

**T.C.**  
**RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOKÖMÜR YAKITI KULLANILAN DOĞRUDAN KARBON**  
**YAKIT PİLİNİN MODELLENMESİ**

**FATMA GÜL NİŞANCI**

**TEZ DANIŞMANI**  
**DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKÇEN AKGÜL**  
**TEZ JÜRİLERİ**  
**DOÇ. DR. ERCÜMENT YÜZÜAK**  
**DR. ÖĞR. ÜYESİ İBRAHİM DÜZGÜN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**RİZE-2019**

**Her Hakkı Saklıdır**

T.C.  
RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİYOKÖMÜR YAKITI KULLANILAN KARBON YAKIT PİLİNİN  
MODELLENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL danışmanlığında, Fatma Gül NİŞANCI tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11/07/2019 tarihinde Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Unvanı, Adı Soyadı**

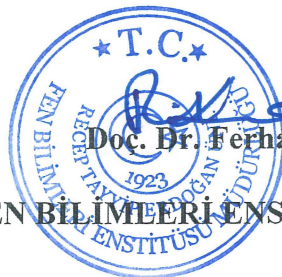
**İmza**

Başkan : Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DÜZGÜN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL

*(Handwritten signatures in blue ink)*



*(Handwritten signature in blue ink)*  
Doç. Dr. Ferhat KALAYCI

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ**

## ÖNSÖZ

Elektrik enerjisi dünyanın her yerinde önemli bir kaynaktır. Yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirilebildiği için yakıt pillerine olan ilgi giderek artmaktadır. Yakıt pilleri verimi yüksek olan enerji sistemleridir. Temiz enerji üretilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaları açısından öneme sahiptirler. Bu çalışmada doğrudan karbon yakıt pilinin yenilenebilir enerji kaynağı biyokütle kullanıldığındaki verimi incelenmiştir.

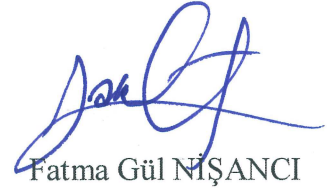
Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve oluşmasında emeği geçen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL'e bana gösterdiği hoşgörü ve sabrından dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında bilgisayar ortamında kullanılan programın öğrenilmesine, kullanılmasına yardımcı olan ve bana değerli zamanından vakit ayıran Dr. Öğr. Üyesi Rasim Volga OVALI hocama ve her zaman maddi, manevi desteklerini yanımda hissettiğim canım aileme teşekkür ederim.

**Fatma Gül NİŞANCI**

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Biyokömür Yakıtı Kullanılan Doğrudan Karbon Yakıt Pili nin Modellenmesi” başlıklı bu tezi, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 11/07/2019



Fatma Gül NİŞANCI

*Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.*

## ÖZET

# BİYOKÖMÜR YAKITI KULLANILAN DOĞRUDAN KARBON YAKIT PİLİNİN MODELLENMESİ

Fatma Gül NİŞANCI

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi  
Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL

Doğrudan karbon yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalışan, yakıt olarak katı karbonu kullanan ve karbondaki kimyasal enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlarla elektriğe dönüştüren sistemlerdir. Kullanılan yakıtın ve oluşan ürün gazının farklı fazlarda olması sebebiyle yakıt kullanımı %100 olabilir. Bu çalışmada yenilenebilir, temiz ve alternatif karbon yakıt olarak biyokütleden türetilen biyokömürün kullanıldığı yakıt pili performansı, Matlab programı ile modellenerek belirlenmiştir. Hücre sıcaklığının, karbonun iletkenliğinin, yoğunluğunun ve büyüklüğünün yakıt pili gerilimi üzerindeki etkileri bu modelleme yardımıyla görülmüştür. Modelleme yapılırken yakıt pili performansını etkileyen 3 ana kayıp değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal reaksiyondan kaynaklanan aktivasyon kayıpları, iyonik ve elektronik ilettime bağlı omik kayıplar ve taşıma nedeniyle oluşan konsantrasyon kayıplarıdır. Bu çalışmada incelenen tüm polarizasyon kayıpları sıcaklığa oldukça bağımlılık göstermiştir. Katot elektrodunda gerçekleşen aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları anot elektrodunda gerçekleşen aktivasyon ve omik kayıplardan küçük çıkmıştır. Yakıt pili performansını azaltan en büyük etken direnç kayıplarıdır. Kullanılan yakıtın ve elektrolitin elektriksel iletkenliği omik kayıpları etkilemektedir. Biyokütlenin elektriksel iletkenliğinin yüksek olduğu değerlerde grafit kullanılan sistemlere yakın performans değerleri bulunmuştur. Yakıt hücresi gerilimi, maksimum gerilimden polarizasyon kayıplarının çıkartılmasıyla bulunmuştur. Yüksek iletkenliğe sahip biyokömürün yakıt olarak kullanıldığı yakıt hücresinde 0,2-0,3 volt arasında 170-190 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilmiştir.

2019, 55 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Doğrudan Karbon Yakıt Pilleri, Matlab, Modelleme, Biyokömür

## ABSTRACT

### DIRECT CARBON FUEL CELL MODEL USING BIOCHARGE FUEL

Fatma Gül NİŞANCI

Recep Tayyip Erdogan University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Energy Systems Engineering  
Master Thesis  
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Gökçen AKGÜL

Direct carbon fuel cells are the systems operating at high temperatures, using solid carbon as fuel, and converting chemical energy in carbon into the electricity by electrochemical reactions. Fuel usage can be 100% due to the different phases of the fuel and the formed product gas. In this study, the performance of the fuel cell using biomass derived biochar as renewable, clean and alternative carbon was determined by modeling with Matlab programe. The effects of cell temperature, conductivity, density and size of carbon on fuel cell voltage were predicted by this modeling. Three main losses that affect fuel cell performance were evaluated. Activation losses due to electrochemical reaction, ohmic losses due to ionic and electronic conduction and concentration losses due to mass transport. In this study, all polarization losses studied were highly dependent on temperature. Activation and concentration losses in the cathode electrode were smaller than in the anode electrode. The biggest factor that reduces fuel cell performance is resistance losses. The electrical conductivity of the fuel and electrolyte used affects ohmic losses. The similar performance values were determined with graphite system when high electrical conductivity of the biochar used. The fuel cell voltage was found by subtracting polarization losses from the maximum voltage. The power density of 170-190 W/m<sup>2</sup> was obtained between 0.2-0.3 volts in the fuel cell where high conductivity biochar is used as fuel.

2019, 55 pages

**Keywords:** Direct Carbon Fuel Cell, Matlab, Modeling, Biyochar

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	II
ÖZET .....	III
ABSTRACT .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLolar DİZİNİ .....	IX
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	X
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.1.1. Yakıt Pili .....	1
1.1.2. Yakıt Pili Çeşitleri .....	2
1.1.2.1. Alkali Yakıt Pili (AFC) .....	3
1.1.2.2. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEMFC) .....	3
1.1.2.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC) .....	4
1.1.2.4. Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMFC) .....	5
1.1.2.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC) .....	6
1.1.2.6. Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC) .....	7
1.2. Doğrudan Karbon Yakıt Pili (DCFC) .....	8
1.2.1. Sulu Hidroksit Teknolojisi .....	10
1.2.2. Erimiş Hidroksit Teknolojisi .....	10
1.2.3. Erimiş Karbonat Teknolojisi .....	12
1.2.4. Oksijen İyonu İleten Katı Oksit Elektrolit Teknolojisi .....	12
1.2.4.1. Akışkan Yatak Sistemli Anot .....	13
1.2.4.2. Erimiş Bir Metal İçinde Yakıt .....	14
1.2.4.3. Erimiş Karbonat İçinde Yakıt .....	14
1.3. Yakıt Pili Performansı .....	15
1.3.1. Aktivasyon Kayıpları .....	17
1.3.2. Omik Kayıplar .....	18
1.3.3. Konsantrasyon Kayıpları .....	20

1.4.	Yakıt Pili Verimi.....	21
1.5.	Yakıt Pilinin Modellenmesi.....	21
1.6.	Literatür Özeti .....	22
1.7.	DCFC’lerde Karbon Yakıtı .....	26
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	28
2.1.	Yakıt Pili Modelinin Geometrisi .....	28
2.2.	Elektrolitin Özellikleri .....	29
2.3.	Elektrotların Özellikleri .....	30
2.4.	Matlab Modellemesi .....	31
2.5.	Modellemede Yapılan Varsayımlar .....	31
2.6.	Katot Kinetiği .....	32
3.	BULGULAR .....	36
3.1.	DCFC Polarizasyon Eğrileri.....	36
3.2.	Sıcaklığın Doğrudan Karbon Yakıt Pili Üzerindeki Etkisi .....	37
3.3.	Karbon Çapının Yakıt Pili Performansına Etkisi .....	40
3.4.	Karbonun Yoğunluğunun ve İletkenliğinin Direnç Kayıplarına Etkisi .....	41
4.	TARTIŞMA ve SONUÇLAR .....	45
5.	ÖNERİLER .....	48
	KAYNAKLAR .....	49
	EKLER .....	51
	ÖZGEÇMİŞ .....	55



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Yakıt pilinin şematik gösterimi .....	2
Şekil 2.	Alkali yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi .....	3
Şekil 3.	Proton değişim mebranlı yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi .....	4
Şekil 4.	Fosforik asit yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi .....	5
Şekil 5.	Doğrudan metanol yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi .....	6
Şekil 6.	Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi .....	7
Şekil 7.	Katı oksit yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi .....	8
Şekil 8.	Akışkan yatak sistemli anotun yakıt hücresi tasarımı. ....	13
Şekil 9.	Yakıt hücresinin akım-voltaj ve güç yoğunluğu eğrisi .....	15
Şekil 10.	Yakıt pilinin polarizasyon eğrisi .....	16
Şekil 11.	DCFC sisteminin (a), katot elektrodunun (b), elektrolit matrisinin (c) 3 boyutlu görünüşleri.....	29
Şekil 12.	Bir yakıt pilinde sıcaklığın açık devre potansiyeline etkisi .....	36
Şekil 13.	Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda (923,973,1023 K) katot konsantrasyon polarizasyonuna etkisi.....	37
Şekil 14.	Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda (923, 973,1023 K) anot aktivasyon polarizasyonuna etkisi.....	38
Şekil 15.	Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda ( 923, 973, 1023 K) katot aktivasyon polarizasyonuna etkisi .....	38
Şekil 16.	Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda (923,973,1023 K) omik polarizasyona etkisi.....	39
Şekil 17.	Doğrudan karbon yakıt pilinin akım yoğunluğu hücre gerilimi grafiği .....	40
Şekil 18.	Farklı karbon çaplarında yakıt pilinin akım yoğunluğuna göre gerilim değişim grafiği ( $D_1 = 1 * 10^{-6}$ , $D_2 = 1 * 10^{-5}$ , $D_3 = 1 * 10^{-4}$ m) .....	40
Şekil 19.	Farklı yoğunluktaki karbon parçacıkların omik polarizasyona etkisi (Temel durum $0,5 * 10^3$ , Liu vd. $1,5 * 10^3$ , Kornhauser $1,201 * 10^3$ kg/m <sup>3</sup> ).....	41
Şekil 20.	Karbon parçacığının iletkenliğinin omik polarizasyona etkisi ( $\sigma_1 = 9,3$ $\sigma_2 = 24,7$ 1/ $\Omega$ m <sup>2</sup> ). ....	42
Şekil 21.	Grafitin iletkenliğinin omik polarizasyona etkisi.....	43
Şekil 22.	İletkenliği artırılan biyokömürün omik polarizasyona etkisi.....	43
Şekil 23.	İletkenliği arttırılan biyokömürün farklı sıcaklıklarda hücre gerilimine etkisi ( $\sigma_4 = 399,7 * 10^5$ 1/ $\Omega$ m <sup>2</sup> ) .....	44

**Şekil 24.** Anot yatak yüksekliğinin hücre gerilimine etkisi ( $x_1 = 1 * 10^{-4}$ ,  $x_2 = 1 * 10^{-3}$ ,  $x_3 = 1 * 10^{-2}$  m).....44



## TABLÖLAR DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Yakıt pilleri çeşitleri ve çalışma koşulları .....	2
<b>Tablo 2.</b> Modellemede kullanılan önemli denklemler .....	33
<b>Tablo 3.</b> Yakıt pili modellemesinde kullanılan parametreler .....	33
<b>Tablo 4.</b> Yakıt pilinde kullanılan karbon materyalleri.....	42
<b>Tablo 5.</b> Doğrudan karbon yakıt pili ile yapılan çalışmalar .....	46



## SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

DCFC	Doğrudan Karbon Yakıt Pili
AFC	Alkali Yakıt Pili
PEM	Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili
PAFC	Fosforik Asit Yakıt Pili
DMFC	Doğrudan Metanol Yakıt Pili
MCFC	Erimiş Karbonat Yakıt Pili
SOFC	Katı Oksit Yakıt Pili
SARA	Bilimsel Uygulamalar ve Araştırma Ortakları
CCE	Temiz Kömür Enerji A.Ş.
$Y_2O_3$	Yitriya Oksit
$ZrO_2$	Zirkonya
YSZ	Yitriya ile Stabilize Edilmiş Zirkonya Bileşiği
$R'$	Evrensel Gaz Sabiti
$F'$	Faraday Sabiti
P	Hücre Basıncı
$\Delta G$	Gibbs Enerji Değişimi(mol başına)
$\Delta H$	Entalpi Değişimi (mol başına)
g	Yerçekimi İvmesi
$V^0$	Standart Açık Devre Potansiyeli
$V_H$	Hücre Gerilimi
$V_N$	Açık Devre Gerilimi
$N_s$	Anot Yatağın Levha Sayısı
$D_C$	Karbon Parçacık Çapı
K	Kütle Transfer Katsayısı
C	Konsantrasyon
$E_a$	Elektrolit İletkenliğinin Görünür Aktivasyon Enerjisi
F	Mekanik Kuvvet
$F_f$	Kaldırma Kuvveti
$F_g$	Yer Çekimi Kuvveti

$F_r$	İtici Kuvvet
$i$	Akım
$j$	Akım Yoğunluğu
$P_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> 'nin Kısmi Basıncı
$P_{O_2}$	O <sub>2</sub> 'nin Kısmi Basıncı
$p_m$	Ortalama Verim Basıncı
$\rho$	Yoğunluk
$R$	Direnç
$R_s$	Elektrolit Direnci
$R_{cr}$	Elektrot Fazının Daralma Direnci
$R_{cr}$	Elektrot Direnci
$R_{ct}$	Yük Transfer Direnci
$s$	İki Karbonun Arasındaki Temas Alanı
$y_{CO_2}$	CO <sub>2</sub> 'nin Mol Yüzdesi
$\varepsilon$	Dolgulu Yatağın Boşluk Oranı
$\sigma_c$	Karbon Parçacığının İletkenliği
$\sigma_s$	Elektrolitin İletkenliği
$\beta$	Yük Transfer Katsayısı
$\eta$	Polarizasyon Kayıpları
$\gamma$	Verim

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Doğrudan karbon yakıt pilleri yakıt pillerinin yüksek sıcaklıkta çalışan bir çeşididir. Diğer yakıt pillerinden farklı olarak katı karbon yakıtı kullanılır. Bu çalışmada doğrudan karbon yakıt pillerinin (DCFC) performansı modelleme yapılarak değerlendirilmiştir. Model tasarımı gerçekleştirilen DCFC’de grafit karbonu ve biyokütleden elde edilen karbonize materyal olan biyokömürün yakıt olarak pil performansına etkileri araştırılmıştır.

### 1.1.1. Yakıt Pili

Yakıt pilleri yanma olayı olmadan uygun bir yakıt ve oksitleyici kullanılarak yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Yakıt pilinde yakıtın ve oksitleyicinin elektrokimyasal reaksiyonları sonucunda enerji üretilir. Şekil 1’ de görüldüğü gibi yakıt pilleri basitçe 3 ana bileşenden oluşur. Bunlar anot elektrodu, katot elektrodu ve elektrolittir. Anot elektrotunda reaksiyonlar sonucu elektronların ortaya çıktığı yükseltgenme, katot elektrotunda ise anottan gelen elektronun kullanıldığı indirgenme reaksiyonları meydana gelir. Elektrolit ise iyonik dengeyi sağlar. Yakıt pillerinde gerçekleşen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları redoks reaksiyonları olarak adlandırılır.

Yükseltgenme reaksiyonu, elektronun ortaya çıktığı reaksiyondur:



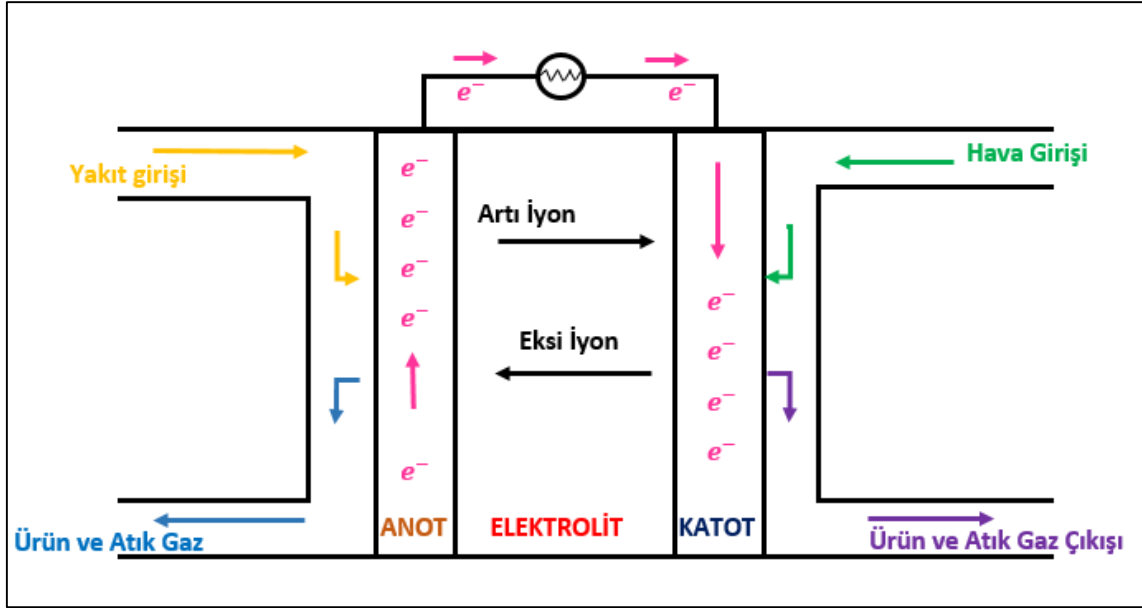
İndirgenme reaksiyonu, anotta ortaya çıkan elektronun devreden geçtikten sonra katotda kullanılması reaksiyonudur:



Toplam pil reaksiyonu;



şeklindedir.



Şekil 1. Yakıt pilinin şematik gösterimi (URL-1).

### 1.1.2. Yakıt Pili Çeşitleri

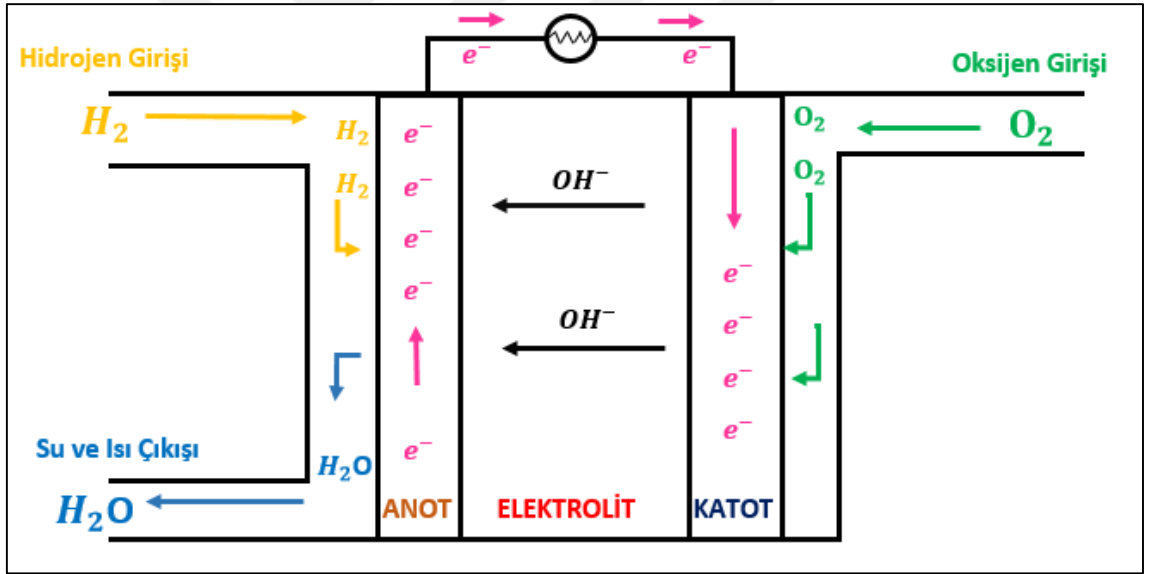
Yakıt pilleri çalışma sıcaklıklarına göre ve kullanılan elektrolit çeşidine göre Tablo 1'deki gibi sınıflandırılabilir. Yakıt pili çeşitlerinin elektrolit, sıcaklık ve yakıt farklılıklarından dolayı elektrokimyasal reaksiyonları da farklılık gösterir.

**Tablo 1.** Yakıt pilleri çeşitleri ve çalışma koşulları (Giddey vd., 2012).

Yakıt pili	Kısa adı	Çalışma sıcaklığı	Elektrolit
Alkali Yakıt Pili	AFC	65-250°C	KOH sıvı çözeltisi
Proton Dönüşüm Zarlı Yakıt Pili	PEMFC	60-120 °C	Katı polimer membran (Nafion)
Fosforik Asit Yakıt Pili	PAFC	160-220 °C	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Doğrudan Metanol Yakıt Pili	DMFC	60-120 °C	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> veya polimer membran
Erimiş Karbonat Yakıt Pili	MCFC	600-800 °C	LiAlO <sub>2</sub>
Katı Oksit Yakıt Pili	SOFC	800-1000°C	Stabilize Zirkonyum
Doğrudan Karbon Yakıt Pili	DCFC	500-1000 °C	Erimiş karbonat veya O <sup>2-</sup> ileten seramik

### 1.1.2.1. Alkali Yakıt Pili (AFC)

Bu yakıt pili çeşidinde elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılmaktadır ve 65-250 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Yakıt olarak hidrojen kullanılır. Hidrojen, anotta elektrolitten gelen OH iyonu ile elektrokimyasal reaksiyona girer, su molekülü oluşurken elektron ortaya çıkar. Katotta ise oksijen indirgenir (Şekil 2). Bu yakıt pillerinin verimi %50-60 arasında olup güç verimliliği 100-200 mW/cm<sup>2</sup> dir. Diğer düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinden farklı olarak pahalı elektrot malzemelerine gerek duymazlar.

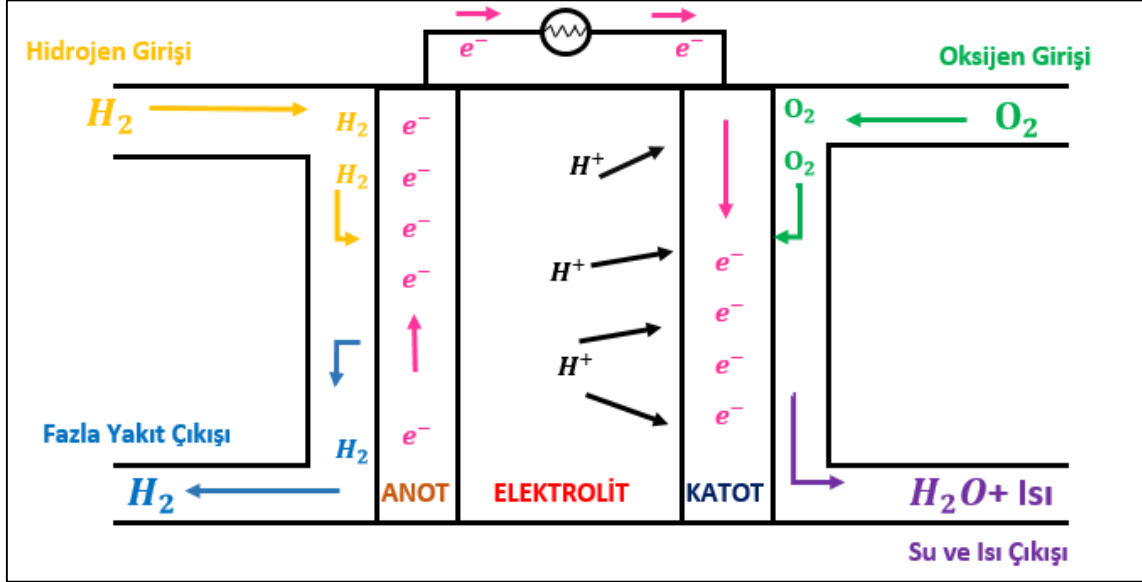


Şekil 2. Alkali yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi (Toprak, 2017).

### 1.1.2.2. Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEMFC)

Bu yakıt pilleri elektrolit olarak Nafion gibi proton iletkenliğe sahip olan ince bir polimer zar (membran) içerir. Şekil 3’de görüldüğü gibi yakıt olarak kullanılan hidrojen, anotta hidrojen iyonlarına ayrışır ve bu iyonlar elektrolitten katoda doğru geçerek burada indirgenir 60-120 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Bu sistemde katalizör olarak genellikle platin kullanılmaktadır. Anot ve katot reaksiyonları eşitlik 6 ve 7’de verilmiştir.



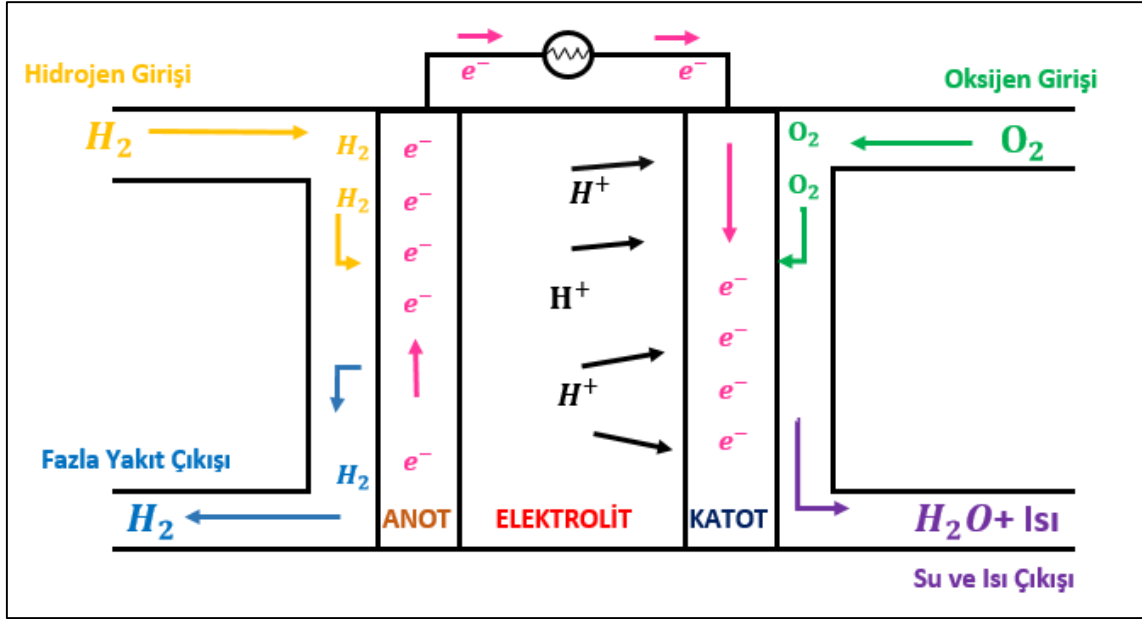


**Şekil 3.** Proton değişim membranlı yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi (Toprak, 2017).

### 1.1.2.3. Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)

Bu yakıt pilleri de yakıt olarak tıpkı PEM ve AFC'nin kullandığı hidrojeni kullanmaktadır (Şekil 4). Dolayısıyla anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar PEM' deki gibidir. Bu yakıt pilinde elektrolit olarak fosforik asit ( $H_3PO_4$ ) kullanılmaktadır. PEM' de olduğu gibi bu yakıt pilinde de katalizör olarak platin kullanılmakta ve bu durum yakıt pilinin maliyetini artırmaktadır. Çalışma sıcaklığı 160-220 °C dir. Bu değer altındaki sıcaklıklarda fosforik asitin iyonik iletkenliği düşer ve platinden kaynaklanan karbon monoksit (CO) zehirlenmesi artar.

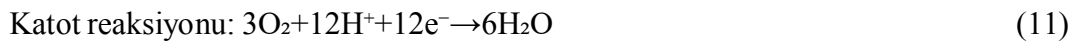


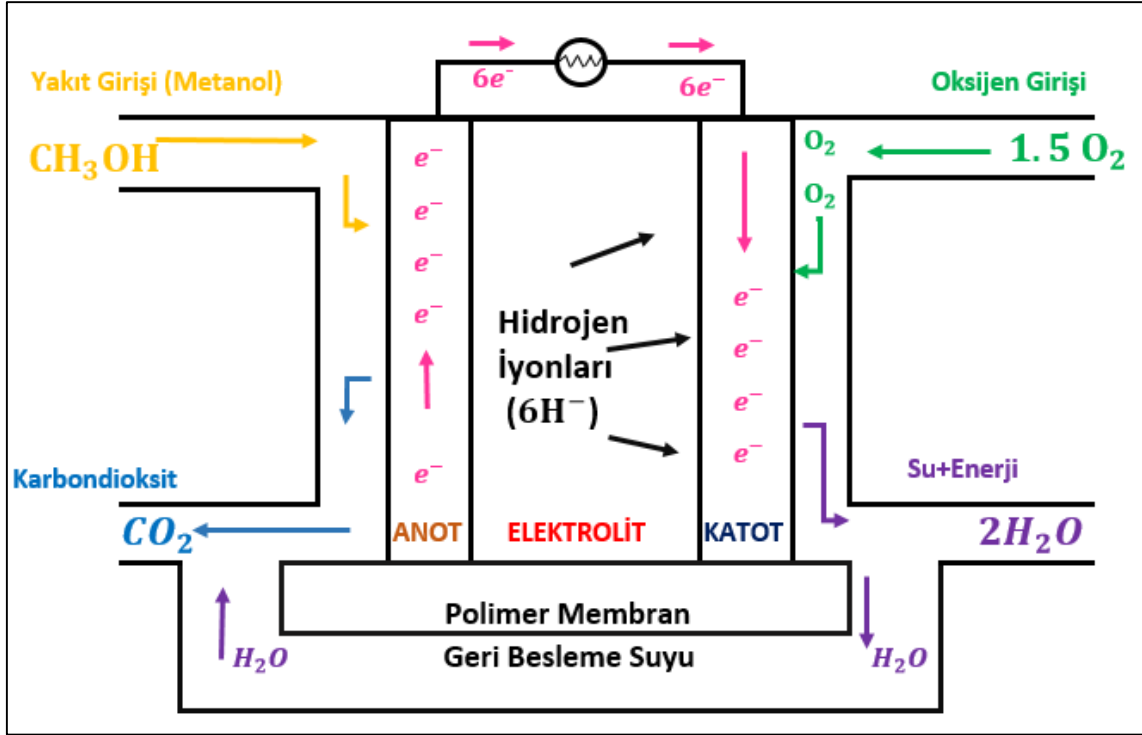


Şekil 4. Fosforik asit yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi (Toprak, 2017).

#### 1.1.2.4. Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMFC)

Elektrolit olarak proton iletken membran kullanılmaktadır. Bu sistemde yakıt olarak metanol kullanılır ve bu yakıt doğrudan anoda verilir (Şekil 5). Bu yakıt pilinin avantajı yakıt olarak kullanılan metanolün ucuz ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Dezavantajı ise elektrolit olarak kullanılan membranın yakıtın anottan katotta geçmesine müsaade etmesidir. Bu da yakıtın boşa harcanması anlamına gelmektedir. Yakıtın anotta reaksiyona girmeyip katoda geçmesi hücrenin verimini düşürecektir. Çalışma sıcaklıkları 60-120 °C arasındadır.

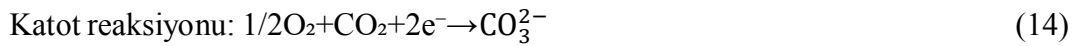
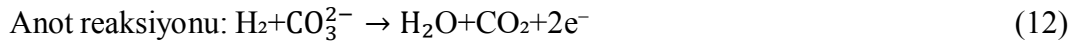


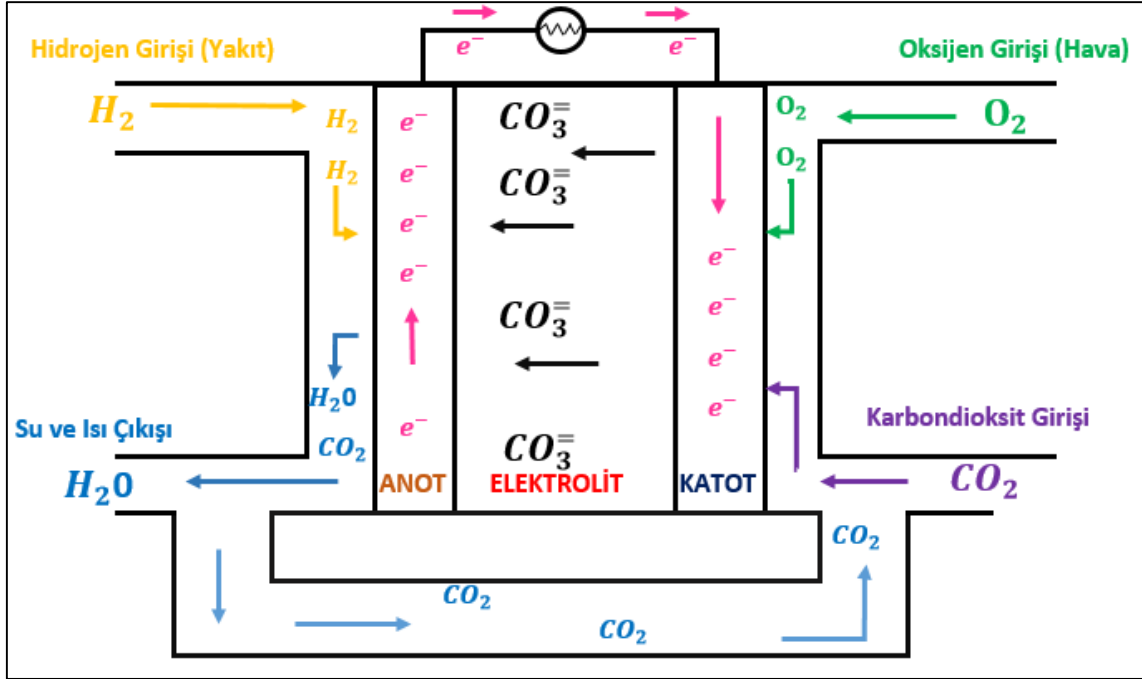


Şekil 5. Doğrudan metanol yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi (URL-2).

#### 1.1.2.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

Bu yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta (600-800°C) çalışmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan bu yakıt pili tüm sistemin verimini artırırken aynı zamanda yakıt çeşidini de artırmaktadır. Yakıt olarak metan, karbon monoksit ve hidrojen gibi farklı yakıtlar kullanılabilir. Burada elektrolit olarak Li, Na ve K gibi alkali karbonat bileşikleri kullanılmaktadır. Bu karbonatlar yüksek sıcaklıkta eriyik halde olup iletkenlikleri fazladır. Bu sistemde yakıt anotta karbonat iyonu ile reaksiyona girer ve su, CO<sub>2</sub>, elektron açığa çıkar. Katotta ise O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girip karbonat iyonları oluşturur. Şekil 6'da yakıt olarak hidrojen kullanan erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma şekli görülmektedir.

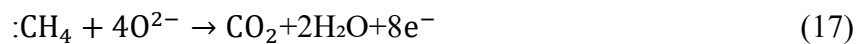
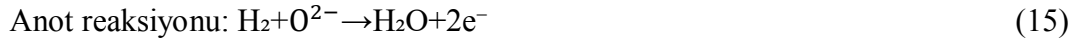


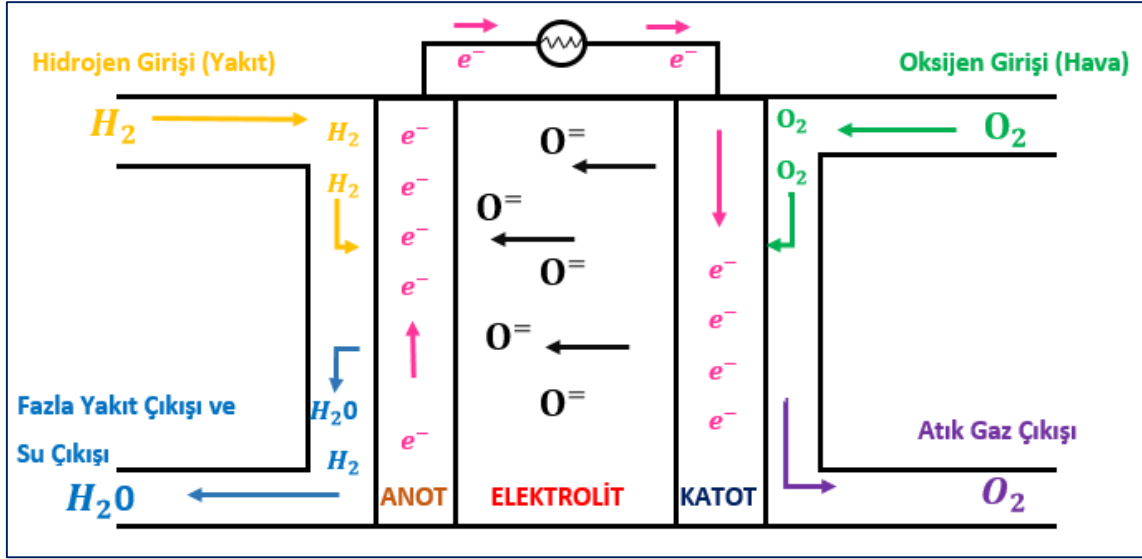


Şekil 6. Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi (Toprak, 2017).

#### 1.1.2.6. Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

MCFC gibi yüksek sıcaklıkta (800-1000 °C) çalışmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalıştığı için yüksek verimlilik sağlar. Yüksek sıcaklıkta çalışma katalizör olarak platin gibi pahalı metal kullanma ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu yakıt pillerinde erimiş karbonat yakıt pilleri gibi sıvı elektrolit kullanılmamaktadır. Şekil 7’de görüldüğü gibi elektrolit, oksijen iyonu ileten bir yapıya sahiptir. Bu sistemde genellikle katı bir elektrolit olan itriyum oksit ( $Y_2O_3$ ) ile stabilize edilen zirkonyum seramiği ( $ZrO_2$ ) kullanılmaktadır. Elektrolit malzemesi yüksek sıcaklıkta oksijen iyonu iletebilecek hale gelmektedir. Bu sistemde yakıt olarak CO,  $CH_4$  kullanılabilir. Bu sistemde yakıt olarak CO,  $CH_4$  kullanılabilir.

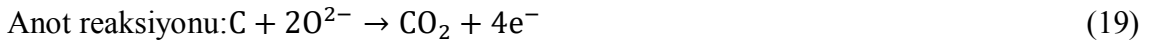




Şekil 7. Katı oksit yakıt pilinin çalışmasının şematik gösterimi (Toprak, 2017).

## 1.2. Doğrudan Karbon Yakıt Pili (DCFC)

DCFC'ler yüksek sıcaklıklarda çalışan, yakıt olarak katı karbonu kullanan ve karbondaki kimyasal enerjiyi elektrokimyasal reaksiyonlarla elektriğe dönüştüren sistemlerdir. DCFC'ler de diğer yakıt pillerinde olduğu gibi iyon dengesine izin veren fakat elektron geçişine izin vermeyen bir yapıya sahip olan Li, Na, K karbonat elektrolit, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği iki tane elektrottan oluşur. Anot karbon yakıtla beslenir, katot hava veya oksijen ile beslenir. Redoks reaksiyonlarıyla ortaya çıkan elektron, anot ve katodu birbirine bağlayan iletim kablolarından geçer, elektrik üretilmiş olur. DCFC'lerin maksimum verimde çalışabilmesi için genel hücre reaksiyonları aşağıdaki gibi olmalıdır.



Bu yakıt pillerini diğer yakıt pillerinden ayıran en büyük özellik katı bir yakıtın doğrudan kullanılmasıdır. Kullanılan yakıtın ve oluşan ürün gazının farklı fazlarda olması sebebiyle yakıt kullanımı %100 olabilir. Reaksiyonlar sonucunda oluşan gaz ürünler faz farkından dolayı kolayca ortamdan ayrılabilir.

DCFC yakıt pillerinde anot odasında gerçekleşen reaksiyonlar yanma olarak değil, elektrokimyasal reaksiyonlar olarak değerlendirilir. Elektrolitle doğrudan temas eden ve oksijen iyonu ile reaksiyona giren karbon parçacıkları, verimli elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda tamamen CO<sub>2</sub>'ye dönüşür. Verimin düşük olduğu durumlarda veya tam olmayan reaksiyonların oluşması ile CO açığa çıkabilir. Fakat oluşan bu CO yine oksijen iyonu ile reaksiyona girip CO<sub>2</sub>'ye dönüşür, yani CO<sub>2</sub> oluşumu 2 yarı reaksiyonla gerçekleşir.



Eğer karbon parçacıkları anot elektrotuna temas etmez veya oksijen iyonlarıyla reaksiyona girmezse aşağıdaki gibi yan reaksiyonlar gerçekleşebilir.



CO oluşması durumunda yakıt hücresinde oluşan CO<sub>2</sub>'den ayırmak mümkün değildir. Oluşan CO'nun oksijen iyonlarıyla tekrardan reaksiyona girmemesi ve anodu terk etmesi durumunda hem yakıt kullanımı hem de sistemin verimi düşmüş olur.

DCFC yakıt pillerinde elektrolit çeşidine, anot tasarımındaki ve malzemesindeki farklılıklara göre değişen türler mevcuttur (Giddey vd., 2012).

Bunlar;

- Elektrolit olarak sulu hidroksit (çalışma sıcaklığı 250 °C)
- Elektrolit olarak erimiş hidroksit (KOH, NaOH, çalışma sıcaklığı 500-600 °C)
- Elektrolit olarak erimiş karbonat (Li, Na, K karbonatlar, çalışma sıcaklığı 750-800 °C)
- Elektrolit olarak katı oksit (katkılı zirkonyum veya seryum seramikleri, çalışma sıcaklığı 500-1000 °C)
  - Akışkan yatak (anot ile karbon parçacıkların doğrudan teması)

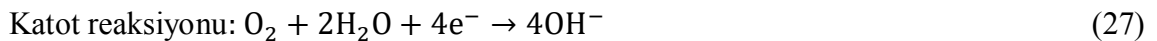
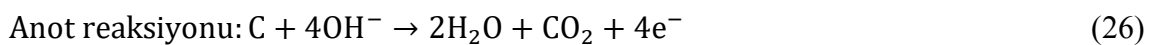
- Erimiş metal anot (karbonun erimiş metal anot ile doğrudan teması)
- Erimiş tuz (karbon parçacıklarının erimiş tuz ile karıştırılması)

### 1.2.1. Sulu Hidroksit Teknolojisi

Bu elektrolit teknolojisi 250 °C altındaki DCFC'lerde denenmiştir. Elektrolit sıvı olduğu için yüksek basınçlarda çalışılması gereken bir teknolojidir. Nunoura vd. (2007), bu elektrolit teknolojisine dayanan bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. İlk çalışmalarını 200 °C de 30 bar basınçta gerçekleştirmişler ve yakıt olarak ham kömür kullanmışlardır. Bu çalışmaları hızla sıfıra düşen 0,55V luk bir açık devre gerilimi ile sonuçlanmıştır. Bu hızlı düşüşün nedenini yakıtın katottaki reaksiyondan kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Daha sonra 80-245 °C aralığında 35 bar basınçta çalışan bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistemde elektrolit olarak çeşitli hidroksit karışımları (potasyum, magnezyum, sodyum lityum gibi), katot olarak ise altın, gümüş, platin ve paladyum gibi metalleri incelemişlerdir. En iyi sonucun 245 °C'de ve 38,5 bar basınçta, anot olarak iletken karbon yatağın kullanıldığı, elektrolit olarak potasyum/lityum sulu hidroksitin kullanıldığı ve katot olarak gümüş/platin alaşımının kullanıldığı sistemden elde etmiştir. Bu yapılan çalışmanın sonucunda yakıt hücresinin 0,574 V luk hücre voltajına ve 65mW/cm<sup>2</sup> tepe güç yoğunluğuna sahip olduğu belirtilmiştir.

### 1.2.2. Erimiş Hidroksit Teknolojisi

Bu tür DCFC'ler de elektrolit olarak erimiş hidroksit (NaOH, KOH) kullanılır. Bu tür tasarımda katot olarak metalik bir kap, anot olarak ise yakıt olarak da kullanılabilen grafitten veya kömürden elde edilmiş karbondan yapılmış bir karbon çubuk kullanılabilir. William Jacques 1856'da bu çalışmayı yapan ilk kişidir. Yapılan çalışmalarda erimiş hidroksit elektrolit kullanılan DCFC'lerde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir (Giddey vd., 2012).



Toplam hücre reaksiyonu:  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  (28)

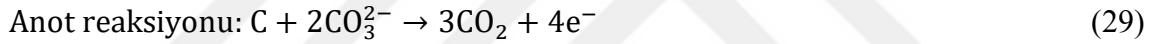
Bilimsel uygulamalar ve araştırma ortakları (SARA) A.Ş. erimiş hidroksit elektrolit kullanarak DCFC'ler de Ar-Ge programı başlatmıştır (Giddey vd., 2012). Elektrolit olarak erimiş hidroksitin erimiş karbonat elektrolitine göre bazı avantajları olduğu bulunmuştur. Elektrolit olarak NaOH kullanılması, yüksek iyonik iletkenlik, düşük erime noktası (düşük çalışma sıcaklığı) sağlar. Çalışma sıcaklığındaki düşüş anottaki karbonun CO yerine  $CO_2$ 'e dönüşmesini sağlar. Bu tür hücreler 400-650 °C de çalışırlar. Elektrolit olarak kullanılan NaOH'in karbona karşı yüksek reaktivitesi sayesinde anotta daha yüksek bir elektrokimyasal reaksiyon hızı ve potansiyel kayıpların azalması sağlanmış olur.

SARA A.Ş. yaptığı tasarımda elektrolit olarak erimiş sodyum hidroksit, anotta karbon çubuğu yakıt olarak, katot olarak ise nikel köpük astarlı düşük karbonlu çelikten yapılmış bir çelik kap kullanmıştır. Bu çalışmada nemlendirilmiş hava çelik kabın altından hava kabarcıkları olarak beslenmiştir. Elektrolitte çözünen hava kabarcıklarının anotta doğrudan temas halinde bulunması kimyasal reaksiyonlara sebep olduğundan yakıt pilinin veriminin düşmesine neden olmaktadır. SARA A.Ş. yaptığı bu çalışmayı daha verimli hale getirmek için anot ve katot arasına gözenekli bir ayırıcı yerleştirmiştir. Ayırıcı nikel ve alüminyum bazlı bir malzemedir yapılmıştır. Ayırıcı hidroksit iyonların geçişine izin verir fakat havanın anotta temas etmesini önlemektedir. Ayrıca SARA A.Ş yine hidroksit bazlı elektrolit kullanarak hücre verimini etkileyecek parametrelerin neler olabileceğini bulabilmek için bazı parametreleri karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmalarda anot ve katot arasındaki mesafenin artmasının güç yoğunluğunu azalttığını, katottun yüzey alanının artması ve anodun yüzey alanının azalmasının hücreyi verimli hale getirdiği, ayrıca yakıt olarak grafitten elde edilen karbon yerine kömürün kullanılmasının daha verimli olduğunu bildirmiştir. Kullanılan metallerin zamanla korozyona uğradığı da belirtilmiştir.



### 1.2.3. Erimiş Karbonat Teknolojisi

Bu teknoloji erimiş karbonat yakıt pili teknolojisine benzemektedir. Elektrolit olarak Li, Na, K gibi erimiş karbonatlar kullanılır. Bu elektrolitin kullanılması yüksek iyonik iletkenliğe, karbon oksidasyonunun katalizine sebep olabilir. Çalışma sıcaklığı (600-850 °C) erimiş hidroksit elektrolitine göre biraz daha yüksektir. Yakıt olarak asetilen siyahı, kömür türevi karbon, grafit partikülleri kullanılır. Bu sistemlerde yakıt olarak kullanılan karbonu anot ve akım toplayıcı olarak kullanmak mümkündür. Cooper vd. (2003), 750-850 °C arasında çalışan, erimiş karbonat elektrolitli eğik bir sistem tasarlamıştır. Eğik sistem erimiş elektrolitin fazlasının dışarı atılmasını sağlamıştır. Bu elektrolit tipindeki yakıt hücrelerinde zamanla katot performansı azalmaktadır. Düşük güç yoğunlukları, yakıt işleme ve dağıtımı ile ilgili zorluklarla karşılaşmıştır. Elektrolit olarak erimiş karbonat kullanılan bu yakıt pillerinde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir.



Erimiş karbonatın kullanılması reaksiyonlar sonucunda CO yerine CO<sub>2</sub> oluşumunu artırmaktadır ve böylece hücre verimi de artmaktadır. Fakat her yakıt pilinde olduğu gibi bu yakıt pili teknolojisinde de zamanla katotta yüksek polarizasyon, performans kaybı, ayırıcı olarak veya akım toplayıcı olarak kullanılan metal plakaların korozyonu, düşük güç yoğunlukları, hücrenin ömrünün kısa olması gibi dezavantajlar ortaya çıkmaktadır.

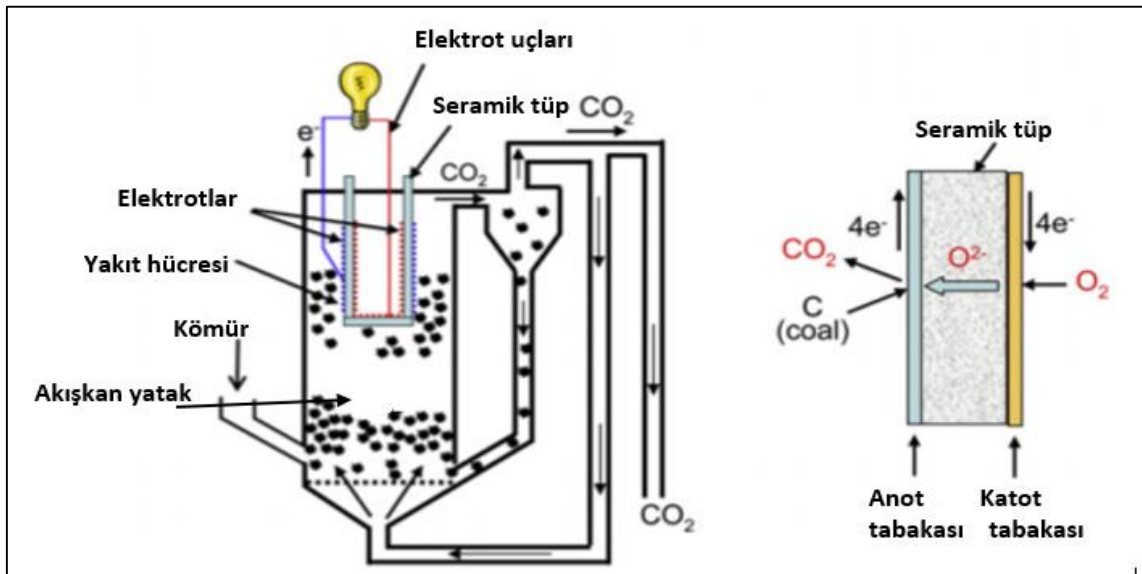
### 1.2.4. Oksijen İyonu İleten Katı Oksit Elektrolit Teknolojisi

SOFC deki gibi oksijen iyonu ileten seramik yapıli elektrolit kullanılır. Çalışma sıcaklığı (800-1000 °C) oldukça yüksektir. Bu teknolojiye DCFC için en yaygın olarak kullanılan elektrolit stabilize edilmiş itriyum oksit (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), anot olarak katı karbon, katot olarak da gözenekli zirkonyum oksit (ZrO<sub>2</sub>) tabakasıdır. Oksijen iyonu ileten katı elektrolit teknolojisinde anodun tasarımına göre değişen 3 çeşit DCFC sistemi vardır;

akışkan yatak, erimiş metal ve karbonat içerisinde yakıt olan sistemler. Bu sistemlerde elektrolit olarak oksijen iyonu ileten katı seramik kullanılır. Fakat bu sistemlerin anot elektrotlarının tasarımı birbirinden farklıdır. Anotla ilgili yapılan bu tasarımlar hücrenin daha verimli olmasını sağlamak ve kullanılan malzemelerin ömürlerini uzatmaya çalışılmaktadır.

#### 1.2.4.1. Akışkan Yatak Sistemli Anot

Bu tür yakıt pillerinde genellikle elektrolit olarak YSZ (yitriya ile stabilize edilmiş zirkonyum bileşiği), yakıt olarak tuz haline getirilmiş karbon kullanılmaktadır. Yakıtın (karbonun) akışkan yataktan sağlanması anot elektrotuyla arasında mesafe olmasına sebep olur. Elektrolitle doğrudan temas etmeyen karbon parçacıklarının doğrudan elektrokimyasal reaksiyonu gerçekleşmez. Temas etmeyen karbon ilk önce kimyasal reaksiyonla CO oluşturur daha sonra CO oksidasyon yoluyla gazlaştırılır. Bu reaksiyon ters Boudouard reaksiyonu (eşitlik 24) olarak bilinir. Karbonun anodun yakınına yerleştirildiği sistemlerde güç yoğunlukları anottan uzağa yerleştirilen sistemlere göre daha yüksektir. Temiz Kömür Enerji A.Ş. (CCE) tarafından tasarlanan yakıt hücresi, yakıt besleme kolaylığı ve oluşan kül bileşenlerinin karbondan ayrılma kolaylığı sağlamaktadır (Şekil 8). Fakat hücre tasarımı maliyetli ve zordur (Giddey vd., 2012).



Şekil 8. Akışkan yatak sistemli anotun yakıt hücresi tasarımı (Giddey vd., 2012).

#### 1.2.4.2. Erimiş Bir Metal İçinde Yakıt

Oksijen iyonu iletimi (elektrolitten katı yakıtta) hızlı bir şekilde gerçekleştiği için bu sistem DCFC'lerde ilgi görmüştür (Giddey vd., 2012).

Bu sistemde kullanılan metaller (kalay, demir, gümüş gibi) elektrot yüzeyinde oksitlenirler ve yakıt tarafından indirgenirler. Erimiş metallerle çalışıldığı için çalışma sıcaklığı oldukça yüksektir. Anotta erimiş halde bulunan metal yakıttan gözenekli seramik bir ayırıcıyla ayrılır. Ayırıcı kullanılması anotun yakıtla doğrudan temas etmesini önlediği için verim kayıpları meydana gelmektedir. Ayırıcının bulunması yüksek anodik polarizasyonlara yol açmaktadır. Ayırıcının gözenekli olması yalnızca gaz halinde olan yakıt türlerinin geçmesini sağlamaktadır.

#### 1.2.4.3. Erimiş Karbonat İçinde Yakıt

Geliştirilen bu teknoloji katı oksit yakıt hücresi ve erimiş karbonat yakıt hücresinin birleşimi olarak düşünülmektedir. Elektrolitin ve yakıtın katı olduğu bu sistemde anotun içinde katı yakıt erimiş karbonatla ıslatılır. Bu sistemde diğer DCFC'ler de olduğu gibi genel hücre reaksiyonları eşitlik 29 ve 32'deki gibidir .



Erimiş karbonat içindeki karbon sadece CO<sub>2</sub> ve CO' ya oksitlenmez, karbonat iyonlarıyla da elektrokimyasal reaksiyona girer. Oluşan CO<sub>2</sub> katottan gelen oksijen iyonlarıyla tekrardan reaksiyona girerek karbonat iyonlarının yenilenmesini sağlar.



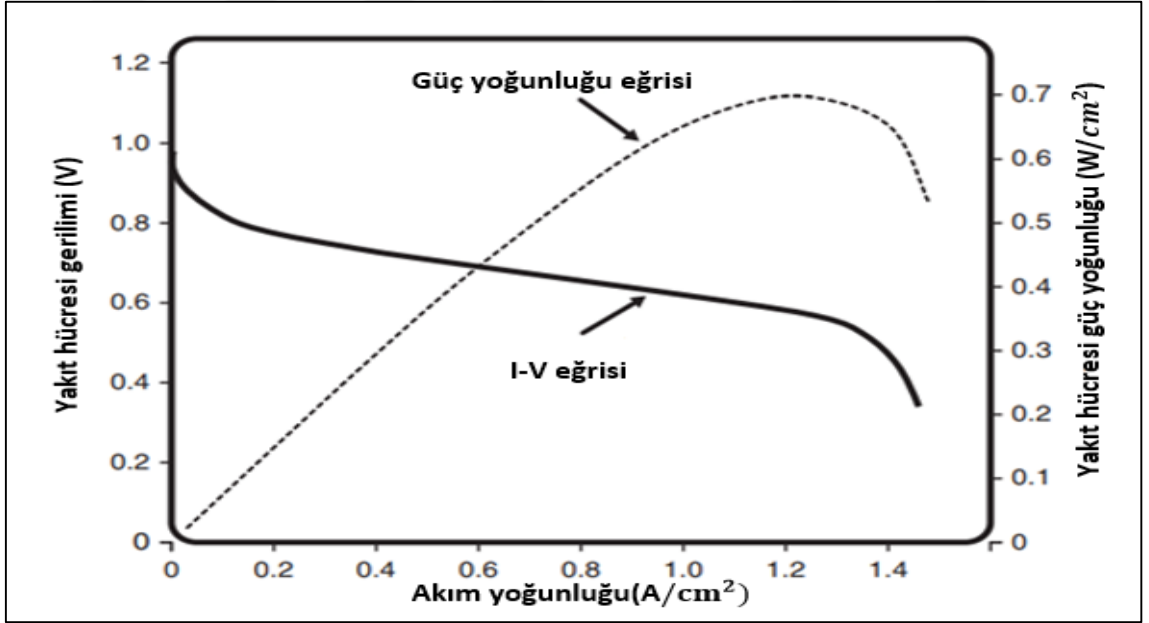
Karbonun ters Boudouard reaksiyonu (eşitlik 24) ile kimyasal olarak CO oluşabilir. CO<sub>2</sub> oluşturmak için CO oksijen iyonlarıyla elektrokimyasal reaksiyona girerek oksitlenir. Bu tip yakıt hücresi MCFC'de olduğu gibi CO<sub>2</sub> sirkülasyonuna ihtiyaç duymaz

ve katot elektrodunu erimiş karbonattan korur. Bu sistem katot taşmasını ve korozyonu önlemektedir.

### 1.3. Yakıt Pili Performansı

Yakıt hücresinin performansı akım-voltaj karakteristiklerini gösteren bir grafikte gösterilebilir. Akım voltaj eğrisi belirli bir akım çıkışı için yakıt hücresinin gerilim çıkışını göstermektedir. Güç yoğunluğu eğrisi, I-V eğrisindeki gerilimin her noktasına karşılık gelen akım yoğunluğuna çarpılmasıyla bulunmaktadır (Şekil 9). Güç yoğunluğu artan akım yoğunluğuyla beraber artar fakat bir noktadan sonra düşmeye başlar. Maksimum güç yoğunluğunun altındaki akım yoğunluklarında voltaj verimi artar fakat güç yoğunluğu azalır. Maksimum güç yoğunluğunun üzerindeki akım yoğunluklarında hem voltaj verimliliği hemde güç yoğunluğu düşer. Bir yakıt hücresindeki güç; akım ve gerilim tarafından belirlenir.

$$P = V \cdot i \quad (34)$$



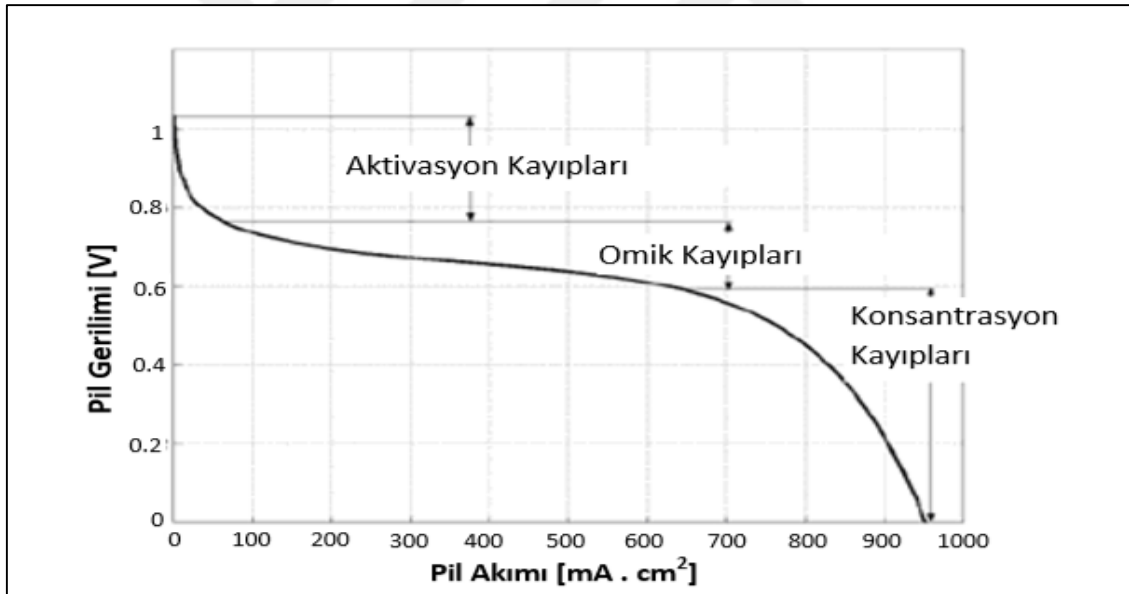
Şekil 9. Yakıt hücresinin akım-voltaj ve güç yoğunluğu eğrisi (Ryan, 2016).

Bir yakıt hücresinden sağlanan akım kullanılan yakıt miktarına bağlıdır. Yakıt pilindeki akım miktarı elektrokimyasal reaksiyonda açığa çıkan her bir elektron sayısının kulomb sayısına çarpımıyla bulunur.

Yakıt hücresinin voltaj çıkışı geri dönüşü olmayan kayıplardan dolayı termodinamik öngörülen voltaj gücünden (yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum gerilim) daha düşüktür. Hücreden ne kadar akım çekilirse kayıplar okadar büyür. Yakıt pili performansını etkileyen 3 ana kayıp vardır (Şekil 10).

Bunlar;

1. Aktivasyon kayıpları (elektrokimyasal reaksiyondan kaynaklanan kayıplar)
2. Omik kayıplar (iyonik ve elektronik iletme bağlı kayıplar)
3. Konsantrasyon kayıpları (toplu taşıma nedeniyle oluşan kayıplar)



Şekil 10. Yakıt pilinin polarizasyon eğrisi (URL-3).

Bu üç ana kayıp yakıt hücresinin I-V eğrisini etkiler. Şekil 10'da gösterildiği gibi, aktivasyon kayıpları çoğunlukla eğrinin ilk kısmını etkiler, omik kayıplar eğrinin orta kısmında en belirgindir ve konsantrasyon kayıpları I-V eğrisinin kuyruğunda en belirgindir.

Tüm kayıplar yakıt pilininden elde edilebilecek maksimum verimden çıkartılıp yakıt pili sisteminden geçen hücre gerilimi bulunabilir. Denklem 36 yardımıyla yakıt pili performansı öğrenilebilir ve sonrasında modelleme yapılabilir.

$$\eta_{\text{toplam}} = \eta_{\text{aktivasyon,an}} + \eta_{\text{aktivasyon,kat}} + \eta_{\text{ohm}} + \eta_{\text{konst,an}} + \eta_{\text{konst,kat}} \quad (35)$$

$$V_{\text{hücre}} = V_N - \eta_t \quad (36)$$

$V_N$  burada açık devre gerilimidir ve bir yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum gerilimdir. Bu gerilim Nernst eşitliği (eşitlik 37) yardımıyla bulunabilir.

$$V_N = V^0 + \frac{R' * T}{n * F'} * \ln \left( \frac{P_{O_2, \text{kat}} * P_{CO_2, \text{kat}}^2}{P_{CO_2, \text{an}}^3} \right) \quad (37)$$

Bu çalışmada  $V^0$  (standart açık devre gerilimi), doğrudan karbon yakıt pili için 1,02 volt olarak alınmıştır (Kornhauser, 2005).  $F'$  faraday sabiti,  $R'$  evrensel gaz sabiti,  $n$  anot ve katotta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan elektron sayısıdır.  $P$  ise anot ve katottaki gazların kısmi basınçlarıdır. Yukarıdaki denklemden açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiğini öğrenmek mümkündür.

### 1.3.1. Aktivasyon Kayıpları

Anot ve katotta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların hızlarına bağlı olarak değişen kayıplardır. Kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için aktivasyon enerjisinin aşılması gerekmektedir. Bu durum elektrokimyasal reaksiyonlar içinde geçerlidir. Aktivasyon polarizasyonlarını hesaplamak için Butler-Volmer (eşitlik 38) denklemini kullanılmaktadır.

$$j = j_0 \left[ \exp \left( \frac{\beta * n * F * \eta_{\text{akt}}}{R * T} \right) - \exp \left( \frac{-(1-\beta) * n * F * \eta_{\text{akt}}}{R * T} \right) \right] \quad (38)$$

Yukarıdaki denklem kullanılarak anot ve katot için ayrı ayrı kayıplar bulunabilir. Denklem de  $j$  çalışma akım yoğunluğu (transfer akım yoğunluğu),  $\beta$  yük aktarım katsayısı ( en yaygın olarak 0,5 değeri kullanılmaktadır.) ,  $n$  ise reaksiyondaki elektron sayısıdır,  $j_0$  değişim akım yoğunluğudur ( anot ve katot için ayrı ayrı bulunur).

$$j_{0,an} = \frac{R*T}{n*F*R_{ct}} \quad (39)$$

Burada  $R_{ct}$  yük transfer direncidir ve Peelen vd. (2000) tarafından regresyon analizinden elde ettiği denklem aşağıdaki gibidir.

$$R_{ct} = 30.79 + 1.48 * \exp\left(-\frac{T}{28.58}\right) \quad (40)$$

$$j_{0,kat} = j_{0,kat}^0 * (P_{CO_2})^{r1} * (P_{O_2})^{r2} \quad (41)$$

Yukarıdaki denklem de  $P_{CO_2}$ ,  $P_{O_2}$   $CO_2$ 'nin ve  $O_2$ 'nin kısmi basınçlarıdır.  $j_{0,kat}^0$  ise katot değişim akım yoğunluğunun ilk değeridir ve bir giriş parametresidir. Burada ki denklemlerden anot ve katot aktivasyon kayıpları bulunur.

### 1.3.2. Omik Kayıplar

Sistemde kullanılan elektrotların (anot ve katot) elektron akımına gösterdikleri elektriksel direnç ve elektrolitin iyonların akışına gösterdiği dirençten dolayı meydana gelen kayıplardır. Omik polarizasyon hücre içindeki dirençlerden kaynaklanmaktadır. Anot elektrotu için her bir levhadaki direnç iki kısımdan oluşmaktadır. Biri elektrolit direnci  $R_s$ , diğeri ise elektrot direnci  $R_c$  dir. Her bir levhadaki elektrolit direncini bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$R_s = \frac{D_c}{\sigma_s * \gamma * Z * \epsilon^{1.5}} \quad (42)$$

Denklem 42’de kullanılan elektrolitin iletkenliği ( $\sigma_s$ ) eşitlik 65 de kullanılan Arrhenius yasasıyla bulunabilir. Eşitlikte görüldüğü gibi iletkenlik sıcaklığa bağımlı olarak değişmektedir. Yukarıdaki denklemde y ve z her bir anot levhasının uzunluğu ve genişliğidir,  $\epsilon$  ise boşluk oranıdır. Elektrolit direnci bulunduktan sonra elektrolit fazından geçen akım aşığıdaki denklemde bulunabilir.

$$j_s = j * \left[ 1 - 2\pi * \left( \frac{x}{D_c - 1} \right) \right] \quad (43)$$

$$j_c = j * 2\pi * \left( \frac{x}{D_c - 1} \right) \quad (44)$$

$$R_c = \frac{1}{\sigma_c * b} \quad (45)$$

Elektrot direncini bulmak için kullanılan denklemdeki  $\sigma_c$ , karbonun iletkenliği, b iki karbon parçacık arasındaki çaptır ve b yüzey alanı yardımıyla bulunabilir.

$$b = \left( \frac{s}{\pi} \right) \quad (46)$$

$$s = \frac{F}{p_m} \quad (47)$$

$$F = (N_s - 1) * (F_f - F_g) \quad (48)$$

$$F_f = 1.33 * \rho_s * \pi * g * D_c^2 \quad (49)$$

$$F_g = 1.33 * \rho_c * \pi * g * D_c^2 \quad (50)$$

Yukarıdaki denklemlerde F mekanik kuvvet,  $F_f$  kaldırma kuvveti,  $F_g$  yerçekimi kuvvetidir. Anot haricindeki diğer direnç kayıpları aşığıdaki denklemlerden bulunur.

$$R_{ce} = \frac{A}{p_{O_2}^{0.67}} * \exp\left(\frac{B}{T}\right) + C_R + D * \exp\left(\frac{f}{T}\right) \quad (51)$$

Denklem 51’de ki bütün değerler Basio vd. (1999)’ nin çalışmalarından alınmıştır.

$$\eta_{ohm,an} = N_s * (j_s * R_s + j_c * R_c) \quad (52)$$



$$\eta_{ohm} = j * R_{ce} + \eta_{ohm,an} \quad (53)$$

Burada  $\eta_{ohm,an}$ , anot elektrodundaki omik kayıplardır.  $R_{ce}$ , anot elektrodu haricinde gerçekleşen direnç kayıplarıdır.

### 1.3.3. Konsantrasyon Kayıpları

Genel olarak bu kayıplar reaktantların ve oluşan ürünlerin çözünürlüğünden kaynaklanmaktadır. Reaktantların (karbon, oksijen) elektrotlarda elektrokimyasal reaksiyona girdikten sonra konsantrasyonlarını koruyamadıkları için gerilim kayıpları oluşmaktadır. Burada gazın ve yakıtın yayılımı, çözünürlükleri, erimesi, bozunması gibi faktörler kayıpları etkilemektedir.

Doğrudan karbon yakıt pillerinde karbon yakıtı anotta fazla olduğundan burada konsantrasyon kayıpları oldukça küçüktür. Aşağıdaki denklemde katot konsantrasyon polarizasyonunun hesaplanması verilmiştir.

$$\eta_{konst,kat} = \frac{R*T}{n*F'} * \ln \left( 1 - \frac{j}{j_{sınır}} \right) \quad (54)$$

Bu denklemde konsantrasyon kayıpları bir sınırlayıcı akım yoğunluğu ( $j_{sınır}$ ) yardımıyla hesaplanır.

$$j_{sınır} = n * F' * K_{CO_2} * C_{CO_2} \quad (55)$$

Yukarıdaki denklemde  $K_{CO_2}$  karbondioksitin kütle transfer katsayısıdır.  $C_{CO_2}$  ise çözünürlüğüdür.

#### 1.4. Yakıt Pili Verimi

Bir yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum elektrik işi elektrokimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişimle bulunur.

$$W_{\text{elektrik}} = -\Delta G \quad (56)$$

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad (57)$$

Burada  $\Delta G$  Gibbs serbest enerjisi,  $\Delta H$  entalpi,  $\Delta S$  entropi ve  $T$  sıcaklıktır. Bir pilin yaptığı iş, pilde olan akım miktarı ve hücrenin potansiyel farkının çarpılmasıyla bulunur (eşitlik 34). Yakıt pilindeki akım miktarı ise elektrokimyasal reaksiyonda açığa çıkan her bir elektron sayısının kulomb sayısına çarpımıyla bulunur.

Çalışma verimi aktivasyon, omik ve kütle taşıma polarizasyonları ile azalır. Bir yakıt hücresinin teorik tersinir verimi toplam serbest enerjiye ve entalpi değişimine bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\gamma_{\text{termik}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad \text{Tersinir termik verim} \quad (58)$$

$$\gamma_v = \frac{V_c}{V_n} \quad \text{Voltaj verimi} \quad (59)$$

$$\gamma_f = \frac{l_f}{l_t} \quad \text{Akım verimi} \quad (60)$$

$$\gamma_{\text{termik}} + \gamma_v + \gamma_f \quad \text{Genel verimlilik} \quad (61)$$

#### 1.5. Yakıt Pilinin Modellenmesi

Bir sistemin özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için o sistemi etkileyen faktörlerin bilinmesi ve sistemi nasıl etkilediğini bilmek gerekir. Bunun içinde bir modelleme yapmak gerekir. Yakıt pillerinin verimleri, yakıt pilinin çalışma koşulları, sıcaklık, yakıtın özellikleri, elektrolitin özellikleri, yüzey alanı, akım yoğunluğu ve

kullanılan yakıt oranına bağılı olarak değişmektedir. Eşitlik 36 modelleme için bir başlangıç noktasıdır.

## 1.6. Literatür Özeti

Bu tez çalışmasında erimiş karbonat elektrolitli doğrudan karbon yakıt pilinin optimizasyonunu ve tasarımını yapabilmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Yakıt pilinin gerilim değişimini, performansını, çalışma voltajını, güç çıkışını tahmin etmek için yapılan modelleme yardımcı olmuştur. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Liu vd. (2008), DCFC'nin performansını simule etmek için matematiksel bir model geliştirmiştir. Yaptığı modellemede kütle transferini, elektrot işlemlerini ve elektrokimyasal reaksiyon dinamiklerini dikkate almıştır. Çalışmasındaki amaç çeşitli polarizasyonları, I-V ilişkisini, güç yoğunluğu ve hücrenin verimliliğini belirlemektir. Tasarlamış olduğu yakıt pili hücresi anot akım toplayıcı, katot akım toplayıcı, katot ve elektrolit matrisinden (seramik biraz zar) oluşmaktadır. Elektrolit olarak erimiş karbonat, yakıt olarak grafit kullanmıştır. Katı karbon anot içine parçacıklar halinde beslenmiştir. Erimiş karbonat ise seramik zar içine beslenerek elektrotlara dağıtılması sağlanmıştır. Bu çalışmada yakıtın kendisi anot görevi görmüş ve anot levhalar halinde tasarlanmıştır. Hücre sıcaklığı 923-1023 K arasında ayarlanmıştır. Matematiksel modeli matlab programı kullanarak oluşturmuştur. Yakıt hücreleri için birinci parametrenin açık devre gerilimi olduğu belirtilmiştir. Hücre sıcaklığın 923 K dan 1023 K ya yükselirken açık devre voltajının yaklaşık olarak 0,015 volt azalmış olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artması anot aktivasyon polarizasyonunu azaltmıştır. Fakat katot aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarını arttırmıştır. Omik polarizasyon ise artan sıcaklığa karşı tepki göstermemiştir. Bu çalışmada karbon partikül büyüklüğü  $1 * 10^{-7}$  ile  $1 * 10^{-4}$  metre arasındadır. Karbon çapı  $1 * 10^{-5}$  ve  $1 * 10^{-4}$  m aralığında olması durumunda ohmik polarizasyon keskin bir şekilde artmıştır. Karbon parçacık çapının  $1 * 10^{-5}$  m den küçük olması durumunda ohmik polarizasyon 0,05V'tan küçük değerde çıkmıştır. Dolayısıyla karbon parçacık çapının küçük olması omik polarizasyonu azaltacağı sonucuna varılmıştır. Karbon çapının  $1 * 10^{-4}$ m den küçük ve akım yoğunluğunun 200

$A/m^2$  den küçük olduğu bölgede hücre gerilimi 0,5 volttan büyük bulunmuştur. Karbon çapının  $1 * 10^{-5}m$  den küçük, akım yoğunluğunun  $200 A/m^2$  den büyük olduğu bölgede ise hücre gerilimi 0,4-0,5 volt bulunmuştur.  $D_c > 1 * 10^{-5}$ ,  $D_c \leq 1 * 10^{-5}$ ,  $D_c = 1 * 10^{-4}m$  olduğu durumlarda güç yoğunlukları sırasıyla 150,2/ 178/ 202  $W/m^2$  bulunmuştur. Hücrenin genel verimliliğinin düşük akım yoğunluğu için %55'ten yüksek olduğu ve yüksek akım yoğunluğunda %45-50 olduğu belirtilmiştir.

Kouchachvili vd. (2011), DCFC'nin performansını değerlendirmek için bir çalışma yapmıştır. Yakıt hücresinin performansını değerlendirmek için farklı karbon kaynakları ve farklı elektrolit bileşimi kullanmıştır. Düşük sıcaklıkta daha iyi çalışacak olan elektrolitlerin doğru bileşimini bulmak için deneylerde üçlü bir tuz karışımı ( $Li_2CO_3-Na_2CO_3 - K_2CO_3$ ) kullanmıştır. İki farklı elektrolit bileşimi kullanıp bu elektrolitlerle iki hücre düzeneği oluşturmuştur. Elektrolit olarak  $E = 43,5 \text{ mol}\% Li_2CO_3-31,5 \text{ mol}\% Na_2CO_3-25 \text{ mol}\% K_2CO_3$ ,  $E_1 = E + 20wt\% Cs_2CO_3$  kullanmıştır. Sonuçlara göre E elektroliti kullanılan hücrenin geriliminin 0,67 V olduğu görülmüş ve  $20 \text{ mA/cm}^2$  lik akım yoğunluğunda  $7,5 \text{ mW/cm}^2$ 'lik güç yoğunluğu elde edilmiştir.  $E_1$  elektrolitli hücrenin geriliminin ise 1,2 V olduğu görülmüş ve  $50 \text{ mA/cm}^2$  lik akım yoğunluğunda  $25 \text{ mW/cm}^2$ 'lik güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında  $E_1$  elektrolitli hücrenin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Ayrıca yaptığı çalışmada hücrenin çalışma sıcaklığının  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  olması karbonun tamamen okside olmasını sağladığını görülmüştür.

Lee vd. (2011), çalışmasında yakıt olarak bambudan yapılmış aktif karbon kullanmış ve hücre sıcaklığını  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de tutmuştur. Elektrolit olarak erimiş karbonat kullanmıştır. Yakıt pili hücresinde anot gözenekli Ni-Al metal sac, katot ise gözenekli Ni bir malzemedir yapılmıştır. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde yakıt olarak kullanılan karbonun iki şekilde oksidasyona uğradığı belirtilmiştir. Karbonun doğrudan elektrokimyasal reaksiyona girmesi veya ilk önce kimyasal daha sonra elektrokimyasal reaksiyona girmesi şeklinde tanımlanmıştır. Yaptığı çalışmada C nun  $CO$ 'ya kimyasal olarak oksitlendiği daha sonra ise  $CO_2$ 'ye elektrokimyasal olarak oksitlendiği görülmüştür. Bunun sebebinin hücre sıcaklığından kaynaklandığı belirtilmiştir. Hücrenin

850 °C'den biraz daha düşük sıcaklığa düşürülmesi sonucunda CO'nun azalmış olduğunu ve hatta 700 °C'de tamamen yok olduğu belirtilmiştir. Ayrıca oluşturduğu sisteme yakıt olarak hem karbon hem de hidrojen beslemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda karbon yakıtın hidrojen yakıtına göre açık devre voltajının daha yüksek olduğu görülmüştür. Çizilen grafiklerde karbonun hidrojene göre daha dik bir eğriye sahip olduğu (karbon kullanılan yakıt hücresinin geriliminin daha fazla düştüğü) görülmüş ve bunun sebebinin aktivasyon polarizasyonundan ve omik kayıplardan kaynaklandığını belirtmiştir

Zhang vd. (2014), DCFC paketlenmiş bir yatak anodundan (grafit), gözenekli bir katottan ve elektrotlar arasına sıkıştırılmış erimiş karbonat elektrolitinden ( $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$ ) oluşan bir sistem ele almıştır. DCFC'nin performansını değerlendirmek için termodinamik analizler yapmıştır. Termodinamik elektrokimyasal analizleri göz önüne alarak DCFC'nin performans özelliklerini ortaya çıkarmak için hücre potansiyeli, verimlilik, güç yoğunluğu, akım yoğunluğu ve entropi üretim hızı gibi bazı performans parametreleri türetilmiştir. Analizler sonucunda aktivasyon aşırı besleme, omik aşırı besleme ve konsantrasyon aşırı besleme faktörlerinin yakıt pilinin voltaj kaybı kaynakları olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca grafit partikülünün boyutu, anodun boyutu, çalışma sıcaklığı, çalışma akım yoğunluğu, katot çalışma basıncı gibi faktörlere bağlı olduğu görülmüştür. DCFC için omik aşırı potansiyelin, akım yoğunluğu arttıkça arttığını tespit etmiştir. Aynı zamanda daha yüksek çalışma sıcaklığının genel omik aşırı potansiyeli azalttığı gözlenmiştir. Hücre sıcaklığının artması aktivasyon kayıplarını azaltmış fakat konsantrasyon kayıplarını bir miktar arttırmıştır. Çalışma sıcaklığı arttıkça hem verimliliğin hem de güç yoğunluğunun arttığı grafikler yardımıyla görülmüştür. Sonuçlara bakıldığında verimin akım yoğunluğunun artmasıyla azaldığını, akım yoğunluğunun artması ise güç yoğunluğunu bir noktaya kadar arttırdığını fakat belli bir noktadan sonra azalttığı görülmüştür. 0,293 Volt hücre geriliminde, 0,325 verim değerinde ve 1,471 W/m<sup>2</sup> K entropi üretim değerinde 210 W/m<sup>2</sup> maksimum güç yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca yaptığı modellemeyi Liu vd. (2008)'nin yaptığı modelleme ile karşılaştırmıştır.

Agarwal (2014)'in yapmış olduğu tez çalışmasında erimiş karbonat elektrolitli doğrudan karbon yakıt pili için farklı bir sistem ele almıştır. Anot ve katot elektrotları

gözenekli dolu bir yatağa (ızgara şeklinde bir yapı ) sahiptir. Katot hem elektrot hem de akım toplayıcı görevi gören delikli paslanmaz çelik elektrot levhalarını içerir. Karbon parçacıkların kendisi anot görevi görürken, delikli paslanmaz çelik levhalar akım toplayıcı görevi görür. Çalışmasında karbon yakıt erimiş karbonatla beraber anot bölmesine aşağıya doğru pompalanmış, karbondioksit, oksijen ve erimiş karbonat katot bölmesine yukarı doğru pompalanmıştır. Reaksiyonlar sonucunda oluşan karbonmonoksit ihmal edilmiştir. Bu çalışmada DCFC'nin performansını öğrenebilmek için bir matematiksel model geliştirmiş. Model anot ve katotta gerçekleşen kütle transfer ve elektrokimyasal işlemleri tanımlayan denklemler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Modelleme yapılırken MATLAB programı kullanılmıştır. Katot ve anodu ayrı ayrı değerlendirip sonra birleştirmiştir. Matematiksel denklemler kullanırken katot için 6 bağımlı değişken 1 bağımsız değişken kullanırken anot için 5 bağımlı değişken 1 bağımsız değişken kullanmıştır. Bağımsız değişkenleri anot ve katot elektrotlarının derinlikleridir. Diferansiyel denklemler yardımıyla çözümlenmelere gitmiştir. Çözümlenmelerden oluşturduğu grafikler sonucunda akım yoğunluğunun hücre gerilimini azalttığını, katottaki sıvı katı kütle transfer katsayısının artmasının hücre gerilimini artırdığını fakat anottaki kütle transferinin hücre gerilimini etkilemediğini görmüştür. Ayrıca oksijenin çözünürlüğünün, difüzyonunun ve elektrolitin iletkenliğinin artmasının hücre gerilimini artırdığını belirtmiştir.

Vutetakis vd. (2015), DCFC'de kullanılan karbon yakıtın özelliklerine göre yakıt piline olan etkisini araştırmıştır. Kömürün elektrokimyasal oksidasyonu için yeni bir yaklaşım açıklamış ve kullanılan kömür çeşitlerine göre açık devre voltajlarını değerlendirmiştir. Çeşitli karbon formlarında (Darco aktif karbon, kömür, linyit, taş kömürü, grafit ve elmas) açık devre voltajı, akım-gerilim eğrileri ve ürün gazı gelişim oranlarını bulmuştur. Elmasın ve grafitin açık devre voltajı (OCV) amorf yapıdaki karbonların OCV lerinden düşük çıkmıştır. Kullanılan karbonların akım-voltaj eğrileri sonucunda elmasın bir cevap vermediği görülmüştür. En yüksek akım yoğunluğu (-0,3 Volta 230 mA/cm<sup>2</sup>) ziftli karbondan elde edilmiştir. Diğer karbon yakıt pillerinden elde edilen akım yoğunluklarının büyüklükleri ziftli karbon>liniyit>darco>grafit>taş kömürü>elmas şeklindedir. Ziftli kömürden ve linyitten elde edilen karbonun akım yoğunluğunun fazla çıkması kimyasal reaktif özelliklerinden kaynaklandığı

düşünülmüştür. Dolayısıyla grafitin ve taş kömürünün akım yoğunluğunun düşük olması düşük kimyasal reaktif özelliklerinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Hızlı kütle taşıma, hızlı kinetik ve yüksek sıcaklık şartlarında çalışan elektrotlarda yüksek akım yoğunluğu elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca karbonun daha verimli çalışması için çalışma elektrotunun alanının genişletilmesi gerektiği belirtilmiştir

### **1.7. DCFC'lerde Karbon Yakıtı**

Doğrudan karbon yakıt pillerinde yakıt olarak katı karbon kullanılır. Katı karbon yakıtlar çok çeşitlidir. Fosil veya biyo kaynaklardan elde edilebilir. Kömür türevli kok, petrol kokleri ve biyokütle karbonizasyonundan elde edilen biyokömür gibi çok çeşitli düşük maliyetli karbonlu yakıtlar kullanılabilir. Karbon fosil yakıtların ana bileşenidir. Ucuz, depolanması ve taşınması kolay olduğu gibi ayrıca iklim değişikliğini etkilemez. Atık gibi yenilenebilir biyokütleden elde edilebilir.

Kömür ucuzdur ve bol miktarda bulunur ancak iyi bir elektriksel iletkenliğe sahip olmayıp reaktivitesi oldukça düşüktür. Kömürün düşük reaktivitesi nedeniyle yüksek bir sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Grafit maliyeti yüksek ve inert olduğundan bir karbon yakıt hücresinin gelişmesine çok az katkı sağlamıştır.

Enerji kaynağı olarak biyokütle kullanımı fosil yakıtlardan önemli ölçüde daha az karbondioksit üretir. Çünkü oluşumu doğadaki karbon döngüsünün bir parçasıdır. Biyokömür, biyokütlenin termokimyasal piroliz yöntemiyle organik yapısının karbonlaştırılmasıyla üretilir.

DCFC'lerde en son fikir biyokarbon yakıt hücresidir. Çünkü yüksek reaktivite ve elektriksel iletkenlik nedeniyle kömürden daha iyi performans alınmıştır. Literatürde biyokömür yakıtı kullanılan çalışmalar yapılmıştır. Yu vd. (2014), mısır koçanından elde edilen, Elleuch vd. (2013), badem kabuğundan elde edilen biyokömür yakıt kullanmıştır.

Elleuch vd. (2013), Yakıt olarak badem kabuğu karbonizasyonundan elde edilen biyokömür kullanmıştır. Hem erimiş karbonat hemde katı oksit yakıt pillerinin özelliklerini birleştirip kompakt bir yakıt hücresi geliştirmiştir. Hücre performansı ölçümlerinde badem kabuğu biyokömür yakıtlı yakıt hücresinden  $127 \text{ mW/cm}^2$ 'lik tepe güç yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca yakıt hücresinde aktif karbon tarafından sağlanan akım yoğunluğunun iki kat daha yüksek akım yoğunluğu elde etmiştir.

Yu vd. (2014), Yakıt olarak biyokömürün kullanıldığı bir doğrudan karbon yakıt pili çalışması yapmıştır. Çalışmasında mısır koçanı pirolizinden elde ettiği karbonu yakıt olarak kullanmıştır. Samaryum katkılı seria (SDC) ve erimiş karbonat karışımını elektrolit olarak kullanmıştır. Anot NiO ve SDC'den yapılmıştır. Elektrik üretmek, biyokömürün temiz ve verimli kullanılması hedefine ulaşmak için çalışmasını  $650-750 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de sıcaklığında tutmuştur. Sonuçlarda  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $1,05 \text{ V}$   $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $0,9 \text{ V}$  açık devre voltajı bulmuştur.  $700^\circ\text{C}$  de  $237 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda  $113 \text{ mW/cm}^2$ ,  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $340 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda  $185 \text{ mW/cm}^2$  maksimum güç yoğunluğu elde etmiştir.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Yakıt Pili Modelinin Geometrisi

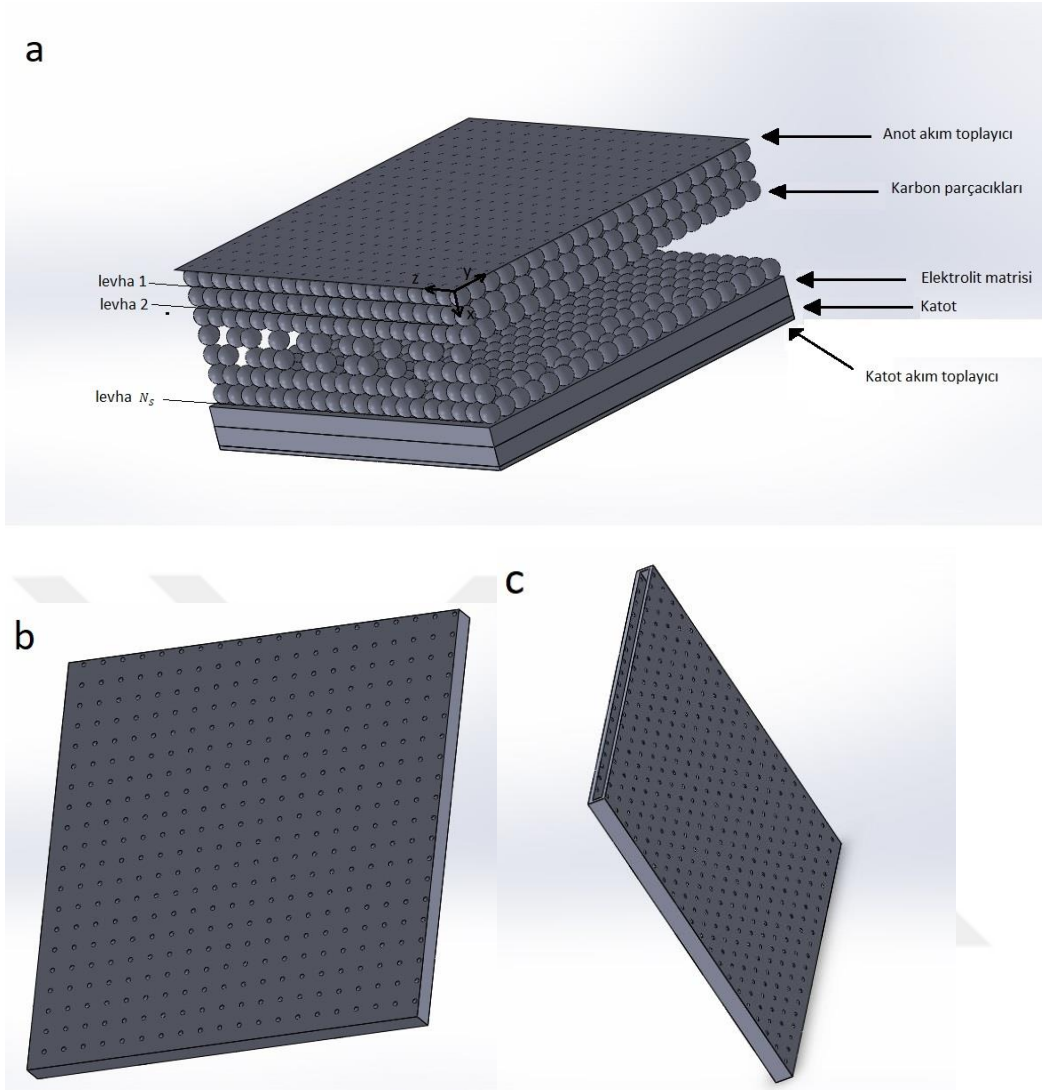
DCFC modeli anot akım toplayıcı, elektrolit matrisi, katot ve katot akım toplayıcıdan oluşmaktadır. Şekil 11'de DCFC'nin üç boyutlu görüntüsü verilmektedir. Bu model Liu vd. (2008)' in çalışması referans alınarak tasarlanmıştır. Anot yatağının uzunluğu  $y$ , genişliği  $z$  ve yüksekliği  $x$  tir. Bu çalışmada  $y$  ve  $z$   $1 * 10^{-2}m$   $x$  ise  $1 * 10^{-7} - 1 * 10^{-3}m$  aralığındadır. Anot yatağının yüksekliği karbon çapına ve sayısına bağlıdır. Şekil 11(a)'da görüldüğü gibi anot elektrotu levhalardan oluşmaktadır.  $X$  yönünde bulunan her bir karbon parçacığı bir levha olarak düşünülmüştür. Levhaların sayısı yatak yüksekliğine ve karbon çapına bağlı olarak aşağıdaki denklemden bulunabilir.

$$N_s = \frac{x}{D_c} \quad (62)$$

Burada  $D_c$  karbon çapı,  $x$  ise anot elektrodunun yüksekliğidir. Her bir levhada bulunan karbon parçacıklarının sayısı  $N_1$ , anot yatağının uzunluğu  $y$  ve genişliği  $z$  tarafından bulunur.

$$N_1 = \frac{1,14*y*z}{D_c^2} \quad (63)$$

Şekil 11(b)'de katot elektrodunun gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Elektrodun gözenekli olması elektrolitten ve elektrodun çözünmesinden kaynaklanan kirleticilerin dışarı atılmasında kolaylık sağlar. Şekil 11(c)'de ise elektrolit matrisi görülmektedir. Elektrolit matrisi gözenekli bir yapıya sahip olup seramik bir zardan meydana gelmektedir. Elektrolit matris malzemesi seramik  $LiAlO_2$  olup  $0,5 * 10^{-3}m$  kalınlığında gözenekli zardır. Erimiş karbonat, elektrolit matrisinin içine beslenip buradan elektrotlara doğru dağılmaktadır.



**Şekil 11.** DCFC sisteminin (a), katot elektrodunun (b), elektrolit matrisinin (c) 3 boyutlu görünümleri.

Model tasarımı gerçekleştirilen DCFC’de grafit karbonu ve biyokütleden elde edilen karbonize materyal olan biyokömürün yakıt pili performanslarına etkileri araştırılmıştır.

## 2.2. Elektrolitin Özellikleri

Elektrolitler karbon yakıtın reaksiyonu sonucu meydana gelen elektronların geçişine izin vermeyen fakat iyonların geçişine izin veren bir yapıya sahiptir. Erimiş karbonat elektrolitin yüksek sıcaklıkta iletkenliği artmaktadır. Sıvı elektrolit kullanılması

katı yakıt kullanan bu yakıt hücresinde yakıtın ilavesini kolaylaştırır ve karbon parçacıklarının taşınmasına izin verir. Karbonun yoğunluğu erimiş karbonatinkine yakın olduğundan parçacıklar kolayca sürüklenebilir. Erimiş karbonatlar anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlarla tüketilmez. Bu tip elektrolit kullanılan sistemlerde sorun, yakıt hücrelerinin ömrüdür. Bunun sebebi de elektrolitin tükenmesi değil, elektrodun zamanla korozyona uğramasıdır.

Alkali karbonat karışımının yoğunluğu 680-1060 K sıcaklıkları aralığında aşağıdaki Arşimet tekniği kullanılarak ölçülebilir (Janz vd., 1979). Bu çalışmada kullanılan erimiş karbonat eriyiğinin (Li, Na, K)  $\text{CO}_3^{2-}$  mol yüzdeleri sırasıyla %43, %31, %25 şeklindedir.

$$\rho = 2512,8 - 0,54405 * T \quad (\text{kg/m}^3) \quad (64)$$

$(\text{LiNaK})_2\text{CO}_3$  eriyiğinin iletkenliği 670-1000K sıcaklık aralığında aşağıdaki denklemden bulunabilir (Janz vd., 1979).

$$\sigma = A * \exp\left(-\frac{E}{R*T}\right) \quad (1/\text{ohm*cm}) \quad (65)$$

Burada orantı sabiti  $A = 83,8192$  (1/ohm\*cm), eşik enerjisi  $E = 7385$  (kal/ohm) değerindedir.

### 2.3. Elektrotların Özellikleri

Anot elektrotu paketlenmiş bir dolu yatak modelindedir. Katot elektrotu ise gözenekli bir yapıya sahiptir. Elektrolit olarak erimiş karbonat kullanılması karbonu anot olarak kullanmayı mümkün kılmaktadır. Diğer katı elektrotlarla karşılaştırıldığında birim hacim başına daha büyük temas alanı sağlar. Katı elektrolit içeren yakıt hücrelerinde elektrolitte biriken kirleticiler hücre arızasına neden olabilir. Bu sistemde elektrolitten ve elektrodun korozyonundan kaynaklanan kirleticiler yan bir arıtma sistemine gerek duymadan, gözenekli yatak hücresi tarafından elektrolitin boşaltılması şeklinde

tasarlanabilir. Sistemin gözenekli olmasından dolayı difüzyon kayıpları azalır. Bu tür tasarımlarda elektrolit katmanının oldukça ince olması gerekmektedir aksi takdirde iyon birikmesi, derişim polarizasyonları artabilir böylece direnç kayıpları da artmış olur. Elektrolit beslenen matris aralığı bu sistemde  $0,45 * 10^{-3}m$  olarak tasarlanmıştır. Şekil 11’de yatay gösterimi verilen sistem çalıştığıında dikey konumlandırılmaktadır.

#### **2.4. Matlab Modellemesi**

Bu tez çalışmasında erimiş karbonat elektroliti kullanılan ve tasarımı Şekil 11’de verilen DCFC performansı modelleme ile belirlenmiştir. Yakıt pilinin verimini etkileyen faktörler bulunmuş ve bunların yakıt pili üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Yakıt pili modellemesi için MATLAB (R2017b) programı kullanılmıştır. Modelleme ile yakıt pilinin verimini etkileyen aktivasyon, omik ve konsantrasyon polarizasyonları hesaplanmıştır. Daha sonra bu tasarımla oluşturulan DCFC’nin hücre potansiyeli, kayıplar göz önüne alınarak bulunmuştur. Kullanılan denklemler Tablo 2’de, parametreler ise Tablo 3’de verilmiştir.

#### **2.5. Modellemede Yapılan Varsayımlar**

Tasarlanan yakıt pilinin performansının teorik olarak belirlenmesinde yapılan kabuller aşağıda verilmiştir.

- Sistem kararlı koşullarda çalışmaktadır.
- DCFC’ de kullanılan yakıtın kendisi anot görevi görmektedir.
- Elektrolit matrisi gözenekli seramik bir zardan oluşur.
- Katot lityum katkılı NiO bazlı gözenekli bir yapıya sahiptir.
- Yakıt olarak kullanılan katı karbon, parçacıklar halinde anoda beslenir daha sonra erimiş karbonat elektrolitle ıslatılır.
- Karbon parçacığının anotta fazla miktarda bulunduğu varsayılır ve bundan dolayı anotta konsantrasyon kayıpları ihmal edilir.

- Burada kullanılan karbon parçacıklarının sert bir küre gibi davrandığını ve basit bir altıgen desene sahip olduğu varsayılmaktadır.
- Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşabilecek olan CO ihmal edilmiştir
- Bu çalışmada katot için peroksit mekanizmasına (eşitlik 66-69) dayalı bir model seçilmiştir.
- Bu sistemin çalışma akım yoğunluğu 0-1000 A/m<sup>2</sup>, hücre sıcaklığı ise 923-1023 K arasında kabul edilmiştir.
- DCFC atmosferik basınçta çalışır ve katotta elektrokimyasal reaksiyonlar için hava kullanılmıştır.
- Konsantrasyon polarizasyonu için Fick yasası, omik polarizasyon için Ohm kanunu, aktivasyon polarizasyonu için Butler-Volmer denklemi (eşitlik 38) kullanılmıştır.

## 2.6. Katot Kinetiği

Erimiş karbonat elektrolitli yakıt hücreleri için katottaki reaksiyon kinetiği mekanizması oldukça karmaşıktır. 1970'lerde Appedy ve Nicholson katot reaksiyon kinetiğini öngörmek için iki model (peroksit ve superoksit mekanizması) geliştirmiştir (Agarwal, 2014).

Peroksit mekanizması:



**Tablo 2.** Modellemede kullanılan önemli denklemler.

Açıklama	Kullanılan formül	Referans
Açık devre gerilimi ( $V_N$ )	$V_N = V^0 + \frac{R' * T}{n * F} * \ln \left( \frac{P_{O_2, kat} * P_{CO_2, kat}^2}{P_{CO_2, kat}^3} \right)$	(Liu vd., 2008)
Transfer akım yoğunluğu ( $j$ ) (Butler – Volmer denklemi)	$j = j_0 \left[ \exp \left( \frac{\beta * n * F * \eta_{akt}}{R * T} \right) - \exp \left( \frac{-(1 - \beta) * n * F * \eta_{akt}}{R * T} \right) \right]$	(Liu vd., 2008)
Anot haricindeki diğer direnç kayıpları ( $R_{ce}$ )	$R_{ce} = \frac{A}{p_{O_2}^{0.67}} * \exp \left( \frac{B}{T} \right) + C_R + D * \exp \left( \frac{f}{T} \right)$	(Bosio vd., 1999)
Yük transfer direnci ( $R_{ct}$ )	$R_{ct} = 30.79 + 1.48 * \exp \left( -\frac{T}{28.58} \right)$	(Peelen vd., 2000)
Anot değişim akım yoğunluğu	$j_{0, an} = \frac{R * T}{n * F * R_{ct}}$	(Liu vd., 2008)
Katot değişim akım yoğunluğu	$j_{0, kat} = j_{0, kat}^0 * (P_{CO_2})^{r1} * (P_{O_2})^{r2}$	(Liu vd., 2008)
Anotta elektrolit direnç kayıpları	$R_s = \frac{D_c}{\sigma_s * y * z * \epsilon^{1.5}}$	(Liu vd., 2008)
Anotta elektrot direnç kayıpları	$R_c = \frac{1}{\sigma_c * b}$	(Liu vd., 2008)
Elektrolitin iletkenliği ( $\sigma$ )	$\sigma = A * \exp \left( -\frac{E}{R' * T} \right)$	(Kornhauser, 2005)

**Tablo 3.** Yakıt pili modellemesinde kullanılan parametreler.

Parametreler	Değer	Birim	Referans
Faraday sabiti (F)	96487	Coulomb/mol	
Gaz sabiti (R)	8,314	J/mol.K	
Hücre sıcaklığı (T)	973	K	
Hücre basıncı (P)	1	atm	
Yerçekimi ivmesi (g)	9,8	m/s <sup>2</sup>	
Anot yatağın yüksekliği (x)	$10^{-7} - 10^{-3}$	m	
Anot yatağın uzunluğu (y)	$1 * 10^{-2}$	m	
Anot yatağın genişliği (z)	$1 * 10^{-2}$	m	
Katot yatak kalınlığı	$0,5 * 10^{-3}$	m	
Karbon parçacık çapı ( $D_c$ )	$10^{-7} - 10^{-4}$	m	
Matris kalınlığı	$0,5 * 10^{-3}$	m	
CO <sub>2</sub> 'nin mol yüzdesi ( $y_c$ )	% 20		
Anot yatağın boşluk oranı ( $\epsilon$ )	0,396		(Liu vd., 2008)

**Tablo 3 (devam).** Yakıt pili modellemesinde kullanılan parametreler.

Parametreler	Değer	Birim	Referans
CO <sub>2</sub> nin kütle transfer katsayısı(K <sub>CO<sub>2</sub></sub> )	3,5 * 10 <sup>-2</sup>	m/s	(Liu vd., 2008)
Katottaki değişim akım yoğunluk denklemi için CO <sub>2</sub> nin kısmi basıncının gücü(r <sub>1</sub> )	-1,250		(Liu vd., 2008)
Katottaki değişim akım yoğunluğu için O <sub>2</sub> nin kısmi basıncının gücü(r <sub>2</sub> )	0.375		(Liu vd., 2008)
Grafitin elektriksel iletkenliği	1,6* 10 <sup>5</sup>	S/m <sup>2</sup>	(Liu vd., 2008)
Konsantrasyondan bağımsız değişim akım yoğunluğu(i <sub>0,kat</sub> <sup>0</sup> )	500	A/m <sup>2</sup>	(Liu vd., 2008)
Görünen aktivasyon enerjisi(E <sub>a</sub> )	2,191 * 10	J/mol	(Liu vd., 2008)
Denklemler için üstel faktör(σ <sub>s</sub> <sup>0</sup> )	2,322 * 10	S/m <sup>2</sup>	(Liu vd., 2008)
Yük aktarım katsayısı(β)	0,5		(Liu vd., 2008)
Omik direnç kayıpları için kinetik parametre (A)	1.38 * 10 <sup>-7</sup>	Ω m <sup>2</sup> Pa <sup>0.67</sup>	(Bosio vd., 1999)
Omik direnç kayıpları için kinetik parametre (B)	11400	K	(Bosio vd., 1999)
Omik direnç kayıpları için kinetik parametre (C <sub>R</sub> )	0,348*10 <sup>-4</sup>	Ωm <sup>2</sup>	(Bosio vd., 1999)
Omik direnç kayıpları için kinetik parametre (f)	6596	K	(Bosio vd., 1999)
Omik direnç kayıpları için kinetik parametre (D)	4,8*10 <sup>-8</sup>	Ωm <sup>2</sup>	(Bosio vd., 1999)
Standart açık devre potansiyeli(V <sup>0</sup> )	1,02	V	(Kornhauser, 2005)
Karbon parçacık yoğunluğu(ρ <sub>c</sub> )	1201	kg/m <sup>3</sup>	(Kornhauser, 2005)
CO <sub>2</sub> nin yoğunluğu(ρ <sub>co2</sub> )	0,55	kg/m <sup>3</sup>	(Kays ve Crawford, 1980)
O <sub>2</sub> nin yoğunluğu(ρ <sub>o2</sub> )	0,40	kg/m <sup>3</sup>	(Kays ve Crawford, 1980)
Elektrolit yoğunluğu(ρ <sub>L</sub> )	1983,4	kg/m <sup>3</sup>	(Janz vd., 1979)
Elektrolit iletkenliği(σ <sub>s</sub> )	183,9	1/Ω*m	(Janz vd., 1979)
Gibbs enerji değişimi(ΔG)	94,05	kcal/mol	(Giddey vd., 2012)
Entalpi değişimi (ΔH)	94,26	kcal/mol	(Giddey vd., 2012)

Bu tez çalışmasının amacı, yakıt olarak yenilenebilir karbon kaynağı kullanıldığı durumda DCFC'nin performansının grafitin yakıt olarak kullanıldığı duruma göre nasıl değiştiğinin belirlenmesidir.

Yenilenebilir karbon, biyokütlenin pirolizi ile elde edilir. İnert atmosfer koşullarında veya sınırlı hava içeren koşullarda biyokütlenin ısıtılması ile biyokütlerdeki uçucu maddeler uzaklaşır ve geriye karbonize materyal biyokömür kalır. Bu da yenilenebilir karbon kaynağıdır. Yu vd. (2014), göstermiştir ki yenilenebilir karbon kaynağı DCFC'lerde yakıt olarak uygulanabilir.



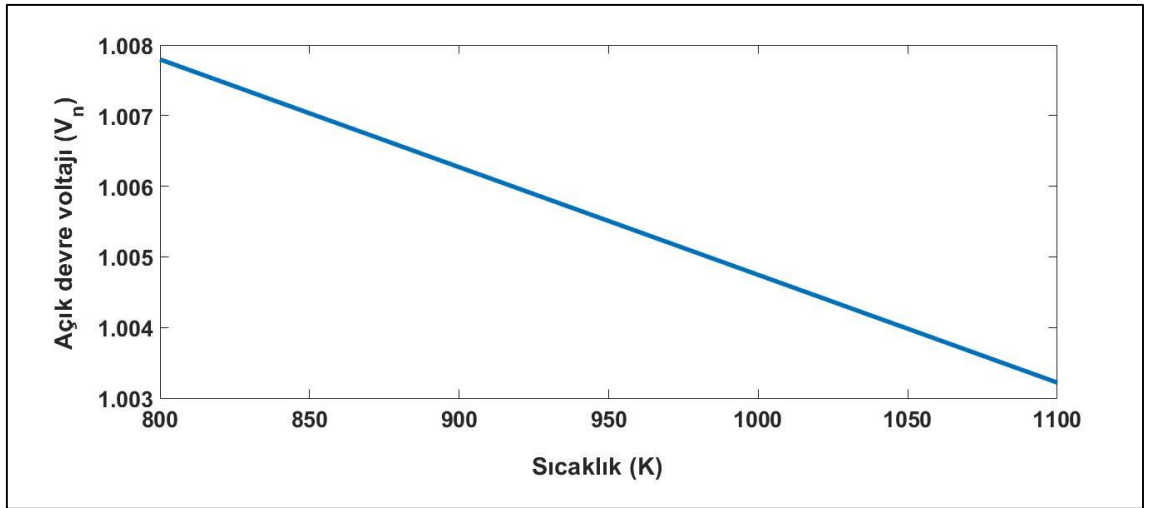


### 3. BULGULAR

#### 3.1. DCFC Polarizasyon Eğrileri

Yakıt pillerinin performansını değerlendirmede kullanılan en önemli araçlardan birisi polarizasyon eğrileridir. Bu eğrilerin amacı yakıt pili geriliminin ortalama akım yoğunluğuna bağlı olarak nasıl değiştiğini tespit etmektir.

Polarizasyon eğrilerini incelemeye başlamadan önce bir yakıt pilinden üretilebilecek maksimum gerilimin (açık devre potansiyeli) bulunması gerekir. Maksimum gerilim Nernst denklemi (eşitlik 37) yardımıyla bulunabilir. Maksimum gerilim hücre sıcaklığına, oksijen ve karbondioksitin kısmi basınçlarına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 12’de açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Burada sıcaklık aralığı 800-1100 K, oksijen ve karbon dioksitin kısmi basınçları sırasıyla 0,33 ve 0,67 olarak alınmıştır. Nernst denkleminde bulunan sonuca göre sıcaklık değeri 800’ den 1100 K’e yükseldikçe açık devre gerilimi azalmaktadır.

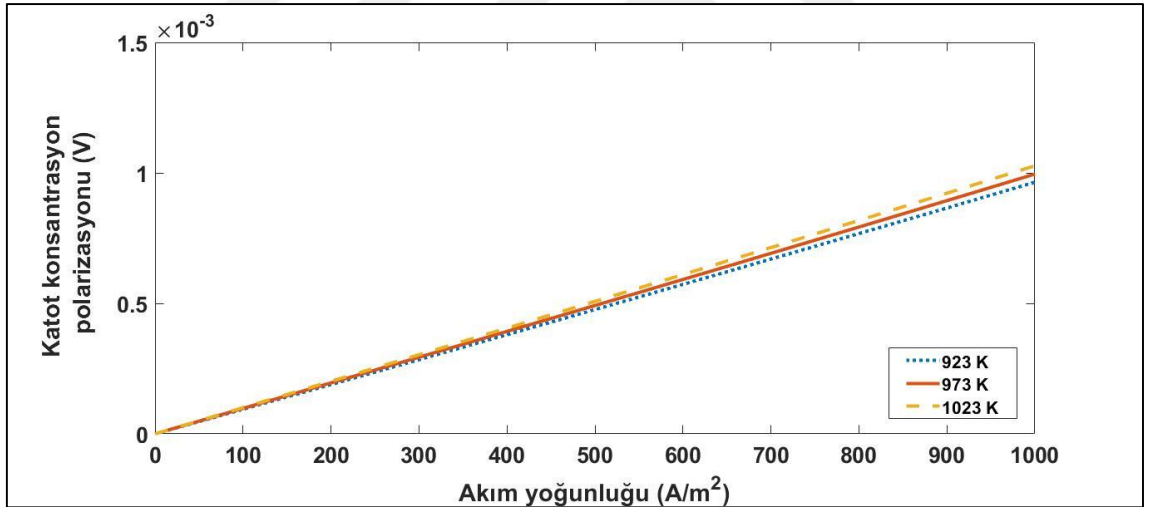


Şekil 12. Bir yakıt pilinde sıcaklığın açık devre potansiyeline etkisi.

### 3.2. Sıcaklığın Doğrudan Karbon Yakıt Pili Üzerindeki Etkisi

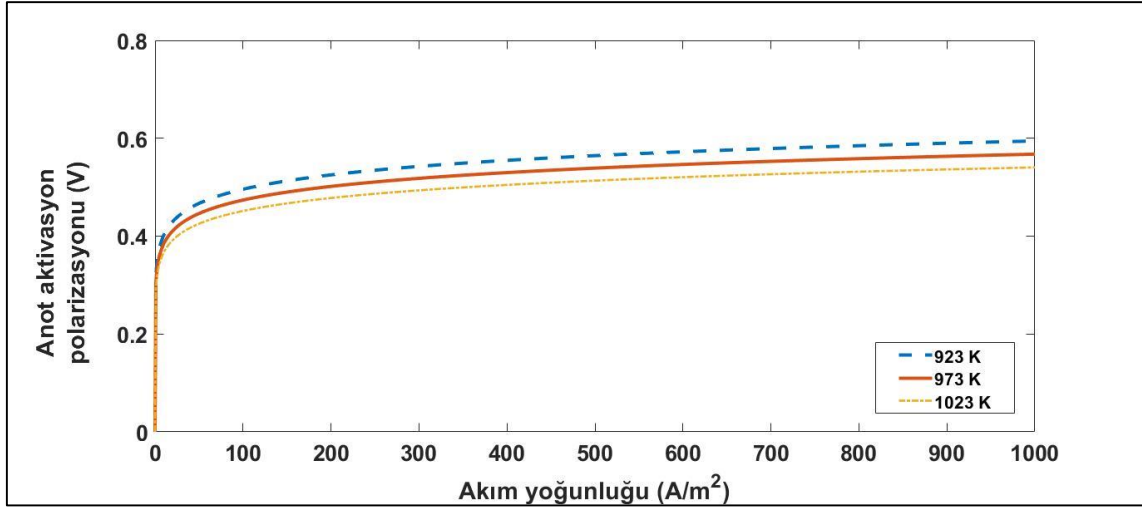
Hangi tür yakıt pili olursa olsun yakıt pili gerilimi ortalama akım yoğunluğu ile ters orantılıdır. Hücre geriliminin artması yakıt pilinden elde edilecek verimin yükselmesine neden olur. Yakıt pillerinin maksimum gerilimi Gibbs serbest enerjisine bağlıdır. Gibbs enerjisi de sıcaklığa bağlı olarak düşmektedir. Bu yüzden sıcaklık arttıkça yakıt hücresi gerilimi artmaktadır. Grafit yakıtı kullanıldığında sıcaklığın yakıt hücresindeki kayıplara etkileri Şekil 13-16' da verilmektedir.

Şekil 13'de sıcaklığa ve akım yoğunluğuna bağlı olarak katottaki konsantrasyon kaybı görülmektedir. Sıcaklık ve akım yoğunluğu arttıkça katot konsantrasyon kayıpları da artmaktadır. Bu çalışmada anotdaki konsantrasyon kayıpları ihmal edilmiştir. Çünkü anot bölgesinde her zaman karbon fazlalığı vardır.



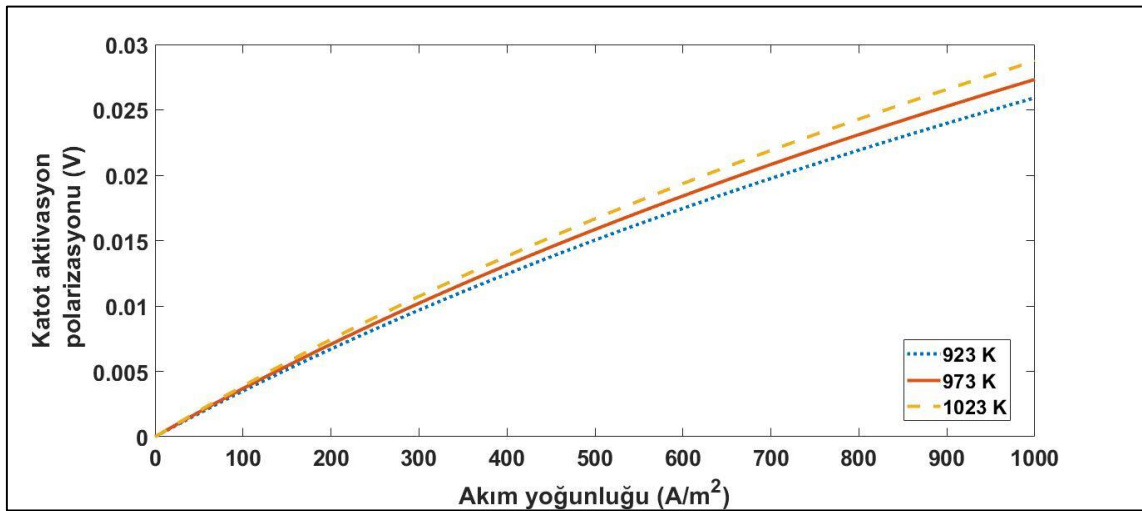
Şekil 13. Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda (923,973,1023 K) katot konsantrasyon polarizasyonuna etkisi.

Şekil 14'de anot aktivasyon kaybının sıcaklık ve akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla aktivasyon kaybı azalmaktadır. Akım yoğunluğunun artmasıyla aktivasyon kaybı artmaktadır. Aktivasyon kaybı akım yoğunluğunun 0-100 A/m<sup>2</sup> değerleri arasında oldukça artış gösterirken 100 A/m<sup>2</sup>'den büyük değerlerde hafif bir seyir göstermektedir.



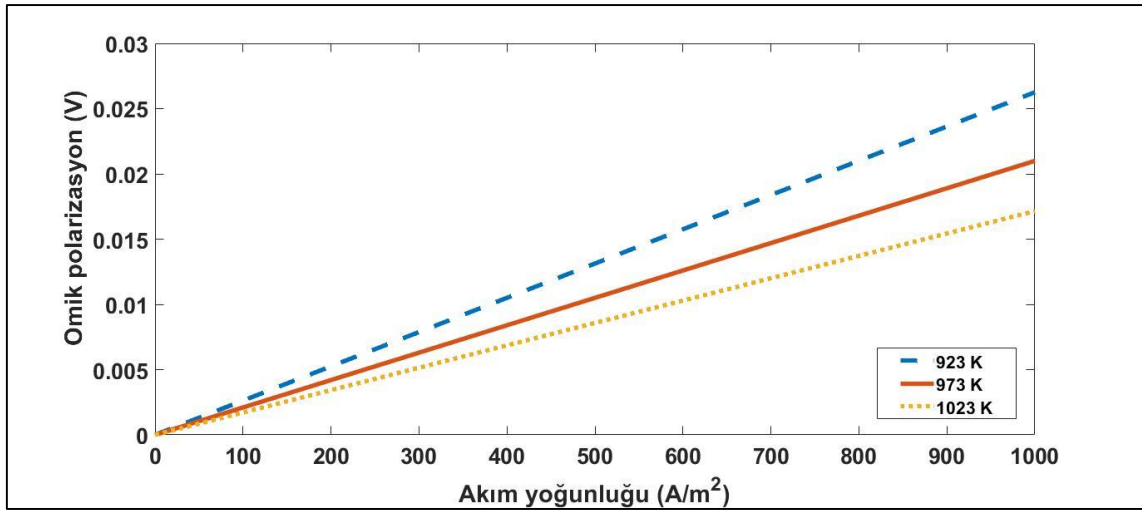
Şekil 14. Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda (923, 973, 1023 K ) anot aktivasyon polarizasyonuna etkisi.

Şekil 15’de sıcaklık ve akım yoğunluğuna bağlı olarak katotta meydana gelen aktivasyon kayıpları görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla katotta aktivasyon kayıpları artmaktadır. Katot aktivasyon kayıpları 800 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 923, 973 ve 1023 K sıcaklık değerlerinde sırasıyla 0,021/0,023/0,024 volt bulunmuştur. Bu çıkan değerlere bakıldığında sıcaklığın yaklaşık olarak %10 dan daha az bir etkisi olduğu söylenebilir. Katottaki maksimum aktivasyon kaybı 1000 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 1023 K sıcaklıkta 0,028 volt olarak bulunmuştur.



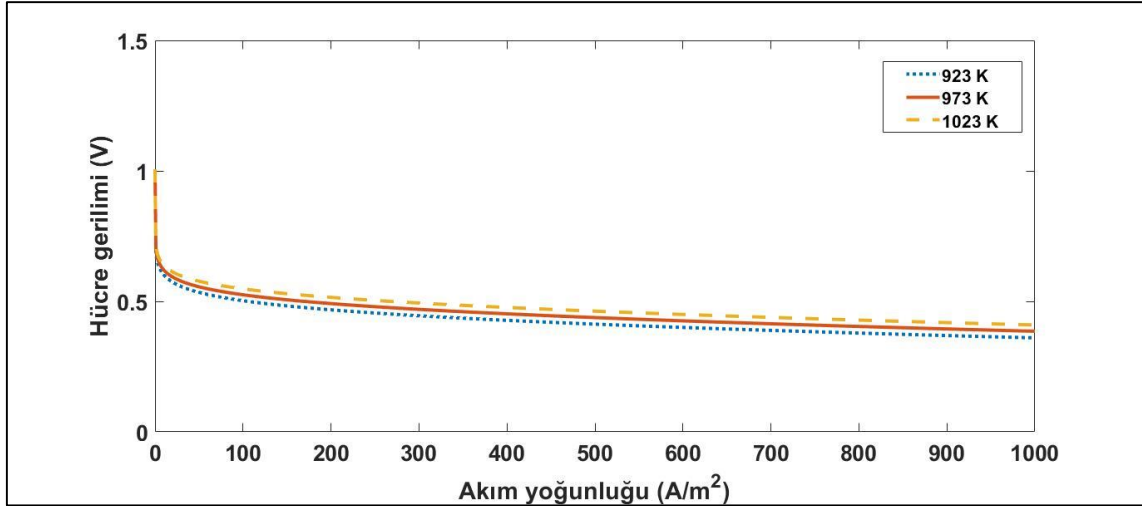
Şekil 15. Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda ( 923, 973, 1023 K) katot aktivasyon polarizasyonuna etkisi.

Şekil 16’da omik kayıpların akım yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak değişimi görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla direnç kayıpları azalmaktadır. Bunun en büyük sebebi elektrolitin iletkenliğidir. Çünkü sıcaklık arttıkça elektrolitin iletkenliği artmaktadır. Elektrolitin iletkenliğinin artmasıyla elektrot direnci azalmaktadır. Elektrolit direnci katottan anota geçen iyonlara karşı gösterilen dirençtir. Dolayısıyla elektrolit direncinin azalması hücrenin verimini arttıracaktır. Sıcaklığın omik polarizasyona etkisi %10 dan fazla etkilediği şekil yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 16. Akım yoğunluğunun farklı sıcaklıklarda (923,973,1023 K) omik polarizasyona etkisi.

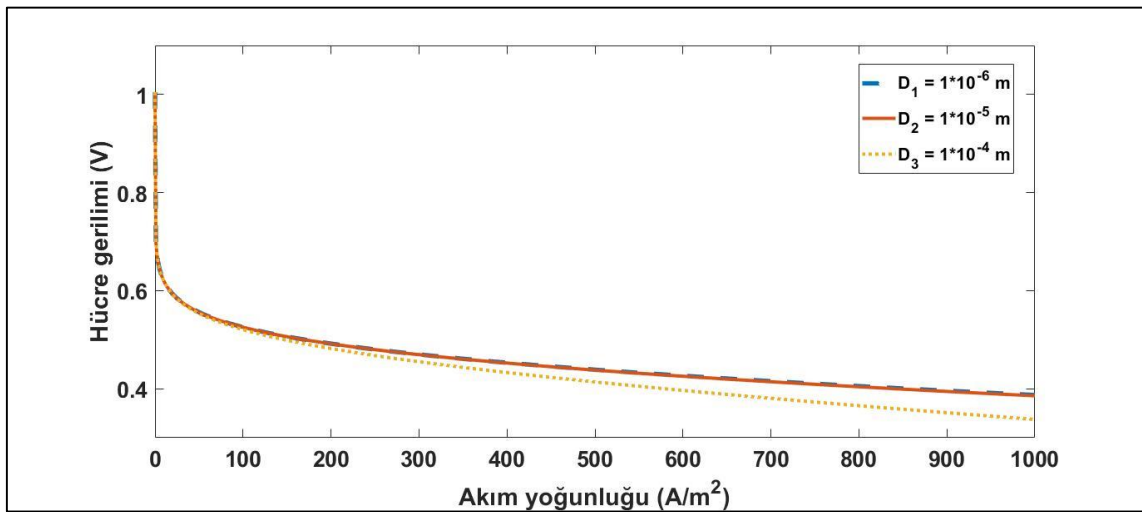
Şekil 17’de grafit yakıtı kullanan doğrudan karbon yakıt pilinin sıcaklığa ve akım yoğunluğuna bağlı olarak hücre geriliminin değişimi görülmektedir. Yukarıdaki şekillerden elde edilen tüm kayıplar hücre gerilimini azaltmaktadır. Bu kayıplar açık devre geriliminden (maksimum hücre gerilimi) çıkartılıp yakıt pili hücresinin gerilimi bulunmuştur. Hücre gerilimi akım yoğunluğunun artmasıyla azalmıştır. Çünkü akım yoğunluğunun artması hücredeki toplam kaybı (aktivasyon, omik, kansantrasyon) arttırmıştır.



Şekil 17. Doğrudan karbon yakıt pilinin akım yoğunluğu hücre gerilimi grafiği.

### 3.3. Karbon Çapının Yakıt Pili Performansına Etkisi

Doğrudan karbon yakıt pillerinde anot bölmesine beslenen karbonun yoğunluğu, iletkenliği, çapı omik polarizasyonu etkilediği için yakıt pili performansını da etkilemektedir. Bu çalışmada karbon parçacık çapı  $1 * 10^{-7} - 1 * 10^{-4}$  m aralığında dır. Karbonun büyüklüğü arttıkça hücre gerilimi akım yoğunluğuna karşı azalmaktadır (Şekil 18). Karbon parçacık çapına  $1 * 10^{-4}$  m'den büyük bir değer verildiği zaman anot polarizasyonu daha ciddi bir hal almıştır fakat bu değer yapılan bu model kapsamında değildir.

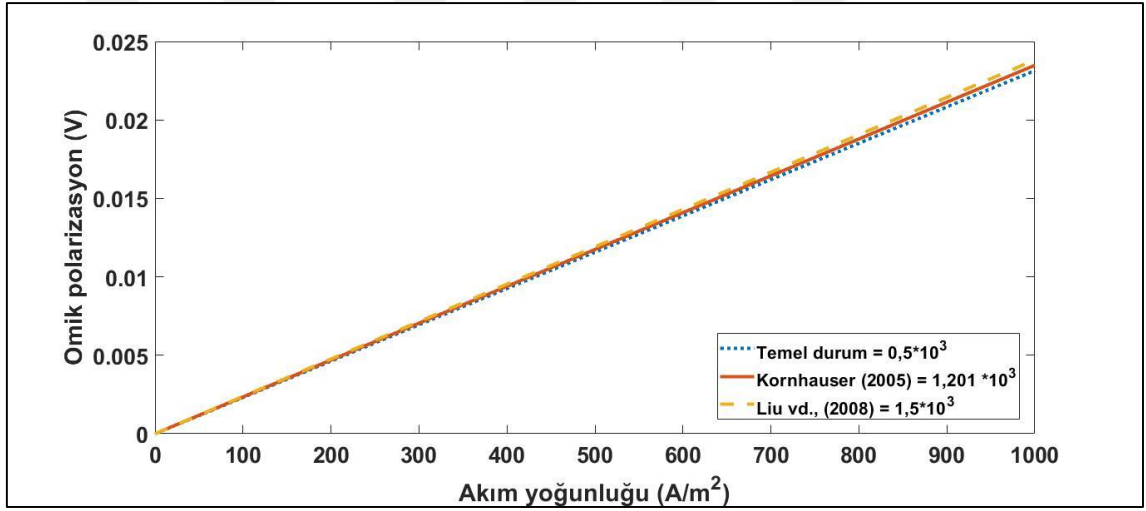


Şekil 18. Farklı karbon çaplarında yakıt pilinin akım yoğunluğuna göre gerilim değişim grafiği ( $D_1 = 1 * 10^{-6}$ ,  $D_2 = 1 * 10^{-5}$ ,  $D_3 = 1 * 10^{-4}$  m).

### 3.4. Karbonun Yoğunluğunun ve İletkenliğinin Direnç Kayıplarına Etkisi

DCFC’de kullanılan karbon kaynağının polarizasyona en büyük etkisi kullanılan karbonun yoğunluğu ve iletkenliği ile olmaktadır.

Elektrolit faz direnci karbonun yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 19’da farklı çalışmalar da kullanılan karbonların yoğunlukları kullanılmıştır. Kullanılan yoğunlukların değerleri birbirine çok yakındır. Grafiğe bakıldığında direnç kayıplarında çok hafif bir değişiklik görülmektedir. Karbon parçacığının yoğunluğunun artması kayıpları bir miktar azaltmıştır.



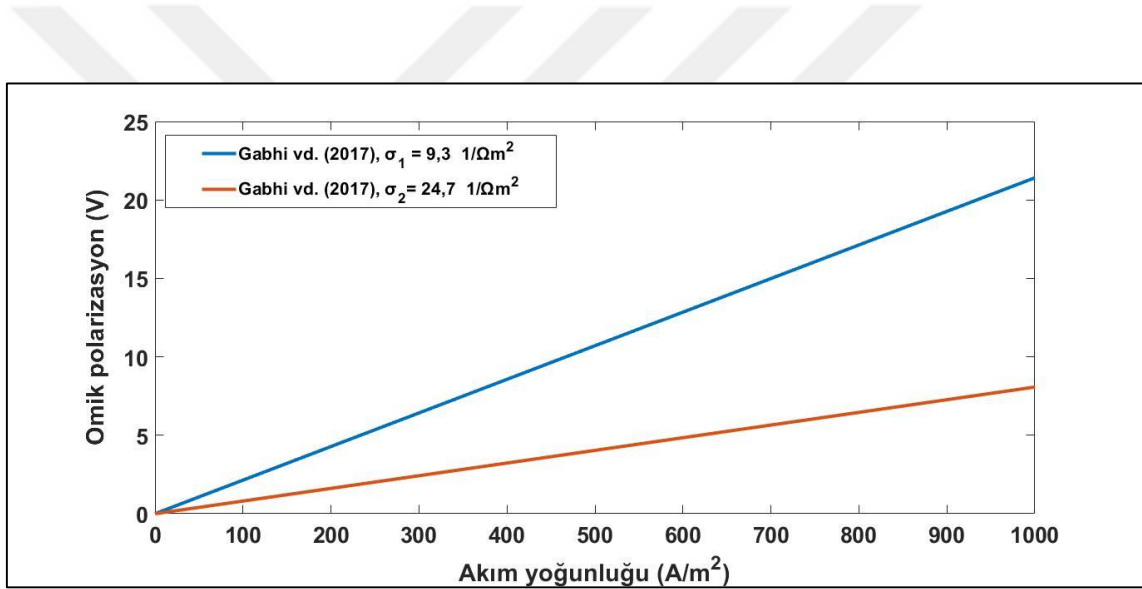
Şekil 19. Farklı yoğunluktaki karbon parçacıklarının omik polarizasyona etkisi (Temel durum  $0,5 * 10^3$ , Liu vd.  $1,5 * 10^3$ , Kornhauser  $1,201 * 10^3$  kg/m<sup>3</sup>).

Karbonun iletkenliği yakıt pillerinde direnç kayıplarını etkilemektedir. Farklı iletkenlik değerleri Gabhi vd. (2017)’ nin biyokömürlerin iletkenlikleri hakkında yapmış olduğu çalışmasından ve Liu vd. (2008) , yapmış olduğu çalışmadan referans alınmıştır (Tablo 4). Gabhi çalışmasında 3 farklı numune (meşe ağacı, ceviz ağacı ve şeker akça ağacından elde ettiği karbon ) kullanmıştır. Çalışması sonucunda karbonun içeriğinin ağırlıkça daha fazla olması iletkenliğinin daha iyi olmasını sağladığını ve içeriğindeki O/C ve H/C oranının düşmesi iletkenliği artırdığını görmüştür. Şekil 20’ye bakıldığında biyokömür kullanılan bir yakıt hücresinde omik kayıpların çok yüksek çıktığı

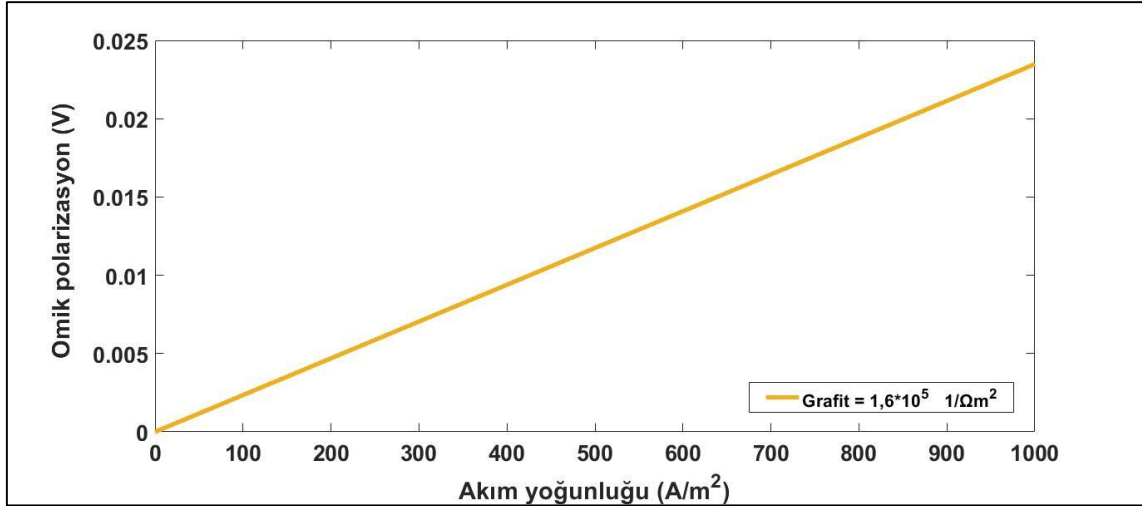
görülmektedir. Grafitin iletkenliğinin yüksek olması yakıt hücresindeki omik kayıpları azaltmıştır (Şekil 21).

**Tablo 4.** Yakıt pilinde kullanılan karbon materyalleri.

Elektiriksel iletkenlik	Yakıt	Değer	Referans
$\sigma_1$	Biyokömür	$9,3 * 10^{-5} 1/\Omega m$	(Gabhi vd., 2017)
$\sigma_2$	Biyokömür	$24,7 * 10^{-5} 1/\Omega m$	(Gabhi vd., 2017)
$\sigma_3$	Grafit	$1,6 * 10^5 1/\Omega m^2$	(Liu vd., 2008)
$\sigma_4$	Biyokömür	$399,67 1/\Omega m$	(Gabhi vd., 2017)

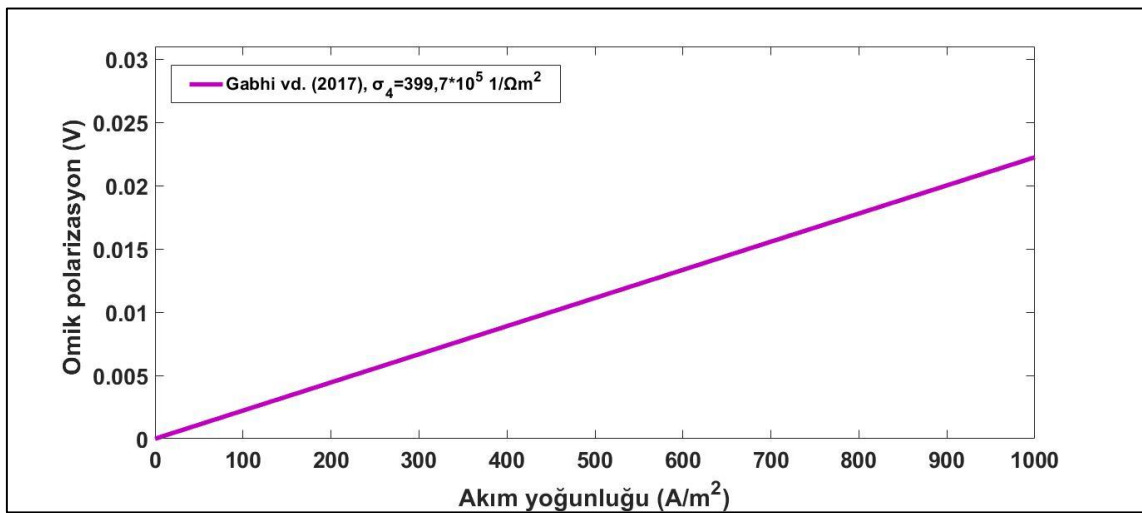


**Şekil 20.** Karbon parçacığının iletkenliğinin omik polarizasyona etkisi ( $\sigma_1 = 9,3 \sigma_2 = 24,7 1/\Omega m^2$ ).



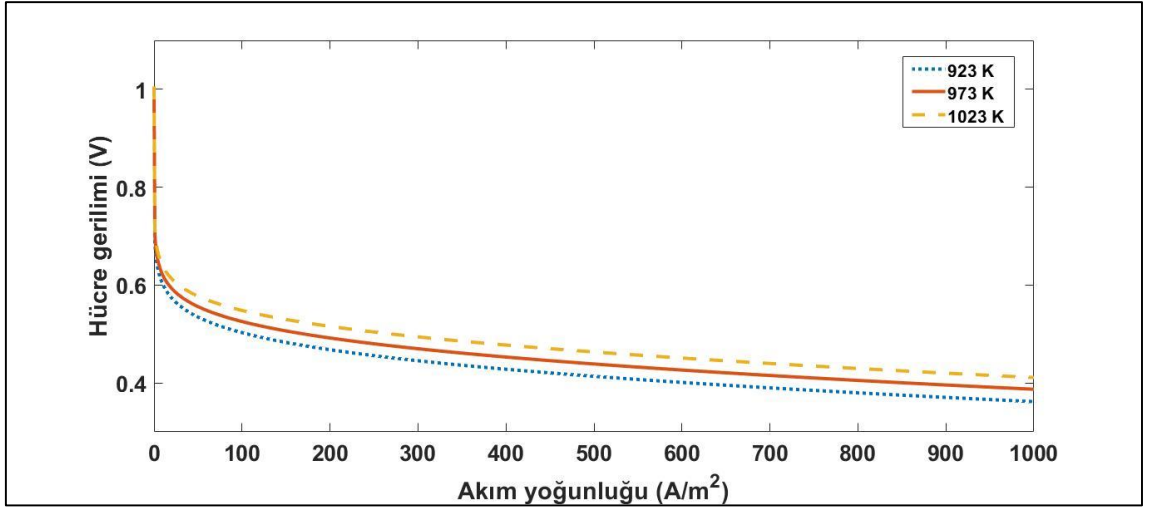
Şekil 21. Grafitin iletkenliğinin omik polarizasyona etkisi.

Gabhi vd. (2017), Biyokömüre 950 °C’de 8 saat boyunca inert bir atmosfer altında ısıl işlem uygulamış ve bunun sonucunda biyokömürün elektriksel iletkenliğinin büyük bir ölçüde arttığını (0,16 dan 106,41 S/m’ye) görmüştür. Bu büyük artışın sebebi hem karbonlaşmadaki hemde grafitleşme derecesindeki artıştan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu tez çalışmasında Gabhi vd. (2017), elde etmiş olduğu en iyi iletkenlik derecesinin yakıt piline uygunluğunu görebilmek için omik kayıplara olan etkisinin grafiği çizilmiştir (Şekil 22). Grafiğe bakıldığında omik kayıpların yakıt olarak grafit kullanılan sistemle çok yakın bir sonuç gösterdiği görülmektedir.

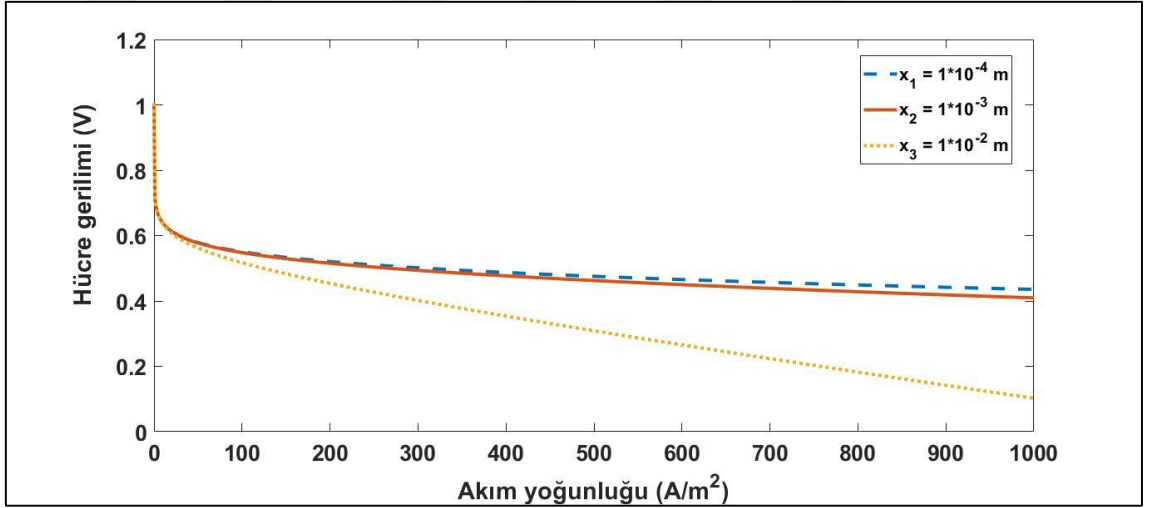


Şekil 22. İletkenliği artırılan biyokömürün omik polarizasyona etkisi ( $\sigma_4 = 399,7 * 10^5 1/\Omega m^2$ ).





Şekil 23. İletkenliği arttırılan biyokömürün farklı sıcaklıklarda hücre gerilimine etkisi ( $\sigma_4 = 399,7 * 10^5 \text{ 1}/\Omega\text{m}^2$ ).



Şekil 24. Anot yatak yüksekliğinin hücre gerilimine etkisi ( $x_1 = 1 * 10^{-4}$ ,  $x_2 = 1 * 10^{-3}$ ,  $x_3 = 1 * 10^{-2}$ m).

#### 4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yüksek sıcaklıkta çalışan DCFC modellemesi yapılmıştır. Bu çalışmada Liu vd. (2008), daha önce yapmış olduğu DCFC modelinden yararlanılmıştır. Referans çalışmasından farklı olarak elektrolit eriyiği 3'lü olarak alınmış, elektrolitin elektriksel iletkenliği değiştirilmiş ve farklı karbon kaynağı olarak biyokömürün DCFC verimine etkisi incelenmiştir. Referans alınan çalışmada elektrolit olarak  $(LiK)CO_3^{2-}$  ikili karışım kullanılırken bu çalışmada  $(LiNaK)CO_3^{2-}$  üçlü karışım kullanılmıştır. Modelin matematiksel denklemlerini çözmek için geniş bir algoritmaya sahip olan MATLAB programı kullanılmıştır. Programa denklemler, sınır şartları girilmiş ve sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Elde edilen grafikler referans alınan çalışmayla da karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada incelenen tüm polarizasyon kayıpları sıcaklığa oldukça bağımlılık göstermiştir. Katot elektrodunda gerçekleşen aktivasyon ve konsantrasyon kayıpları anot elektrodunda gerçekleşen aktivasyon ve omik kayıplardan oldukça küçüktür. Yakıt pili performansını azaltan en büyük etken direnç kayıplarıdır. Direnç kaybı elektrolitin elektriksel iletkenliğinin artırılmasıyla azaltılabilir. Yakıt pilinde gerçekleşen bütün kayıplar açık devre voltajından çıkarılıp genel hücre gerilimi bulunmuştur. Açık devre gerilimi bir yakıt hücresi performansı için birinci parametredir. Referans alınan çalışmada omik kayıplar sıcaklığa çok bağımlılık göstermemiştir. Bunun nedeni de referansta kullanılan elektrolitin elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olmamasıdır.

Bu çalışmadaki DCFC modelinden elde edilebilecek güç yoğunluğu 200-400  $W/m^2$  arasındadır. Karbon çapının  $1 * 10^{-5}m$ , sıcaklığın 923, 973 ve 1023 K olduğu sistemden elde edilen maksimum güç yoğunlukları sırasıyla 361-387-412  $W/m^2$  dir. Güç yoğunluğu akım yoğunluğuna ve gerilime bağlı olarak değişmektedir. Fakat gerilimin maksimum olduğu yerde akım yoğunluğu düşük olduğundan güç yoğunluğu da düşmektedir. Bu çalışmada maksimum güç yoğunluğu 0,4 Volt civarındaki hücre gerilimine karşılık gelen değerdir. Bu çalışmada anot boyutlarının yükseklik, genişlik ve uzunluk parametreleri incelenmiştir. DCFC sisteminde karbon parçacıkları anot elektrotu görevi gördüğü için gerilim düşmesi anotta genişlik ve uzunluk sınırlarında gerçekleşmemektedir. Gerilim düşüşü daha çok anodun yüksekliğine bağlıdır. Anodun

yüksekliğinin  $1 * 10^{-4}$ ten  $1 * 10^{-2}$  metreye yükseltilmesi durumunda hücre gerilimi bir miktar düşmüştür (Şekil 24). Anodun yüksekliğinin  $1 * 10^{-1}$ metreye yükseltimesi durumunda (sistem tasarımına uygun olmadığından) hücre gerilimi farklı bir hal almıştır. Anotta her bir levhadaki karbondan kaynaklanan omik kayıpların elektrolitten kaynaklanan kayıplardan daha fazla olduğu bulunmuştur. DCFC’de gerçekleşen temel reaksiyonun (reaksiyon 21) tersinir termik verimi %100 dür. Akım yoğunluğu  $300 \text{ A/m}^2$  den küçük olduğu durumda voltaj verimi %50 civarında bulunmuştur. Akım yoğunluğunun bu sistemde maksimum olması durumunda voltaj verimi %40’ a kadar düşmüştür.

Yakıt pili performansı için kullanılan yakıt, elektrolit, hücre sıcaklığı önemli bir etkidir. Farklı tasarımlı doğrudan karbon yakıt pili performans değerleri Tablo 5’de görülmektedir. Yakıt olarak grafitin kullanıldığı sistemlerde daha yüksek güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında biyokömürün yakıt piline uygunluğunu görmek için omik kayıplara olan etkisine bakılmıştır (Şekil 20-22). İletkenliği düşük olan biyokömürün omik kayıpları çok yüksek çıkmıştır. Omik kaybı büyük çıktığından akım voltaj eğrisi anlamsızlaşmıştır. Biyokömürün iyi iletkenlik değerinde (Gabhi vd., 2017) ise grafitten alınan sonuca çok yakın değerler bulunmuştur (Şekil 22). Yüksek iletkenliğe sahip biyokömürün yakıt olarak kullanıldığı yakıt hücresinde 0,2-0,3 volt arasında  $170\text{-}190 \text{ W/m}^2$  güç yoğunluğu elde edilmiştir (Şekil 23). Tablo 5’e bakıldığında çalışma sıcaklığının yüksek olduğu tasarımlarda hücre potansiyeli daha yüksek bulunmuştur.

**Tablo 5.** Doğrudan karbon yakıt pili ile yapılan çalışmalar.

Yakıt	Elektrolit	Çalışma sıcaklığı(°C)	Katot materyali	Hücre potansiyeli(V)	Güç yoğunluğu	Referans
Grafit	62 mol % $\text{Li}_2\text{CO}_3$ / 38 mol % $\text{K}_2\text{CO}_3$	550-750	$\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$	0,4-0,5	200-500 $\text{W/m}^2$	(Liu vd., 2008)
Linyit	$(\text{LiNaK})_2\text{CO}_3$	700	NiO tozu	0,67	330 $\text{W/m}^2$	(Kouchachvili vd., 2011)
Bambudan yapılmış aktif karbon	62 mol % $\text{Li}_2\text{CO}_3$ / 38 mol % $\text{K}_2\text{CO}_3$	850	NiO	0,7-0,8	600-1100 $\text{W/m}^2$	(Lee vd., 2011)

**Tablo 5 (devam).** Doğrudan karbon yakıt pili ile yapılan çalışmalar.

Yakıt	Elektrolit	Sıcaklık (°C)	Katot materyali	Hücre potansiyeli	Güç yoğunluğu	Referans
Grafit	62 mol % $\text{Li}_2\text{CO}_3$ / 38 mol % $\text{K}_2\text{CO}_3$	550-750	NiO	0,293	210 W/m <sup>2</sup>	(Zhang vd., 2014)
Biyokömür (mısır koçanı)	Samaryum katkılı seryum dioksit ve erimiş karbonat	750		0,3-0,4	1850 W/m <sup>2</sup>	(Yu vd., 2014)
Kömür tozu	Sulu KOH/ LiOH	245	Ag/Pt	0,574	650 W/m <sup>2</sup>	(Nunoura vd., 2007)
Grafit tozu	Erimiş NaOH	400-650	Metalik çelik kap	0,2-0,3	420-580 W/m <sup>2</sup>	(Giddey vd., 2012) SARA
Grafit	$(\text{LiNaK})_2\text{CO}_3$	550-750	$\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$	0,3-0,4	200-400 W/m <sup>2</sup>	Tez çalışması
Biyokömür	$(\text{LiNaK})_2\text{CO}_3$	550-750	$\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$	0,2-0,3	170-190 W/m <sup>2</sup>	Tez çalışması

DCFC yüksek sıcaklıkta çalışması sebebiyle bu yakıt pili türü için sıcaklığın sağlanmasının zor olacağı düşünülebilir. Fakat dünyanın birçok yerinde bulunan termik santrallerde DCFC kullanımını gerçekleştirmek mümkün olabileceği düşünülmektedir. Termik santrallerde kullanılan yakıtın yakılması sonucunda açığa çıkan gazlar dünyamıza zarar vermektedir. Bu gazlar da DCFC sisteminde kullanılabilir. Diğer yandan termik santrallerden sağlanan verim, bir DCFC'den elde edilebilecek verimden oldukça düşüktür.

DCFC lerin birçok avantajı vardır. Teorik ısı verimleri %100' e yakın olup diğer yakıt pillerine göre büyük termodinamik avantajlar sunar. Kullanılan katı karbonun taşınması ve depolanması kolaydır. Katı karbon kömür, biyokütle ve atıklardan elde edilebileceği için yakıt çeşidi de diğer yakıt pillerine göre daha fazladır.

## 5. ÖNERİLER

Yakıt hücresinin performansının doğru anlaşılabilmesi için iyi bir modelleme yapmak gerekir. İyi bir modelleme yapmak içinde kullanılan elektrotların, elektrolitin ve yakıtın termodinamik ve taşınım özelliklerinin iyi bir şekilde anlaşılması gerekir. Bu sistemde akışkan bir elektrolit kullanıldığından dolayı kütle transferi hakkında bilgi edinmek yapılan çalışmaya oldukça yarar sağlayacaktır. Yüksek sıcaklıkta çalışmaları ve yüksek verimler elde edilmeleri sayesinde termik santrallerde kullanılmaları mümkündür. Bu çalışmada pek konu edilmemesine rağmen DCFC'lerin çalışma koşullarının ve alanlarının geniş bir şekilde araştırılması gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- Aydın, M., 2007.** PEM Yakıt Pili İki Boyutlu Modellemesi. Yüksek Lisans. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 82s., 39-73.
- Agarwal, R., 2014.** Design and Modelling of a Novel Direct Carbon Molten Carbonate Fuel Cell with Porous Bed Electrode. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA, 302p.
- Basio, B., Costamagna, P. and Parodi, F., 1999.** Modeling and experimentation of molten carbonate fuel cell reactors in a scale-up process. Chemical Engineering Science, 54, 2907-2916.
- Baranak, M., 2004.** Ergimiş Karbonatlı Yakıt Pili Modellemesi. Yüksek Lisans. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 73s., 16-39.
- Cooper, J.F., 2003.** Reactions of the carbon anode in molten carbonate electrolyte. Pittsburgh, PA: Direct Carbon Fuel Cell Workshop, NETL, <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/dcfcw/Cooper%202.pdf>.
- Cherepy, N.J., Krueger, R., Fiet, K.J., Jankowski, A.F. and Cooper, F., 2005.** Direct conversion of carbon fuels in a molten carbonate fuel cell. Journal of the Electrochemical Society, 152, 80-87. DOI: 10.1149/1.1836129
- Elleuch, A., Boussetta, A., Yu, J., Halouani, K. and Li, Y., 2013.** Experimental investigation of direct carbon fuel cell fueled by almond shell biochar: Part I. Physicochemical characterization of the biochar fuel and cell performance examination. International Journal of Hydrogen Energy, 38, 16590 -16604.
- Giddey, S., Badwal, S.P.S., Kulkarni, A. and Munnings, C., 2012.** A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology. Progress in Energy and Combustion Science, 38, 360-399.
- Gabhi, R.S., Kirk, D.W. and Jia, C.Q., 2017.** Preliminary investigation of electrical conductivity of monolithic biochar. Carbon, 116, 435-442.
- Janz, G.J., Allen, C.B., Murphy, R.M. and Tomkins, R.P.T., 1979.** Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage. National Bureau of Standards, Part II (NSRDS-NBS 61 , Ernest Ambler), 343-350.
- Kornhauser, A., 2005.** Modeling and Design for a Direct Carbon Fuel Cell with Entrained Fuel and Oxidizer. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 48s.

- Kouchachvili, L. and Ikura, M., 2011.** Performance of direct carbon fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 10263-10268.
- Liu, Q., Tian, Y., Xia, C., Thompson L.T., Liang, B. and Li, Y., 2008.** Modeling and simulation of a single direct carbon fuel cell. *Journal of Power Sources*, 185, 1022–1029. DOI:10.1016/j.jpowsour.2008.08.100.
- Lee, G.C., Hur, H. and Song, M.B., 2011.** Oxidation behavior of carbon in a coin-type direct carbon fuel cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 158, 10-15. DOI: 10.1149/1.3544941.
- Nunoura, T., Dowaki, K., Fushimi, C., Allen, S., Meszaros, E. and Antal, M.J., 2007.** Performance of a first-generation, aqueous-alkaline biocarbon fuel cell. *Industrial. Engineering. Chemistry. Research*, 46, 734-744.
- Peelen, W.H.A., Olivry, M., Au, S.F., Fehribach, J.D. and Hemmes, K., 2000.** Electrochemical oxidation of carbon in a 62/38 mol % Li/K carbonate melt. *Journal of Applied Electrochemistry*, 30, 1389-1395.
- Ryan, O.H., 2016.** *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley, ISBN 9781119114208, 18-21.
- Toprak, M.M., 2017.** Yakıt Pilleri için Akış Kanallarının 3D Modellenmesi ve Performans Analizi. Yüksek Lisans. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye, 125s., 7-11.
- Vutetakis, D.G., Skidmore, D.R. and Byker, H.J., 1987.** Electrochemical oxidation of molten carbonate-coal slurries. *Journal of the Electrochemical Society*, 134, 3027–3034.
- Yu, J., Zhao, Y. and Li, Y., 2014.** Utilization of corn cob biochar in a direct carbon fuel cell. *Journal of Power Sources*, 270, 312-317.
- Zhang, H., Chen, L., Zhang, J. and Chen, J., 2014.** Performance analysis of a direct carbon fuel cell with molten carbonate electrolyte. *Energy*, 68, 292-300. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.049
- URL-1, 2019.** <http://kerimuzum.byethost13.com/enerj%C4%B1.html> (29 Mayıs, 2019).
- URL-2, 2019.** <https://tr.redsearch.org/images/2259690> (29 Mayıs, 2019).
- URL-3, 2019.** <https://dergipark.org.tr/download/article-file/555614> (29 Mayıs, 2019).

## **EKLER**

### **MATLAB Programı**

MATLAB, genellikle pozitif bilim ve mühendislik hesaplamaları için kullanılan bir bilgisayar programıdır. Matematiksel hesaplamanın etkili ve hızlı şekilde yapılmasına olanak sağlayan MATLAB programı aynı zamanda 2D ve 3D grafik çizimi için de kullanılır.

### **MATLAB Programında İzlenen Yol**

Doğrudan karbon yakıt hücresinin modellenmesinde kullanılan karmaşık matematiksel denklemleri çözebilmek için MATLAB programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar yardımıyla grafikler çizdirilmiş ve yakıt hücresi performansı değerlendirilmiştir. Bu bölümde MATLAB programına girilen parametreler, kodlar ve izlenen yollar sırasıyla şekillerle gösterilmiştir.

#### **1. Açık Devre Potansiyelinin Bulunması**

Yakıt pilinin performansını değerlendirmek için kullanılan birinci parametre açık devre potansiyelidir. Açık devre potansiyeli hücreden akım geçmediği zaman ölçülen hücre gerilimidir. Maksimum hücre gerilimi de denilebilir. Açık devre gerilimini bulmak için Nernst eşitliği (eşitlik 37) kullanılmıştır. Ek 1 de kullanılan parametrelerin açıklaması hemen sağında verilmiştir. Hücre geriliminin grafiği çizdirilirken belli bir sıcaklık ve akım yoğunluğu aralığı belirlenmiştir. Açık devre potansiyeli bulunduktan sonra hücrede meydana gelen tüm kayıplar bulunur ve bu bütün kayıplar maksimum hücre geriliminden çıkartılır (Ek 6). Böylece yakıt hücresinin belli bir akım yoğunluğu aralığında hücre gerilimi çıkışı bulunur.



## Ek 1. Açık devre gerilimini bulmak için kullanılan parametreler ve denklemler.

```
##### AÇIK DEVRE POTANSİYELİ #####
j = 0:1000;          % Akım yoğunluğu (A/m2)
T = 800:1100;       % Yakıt pili hücre sıcaklığı (K)
Vo = 1.02;          % Standart açık devre potansiyeli (V)
Po = 0.33 ;         % O2 nin kısmi basıncı (atm)
Pc = 0.67;          % CO2 nin kısmi basıncı (atm)
n = 4;              % Elektrokimyasal reaksiyondaki elektrik yükü sayıları
R = 8.314;          % Evrensel gaz sabiti (J/mol*K)
F = 9.6487*10^4;    % Faraday sabiti(coulomb/mol)

Vn = Vo+R*T/(n*F)*log(Po*(Pc^2)/Pc^3); % AÇIK DEVRE POTANSİYELİNİ BULMAK İÇİN KULLANILAN DENKLEM

plot(T,Vn)          % Grafik çizdirme komutu
#####
```

## 2. Yakıt Hücresinde Oluşan Kayıplarının Bulunması

Bölüm 1 de bu kayıplar hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bu bölümde sadece kullanılan parametrelerden ve girilen değerlerden bahsedilecektir.

### a. Aktivasyon Kayıpları

Anot elektrotunda ve katot elektrotunda gerçekleşen kayıplar ayrı ayrı bulunmuştur (Ek 2).

## Ek 2. Anot ve Katot aktivasyon kayıplarını bulmak için kullanılan parametreler ve denklemler.

```
##### AKTİVASYON KAYIPLARI #####
j = 0:1000;          % Akım yoğunluğu (A/m2)
T= 923:973:1023;    % Yakıt hücresi sıcaklığı (K)
F = 9.6487*10^4;    % Faraday sabiti
n = 4;              % Elektrokimyasal reaksiyondaki elektrik yükü sayıları (mol)
R = 8.314;          % Evrensel gaz sabiti(J/mol*K) (coulomb/mol)
ioc_init = 500;     % Konsantrasyondan bağımsız değişimi akımı yoğunluğu (amp/m2)
r1 = -1.250;        % Kat.değişim akımı yoğunluk denklemi için CO2 kısmi basıncının gücü
r2 = 0.375;        % Kat.değişim akımı yoğunluk denklemi için O2 kısmi basıncının gücü
Po = 0.33 ;         % O2 nin kısmi basıncı (atm)
Pc = 0.67;          % CO2 nin kısmi basıncı (atm)

Rct = 30.79+1.48*exp(-T/28.58); % Yük transfer direnci (ohm*m2)
ioa = R*T/(n*F*Rct); % Anot değişim akım yoğunluğu (A/m2)
Kaa = R*T/(2*F)*log(j/(2*ioa)+(j/(2*ioa)^2+1).^0.5); % Anot aktivasyon kayıpları
plot(j,Kaa)         % Anot aktivasyon kayıplarını çizdirmek için kullanılan komut

ioc = ioc_init*(Pc^r1)*(Po^r2); % Katot değişim akım yoğunluğu ( A/m2)
Kac = R*T/(2*F)*log(j/(2*ioc)+(j/(2*ioc)^2+1).^0.5); % Katot aktivasyon kayıpları
plot(j,Kcc)         % Katot aktivasyon kayıplarını bulmak için kullanılan komut
#####
```

## b. Omik Kayıplar

Yakıt hücresinde hem elektrottan hemde elektrolitten kaynaklanan direnç kayıpları bulunmuştur (Ek 3-4).

### Ek 3. Omik kayıpları bulmak için kullanılan parametreler.

***** DİRENÇ KAYIPLARI*****	
j = 0:1000;	% Akım yoğunluğu
T = 973;	% Yakıt hücresi sıcaklığı
Dc = 10 <sup>^</sup> (-5);	% karbon parçacığının çapı (m)
x = 10 <sup>^</sup> (-3);	% Paketlenmiş yatak yüksekliği (m)
y = 10 <sup>^</sup> (-2);	% Paketlenmiş yatak uzunluğu (m)
z = 10 <sup>^</sup> (-2);	% Paketlenmiş yatak genişliği (m)
e = 0.396;	% paketlenmiş yatağın boşluk oranı
Al = 83.8192*100;	% Üstel faktör
E = 7385;	% Elektrolit iletkenliğinin görünür aktivasyon enerjisi
R = 8.314;	% Evrensel gaz sabiti (J/mol*K)
Gc = 1.6*10 <sup>^</sup> 5;	% Karbon parçacığının iletkenliği (s/m2) (GRAFİT)
Ns = x/Dc ;	% Levha sayısı
pc = 1201;	% Karbon parçacığının yoğunluğu (kg/m3)
ps = 1983.43;	% Elektrolit yoğunluğu (kg/m3)
g = 9.81;	% Yerçekimi ivmesi m/s2
Pm = 101325;	% Ortalama verim basıncı (pa)
Fgi = 1.33*pc*pi*g*(Dc <sup>^</sup> 2);	% Yerçekimi kuvveti (N)
Ffi = 1.33*ps*pi*g*(Dc <sup>^</sup> 2);	% Kaldırma kuvveti (N)
Fi = (Ns-1)*(Ffi-Fgi);	% Mekanik kuvvet (N)
si = Fi/Pm;	% İki karbon parçacığı arasındaki temas alanı (m2)
bi = (si/pi) <sup>^</sup> 0.5;	% İki karbon parçacığı arasındaki temas alanı (m2)
A = 1.38*10 <sup>^</sup> (-7);	% Omik direnç ile ilgili kinetik bir parametre
B = 11400;	% Omik direnç ile ilgili kinetik bir parametre
Cr = 0.348*10 <sup>^</sup> (-4);	% Omik direnç ile ilgili kinetik bir parametre
D = 4.8*10 <sup>^</sup> (-8);	% Omik direnç ile ilgili kinetik bir parametre
f = 6596;	% Omik direnç ile ilgili kinetik bir parametre
po = 0.67;	% O2 nin kimsi basıncı
% Gc = 2.47*10 <sup>^</sup> 1;	% Karbon parçacığının elektriksel iletkenliği
% Gc = 9.3;	% Karbon parçacığının elektriksel iletkenliği
% Gc = 399.67*10 <sup>^</sup> 5;	% Karbon parçacığının elektriksel iletkenliği
% pc = 0.5*10 <sup>^</sup> 3;	% Karbon parçacığının yoğunluğu (kg/m3)
% pc = 1.5*10 <sup>^</sup> 3;	% Karbon parçacığının yoğunluğu (kg/m3)

### Ek 4. Omik kayıpları bulmak için kullanılan denklemler.

Gs = Al*exp(-E*4.1868/(R*T));	% Elektrolitin elektriksel iletkenliği
Rsi = Dc/(Gs*y*z*(e <sup>^</sup> 1.5));	% Elektrolit direnci
isi = j*(1-2*pi*(x/(Dc-1)));	% Elektrolit fazından geçen akım
Rci = 1/(Gc*bi);	% Elektrot yüzeyindeki daralma direnci
ici = 2*pi*j*(x/(Dc-1));	% Elektrot fazından geçen akım
Rce = A/(po <sup>^</sup> 0.67)*exp(B/T)+Cr+D*exp(f/T);	% Anot hariç tüm bileşenlerin direnci
Koa = Ns*(isi*Rsi+ici*Rci);	% Anot ohmik polarizasyon (volt)
Ko = (j*Rce+Koa)*10 <sup>^</sup> -5;	% OMİK POLARİZASYON (V)
plot (j,Ko);	% Omik kayıpları çidirmek için kullanılan komut
hold on	% Grafikleri üst üste çizdirme komutu

### c. Konsantrasyon Kayıpları

Konsantrasyon kayıpları sadece katotta gerçekleşmiştir. Anot elektrotunda karbon yakıtı fazla olduğundan oradaki konsantrasyon kayıpları ihmal edilmiştir (Ek 5).

**Ek 5.** Katot konsantrasyon kayıplarını bulmak için kullanılan parametreler ve denklemler.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% KONSANTRASYON KAYIPLARI %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
j = 0:1000; % Akım yoğunluğu (A/m2)
T = 923:973:1023; % Yakıt pili hücre sıcaklığı (K)
Yc = 0.20; % Co2 nin katot giriş molar yüzdesi
Pc = 0.67; % Co2 nin kısmi basıncı (atm)
n = 4; % Elektrokimyasal reaksiyondaki elektrik yükü sayıları (mol)
Kc = 3.5*10^(-2); % Co2 nin kütle transfer katsayısı (m/s)
Hc = 1.71*(10^-4)*exp(-364.6/T); % Co2 nin çözünürlüğü (henry sabiti)
Cc = Yc*Pc*Hc*101.325*(10^3) ; % Gaz fazında co2 nin konsantrasyonu
is = n*F*Kc*Cc; % Katot sınırlayıcı akım yoğunluğu (A/m2)

Kkc = -(R*T)/(n*F)*log(1-j/is); % Katot konsantrasyon polarizasyonu
hold on % Grafikleri üst üste çizdirme komutu
plot(j,Kkc) % Grafik çizdirme komutu

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

**Ek 6.** Yakıt hücresinin akım yoğunluğu hücre gerilimi eğrisini bulmak için kullanılan denklemler.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% AKIM YOĞUNLUĞU HÜCRE GERİLİMİ POLARİZASYON EĞRİSİ%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Kt = Kaa+Kac+Ko+Kkc; % Yakıt hücresindeki tüm kayıpların toplanması
Vc = Vn-Kt; % Açık devre potansiyelinden toplam kayıpların çıkarılması
plot(j,Vc) % Belli bir akım yoğunluğu aralığında hücre gerilimi çıkışının alınması
hold on % Grafikleri üst üste çizdirme komutu

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

## ÖZGEÇMİŞ

Fatma Gül NİŞANCI 1992 yılında Rize’de doğmuştur. Lise öğrenimini Ardeşen Türk Telekom Lisesinde tamamladıktan sonra 2011 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Otomotiv Mühendisliği bölümüne başlamış ve 2016 yılında buradan mezun olmuştur. 2017 yılında Recep Tayip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir.

