueckner, Binyu Chen, Peter G. Pickup. Product distributions and efficiencies for ethanol oxidation at PtNi octahedra. *Journal of Power Sources* 400 (2018) 369-376
- [34] R.S. Gomes, M.M. De Souza, A.L. De Bortoli. Modeling and simulation of a direct ethanol fuel cell considering overpotential losses and variation of principal species concentration. *Chemical Engineering Research and Design* 136 (2018) 371-384

- [35] M.M. De Souza, R.S. Gomes, A.L. De Bortoli. A model for direct ethanol fuel cells considering variations in the concentration of the species. *International Journal Of Hydrogen Energy* 43 (2018) 13475-13488
- [36] Subrata Chandraa, Sweta Lalb, Vinod M. Janardhanan, Kirti Chandra Sahu, Melepurath Deepa. Ethanol based fuel cell on paper support. *Journal of Power Sources* 396 (2018) 725-733
- [37] Junsong Guo, Rongrong Chen, Fu-Chun Zhu, Shi-Gang Sun, Hebe M. Villullas. *Aplied Catalysis B: Environmental* 224 (2018) 602-611
- [38] Luigi Osmieri, Ricardo Escudero-Cid, Alessandro H.A. Monteverde Videla, Pilar Ocon, Stefania Specchia. *Renewable Energy* 115 (2018)226-237
- [39] D. Herranz, R. Escudero-Cid, M. Montiel, C. Palacio, E. Fatas, P. Ocon. *Renewable Energy* 127 (2018)883-895
- [40] Chi Him A. Tsang, D.Y.C. Leung. Use of Pd-Pt loaded graphene aerogel on nickel foam in direct ethanol fuel cell. *Solid State Sviences* 75 (2018) 21-26
- [41] Joshua L. Tana, Arvee M. De Jesus, Stephanie L. Chua, Jakkid Sanetuntikul, Sangaraju Shanmugam, Bernard John V. Tongol, Hasuck Kim. Preparation and characterization of palladium-nickel on graphene oxide support as anode catalyst for alkaline direct ethanol fuel cell. *Applied Catalysis A: General* 531 (2017) 29-35
- [42] Muhammad Rauf, Rongrong Chen, Qiang Wang, Yu-Cheng Wang, Zhi-You Zhou. Nitrogen-doped carbon nanotubes with encapsulated Fe nanoparticles as efficient oxygen reduction catalyst for alkaline membrane direct ethanol fuel cells. *Carbon* 125 (2017) 605-613
- [43] Ilena Grimmera, Paul Zorn, Stephan Weinberger, Christoph Grimmer, Birgit Pichler, Bernd Cermenek, Florian Gebetsroither, Alexander Schenk, Franz-Andreas Mautner, Brigitte Bitschnau, Viktor Hacker. Ethanol tolerant precious metal free cathode catalyst for alkaline direct ethanol fuel cells. *Electrochimica Acta* 228 (2017) 325-331
- [44] Jesse T.S. Allan, Mohammad R. Rahman, E. Bradley Easton. The influence of relative humidity on the performance of fuel cell catalyst layers in ethanol sensors. *Sensors and Actuators B* 239 (2017) 120-130
- [45] Hirokazu Ishitobi, Yurina Ino, Nobuyoshi Nakagawa. Anode catalyst with enhanced ethanol electrooxidation activity by effective interaction between Pt-Sn-SiO<sub>2</sub> for a direct ethanol fuel cell. *International Journal Of Hydrogen Energy* 42 (2017) 26897-26904

- [46] J. Maya-Cornejo, R. Carrera-Cerritos, D. Sebastian, J. Ledesma-García, L.G. Arriaga, A.S. Arico, V. Baglio. PtCu catalyst for the electro-oxidation of ethanol in an alkaline direct alcohol fuel cell. *International Journal Of Hydrogen Energy* 42 (2017) 27919-27928
- [47] V.B. Oliveira, J.P. Pereira, A.M.F.R. Pinto. Modeling of passive direct ethanol fuel cells. *Energy* 133 (2017)652-665
- [48] Juan Sanchez-Monreal, Pablo A. García-Salaberri, Marcos Vera. A genetically optimized kinetic model for ethanol electro-oxidation on Pt-based binary catalysts used in direct ethanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 363 (2017) 341-355
- [49] Kanin Charoen, Chaiwat Prapainainar, Panitas Sureeyatanapas, Theeraporn Suwannaphisit, Kanchaporn Wongamornpitak, Paisan Kongkachuichay, Stuart M. Holmes, Paweena Prapainainar. Application of response surface methodology to optimize direct alcohol fuel cell power density for greener energy production. *Journal of Cleaner Production* 142 (2017) 1309-1320
- [50] Petri Kanninen, Maryam Borghei, Janina Hakanpää, Esko I. Kauppinen, Virginia Ruiz, Tanja Kallio. Temperature dependent performance and catalyst layer properties of PtRu supported on modified few-walled carbon nanotubes for the alkaline direct ethanol fuel cell. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 793 (2017) 48-57
- [51] R.S. Gomes, A.L. De Bortoli. A three-dimensional mathematical model for the anode of a direct ethanol fuel cell. *Applied Energy* 183 (2016) 1292-1301
- [52] W.W. Yang, M.Y. Lu, Y.L. He. Performance study of an alkaline direct ethanol fuel cell with a reduced two-dimensional mass transport model. *International Journal Of Hydrogen Energy* 41 (2016) 20693-20708
- [53] Y.S. Li, T.S. Zhao. A passive anion-exchange membrane direct ethanol fuel cell stack and its applications. *International Journal Of Hydrogen Energy* 41 (2016) 20336-20342
- [54] Chien-Yi Huang, Jia-Shiun Lin, Wen-Han Pan, Chao-Ming Shih, Ying-Ling Liu, Shingjiang Jessie Lue. Alkaline direct ethanol fuel cell performance using alkali-impregnated polyvinyl alcohol/functionalized carbon nano-tube solid electrolytes. *Journal of Power Sources* 303 (2016) 267-277
- [55] Xiu-Wen Wua, Nan Wua, Chun-Qing Shi, Zhi-Yuan Zheng, Hong-Bin Qi, Ya-Fang Wang. Proton conductive montmorillonite-Nafion composite membranes for direct ethanol fuel cells. *Applied Surface Science* 388 (2016)239-244

- [56] S. Carrion-Satorre, M. Montiel, R. Escudero-Cid, J.L.G. Fierro, E. Fatas, P. Ocon. Performance of carbon-supported palladium and palladium-ruthenium catalysts for alkaline membrane direct ethanol fuel cells. *International Journal Of Hydrogen Energy* 41 (2016) 8954-8962
- [57] S. Abdullah, S.K. Kamarudin, U.A. Hasran, M.S. Masdar, W.R.W. Daud. Electrochemical kinetic and mass transfer model for direct ethanol alkaline fuel cell (DEAFC). *Journal of Power Sources* 320 (2016) 111-119
- [58] Ji Qi a, Neeva Benipal a, Changhai Liang b, Wenzhen L. PdAg/CNT catalyzed alcohol oxidation reaction for high-performance anion exchange membrane direct alcohol fuel cell (alcohol = methanol, ethanol, ethylene glycol and glycerol). *Applied Catalysis B: Environmental* 199 (2016) 494-503
- [59] Pasha Majidi, Peter G. Pickup. Determination of the average number of electrons released during the oxidation of ethanol in a direct ethanol fuel cell. *Electrochimica Acta* 182 (2015) 856-860
- [60] Marta C. Figueiredo, Olli Sorsa, Rosa M. Arán-Ais, Nguyet Doan, Juan M. Feliu, Tanja Kallio. Trimetallic catalyst based on PtRu modified by irreversible adsorption of Sb for direct ethanol fuel cells. *Journal of Catalysis* 329 (2015) 69-77
- [61] Jyoti Goel, Suddhasatwa Basu. Mathematical modeling and experimental validation of direct ethanol fuel cell. *International Journal Of Hydrogen Energy* 40 (2015) 14405-14415
- [62] S. Abdullah, S.K. Kamarudin, U.A. Hasran, M.S. Masdar, W.R.W. Daud. Development of a conceptual design model of a direct ethanol fuel cell (DEFC). *International Journal Of Hydrogen Energy* 40 (2015) 11943-11948
- [63] Remegia M. Modibedi, Thembelihle Mehlo, Kenneth I. Ozoemena, Mkhulu K. Mathe. Preparation, characterisation and application of Pd/ C nanocatalyst in passive alkaline direct ethanol fuel cells (ADEFC). *International Journal Of Hydrogen Energy* 40 (2015) 15605-15612
- [64] Andrzej Jablonski, Adam Lewera. Improving the efficiency of a direct ethanol fuel cell by a periodic load change. *Chinese Journal of Catalysis* 36 (2015) 496-501
- [65] Kareemulla D, Jayanti S. Comprehensive one-dimensional, semi-analytical, mathematical model for liquid-feed polymer electrolyte membrane direct methanol fuel cells. *J Power Sources* 2009;188(2):367-78

- [66] Yang, W.W. ve Zhao, T.S. (2007). A two-dimensional, two-phase mass transport model for liquid-feed DMFCs. *Electrochimica Acta*, 52, (20), 6125–6140
- [67] Murgia, G., Pisani, L., Shukla, A.K. ve Scott, K. (2003). A numerical model of a liquid-feed solid polymer electrolyte DMFC and its experimental validation. *Journal of the Electrochemical Society*, 150, (9), A1231-A1245
- [68] Jeng K, Chen C. Modeling and simulation of a direct methanol fuel cell anode. *J Power Sources* 2002;112(2):367-75
- [69] Liu, W. ve Wang, C-Y. (2007). Electron transport in direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 164, (2), 561–566
- [70] Pramanik H, Basu S. Modeling and experimental validation of overpotentials of a direct ethanol fuel cell. *Chem Eng Process* 2010;49(7):635–42
- [71] Memming R, Bahnemann D. *Semiconductor electrochemistry*. John Wiley & Sons; 2015
- [72] Andreadis G, Tsiakaras P. Ethanol crossover and direct ethanol PEM fuel cell performance modeling and experimental validation. *Chem Eng Sci* 2006;61(22):7497-508
- [73] N.S. Suresh, S. Jayanti Cross-over and performance modeling of liquid-feed Polymer Electrolyte Membrane Direct Ethanol Fuel Cells *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011) 14648-14658
- [74] Zhou W, Song S, Li W, Sun G, Xin Q, Kontou S, et al. Pt-based anode catalysts for direct ethanol fuel cells. *Solid State Ionics* 2004;175(1-4):797-803

## ÖZGEÇMİŞ

Ethem Sökmez, 22.08.1996'da Pamukova'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Pamukova'da tamamladı. 2014 yılında Pamukova Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2014 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2018 yılında 3.95 not ortalamasıyla fakülte birincisi olarak tamamladı. 2018 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.