



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TAŞINABİLİR CİHAZLAR İÇİN 10 W'LIK BİR
ETANOL YAKIT HÜCRESİ MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

ŞULE ÇELİK

AĞUSTOS 2022

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TAŞINABİLİR CİHAZLAR İÇİN 10 W'LIK BİR
ETANOL YAKIT HÜCRESİ MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

ŞULE ÇELİK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Ağustos 2022

Şule ÇELİK tarafından **Prof. Dr. Yüksel KAPLAN** danışmanlığında hazırlanan “**Taşınabilir Cihazlar İçin 10 W’lık Bir Etanol Yakıt Hücresi Modeli Geliştirilmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ, Gazi Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Ömer GENÇ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 01/08/2022 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Şule ÇELİK

ÖZET

TAŞINABİLİR CİHAZLAR İÇİN 10 W'LIK BİR ETANOL YAKIT HÜCRESİ MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

ÇELİK, Şule

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Ağustos 2022, 55 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında Doğrudan Etanol Yakıt Hücreleri (DEYH) performansına etki eden proses parametreleri teorik olarak araştırılmıştır. Teorik çalışmada DEYH’de meydana gelen ısı ve kütle transferi, akış ve kimyasal reaksiyonlar için iki boyutlu bir matematiksel model geliştirilmiş ve nümerik olarak çözülmüştür. Etanol konsantrasyonunun, katot basıncının, hava debisinin ve sıcaklığın performansın belirlenmesinde en etkin parametreler olduğu görülmüştür. Hava debisinin ve katot basıncının artmasıyla yakıt hücresinin performansı etkilediği gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda performans reaksiyon kinetiğinin iyileşmesi ile önemli ölçüde arttığı ve yüksek yakıt konsantrasyonlarında ise anottan katoda etanol geçişi nedeniyle performansın düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar akım yoğunluğuna ve etanolün debisine bağlı olarak yığın çıkışına doğru yakıt konsantrasyonunun azalabileceğini göstermiştir. Nümerik sonuçların literatürdeki deneysel bir çalışmanın sonuçlarıyla uyumlu olduğu dolayısıyla geliştirilen matematiksel modelin geçerliliği test edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Doğrudan etanol yakıt hücresi, matematiksel modelleme, nümerik analiz

SUMMARY

DEVELOPMENT OF A 10 WATT ETHANOL FUEL CELL MODEL FOR PORTABLE DEVICES

ÇELİK, Şule

Niğde Omer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

August 2022, 55 pages

Within the scope of this thesis, the process parameters affecting the performance of Direct Ethanol Fuel Cells (DEYH) were investigated theoretically. In the theoretical study, a two-dimensional mathematical model was developed and solved numerically for the heat and mass transfer, flow and chemical reactions occurring in DEYH. Ethanol concentration, cathode pressure, air flow and temperature were found to be the most effective parameters in determining performance. It was observed that the fuel cell performance was affected by the increase in air flow and cathode pressure. It has been determined that the performance at high temperatures increases significantly with the improvement of the reaction kinetics, and at high fuel concentrations, the performance decreases due to the ethanol transition from the anode to the cathode. The results showed that the fuel concentration might decrease towards the stack exit depending on the current density and the flow rate of the ethanol. Since the numerical results are compatible with the results of an experimental study in the literature, the validity of the developed mathematical model has been tested.

Keywords: Direct ethanol fuel cell, mathematical modeling, numerical analysis

ÖN SÖZ

Gelişen teknolojiyle birlikte taşınabilir elektronik cihazların önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan lityum temelli cihazlar, batarya gücü olarak yetersiz ve rezervleri de sınırlıdır. Bu sebeple alternatif enerji olarak aranan diğer yakıtlara göre enerji yoğunluğunun yüksel olması, kolay depolanabilir ve zehirsiz olması sebebiyle doğrudan etanol yakıt hücresi araştırılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada doğrudan etanol yakıt hücresi için değişken parametreler incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Yüksel KAPLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Araştırma aşamamda emeği geçen Mikail YAĞIZ'a Gamze ATALMIŞ'a ve Nebi YELEĞE'ne teşekkür ederim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Naim ÇELİK'e, annem Hacer ÇELİK'e ve kardeşime ithaf ediyorum. Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok sevgili aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Hedef ve Amaçları	3
1.2 Kapsam	4
1.3 Tez İçeriği	5
BÖLÜM II	6
DOĞRUDAN ETANOL YAKIT HÜCRESİ	6
2.1 Tarihsel Gelişimi.....	7
2.2 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi	7
2.3 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresinin Avantaj ve Dezavantajları.....	9
2.4 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi Sisteminin Elemanları	12
2.5 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi İle İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar	16
BÖLÜM III.....	20
TEORİK ÇALIŞMALAR.....	20
3.1 Temel Denklemler ve Yakıt Hücre Termodinamiği	20
3.1.1 Sıcaklığın Hücre Potansiyeline Etkisi.....	21
3.1.2 Basıncın hücre potansiyeline etkisi.....	22

3.1.3 Teorik Hücre Verimliliği	23
3.1.4 Gerçek yakıt hücre potansiyeli ve verimliliği.....	23
3.2 Gerilim Kayıpları	24
3.2.1 Aktivasyon kayıpları.....	24
3.2.2 Ohmik kayıplar	27
3.3 Gerçek Yakıt Hücre Potansiyeli - Polarizasyon Eğrisi	27
3.4 Gerçek Hücre Verimliliği	28
3.5 Matematiksel Modelleme	29
3.5.1 Model Geometrisi	30
3.5.2 Model Fiziklerinin Programa Tanımlanması.....	31
3.5.3 Model Denklemleri	34
3.5.4 Model Parametreleri	36
3.5.5 Modelin Ağ Yapısının (mesh) Oluşturulması.....	37
BÖLÜM IV.....	39
ANALİZ SONUÇLARI.....	39
4.1 Modelin İspatlanması.....	39
4.2 Sıcaklığın DEYH Performansına Etkisi	40
4.3 Katot Basıncının DEYH Performansına Etkisi.....	41
4.4 Etanol Molaritesinin DEYH Performansına Etkisi.....	42
4.5 Hava Debisinin DEYH Performansına Etkisi.....	44
4.6 DEYH Sistem Tasarımı	44
BÖLÜM V	48
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	48
KAYNAKLAR	50
ÖZ GEÇMİŞ.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	PEM yakıt hücrelerinin tabakalarına ait fonksiyonlar ve taşıma olayları	10
Çizelge 2.2.	Yakıt olarak hidrojen, etanol ve metanolün karşılaştırılması (Wagner,2003).....	16
Çizelge 3.1.	Hidrojen oksitlenme reaksiyonu için entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi (25°C’de.....	21
Çizelge 3.2.	Hidrojen/oksijen yakıt hücresi reaksiyonlarının entalpi, gibbs serbest enerji ve entropi değerleri, teorik hücre potansiyeli (Barbir,2005).....	22
Çizelge 3.3.	Farklı sıcaklık ve basınçlardaki teorik hücre potansiyeli (Barbir,2005).....	23
Çizelge 3.4.	COMSOL Multiphysics programındaki bilinmeyen değişkenlerin özeti.....	33
Çizelge 3.5.	Comsol multiphysics programında kullanılan model parametreler.....	37
Çizelge 3.6.	Farklı ağ(mesh) yapılarında akım yoğunluğu değerleri.....	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Yakıt hücresi girdi ve çıktıları.....	6
Şekil 2.2.	Doğrudan etanol yakıt hücresinin çalışma prensibi	8
Şekil 2.3.	Yakıt pilleri ve pil sistemlerinin enerji yoğunluklarına göre mukayesesi	11
Şekil 2.4.	Şarj edilebilir pil ile yakıt pili sistemi karşılaştırılması	12
Şekil 2.5.	Bipolar plaka ve yakıt hücresindeki konumu	15
Şekil 3.1.	Yakıt hücresindeki gerilim kayıpları ve polarizasyon eğrisi (Appleby ve Foulkes, 2004)	28
Şekil 3.2.	Doğrudan etanol yakıt hücresinin şematik görünümü	30
Şekil 3.3.	COMSOL Multiphysics programında kullanılan model	31
Şekil 3.4.	Comsol multiphysics programında fizik seçimleri	32
Şekil 3.5.	Fizik arayüzlerinin çözüme eklenmesi	33
Şekil 3.6.	Comsol multiphysics programında denklemlerin girilmesi	36
Şekil 3.7.	Geometriye uygulanan farklı ağ (mesh) sayılar	38
Şekil 4.1.	DEYH modelinin deneysel çalışma ile karşılaştırılması	39
Şekil 4.2.	Sıcaklığın yakıt hücresine etkisi	40
Şekil 4.3.	Sıcaklığın yakıt hücresine etkisi	40
Şekil 4.4.	Katot basıncının yakıt hücresine etkisi	41
Şekil 4.5.	Katot basıncının yakıt hücresine etkisi	42
Şekil 4.6.	Etanol molaritesinin DEYH performansına etkisi	43
Şekil 4.7.	Etanol molaritesinin DEYH performansına etkisi	43
Şekil 4.8.	Katot kanal girişindeki hava debisinin etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği	44
Şekil 4.9.	Üç hücreli yakıt hücresi yığın katı tasarımı; Bipolar plaka(a), Yığının montajlanmış hali (b) ve Yığın elemanları (c)	45
Şekil 4.10.	DEYH tasarımı.....	46

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Pt	Platinyum
Rt	Rutenyum
Ti	Titanyum
M	Molarite
C	Karbon
μm	Mikrometre
ρ	Yoğunluk
W	Watt
kW	kilowatt
V	Volt
ΔV_{Ohmik}	Ohmik kayıplardan oluşan voltaj kayıpları
$\Delta V_{Aktivitasyon}$	Aktivitasyon kayıplardan oluşan voltaj kayıpları
$\Delta V_{Konsantrasyon}$	Konsantrasyon kayıplardan oluşan voltaj kayıpları
ΔG	Gibbs Serbest Enerji
ΔS	Entropi
Mt	Metrik Ton (ton)
mmHg	Milimetre Cıva

Kısaltmalar	Açıklama
DMYH	Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi
DEYH	Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi
BBP	Bipolar Plaka
GDT	Gaz Difüzyon Tabakası
CO ₂	Karbondiyoksit
DC	Doğru Akım

Li-on	Lityum İyon
AEM	Anyon Değişim Membranı
PEM	Proton Değişim Membranı



BÖLÜM I

GİRİŞ

Son yıllarda fosil kökenli yakıtların kullanımından kaynaklanan ve ekosisteme ciddi zararlar veren emisyonların, çevresel etkileri ve artan enerji ihtiyaçların karşılanmasında endişe verici sonuçlar ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan çevresel zararlı etkiler ve bu azalan fosil kökenli kaynakların sınırlı olması, bilim insanlarını sürdürülebilir ve ekosisteme zarar vermeyen daha verimli enerji üretim tekniklerine yöneltmiştir. Bu nedenlerle fosil kökenli yakıtlara bağımlı kalmadan alternatif enerji kaynakları oluşturmak önemli hale gelmiştir. Yakıt hücreleri, yakıt olarak hidrojen ve çeşitli yakıtların kullanıldığı günümüzün alternatif enerji üretim teknolojilerinden biridir. Bu teknoloji üzerine yapılan çalışmaların çoğu, enerji kaynağı olarak hidrojen kullanan yakıt hücrelerine odaklanmaktadır. Hidrojen kullanımı, yakıt hücrelerini çevre dostu bir teknoloji haline getirmektedir. En önemli alternatif enerji kaynaklarından olan hidrojen, doğada serbest olarak bulunmamaktadır. Yakıt olarak kullanılabilmesi için, yapısında bulunduğu bileşiklerden açığa çıkarılması gerekmektedir. Günümüzde yaklaşık olarak %95 oranında hidrokarbonlardan üretilen hidrojenin, çok sayıda üretim senaryosu ve tekniği bulunmaktadır. Hidrokarbon tabanlı yakıtların sebep olduğu çevre kirliliği ve küresel ısınma da hesaba katıldığında, hidrojeninin öncelikle çevre dostu, temiz, ekonomik ve sürdürülebilir bir yöntem ile üretilmesidir. Sorun, hidrojenin taşınması ve lojistiği için verimli depolama yöntemleri ve altyapısının yetersiz olmasıdır. Düşük moleküler ağırlıkları ve yüksek enerji yoğunlukları ile öne çıkan metanol ve etanol gibi alkoller, bu özellikleri sonucunda mobil uygulamalarda diğer yakıtlara göre birçok avantaja sahiptir. Alkollerin bu özelliklerinden dolayı günümüzde yakıt pillerinde uygulamalarına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmektedir. Doğrudan Alkollü Yakıt Pilleri, bütanol, metanol ve etanol gibi sıvı alkolde depolanan kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedirler. Alkollü yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda yakıt olarak metanol kullanan yakıt pillerine odaklanılmış ve DMYH'nin dezavantajlarının olduğunu göstermişlerdir. Nafion membranlarından katot elektroduna metanol geçişi ve karbon monoksit tarafından anot zehirlenmesi önemli sorunlar olarak ortaya konmuştur. Metanol geçişinin yakıt verimliliğinin düşmesine neden olduğu, katot potansiyelini azalttığı ve ayrıca fazla yakıt tüketimine neden olduğu da ortaya konmuştur (Xu Q vd, 2011).

Ayrıca Matsuoka vd. (2005), çalışmalarında DMTH'lerinin yavaş elektrot kinetiğine sahip olduğunu, daha düşük sıcaklıklarda Pt katalizörlerinin karbon monoksit zehirlenmesi yaşadığını bildirmişlerdir. Aslında metanol yenilenemez, yüksek zehirliliğe sahip, uçucu ve yanıcı bir maddedir. Metanol kullanımı, taşınabilir cihazlara uygulandığında büyük sorunlara neden olabilmektedir. Etanol, metanol ile ilgili sorunların giderilebilmesi için iyi bir yakıt seçimidir. Etanol daha az toksiktir ve daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca tarımsal biyoproseslerden üretilir ve yenilenebilir bir enerji olarak kabul edilmiştir (Roelofs KS vd. 2011).

Doğrudan etanol yakıt pilleri üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunlar genellikle farklı malzemelerden katalizörlerin geliştirilmesi, karakterizasyonu ve performansın iyileştirilmesi üzerine deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır(Wnuk, 2020), (Altarawneh vd. 2018), (Promanan, vd. 2019). Ayrıca çalışma parametrelerinden biri olan etanol konsantrasyon değişimi de birçok çalışmada incelenmiştir. Estrada-Solis ve ark., çalışmalarında Ag-Pt katodunu kullanarak yüksek etanol konsantrasyonunda oksijen indirgeme reaksiyonunu incelemişler ve 2 M'a kadar yüksek etanol konsantrasyonunun varlığında oksijen indirgeme reaksiyonunun gerçekleştirme yeteneği gösterdiğini açıklamışlardır. Azam ve ark., çalışmalarında sıcaklık, yakıt konsantrasyonu, etanol ve hava akışları gibi parametrelerin doğrudan etanol yakıt hücresi üzerindeki etkisini incelemek için parametrik bir çalışma yürütmüşlerdir. Etanol akış hızının ve sıcaklığın optimizasyonunun anot ve katotta kütle transferini artırabileceğini, böylece elektrokimyasal reaksiyonların performansını artırabileceğini bildirmişlerdir. Souza ve ark., geliştirdikleri matematiksel modelleme ile farklı katalizör, sıcaklık ve etanol konsantrasyonları ile hücrenin voltajını ve güç yoğunluğunu hesaplamışlardır.

Günümüzde teknolojik gelişmeler ve dünya nüfusunun hızla artması sonucu olarak, enerji tüketimi ve güç gereksinimleri giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmı sanayi devriminden bu yana fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıt kullanımı atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu önemli ölçüde artırarak, milyonlarca insanın sağlığını tehdit eden hava kirliliğine neden olmakta ve küresel ısınmaya artırmaktadır (Zhao vd., 2007).

Sağlık ve çevresel kaygıların yanı sıra sınırlı fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi, insanoğlunun enerji dönüşümü ve enerji üretimi için geleneksel ısı makinalarından daha verimli, daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla uyumlu yeni nesil teknoloji arayışı içine girmesine neden olmuştur. Yakıt hücresi, yukarıdaki tüm gereksinimleri karşılayan en umut verici ve potansiyel enerji dönüştürme teknolojisi olarak belirlenmiştir. Yakıt hücresi teknolojisi, özellikle uzay keşiflerinde, birçok alanda kullanılmaktadır (Zhao vd., 2007).

Yakıt hücrelerinin sahip olduğu bu avantajlar, teknolojinin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi için itici güç oluşturmaktadır. Günümüzde yakıt hücrelerinin en önemli dezavantajı maliyettir. Farklı türleri için güçlü özellikleri ve farklı uygulamalara öncülük eden çeşitli avantajları (verimlilik, basitlik, düşük emisyon, sessiz çalışma gibi) vardır (Larminie ve Dicks, 2003).

Dahası, yakıt hücreleri genellikle, elektrik enerjisi üretiminde 40% daha fazla verimlilik, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verime sahiptir bununla birlikte yakıt hücresinden atılan ısı, ısıtma amaçlı kullanılabilir. Son olarak farklı tip yakıt hücrelerinde etanol, metanol ve hidrojen gibi farklı yakıtların kullanılabilmesi fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya yardımcı olmaktadır (Gou vd., 2009).

Bu tez çalışmaları kapsamında ise DEYH sistemlerinde meydana gelen akış, ısı ve kütle transferi ve elektro-kimyasal olaylar teorik olarak incelenmiştir. Sayısal analiz ile proses parametrelerine bağlı akım yoğunlukları, hücre voltajı ve güç yoğunluğu grafikleri elde edilmiştir. COMSOL Multiphysics programı yardımıyla nümerik olarak çözülmüştür. Analizin doğrulanması amacıyla literatürdeki deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır.

1.1 Çalışmanın Hedef ve Amaçları

Yakıt hücreleri, özellikle dünya fosil yakıt kaynaklarının azalması ve bunların kullanımının çevreye olan zararları nedeniyle son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Yakıt hücre sistemleri Carnot verimi ile sınırlı olmayıp enerji dönüşüm verimleri %90'lara kadar çıkabilmektedir. Yakıt hücrelerinin otomotiv, büyük güç santrallerinden

taşınabilir elektronik aygıtlara kadar her alanda uygulaması vardır. Yakıt hücreleri üzerine yapılan çalışmalarda özellikle sistem performansını arttırmak için, yakıt hücre bileşenlerinin (akım toplayıcı plakalar, gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası, gaz akış kanalları ve membran) ve çalışma parametrelerinin optimize edilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

Doğrudan etanol yakıt hücreleri otomotiv sektöründe, ana ve yardımcı güç ünitesi olarak, diz üstü bilgisayarlar, cep telefonları, telsiz gibi taşınabilir elektronik cihazların güç üniteleri için uygundur. Bilindiği gibi şu anda yakıt hücre teknolojisinin otomotiv ve taşınabilir elektronik cihazlardaki kullanımındaki en önemli problemlerden biri hidrojen depolama problemidir. Etanol atmosferik koşullarda sıvı halde olması ve birim hacim başına hidrojen yoğunluğu çok yüksek olması nedeniyle depolama problemi yoktur.

Doğrudan etanol yakıt hücresinde, etanol solüsyonu, elektro-kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan karbondioksit ve su buharı sistem içindeki akışı çift fazlı akış problemi yapmaktadır. Doğrudan etanol yakıt hücresinin performanslarının artırılması ve daha kullanışlı hale getirilmesi sistem içindeki kütle ve ısı transferinin, çift fazlı akışın ve elektro-kimyasal olayların anlaşılması oldukça önemlidir.

Tüm dünyada yakıt hücreleri üzerinde çalışmalar çok yoğun bir şekilde sürerken ülkemizde konu ile ilgili çalışmalar son yıllarda artmış olsa da yeterli olarak görülmemektedir. Dolayısıyla çalışmanın en önemli amaçlarından biri de DEYH teknolojisini çok iyi analiz ederek, konu ile ilgili bilgi birikimini artırmak prototip geliştirilmesi ile ilgili işletmelere öncülük etmektir.

1.2 Kapsam

Tez çalışmaları kapsamında DEYH’de meydana gelen akış, ısı ve kütle transferi ve elektro-kimyasal olaylar teorik olarak incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- DEYH’de meydana gelen ısı ve kütle transferi, akış ve elektro-kimyasal olayları temsil eden bir matematiksel model geliştirilmiştir.

- Matematiksel model çözülerek, sistem içindeki fazların konsantrasyon dağılımları, katoda istenmeyen etanol geçişi, katotta aşırı su toplanması olayları, akım yoğunluğuna etki eden faktörler nümerik olarak incelenmiştir.
- Elde edilen veriler matematiksel modelin validasyonunda ve geliştirilmesinde kullanılmıştır.

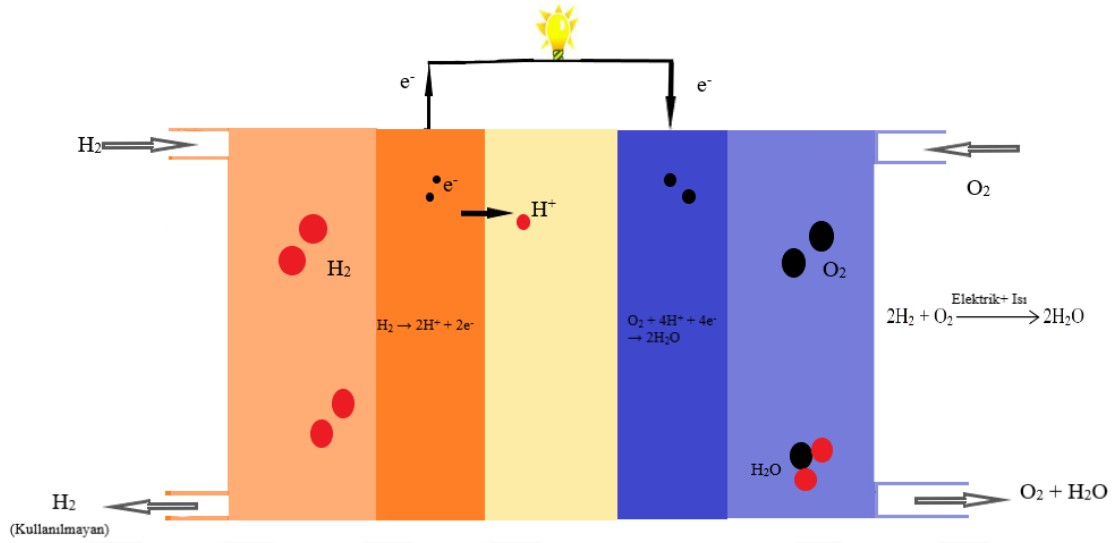
1.3 Tez İçeriği

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Bölüm I'de çalışmaya giriş yapılmış ve çalışmanın amacı ve hedefleri açıklanmıştır. Bölüm II'de DEYH'nin geliştirilmesi, çalışma prensibi, sistem elemanları ve etanolün seçilme nedenlerinden bahsedilmiştir. DEYH ile ilgili yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Bölüm III sayısal analizin yapıldığı ve anlatıldığı kısımdır. Bölüm IV tezin analiz sonuçlarının anlatıldığı bölümdür. Son olarak Bölüm V'de yapılan çalışmalarının sonuçları verilmiştir.

BÖLÜM II

DOĞRUDAN ETANOL YAKIT HÜCRESİ

Yakıt hücresi, reaktanların kimyasal enerjisini elektriğe dönüştürerek pil gibi çalışır ancak Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi yakıt (hidrojen) ve oksitleyici (oksijen) sağlandığı sürece doğru akım (DC) üretecek olması yönüyle pillerden farklılık gösterir (Barbir, 2005).



Şekil 2.1. Yakıt hücresi girdi ve çıktıları

Yakıt hücresinin sahip olduğu avantajları;

Verimlilik: Yakıt hücreleri genellikle ısı makinalarına göre daha verimlidir. Bu durum, birleşik ısı ve güç sistemleri için ihtiyaç duyulan küçük yerel güç üretim sistemleri için çok önemlidir (Larminie ve Dicks, 2003).

Basitlik: Herhangi bir hareketli parça bulundurmamasıyla yakıt hücresi basit bir yapıya sahiptir. Bu durum son derece güvenilir ve uzun ömürlü sistemler oluşturulmasını sağlamaktadır (Larminie ve Dicks, 2003).

Düşük Emisyon: Örneğin hidrojen yakıt olarak kullanıldığı zaman yakıt hücresi reaksiyon yan ürünü saf sudur. Bu durumda, bir yakıt hücresi aslında “sıfır emisyonlu” anlamına gelir. Şehir içinde araç emisyonlarını azaltmak bir gereklilik olduğundan,

yakıt hücreleri araçlarda kullanıldığında bu noktada avantaj sağlamaktadır (Larminie ve Dicks, 2003).

Sessiz Çalışma: Yakıt hücreleri çok sessiz çalışır. Bu, hem taşınabilir güç uygulamaları hem de birleşik ısı ve güç tasarımlarında çok önemlidir (Larminie ve Dicks, 2003).

2.1 Tarihsel Gelişimi

1839 yılında Sir William Grove seyreltik sülfirik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşan bir sistemde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmış ve ilk yakıt hücresi teknolojisi için gelişim başlamıştır (Bıyıkoglu, 2003).

İngiliz mühendis Francis T. Bacon, Grove'un keşfinden beri bilinen asit elektrolit yerine potasyum hidroksit kullanarak, 1930'ların sonunda alkali elektrolitlerle çalışmaya başlamış ve 1952 yılında 5 kW'lık bir yakıt hücresi yığını geliştirmişlerdir (Bıyıkoglu, 2003).

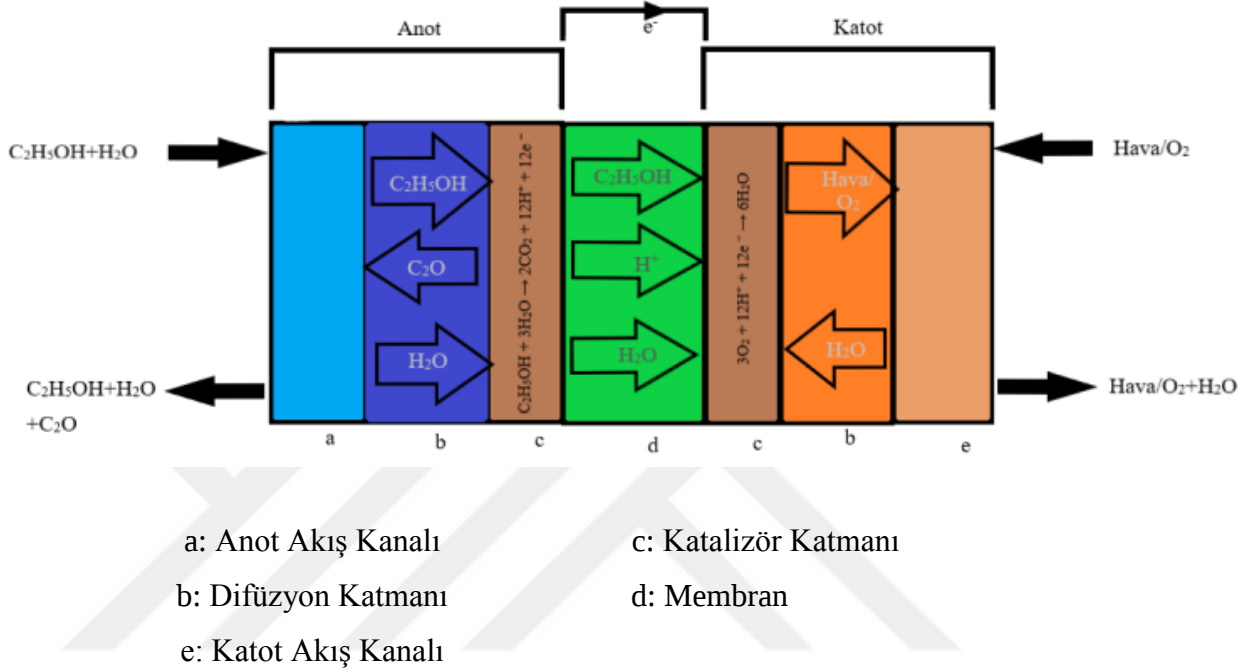
General Electric 1960'lı yılların başlarında uzay çalışmalarında kullanılması için elektrik üreten ilk polimer membrana sahip yakıt hücresi geliştirmişlerdir. 1970'lerde sudan hidrojen ve oksijen üreten PEM elektrolizör teknolojisini geliştirerek Birleşik Devletler Donanma Oksijen Üretim Santralını kurmuşlardır (Bıyıkoglu, 2003).

1989 yılında Perry Energy Systems şirketi polimer elektrolit membran yakıt hücresiyle çalışan bir denizaltı geliştirmişlerdir. 1993 yılında Ballard Power Systems yakıt hücresiyle çalışan otobüsleri tanıtmışlardır. 1993 yılında Perry Energy Systems polimer elektrolit membran yakıt hücresiyle çalışan otomobili tanıtmıştır (Bıyıkoglu, 2003).

2.2 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresinin Çalışma Prensibi

Doğrudan etanol yakıt hücresinin çalışma prensibi, proton değişim membranlı yakıt hücresinin basit formuna benzer. Doğrudan etanol yakıt hücresinde anot tarafına beslenen etanol-su karışımı elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu karbondioksit, protonlar ve elektronları oluşturur. Yakıt hücresinde kullanılan proton değişimli

membran sayesinde protonlar membran aracılığıyla katot tarafına geçerken membrandan geçemeyen elektronlar ise dış bir devre yardımıyla katota geçerek potansiyel fark oluştururlar. Katot tarafında hava, membrandan geçen protonlar ve dış devreden gelen elektronlar ile elektrokimyasal reaksiyona girerek suyu oluştururlar (Al-Baghdadi, 2005). Doğrudan etanol yakıt hücresinin çalışma prensibi Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Doğrudan etanol yakıt hücresinin çalışma prensibi

Doğrudan etanol yakıt hücresinin çalışması sırasında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir.

Anot reaksiyonu:



Katot reaksiyonu:



Toplam reaksiyon:



Anotta meydana gelen reaksiyon sonucu 1 mol etenole karşılık 12 elektron açığa çıkmakta olup hücrenin enerji yoğunluğu doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH) ve hidrojen yakıt hücresinin (PEM) enerji yoğunluğuna oranla daha yüksektir.

2.3 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresinin Avantaj ve Dezavantajları

Yakıt hücreleri, günümüzde kullanılmakta olan yanmaya dayalı olan klasik enerji dönüşüm teknolojilerine göre birçok avantaja sahiptir. Etanolün avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

Avantajları;

- Hidrojence zengin bir sıvı,
- Enerji yoğunluğu yüksek,
- Elde edilmesi kolay,
- Depolaması ve lojistiği kolay,
- Yenilenebilir,
- Zehirsiz bir sıvı,
- Çevresel zararlı etkileri çok azdır.

Dezavantajları;

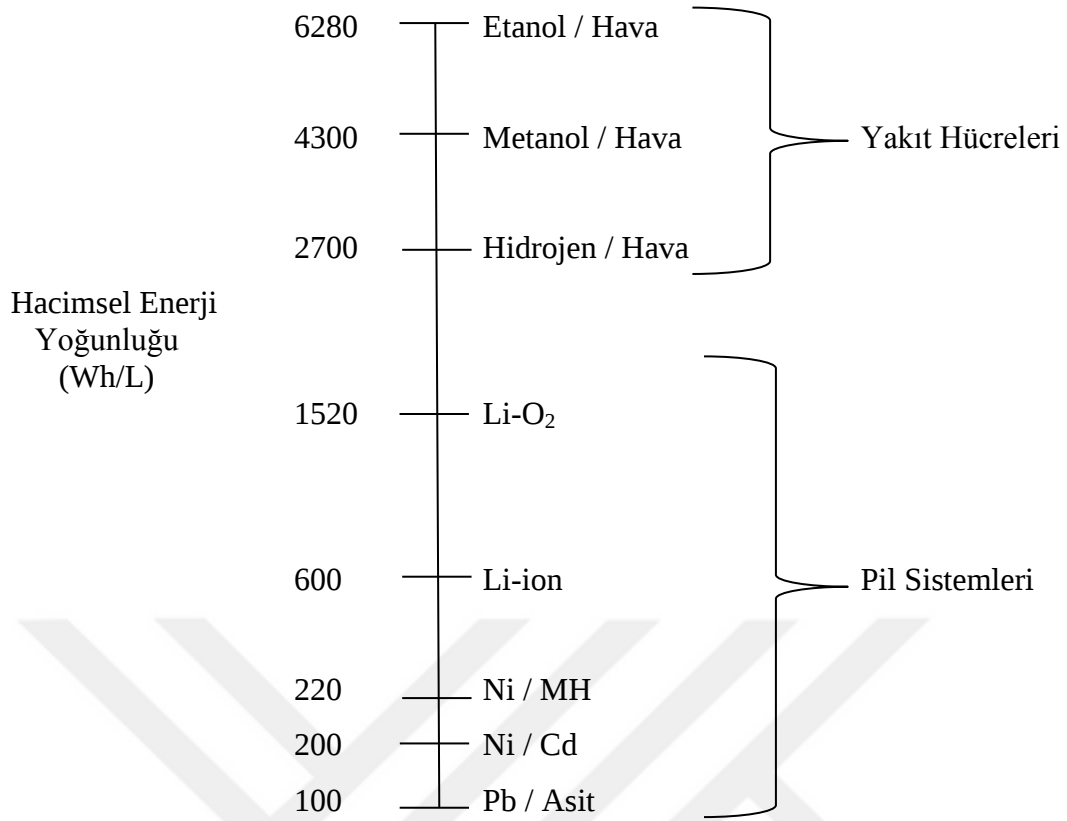
- Kullanılan MEG'in Pt'den dolayı pahalı olması
- Etanolün oksidasyon reaksiyonunu ile çok az miktarda ortaya çıkan karbon dioksit elektro katalizörü zehirlemesi gibi dezavantajları vardır.

Bu çalışmada yakıt olarak etanol seçilmesinin temel nedenlerinden biri diğer yakıtlara göre avantajlı olmasıdır. Çizelge 2.1.'de yakıtların karşılaştırılmaları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yakıt olarak hidrojen, etanol ve metanolün karşılaştırılması (Wagner, 2003)

	H₂	Metanol	Etanol
Teorik özgül enerji (kWh/kg)	32,8	6,07	8,03
Elektrik enerji yoğunluğu (kWh/L)	1,3	4,3	6,32
Toksik özellik	Hayır	Evet	Hayır
Patlayıcılık	Evet	Hayır	Hayır
Depolama	Zor	Kolay	Kolay
Kaynak	Fosil yakıtlar	Fosil Yakıtlar	Şeker, biyokütle

Yakıt hücrelerinin taşınabilir elektronik cihazların güç ünitesi olarak kullanılması fikri 2000' li yıllardan sonra ortaya çıkmıştır. Bu durum şu anda kullanılan Li-ion tabanlı pillerin başarısından kaynaklanmaktadır. Fakat son zamanlarda yeni jenerasyon elektronik cihazların çalıştırılabilmesi için daha yüksek enerji yoğunluğu gereksinimi ve pillerin şarj süresinin kısalığı pil üreticilerini yeni arayışlara itmektedir. Kamera, laptop, mobil telefonlar, askeri iletişim cihazları gibi elektronik cihazların pil sistemlerinin yıllık yaklaşık 25 milyar ABD Doları pazarı, bu alanda meydana gelecek yeni gelişmelerin önemini bir kat daha ortaya koymaktadır. Şekil 2.3.'de çeşitli pil sistemleriyle yakıt hücre sistemlerinin enerji yoğunlukları karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.3. Yakıt pilleri ve pil sistemlerinin enerji yoğunluklarına göre mukayesesi

Şekilde görüldüğü gibi yakıt hücreleri ile kuru piller arasında çok büyük bir fark vardır. Ayrıca yakıt hücresi sistemlerinde de taşınabilir elektronik cihazlar için DEYH sistemlerinin üstünlüğü tartışılmaz olduğu Şekil 2.3'te görülmektedir.

Sistem Karşılaştırması:

Yakıt hücresi ve kuru pil sistemlerinin karşılaştırılmasında sistemin tüm elemanlarının göz önüne alınması gerekmektedir. Dolayısıyla şarj edilebilir kuru pillerin şarj cihazlarında karşılaştırmada göz önüne alınması gerekmektedir. Şarj edilebilir pil ile yakıt pili sistemi karşılaştırılması Şekil 2.4.' de verilmiştir.

Şarj Cihazı ve kabloları 300 gr	Yakıt 150 gr
Lityum İyon Pil 300 gr	Yakıt Hücresi 200 gr

Li-ion (150-200 Wh/kg)

Yakıt hücresi (500-2000 Wh/kg)

Şekil 2.4. Şarj edilebilir pil ile yakıt pili sistemi karşılaştırılması

Şekilden de anlaşıldığı gibi şarj edilebilir pil sistemi DEYH sistemi ile değiştirildiğinde aynı hacimden yaklaşık olarak 10 kat daha fazla enerji elde edilmesi mümkün olmaktadır (Emiroğlu ve Erşan, 2019).

2.4 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi Sisteminin Elemanları

Polimer Elektrolit Membran; İşlevi elektronları iterken protonları (hidrojen) geçirmek olan PEM, yakıt hücresinin en kritik parçasıdır. Bir PEM yakıt hücresinde membran; yüksek proton iletkenliğe, anot ve katot arasındaki yakıt çapraz geçişini engelleyen özellikle birlikte yüksek kimyasal ve ısıl kararlılığa sahip olmalıdır. En sık kullanılan ve araştırılan membran malzemesi Dupont firması tarafından üretilen Nafion'dur. Nafion ve diğer birçok polimer elektrolitte proton iletkenliği, su aktivitesiyle artar ve bu gelen gaz reaktanlarının nemlendirilmesinin ana nedenidir.

Yeterli miktarda su, iyonize etmek üzere membran içine emilir, aşırı su yakıt hücresinin katot tarafında hücre performansını ve güç çıkışını sınırlar. Bu nedenle, yakıt hücresi içindeki su yönetimi PEM yakıt hücresi operasyonu için kritiktir (Wu, 2009).

Katalizör tabakası; Normalde, bir PEM yakıt hücresinde elektro-kimyasal reaksiyonlar, özellikle katot tarafında, düşük sıcaklıkta yavaşça gerçekleşir. Bu reaksiyonları hızlandırmak için, membranın her bir elektrot tarafı ince bir katalizör tabaka ile kaplanır. Katalizör tabakası, genellikle mikro ölçekte platin (Pt) katalizörle desteklenmiş, genel anlamda iyonomer bir matris içine gömülü karbon parçacıklardan

oluşur (Wu,2009). İyonomer mikro yapı ve iyonomer katalizör tabaka ara yüzü bir yakıt hücresinin performansı için önemli faktörler olup, yakıt hücresi reaksiyonunun gerçekleşmesini sağlayan membran boyunca iyon değişimi belirlemektedir. Hemen hemen reaksiyonların hepsi 10 µm kalınlığında tabaka içinde gerçekleştiğinden, katalizör tabakasının optimum kalınlığı yaklaşık 10 µm olduğu bulunmuştur. Diğer taraftan, elektro-kimyasal reaksiyon, katalizör tabakası üzerine eşit oranda dağılmış değildir; bu nedenle, Pt parçacıklar reaksiyon verimini maksimize etmek ve maliyeti en aza indirmek için katalizör tabakası üzerine düzgün bir şekilde dağıtılmış olması gerekmektedir (Wu, 2009).

Gaz difüzyon tabakası; Gaz difüzyon tabakaları (GDL), 200 - 300 µm arasındaki kalınlıklarda karbon kumaş veya karbon fiber kağıt benzeri gözenekli malzemeden oluşmaktadır. Gaz difüzyon tabakaları, katalizör tabakasına yapısal destek olmakla birlikte reaktant gazlarını reaksiyon bölgelerine taşınmasını ve elektron transferine bir ara yüz sağlamaktadır. Ayrıca GDL, reaksiyon bölgesinden ısıyı uzaklaştırılmasında ve hücrenin su yönetiminde önemli rol oynamaktadır. GDL'nin en önemli etkilerinden biride membran, gaz kanalındaki akış tarafından kurutulmak ve dolayısıyla membranın proton iletkenliği azaltmaktadır. Gaz difüzyon tabakası ve katalizör tabakası birlikte, genellikle gözenekli destek tabaka olarak adlandırılır. Ayrıca polimer elektrolit membran, GDL ve katalizör tabakaları birlikte membran elektrot düzeneği (MEA) olarak adlandırılır (Wu, 2009).

Bipolar tabaka (akım toplayıcı plaka); Tek bir hücreden elde edilebilecek voltaj hücrede meydana gelen elektrokimyasal reaksiyona bağlı olup 1V' un altındadır. Bu nedenle daha yüksek voltajlar elde edilebilmesi için hücrelerin seri bağlanması gerekmektedir (Şekil 2.5.). Seri bağlamanın en kolay yolu bir hücrenin anodunu diğer hücrenin katoduna bağlanmaktadır. Bu metotla bağlamada elektrotlar, elektrot içinde bağlantı noktasına kadar gitmek zorunda kaldıkları için voltaj düşmektedir. Birden fazla hücre arasında bağlantı yapabilmek için geliştirilen en iyi bağlantı aracı bipolar plakalardır. Bipolar plaka bir hücrenin tüm katot yüzeyi ile diğer hücrenin tüm anot yüzeyini birleştirmektedir. Bipolar tabaka iyi bir seri bağlama aracı olmakla beraber aynı zamanda katoda oksijen ve anoda da yakıt sağlayan kanalları da bulundurmaktadır. Yakıt ve oksijenin birbirine karışmaması için çok iyi dizayn yapılması gerekmektedir.

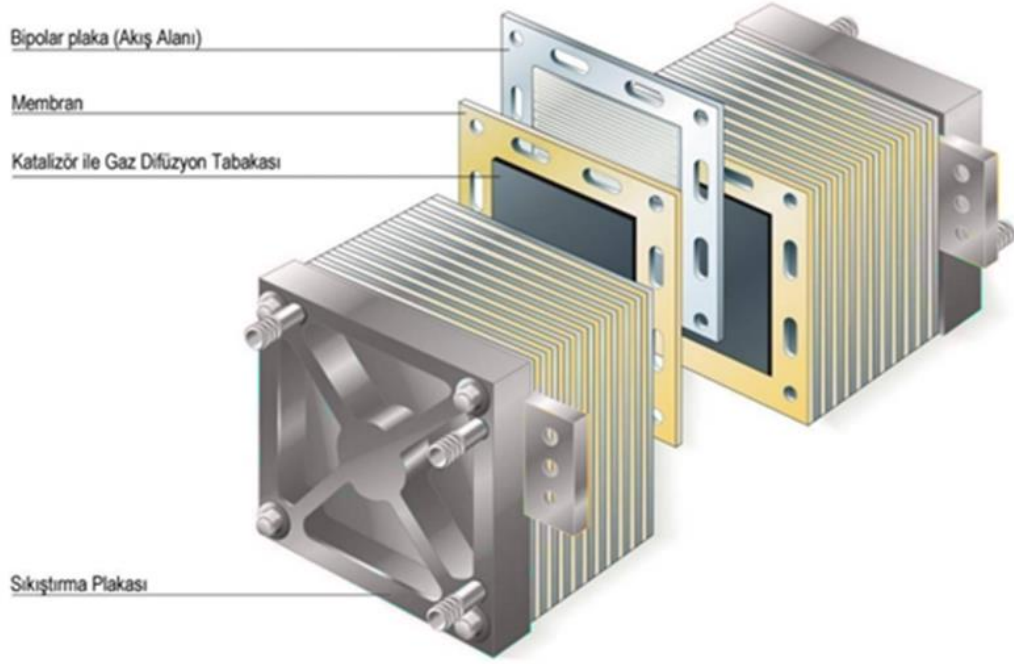
Bipolar tabaka ile sadece bir kenar yerine tüm yüzeylerden elektrik toplamak mümkün olmaktadır. Bipolar tabakanın görevleri aşağıda özetlenmiştir;

1. Gaz ve yakıtın aktive alanlara uniform bir şekilde dağılmasını sağlamak.
2. Aktif alanlardan ısının atılması,
3. Hücreden hücreye akımın iletilmesi,
4. Gaz ve yakıtın sızıntısının önlenmesi

Bipolar plaka malzemesinin korozyona dayanıklılık, elektronik iletkenliği, gaz difüzyon/geçirgenlik, işlenebilirliği, yoğunluğu, ısı iletkenliği malzeme seçiminde önemli parametrelerdir.

Bipolar plaka malzemesi olarak, elektro – grafit, karbon – karbon kompozit, metal levha, grafit – polimer kompozitler kullanılmaktadır. Yüksek saflıktaki elektron grafit prototip plakalar için ideal malzemelerdir. Fakat bu malzemenin çok pahalı olması, kullanımını kısıtlamaktadır.

Akım toplayıcı plaka üretiminde en çok kullanılan malzeme yüksek elektrik iletkenliği, yüksek ısı iletkenlik, düşük korozyon oranı ve hafifliği gibi olumlu özellikleri olan grafitir. Bununla birlikte, grafit içine akış yollarının işlenmesi pahalıdır. Grafitten başka, metal alaşımlar ve karbon kompozitler de akım toplayıcı plakalar üretmek için yaygın kullanılan malzemelerdir (Wu, 2009).



Şekil 2.5. Bipolar plaka ve yakıt hücresindeki konumu

Conta; Yakıt hücresi yığnında kullanılan membran elektrot grupları bipolar plakalar arasına sıkıştırırlar. Yakıt hücresi dışına yakıtın sızmasını engellemek için membran elektrot grubunun etrafına contalar eklenmektedir. Contalar çoğunlukla kauçuksu polimerlerden üretilmektedir (Wu, 2009).

Çizelge 2.2. PEM yakıt hücrelerinin tabakalarına ait fonksiyonlar ve taşıma olayları

Tabaka	Fonksiyonları Ve Taşıma Olayı
Bipolar Tabaka (Akım Toplayıcı Plaka)	➤ Gaz ve yakıtın aktive alanlara uniform bir şekilde dağılmasını sağlamak. ➤ Aktif alanlardan ısıнын atılması, ➤ Hücreden hücreye akımın iletilmesi, ➤ Gaz ve yakıtın sızıntısının önlenmesi
Gaz Difüzyon Tabakası (GDL)	➤ Sistemdeki suyun iletimi, ➤ Akış alanı plakaları arasında ısıl teması, ➤ Elektron iletimi,
Katalizör Tabakası	➤ Gaz reaktanların gözenekli ortamda akışı, ➤ Elektrokimyasal reaksiyonlar, ➤ Su buharlaşma ve yoğunlaşma, ➤ Membrana su taşıma, ➤ Membran emilimi, ➤ Elektron taşıma, ➤ Isı transferi,
Membran	➤ Yüksek proton iletkenliğe, ➤ Anot ve katot arasındaki yakıt çapraz geçişini engelleme,
Conta	➤ Yakıtın sızmasını engelleme,

2.5 Doğrudan Etanol Yakıt Hücresi İle İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar

Yakıt hücreleri üzerine yapılan çalışmalarda özellikle verimi ve performansı arttırmak için, yakıt hücre bileşenlerinin (akım toplayıcı plakalar, gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası, gaz akış kanalları ve membran) ve çalışma parametrelerinin optimize edilmesi için çok sayıda araştırma yapılmaktadır.

Wang vd. (2003), yaptıkları deneysel çalışmada yakıt hücresi çalışma sıcaklıkları, katot ve anot nemlendirme sıcaklıkları, çalışma basınçları gibi çalışma parametrelerinin PEM yakıt hücresi performansı üzerindeki etkisi, katot tarafında hava ve anot tarafında saf hidrojen kullanarak polarizasyon eğrileri üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca oluşturdukları sayısal model aracılığıyla deneysel sonuçlarla sayısal sonuçları karşılaştırarak kullanılan sayısal modelin doğruluğunu araştırmışlardır.

Sivertsen ve Dijali (2005), PEM yakıt hücreleri için karşılaştırması, izotermal olmayan, 3 boyutlu matematiksel model geliştirmiş ve nümerik olarak çözmüşlerdir. Modelde katot ve anotta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon ile ilişkili olarak ısı üretimini dahil etmişlerdir. Modelde elektrotlar ve membran içinde elektrik ve iyonik potansiyeller için çözülmüştür.

Taymaz ve Benli (2009), Çalışmalarında taşımacılık sektöründe, fosil yakıtların fiyatlarının artması ve çevreye verdikleri zarar sebebiyle alternatif yakıtlara olan ilginin arttığını ve metanolün farklı yöntemlerle taşıtlarda kullanılabilen alternatif yakıtlardan biri olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmaların da metanolün taşıtlarda üç farklı metotla kullanımı incelenmiş olup kendi aralarında ve diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırmaları yapmışlardır.

Heysiattalaba vd. (2011), doğrudan etanol yakıt hücresi, direkt metanol yakıt hücresi ve proton değişim membranlı yakıt hücreleri gibi diğer yakıt hücreleri için yeni bir alternatif olarak ilan etmişlerdir. Çalışmalarında, sıcaklık, anot ve katot akış hızı, molarite ve katot basıncı gibi proses parametrelerin etkileri DEYH performansı üzerinde incelenmişlerdir. Maksimum güç yoğunluğu ve yakıt hücresi performansı, iyon iletkenliği, difüzyon ve reaksiyon hızı artışından dolayı sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Molarite artırması ile de, katalizör katmanındaki etanol konsantrasyonunu ve hücrenin daha iyi performansına yol açan reaksiyon hızını artırmaktadır. Anot ve katot akış hızı ve katot basıncı, yakıt hücresi performansını az da olsa artıracaktır.

Goel vd. (2015), Çalışmalarında tek boyutlu kararlı bir durumdaki doğrudan etanol yakıt hücresinin performansını analiz etmek için matematiksel model geliştirmişlerdir. Modelin farklı anot katalizörleri için DEYH'nin akım-voltaj verilerini iyi bir şekilde tahmin ettiğini belirtmişlerdir.

Badwal vd. (2015), yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen yerine metanol ve etanol gibi biyoyakıtların kullanılması, yalnızca yakıtın lojistiği ve depolama sorunlarını azaltmakla kalmayıp CO₂ ve diğer çevresel etki oluşturan emisyonların azalmasında önemli rol oynadığını göstermişlerdir. Ayrıca doğrudan etanol yakıt hücreleri, etanol kaynakları ve üretim yöntemleri, çalışma rejimi, hücre ve yığın üretimi, performans ve ömür testleri ve pazar potansiyelini gözden geçirmişlerdir.

Charoen vd. (2017), Program Tasarım Uzmanı 7.0.0 ' ı kullanarak yüzey tepki yöntemiyle maksimum güç yoğunluğunu elde etmek için doğrudan metanol yakıt hücreleri ve doğrudan etanol yakıt hücreleri için en iyi koşullarını bulmaya çalışmışlardır. Çalışma sıcaklığı 30-70 °C aralığında, debi 5-50 ml/min aralığında ve alkol konsantrasyonu 0.5 -3 M aralığında olmak üzere üç bağımsız değişkeni ele almışlardır. Tepki sonucu, daha yüksek çalışma sıcaklıklarının ve daha yüksek alkol konsantrasyonlarının hem DMYH hem de DEYH'de maksimum güç yoğunluğunda bir artışa yol açtığını ortaya çıkarmışlardır.

Monreal vd. (2017), Doğrudan etanol yakıt hücresinin anodu için tek boyutlu bir model önermişlerdir. Literatürden elde edilen anot polarizasyonu ve ürün seçicilik verilerini kullanarak reaksiyon sabitlerini belirlemek için çok amaçlı genetik algoritma kullanmışlar ve burada geliştirilen metodolojiyi kullanarak reaksiyon sabitlerini ayarlayarak, farklı katalizör katmanları modellenabilir ve seçicilikleri başarılı bir şekilde yeniden üretilebileceğini göstermişlerdir.

Oliveira vd. (2017), pasif beslemeli bir DEYH'de meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonları ve tüm transfer olaylarını (ısı ve kütle transferi) dikkate alan kararlı durum ve tek boyutlu bir modeli açıklamışlardır. Bu modelin, farklı kimyasal türlerin konsantrasyon profillerini ve ayrıca farklı katmanlardaki sıcaklık dağılımını tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca modelin, çalışma koşullarının ve tasarım parametrelerinin etanol ve su geçiş hızı üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tahmin edebileceğini ifade etmişlerdir.

De Souza vd. (2018), yaptıkları çalışmada, potansiyellerin üzerindeki kayıpların hesaplanması için zamana ve alana bağlı akışı ve konsantrasyonunu dikkate alan doğrudan etanol yakıt hücresi (DEYH) için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Hücrenin voltaj ve güç yoğunluğunu farklı katalizörler, sıcaklıklar ve etanol konsantrasyonları için hesaplamışlardır.

Estrada vd. (2019), oksijen indirgenme reaksiyonunu seçici olarak gerçekleştirmek için Ag-Pt katotunu kullanarak yüksek etanol konsantrasyonunda incelemişlerdir. 2 M'e kadar yüksek etanol konsantrasyonu varlığında bile oksijen indirgeme reaksiyonunun seçici olarak gerçekleştirme kabiliyeti olduğunu göstermişlerdir.

Azam vd. (2019), farklı sıcaklıklar, farklı yakıt konsantrasyonları, farklı etanol debileri ve farklı hava debileri gibi proses parametrelerin doğrudan etanol yakıt hücresi üzerine etkisini incelemek için parametrik çalışma yapmışlardır. Etanol geçişinin optimizasyonu, oksidan debisinin oranı ve sıcaklığın anot ve katottaki kütle transferini arttırabileceğini ve bununla elektrokimyasal reaksiyonları ve DEYH performansını arttırabileceğini bulmuşlardır.

Ekiz A. vd. (2019), tek hücreli bir polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi Comsol Multiphysics programı kullanılarak iki boyutlu olarak modellemiştir. Akışa paralel kesitte model oluşturmuş akış kanalına farklı geometrilerde engeller konularak daha fazla yakıtı reaksiyona zorlayı hedeflenmiştir. Bu şekilde ideal performans değerlerine yakın akım ve güç yoğunlukları oluşturulmaya ve kayıplar en aza indirilmeye çalışmışlardır. Sınır koşullarını, farklı hız değerleri alınmıştır. Akış çıkış sınır şartlarında ise farklı basınç değerleri verilerek performans etkisini incelenmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda giriş hızının artması, çıkış basıncının artması, katot tarafındaki sınır şartlarına anoda göre daha fazla oksidant beslenmesi ve kanal boyunca bulunan engellerin derinliğinin artması sonrasında yakıt hücresi performansı arttığını bulmuşlardır.

Wnuk ve Lewera (2020), Pt/C ve PtRu/C katalizörleri kullanılan bir DEYH'nin anot tarafında oluşan ürün dağılımı analiz etmişler ve farklı hücre koşullarında (voltaj, sıcaklık, vb.) kullanılan katalizörlerin seçiciliğini değerlendirmişlerdir. Oksijen geçişi ve etanol oksidasyon (asetaldehit, asetik asit ve CO₂) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak oksijen geçirgenliğinin, etanol yakıt hücresi için anot zehirlenmesine yol açmadığı sonucuna varmışlardır.

Bu tez çalışması kapsamında DEYH etki eden proses parametreleri teorik olarak incelenmiş olup literatürdeki bir çalışma ile doğrulanmıştır. İncelenen parametreler arasında özellikle sıcaklık ve molaritenin verim üzerine etkilerini arttırdığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar neticesinde 10 W'lık bir model oluşturulmuştur.

BÖLÜM III

TEORİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, yakıt hücrelerinin temel denklemleri ve termodinamiği, Comsol multiphysics programında doğrudan etanol yakıt hücresi analizinde kullanılan korunum denklemleri ve elektrokimyasal reaksiyonları içeren, matematiksel model verilmiştir.

3.1 Temel Denklemler ve Yakıt Hücre Termodinamiği

Yakıt hücresinde elektro-kimyasal reaksiyonlar membranın her iki tarafında, anot ve katot katalizör tabakalarında gerçekleşmektedir. Yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar;



Genel hücre reaksiyonu (Denklem 3.3), hidrojenin yanma reaksiyonu ile aynıdır. Yanma ekzotermik bir süreçtir, dolayısıyla bu süreç içinde enerji açığa çıkmaktadır (Barbir, 2005).



Bir kimyasal reaksiyonun ısısı (entalpi), ürünlerin ve reaktanların oluşum ısısı arasındaki farktır. Sıvı su üreten hidrojen/oksijen yakıt hücreleri için reaksiyon entalpisi $\Delta H = -286 \text{ kJ mol}^{-1}$ 'dür (25 ° C'de). Bu aynı zamanda hidrojen üst ısı değeri yani hidrojenin yanması sonucu üretilen enerji miktarı olarak tanımlanır.

Bir yakıt hücresinde entalpinin tamamı faydalı işe yani elektrik enerjisine dönüşemez. Elektriğe dönüştürülebilir tepkime entalpisi kısmı aşağıda verilen Gibbs serbest enerjisine karşılık gelmektedir (Barbir, 2005).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.5)$$

Diğer bir ifade ile, entropi (ΔS) oluşumu nedeniyle enerji dönüşümünde bazı geri dönüşü olmayan kayıplar oluşmaktadır. Hidrojen oksitlenme reaksiyonu için 25 °C'deki değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Hidrojen oksitlenme reaksiyonu için entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi (25°C 'de)

Oksitlenme reaksiyonu	$\Delta H(\text{kJ mol}^{-1})$	$\Delta S(\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1})$	$\Delta G(\text{kJ mol}^{-1})$
$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O (s)}$	-286,02	-0,1613	-237,34
$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O (g)}$	-241,98	-0,0444	-228,74

Yakıt hücresi, teorik ya da tersinir potansiyeli E_r :

$$E_r = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{237,34 \text{ Jmol}^{-1}}{2 \cdot 96,485 \text{ A s mol}^{-1}} = 1,23 \text{ V} \quad (3.6)$$

Yakıt hücre reaksiyonunda (Denklem 3.6) yer alan elektron sayısı n , her hidrojen molekülü için 2'dir. F , Faraday sabitini göstermektedir. Burada n ve F sayısal değerleri ile teorik yakıt hücresi potansiyeli 1,23 V'dur (25 °C'de) (Barbir, 2005).

3.1.1 Sıcaklığın Hücre Potansiyeline Etkisi

Hem ΔH (entalpi), hem de ΔS (entropi) sıcaklığa bağlı olduğundan ΔG (Gibbs)'de sıcaklığa bağlıdır ve dolayısıyla teorik hücre gerilimi de sıcaklığa bağlıdır. Tipik bir Hidrojen/Oksijen yakıt hücresi çalışma sıcaklığında (60-80 °C) teorik olarak hücre potansiyeli 1,20-1,18 V arasındadır (Barbir, 2005).

Çizelge 3.2.'de farklı sıcaklıklardaki (hidrojen/oksijen) yakıt hücresi reaksiyonunun entalpi, Gibbs serbest enerjisi ve entropi değerleri verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, teorik yakıt hücresi potansiyeli sıcaklıkla azalmaktadır.

Çizelge 3.2. Hidrojen/oksijen yakıt hücresi reaksiyonlarının entalpi, Gibbs serbest enerji ve entropi değerleri, teorik hücre potansiyeli (Barbir, 2005)

T (K)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹)	E _r (V)
298,15	-286,02	-237,34	-0,16338	1,23
333,15	-284,85	-231,63	-0,1598	1,2
353,15	-284,18	-228,42	-0,1579	1,184
373,15	-283,52	-225,24	-0,1562	1,167

3.1.2 Basıncın hücre potansiyeline etkisi

Yukarıda verilen denklemlerin hepsi atmosferik basınçta geçerlidir. Ancak, bir yakıt hücresi genellikle bir atmosfer basınçtan 6-7 bara kadar herhangi bir basınçta çalışabilir. Bu durumda teorik olarak hücre potansiyeli, Nernst denklemine göre yüksek basınçta daha fazla olacaktır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir (Barbir, 2005).

$$E_r = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (3.7)$$

Burada; P, reaktanların ve ürünlerin kısmi basıncını, E₀ ise atmosferik basınçtaki hücre potansiyelini göstermektedir.

Yukarıdaki denklem sadece gaz formdaki ürünler ve reaktanlar için geçerli olduğu unutulmamalıdır. Hücrede sıvı su üretildiği zaman P_{H₂O}=1'dir.

Yüksek reaktan basıncında, reaktanların kısmi basıncı artmakta bu nedenle Denklem (3.7)'de verilen Nernst denklemine göre hücre potansiyeli daha da artmaktadır. Eğer reaktanlar seyreltilirse, örneğin saf oksijen yerine hava kullanılırsa, kısmi basınçları konsantrasyonlarıyla orantılıdır ve sonuç olarak hücre potansiyeli düşer (Barbir, 2005).

Çizelge 3.3'te farklı sıcaklık ve basınçlardaki teorik hücre potansiyelini göstermektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi basınç arttıkça hücre potansiyeli artmaktadır.

Çizelge 3.3. Farklı sıcaklık ve basınçlardaki teorik hücre potansiyeli (Barbir, 2005)

T (K)	Atm.	200 kPa	300 kPa
298, 15	1,230	1,243	1,251
333,15	1,200	1,215	1,223
353,15	1,184	1,200	1,209

3.1.3 Teorik Hücre Verimliliği

Herhangi bir enerji dönüşüm cihazının verimliliği, faydalı enerji çıkışı ve enerji girişi arasındaki oran olarak tanımlanır. Yakıt hücresinde, faydalı enerji çıkışı, üretilen elektrik enerjisi ve enerji girdisi ise hidrojen üst ısı değeridir. Gibbs serbest enerjisinin tamamının elektrik enerjisine dönüştüğünü varsayarsak, mümkün olan bir yakıt hücresi teorik (25 °C'de) verimliliği,

$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237,34}{286,02} = \%83 \quad (3.8)$$

olarak elde edilebilir. Hidrojen alt ısı değeri, yakıt hücresi verimliliğini ifade etmekte kullanıldığında, hücre teorik verimliliği ise (25 °C, 1 atm),

$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H_{LHV}} = \frac{228,74}{241,98} = \%94,5 \quad (3.9)$$

olmaktadır (Barbir, 2005).

3.1.4 Gerçek yakıt hücre potansiyeli ve verimliliği

Gerçek yakıt hücre potansiyeli ve gerçek verimlilik, reaktanların ve ürünlerin kinetiği ve dinamikleri ile ilgili çeşitli kayıplar nedeniyle teorik değerlerden daha düşüktür. Hücre gerçek potansiyeli şöyle ifade edilebilir:

$$V_{\text{cell}} = E_r - \Delta V_{\text{loss}} \quad (3.10)$$

Burada, ΔV_{loss} çeşitli nedenlerden dolayı oluşan gerilim kayıplarıdır ve aşağıda açıklanmaktadır.

3.2 Gerilim Kayıpları

Yakıt hücresi reaktan gazlar ile beslendiğinde, ancak elektrik devresi kapalı değil ise, herhangi bir akım üretilmez ve hücre potansiyelinin, verilen şartlarda (sıcaklık, basınç ve reaktanların konsantrasyonu) teorik hücre potansiyeline eşit olması beklenir. Ancak, uygulamada açık devre potansiyeli denilen bu potansiyel, önemli ölçüde teorik potansiyelden daha düşüktür, genellikle 1 V'dan azdır. Bu, hiçbir dış akım üretilmediğinde bile yakıt hücresinde bazı kayıplar olduğunu göstermektedir. Bir elektrik devresi yük (bir direnç gibi) ile kapatıldığında, kaçınılmaz kayıplar nedeniyle, potansiyelin üretilen akımın bir fonksiyonu olarak daha da düşmesi beklenir (Barbir, 2005).

Bu kayıpların en önemlileri aktivasyon kaybı, direnç (ohmik) kaybı, konsantrasyon (kütle transferi) ve yakıt sızıntısı kaybıdır. Bu kayıplar farklı çalışma koşullarında, özellikle sistemden çekilen akım değerlerine göre farklı etki göstermektedir. Yakıt hücrelerinde bu kayıpların etkisini dikkate alarak akım ile gerilim arasındaki değişimi gösteren grafiğe polarizasyon eğrisi denir (Özdemir, 2012).

Elektrokimyasal aktivasyon (reaksiyonların kinetiği), elektrik ve iyonik direnç, reaksiyon bölgesinde konsantrasyon azalması, reaktanların çapraz geçişi gibi çeşitli faktörlerin neden olduğu yakıt hücresi voltaj kayıpları aşağıda açıklanmaktadır (Özdemir, 2012).

3.2.1 Aktivasyon kayıpları

Aktivasyon kaybı yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonlarda, kimyasal bağları koparmak için harcanan enerji kaybıdır. Özellikle düşük akım yoğunluklarında, yakıt hücrelerinde çok büyük kayıp etkisi oluşturmaktadır. Anot ve katotta ayrı ayrı

aktivasyon kayıpları vardır. Anottaki aktivasyon kaybı katottakine göre ihmal edilebilir. Aktivasyon kaybını azaltmak için yakıt hücresini yüksek sıcaklıkta çalıştırmak ve reaksiyonun gerçekleştiği katalizörün aktif yüzey alanını artırmak gerekir (Barbir, 2005).

Aşırı-potansiyel (elektrot potansiyeli ve denge potansiyeli arasındaki fark) denilen gerilim farkı, elektrokimyasal reaksiyonun başlaması için gereklidir. Akım yoğunluğu ve bu gerilim farkı arasındaki ilişki herhangi bir elektrot için Butler Volmer denklemi ile verilir (Barbir, 2005).

$$i=i_0 \left\{ \exp \left[\frac{-\alpha_{RD} F(E-E_r)}{RT} \right] - \exp \left[\frac{\alpha_{OX} F(E-E_r)}{RT} \right] \right\} \quad (3.11)$$

Burada, elektrotun aktifliğini belirleyen iki faktör, v transfer katsayısı (α) ve değişim akım yoğunluğudur (i_0). Denklem (3.11)'deki transfer katsayısı (α) elektrottaki ileri-geri reaksiyonlar (yani indirgenme ve yükseltgenme) için katsayılarıdır (Barbir, 2005).

Denklem (3.11)'de verildiği gibi, E_r hücrenin tersinir ya da denge potansiyelidir. Anottaki tersinir ya da denge potansiyeli sıfırdır. Katottaki tersinir potansiyel ise 1,23 V'dur. (25 °C ve atmosferik basınçta) tersinir potansiyel sıcaklık ve basınçla değişmektedir. (Barbir, 2005).

Gerçek katalizör yüzey alanındaki referans değişim akım yoğunluğu (referans sıcaklık ve basınçta) verilirse, herhangi bir sıcaklık ve basınçtaki etkin değişim akım yoğunluğu aşağıdaki denklemle elde edilmiştir (Barbir, 2005).

$$i=i_0^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}} \right)^\gamma \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right] \quad (3.12)$$

Bu denklemde; i_0^{ref} , Birim katalizör yüzey alanındaki referans değişim akım yoğunluğu (referans sıcaklık ve basınçta, genellikle 25 °C ve 101,25 kPa), $A\ cm^{-2}Pt$, a_c = Katalizör özgül alanı (Pt katalizör için teorik limit $2,400\ cm^2mg^{-1}$, ancak en son teknoloji katalizör $600-1000\ cm^2mg^{-1}$ alana sahiptir.), L_c = Katalizör kaplaması (en son teknoloji elektrotlar

0,3-0,5 mg Pt cm⁻²; düşük kaplamalar mümkün ama düşük hücre gerilimlerine neden olmaktadır), P_r = Reaktant kısmi basıncı, kPa, P_r^{ref} = Referans basınç, genellikle atmosferik basınç, kPa, γ = Basınç katsayısı (0,5-1,0), E_c = aktivasyon enerjisi, 66 J mol⁻¹ (oksijen indirgenme reaksiyonu için), R = gaz sabiti, 8,314 J mol⁻¹K⁻¹, T = sıcaklık, K T_{ref} = referans sıcaklığı, 298,15 K'dir.

Değişim akım yoğunluğu (i_0), elektrotun elektrokimyasal reaksiyona devam etmek için hazır olmasının bir ölçüsüdür. Eğer, değişim akım yoğunluğu yüksek ise, elektrotun yüzeyi daha fazla aktif olur. Bir hidrojen-oksijen yakıt hücresinde, anotta referans değişim akım yoğunluğu, katoda göre çok daha büyüktür. Verilen herhangi bir aşırı-potansiyelde yüksek değişim akım yoğunluğunda, daha fazla akım üretilir. Veya tam tersi yüksek akım yoğunluğunda düşük aktivasyon kayıpları vardır. Bu kayıplar hem anot hem de katotta meydana gelir ancak oksijen indirgenmesi daha yüksek aşırı-potansiyel gerektirir, yani hidrojen oksitlenmesinden daha yavaştır (Barbir, 2005). Yüksek negatif aşırı-potansiyelinde ($E < E_r$), yakıt hücresi katodunda potansiyel eşitliğini akım yoğunluğu fonksiyonu olarak veren Butler – Volmer (Denklem 3.11) denkleminin ilk terimi daha baskın olur (Barbir, 2005). Böylece $V_{act,c}$, katot aktivasyon kayıpları şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta V_{act,c} = E_{rc} - E_c = \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) \quad (3.13)$$

Benzer şekilde anotta, pozitif aşırı gerilimde ($E > E_r$) Butler-Volmer denkleminin (Denklem 3.11) ikinci terimi baskın olur (Barbir, 2005). Böylece $V_{act,a}$, anot aktivasyon kayıpları,

$$\Delta V_{act,a} = E_a - E_{r,a} = \frac{RT}{\alpha_a F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,a}} \right) \quad (3.14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $V_{act,a}$ anot aktivasyon kayıplarını göstermektedir. $V_{act,a}$ ve $V_{act,c}$ aktivasyon kayıpları, bir yakıt hücresinde tek kayıp olsaydı hücre potansiyeli şu şekilde olurdu:

$$V_{cell} = E_r - \Delta V_{act,c} - \Delta V_{act,a} \quad (3.15)$$

3.2.2 Ohmik kayıplar

Ohmik (direnç) kayıplar, membrandaki iyon akışına (hareketine) ve elektriksel olarak iletken yakıt hücre bileşenleri aracılığıyla elektron hareketine karşı direnç nedenleriyle oluşur (Barbir, 2005).

Bu kayıplar Ohm yasası ile ifade edilebilir:

$$\Delta V_{ohm} = iR_i \quad (3.16)$$

Burada, i akımı temsil etmektedir.

R_i ise iyonik, elektronik ve temas dirençlerini içeren toplam hücre iç direncidir, yani:

$$R_i = R_{i,i} + R_{i,e} + R_{i,c} \quad (3.17)$$

Grafit veya polimer / grafit kompozitler, akım toplayıcı plaka olarak kullanıldığında elektronik direnç ihmal edilir. Temas direnci büyük ölçüde gaz difüzyon tabakası ve akım toplayıcı plaka için kullanılan malzemeler ve uygulanan sıkma basıncına bağlıyken, iyonik direnç çoğunlukla polimer membran nemlilik durumuna bağlıdır. İyi tasarlanmış, monte edilmiş ve işletilmekte olan yakıt hücresinde R_i için tipik değerler 0,1 ve 0,2 $\Omega \text{ cm}^2$ arasındadır (Barbir, 2005).

3.3 Gerçek Yakıt Hücre Potansiyeli - Polarizasyon Eğrisi

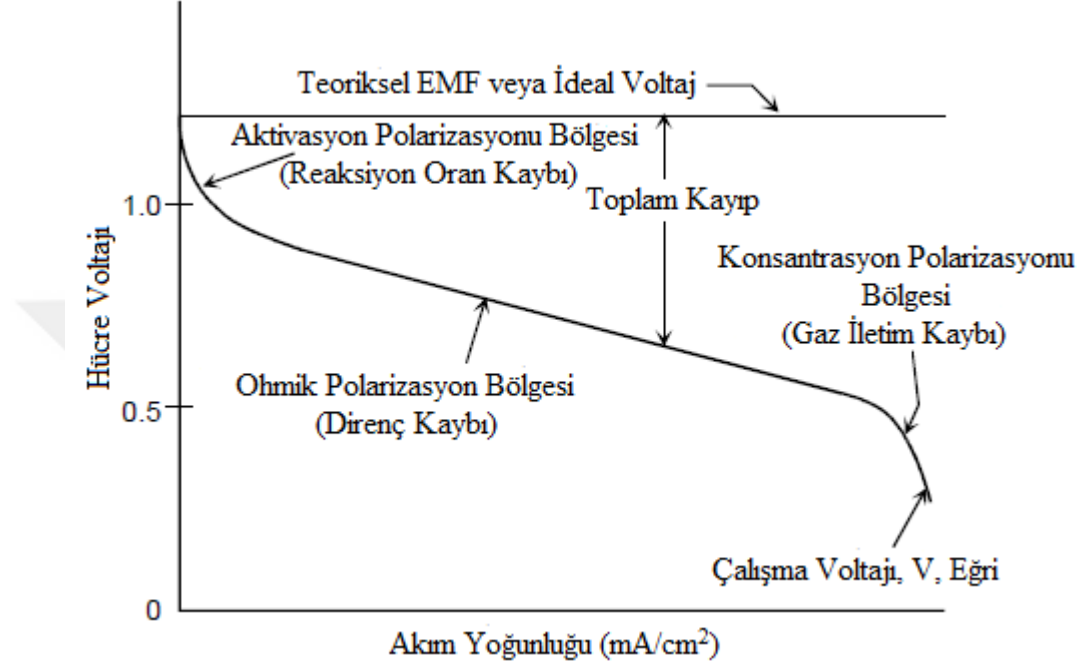
Gerçek hücre potansiyeli (V_{cell}), teorik hücre potansiyelinden aktivasyon (V_{act}), ohmik (V_{ohm}), konsantrasyon (V_{conc}) kayıplarının çıkarılması sonucu elde edilir:

$$E_{cell} = E_r - (\Delta V_{act} + \Delta V_{conc})_a - (V_{act} + V_{conc})_c - V_{ohm} \quad (3.18)$$

Denklem 3.13, 3.14, 3.16 ve 4.17 denklemleri (Denklem 4.21) denkleminde yerine konularak, yakıt hücre potansiyeli ve akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi gösteren yakıt hücresi polarizasyon eğrisi elde edilmiştir (Barbir, 2005).

$$E_{\text{cell}} = E_{r,T,P} - \frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,c}} \right) - \frac{RT}{\alpha_a F} \ln \left(\frac{i}{i_{0,a}} \right) - \frac{RT}{n_c F} \ln \left(\frac{i_{L,c}}{i_{L,c}} \right) - \frac{RT}{n_a F} \ln \left(\frac{i_{L,a}}{i_{L,a}} \right) - iR_i \quad (3.19)$$

Aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon kayıplarının, teorik hücre geriliminden çıkarılarak elde edilen hücre polarizasyon eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir (Barbir, 2005).



Şekil 3.1. Yakıt hücresindeki gerilim kayıpları ve polarizasyon eğrisi
(Appleby ve Foulkes, 2004)

Anot ve katot aktivasyon kayıpları aynı olarak değerlendirilir ancak kayıpların çoğunluğu oksijen indirgenme reaksiyonundaki yavaşlık nedeniyle katot da meydana gelmektedir (Barbir, 2005).

3.4 Gerçek Hücre Verimliliği

Yakıt hücresi verimliliği, faydalı enerji çıkışı yani üretilen elektrik ve enerji girişi yani tüketilen hidrojen arasındaki orandır. Her ikisi de watt veya kilowatt gibi aynı birimlerde olmalıdır (Barbir, 2005).

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} \quad (3.20)$$

Burada , η verimi; W_{el} , üretilen elektrik enerjisini; W_{H_2} , tüketilen hidrojen miktarını göstermektedir. Elektrik üretimi (W_{el}), sadece gerilim (V) ve akımın (A) çarpımıdır.

$$W_{el}=V \cdot I \quad (3.21)$$

Tüketilen Hidrojen miktarı N (mol/s), Faraday Kanununa göre doğrudan üretilen akım I (A) ile orantılıdır;

$$N_{H_2} = \frac{I}{nF} \quad (3.22)$$

Tüketilen hidrojenin “enerji değeri”;

$$W_{H_2} = \Delta H \frac{I}{nF} \quad (3.22)$$

Elde edilen elektrik üretimi (W_{el}) ve tüketilen hidrojen enerji değeri (W_{H_2}) Denklem 3.20’te yerine koyulursa, yakıt hücre verimliliği (η) aşağıdaki gibi bulunur;

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} = \frac{V \cdot I}{\Delta H \frac{I}{nF}} = \frac{nFV}{\Delta H} \quad (3.23)$$

($\Delta H/nF$), Volt boyutunda ve $\Delta H = 286 \text{ kJ / mol}$ için 1,482 V değerine eşittir. Böylece yakıt hücre verimliliği sadece hücre potansiyeli (V) ile doğru orantılıdır (Barbir, 2005).

$$\eta = \frac{V}{1,482} \quad (3.24)$$

3.5 Matematiksel Modelleme

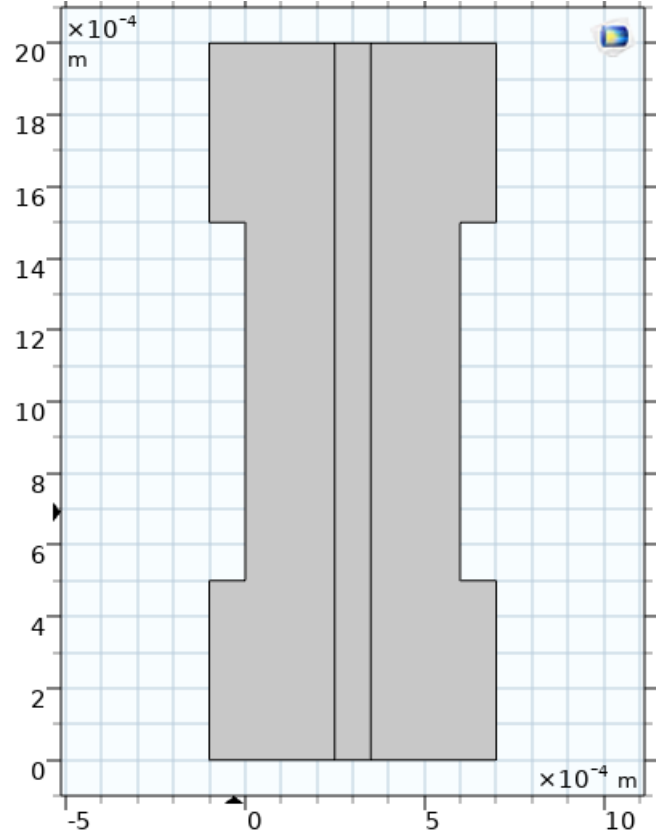
DEYH 2 boyutlu olarak Şekil 3.2’ deki gibi idealize edilmiştir. Sistem her iki elektrot içinde birer akış kanalı, destek tabakası ve her iki elektrot arasında bir membran tabakasından oluşmaktadır. Elektrotlarda aşağıdaki elektro-kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Doğrudan etanol yakıt hücresinin şematik görünümü

3.5.1 Model Geometrisi

COMSOL Multiphysics programında kullanılan model Şekil 3.3.'de gösterilmiştir.

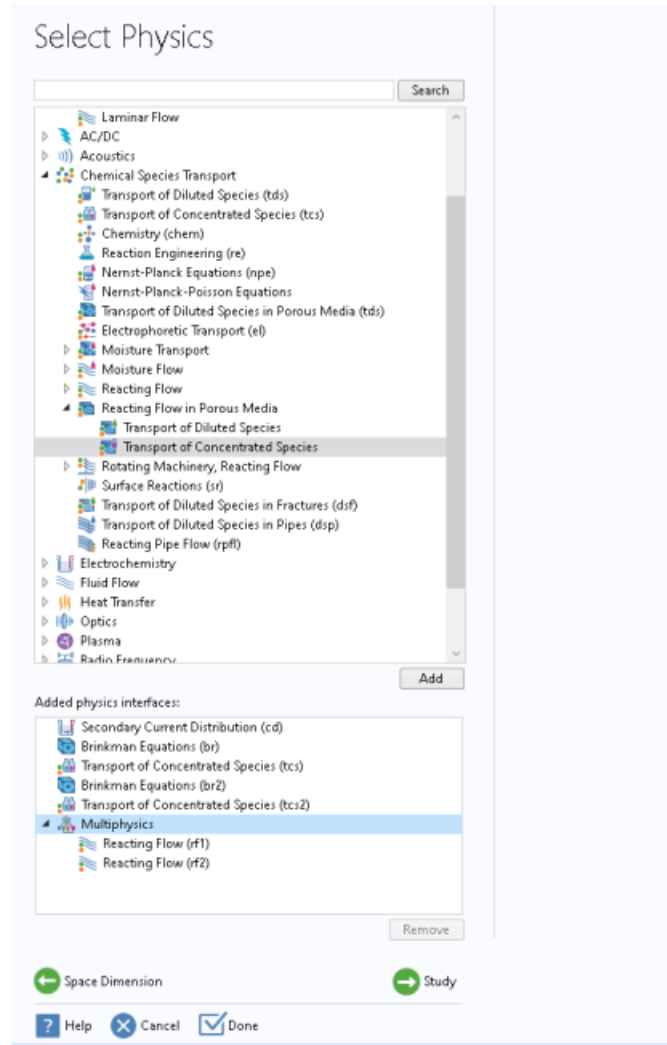


Şekil 3.3. COMSOL Multiphysics programında kullanılan model

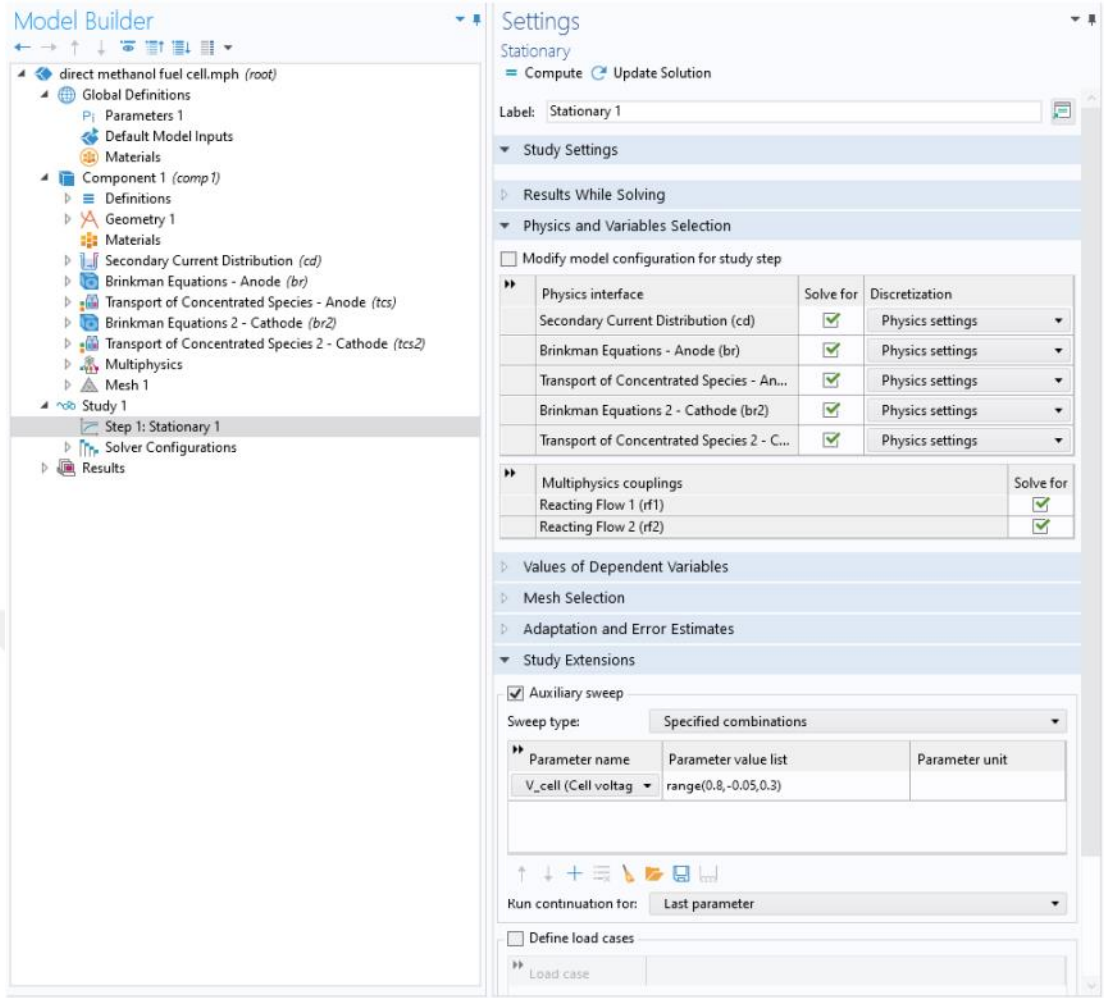
3.5.2 Model Fiziklerinin Programa Tanımlanması

Sayısal çözümleme Comsol multiphysics programı ile gerçekleştirilmiştir. Comsol multiphysics programının seçilme sebebi, bilinen diğer hesaplamalı akışkanlar mekaniği programlarından farkı, kontrol hacim metodu ile çözüm yerine sonlu elemanlar metodu ile sayısal çözümleme yapmaktadır.

Comsol multiphysics programında fizik seçimleri için model oluşturma sekmesinde modelde kullanılacak fizikler yapılmıştır. “Secondary Current Distribution”, “Transport of Concentrated Species” ve “Brinkman Equations” fizik arayüzleri yakıt hücresi simülasyonunun temelidir. Fizik seçimleri Şekil 3.5’te verilmektedir.



Şekil 3.4. Comsol multiphysics programında fizik seçimleri



Şekil 3.5. Fizik arayüzlerinin çözüme eklenmesi

Çizelge 3.4. COMSOL Multiphysics programındaki bilinmeyen değişkenlerin özeti

Değişkenler	Çözüm Modülü	Tanımlandığı Alan
ϕ_s, ϕ_l	Secondary Current Distribution	Gaz Difüzyon Tabakaları, Katalizör Tabakaları, Membran
$w_{C_2H_5OH}, w_{H_2O_a}, w_{O_2}, w_{H_2O_c}$	Transport of Concentrated Species	Akış Kanalları, Gaz Difüzyon Tabakaları, Katalizör Tabakaları
u, p	Brinkman Equations	Akış Kanalları, Gaz Difüzyon Tabakaları, Katalizör Tabakaları

3.5.3 Model Denklemleri

Bu çalışmada kullanılan matematiksel modelde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Yakıt hücresi düzgün rejim koşullarında çalışmaktadır.
- Karbondioksit elektrokimyasal reaksiyonun ana ürünüdür.
- Katotta atmosferik hava kullanılmıştır.
- Etanol anot katmanı ve membran bölgesinde yayılabilir.

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

Elektron / İyon yükü dengesi:

Ohm kanunu:

$$I = \sigma \Delta V \quad (3.25)$$

Burada; I = akım , σ = iletkenlik, V = potansiyel i göstermektedir.

Yük transferi kinetiği:

Tafel eşitliği:

$$i_{loc} = i_0 10^{\eta/Aa}, i_{loc} = -i_0 10^{\eta/AC} \quad (3.26)$$

Burada; i_{loc} = yerel akım yoğunluğu , i_0 = akım yoğunluğu değişimi , η = aşırı gerilimi göstermektedir.

Elektrolitte yük transferi:

Nernst-Planck eşitliği:

$$N_i = -D_i \nabla c_i - z_i u_i F c_i \nabla \phi + c_i u \quad (3.27)$$

Burada; N_i = elektrolitte yük transferi , D = difüzyon katsayısı , c = konsantrasyon, z = elektron sayısı, F = faraday sabiti , ϕ = elektrolit potansiyelini göstermektedir.

Serbest ve gözenekli elektrotta kütle transferi:

Navier-Stokes eşitliği:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot [-\eta (\nabla u + \nabla u^T) + p l] = -\rho (u \cdot \nabla) u \quad (3.28)$$

Brinkman eşitliği:

$$\frac{\rho}{\epsilon_p} \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot [-\eta \frac{\rho}{\epsilon_p} (\nabla u + \nabla u^T) + p l] = -\frac{u}{k} u \quad (3.29)$$

Burada; ρ =yoğunluk, η = dinamik viskozite , ϵ_p = gözeneklilik, k = geçirgenliği göstermektedir.

Gözenekli elektrot ve akış kanallarında kütle dengesi:

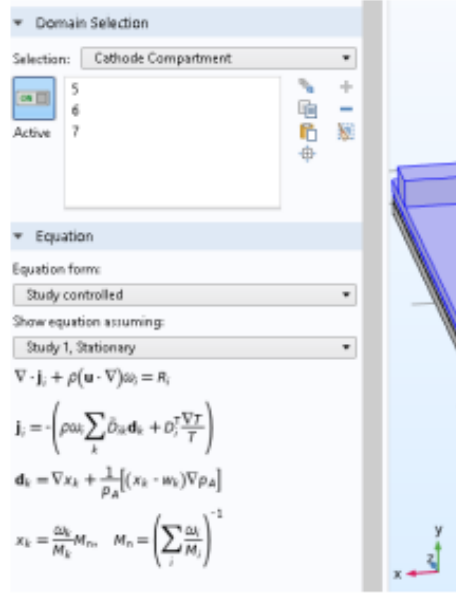
Fick kanunu:

$$-\nabla \cdot (-D \cdot \nabla c + c \cdot u) = 0 \quad (3.30)$$

Maxwell-Stefan eşitliği:

$$-\nabla \cdot [-\rho w_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \{ \frac{M}{M_j} (\nabla w_j + w_j \frac{\nabla M}{M}) + (x_j - w_j \frac{\Delta p}{p}) \} + w_i \rho u] = 0 \quad (3.31)$$

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



Şekil 3.6. Comsol multiphysics programına denklemlerin girilmesi

3.5.4 Model Parametreleri

Comsol multiphysics programıyla doğrudan etanol yakıt hücresi modelindeki bazı parametreler aşağıda Çizelge 3.5.'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Comsol multiphysics programında kullanılan model parametreleri

Parametre	Değer
Anot difüzyon tabakası gözenekliliği	0,4 (Kareemullave ve Jayanti, 2009)
Katot difüzyon tabakası gözenekliliği	0,4 (Kareemullave ve Jayanti, 2009)
Anot katalizör tabakası gözenekliliği	0,4 (Kareemullave ve Jayanti, 2009)
Katot katalizör tabakası gözenekliliği	0,4 (Kareemullave ve Jayanti, 2009)
Anot ve Katot difüzyon tabakası geçirgenliği	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (Yang ve Zhao, 2007)
Anot ve Katot katalizör tabakası geçirgenliği	10^{-13} m^2 (Murgia vd., 2003)
Membran elektronik iletkenliği	$14,16 \text{ S m}^{-1}$ (Jeng ve Chen, 2002)
Anot ve Katot difüzyon tabakası elektronik iletkenliği	300 S m^{-1} (Liu ve Mang , 2007)
Etanol mol ağırlığı	$46,068 \text{ g mol}^{-1}$ (Pramanik ve Basu, 2010)
Karbondioksit mol ağırlığı	$44,01 \text{ g mol}^{-1}$ (Pramanik ve Basu, 2010)
Su mol ağırlığı	$18,015 \text{ g mol}^{-1}$ (Pramanik ve Basu, 2010)
Anot referans akım yoğunluğu	$4,8 \text{ mA cm}^{-2}$ (Memming vd. ,2015)
Etanolün su içindeki difüzyon katsayısı	$4,7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Andreadis ve Tsiakaras , 2006)
Etanolün membran içindeki difüzyon katsayısı	$1,76 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Andreadis ve Tsiakaras , 2006)
Oksijenin gaz içindeki difüzyon katsayısı	$2,98 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Suresh ve Jayanti, 2011)

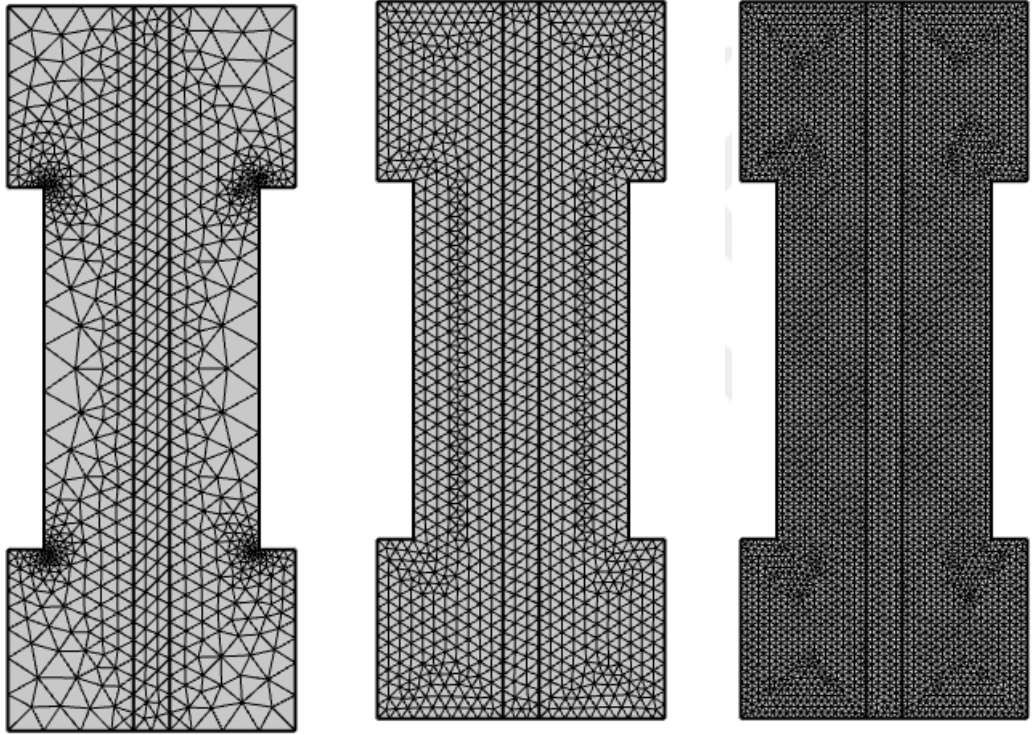
3.5.5 Modelin Ağ Yapısının (mesh) Oluşturulması

Comsol Multiphysics programında ağ (mesh) sayısının değişmesinin elde edilen çözümleri değiştirmedikini göstermek amacıyla 3 farklı ağ yapısında çözüm yapılmıştır. Farklı ağ (mesh) yapılarında 0,7 voltteki alınan akım yoğunları Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Farklı ağ(mesh) yapılarında akım yoğunluğu değerleri

	Ağ (mesh) Sayısı	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)
1. Ağ (mesh)	2928	16,99 mA/cm ²
2. Ağ (mesh)	9530	17 mA/cm ²
3. Ağ (mesh)	20132	17,12 mA/cm ²

Sonuçlar incelendiğinde çözümün ağ (mesh) sayısının değişimi akım yoğunluğunu pek fazla etkilemediği görülmüştür.



Şekil 3.7. Geometriye uygulanan farklı ağ (mesh) sayıları

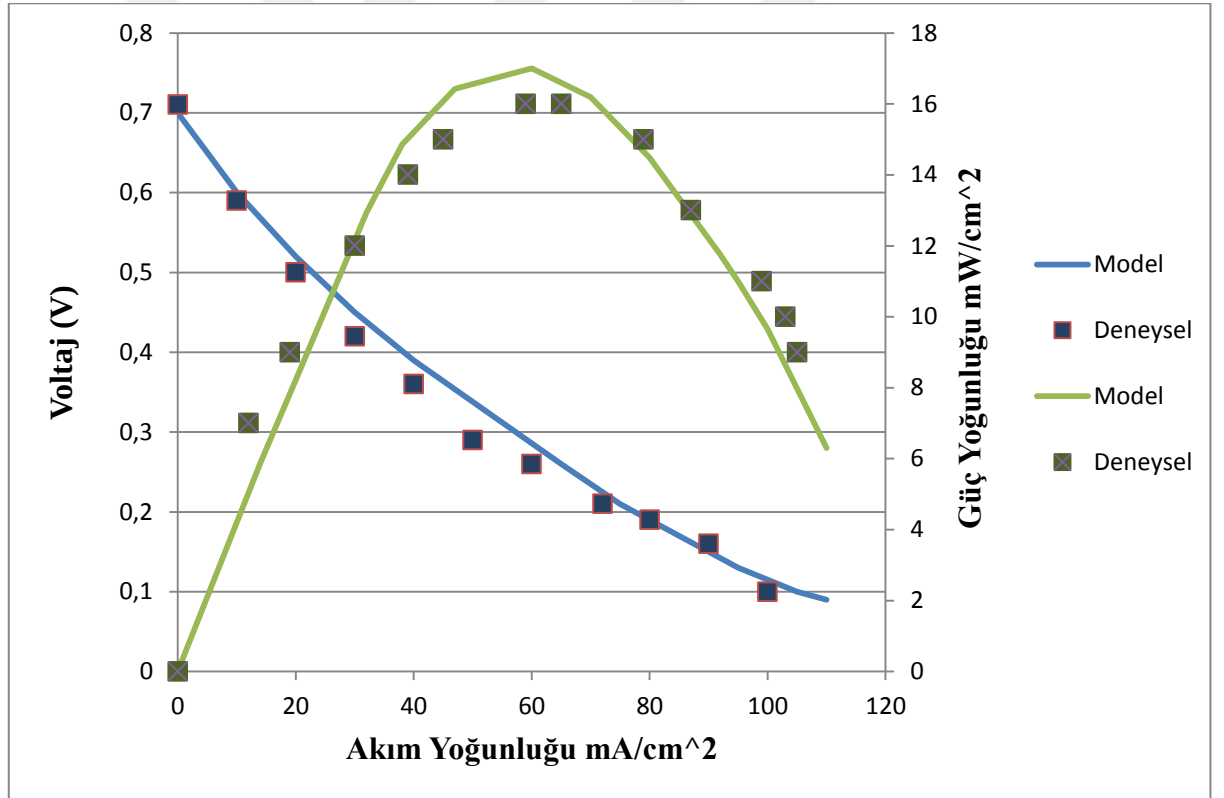
BÖLÜM IV

ANALİZ SONUÇLARI

Çalışma kapsamında yapılan sayısal analiz literatürde yapılan bir deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. İncelenen parametrelere bağlı olarak polarizasyon eğrileri ve güç yoğunluğu eğrileri verilmiştir.

4.1 Modelin İspatlanması

Doğrudan etanol yakıt hücresi için geliştirilen model, Heysiattalab vd. (2011) tarafından yayınlanan deneysel verilerle doğrulanmıştır.

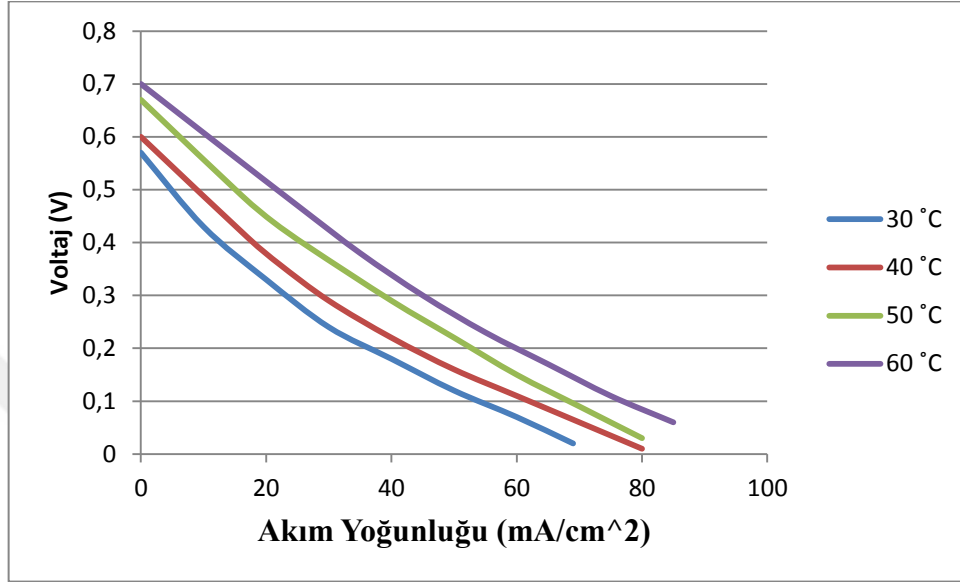


Şekil 4.1. DEYH modelinin deneysel çalışma ile karşılaştırılması

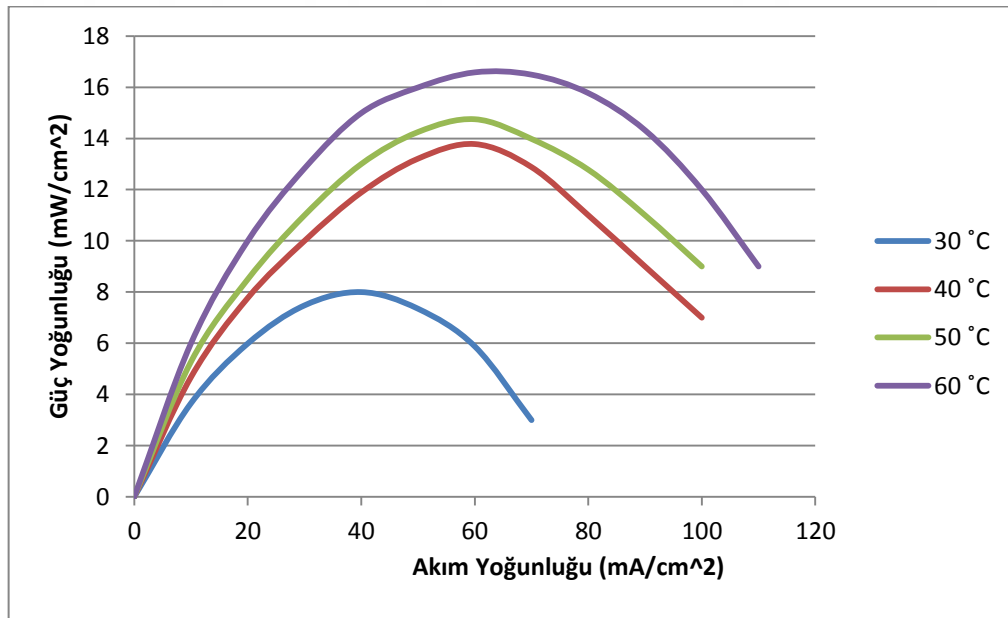
Sonuçlar 1 M etanol ve 60 °C sıcaklık parametreleri için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere deneysel çalışma ile sayısal analiz modeli arasında iyi bir uyum vardır. Elektrokimyasal reaksiyonların basitleştirilmesinden kaynaklı ufak farklılıklar göstermektedir.

4.2 Sıcaklığın DEYH Performansına Etkisi

Yapılan çalışmada 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C dört farklı sıcaklık parametresi incelenmiştir.



Şekil 4.2. Sıcaklığın yakıt hücresine etkisi



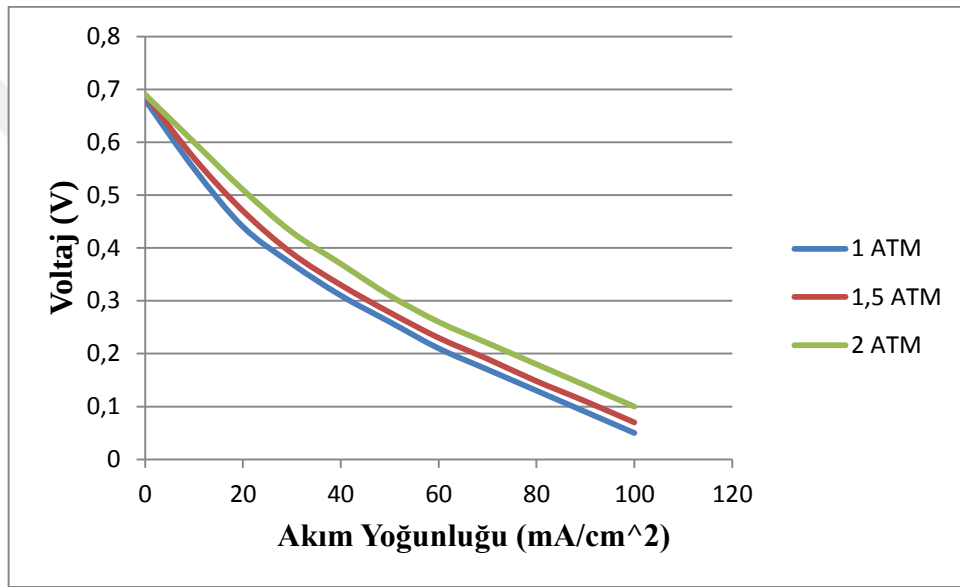
Şekil 4.3. Sıcaklığın yakıt hücresine etkisi

Şekil 4.2. ve Şekil 4.3. incelendiğinde 60°C 'de performansın arttığı gözlenmiştir. Sıcaklık ile membranın iyonik iletkenliği arttığından daha fazla H⁺ iyonları anot

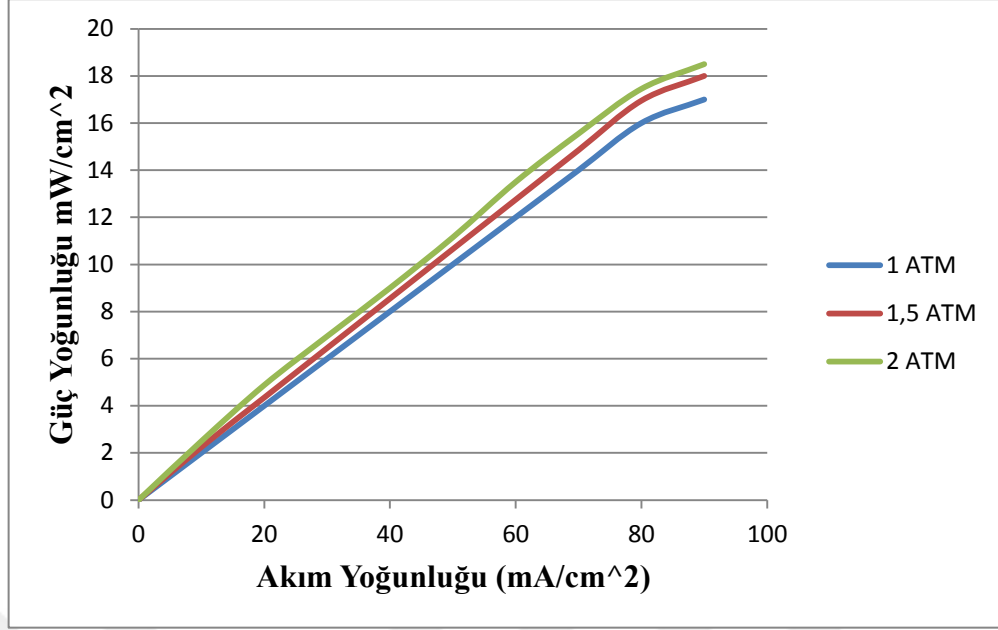
katalizör tabakasına ulaşır böylelikle elektrokimyasal reaksiyonlar artar ve DEYH'nin performansı artmaktadır.

4.3 Katot Basıncının DEYH Performansına Etkisi

Modelde katot basıncının DEYH'nin performansına etkisi için 1 atm, 1,5 atm ve 2 atm parametreleri alınmış ve incelenmiştir. Parametreler 60°C ve 2 M etanol konsantrasyonu uygulanarak elde edilmiştir. Parametrelerin etkisi Şekil 4.4.'te ve Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Katot basıncının yakıt hücresine etkisi

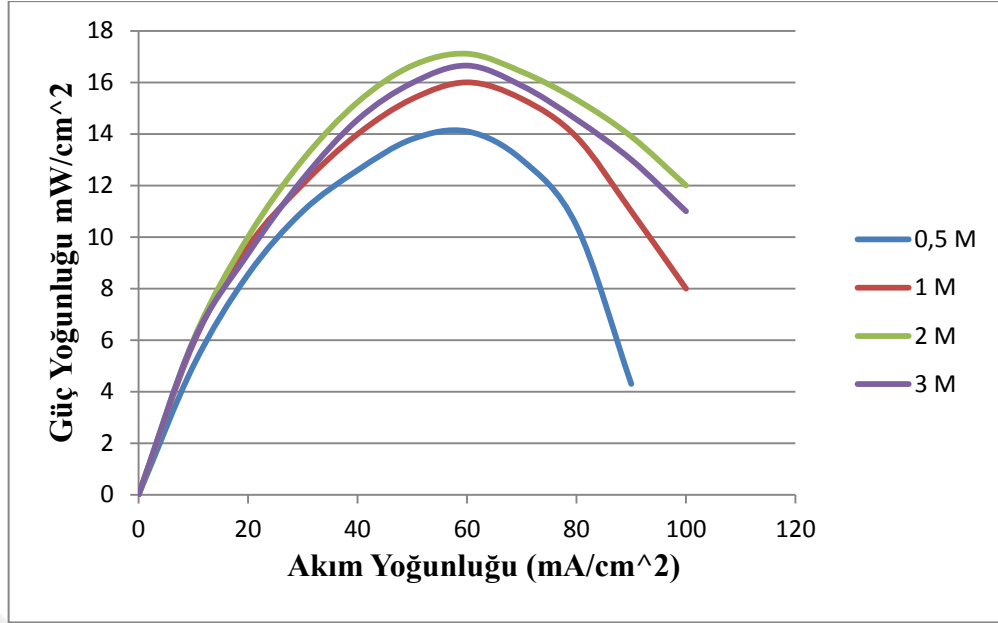


Şekil 4.5. Katot basıncının yakıt hücresine etkisi

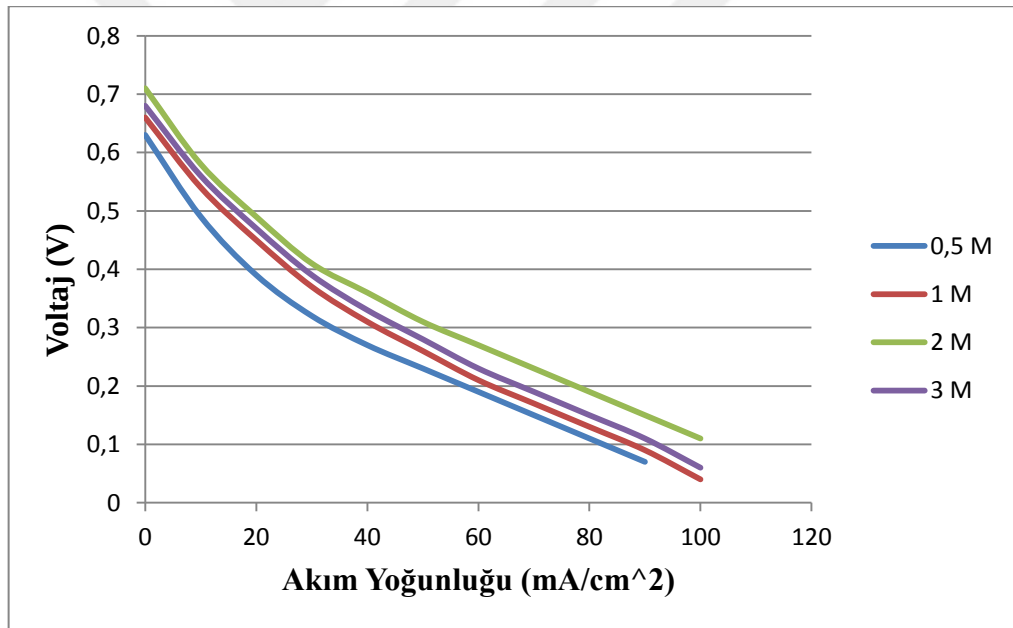
Şekillerde görüldüğü üzere katot basıncının artması sistemin performansını arttırmaktadır.

4.4 Etanol Molaritesinin DEYH Performansına Etkisi

Yakıt hücresine molaritenin etkisini incelemek amacıyla farklı konstrasyonlarda etanol çözelti girişi uygulanmıştır. Parametreler 0,5 Molar, 1 Molar, 2 Molar ve 3 Molar olarak seçilmiştir.



Şekil 4.6. Etanol molaritesinin DEYH performansına etkisi



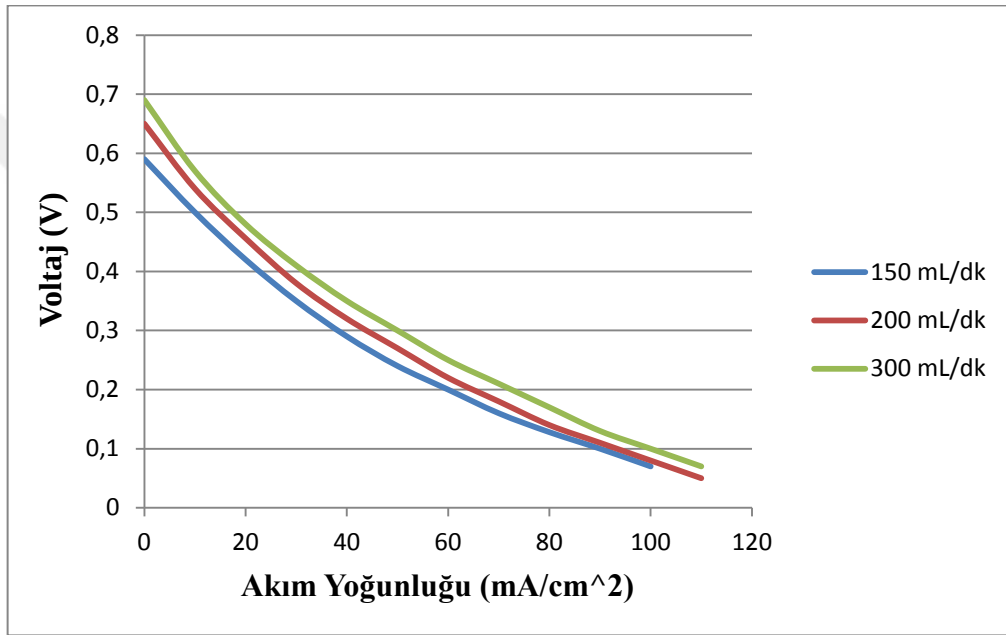
Şekil 4.7. Etanol molaritesinin DEYH performansına etkisi

Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi etanol molaritesi performansı etkilemektedir. Etanol konsantrasyonu artırmasıyla maksimum akım yoğunluğu 17 mW/cm²'ye ulaşacaktır. Etanol konsantrasyonunun arttırılması, etanol konsantrasyonuna bağlı olarak reaksiyon hızının artmasını sağlamaktadır. Düşük olduğunda ise yeterli etanol katalizör tabakasına ulaşamadığı dolayısıyla yakıt hücresinin performansın da düştüğü görülmektedir. 3 M'de artan etanol geçişi nedeniyle yakıt hücresi performansının ve

maksimum akım yoğunluğunun düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi katalizör tabakasından geçen yeterli hava / O₂ olmamasından kaynaklanır.

4.5 Hava Debisinin DEYH Performansına Etkisi

Çalışmada katot kanal girişindeki hava debisinin DEYH üzerine performansına etkisini incelemek amacıyla katot kanalına 150 mL/dk, 200 mL/dk ve 300 mL/dk debilerde hava beslemesi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.8.'de verilmiştir.

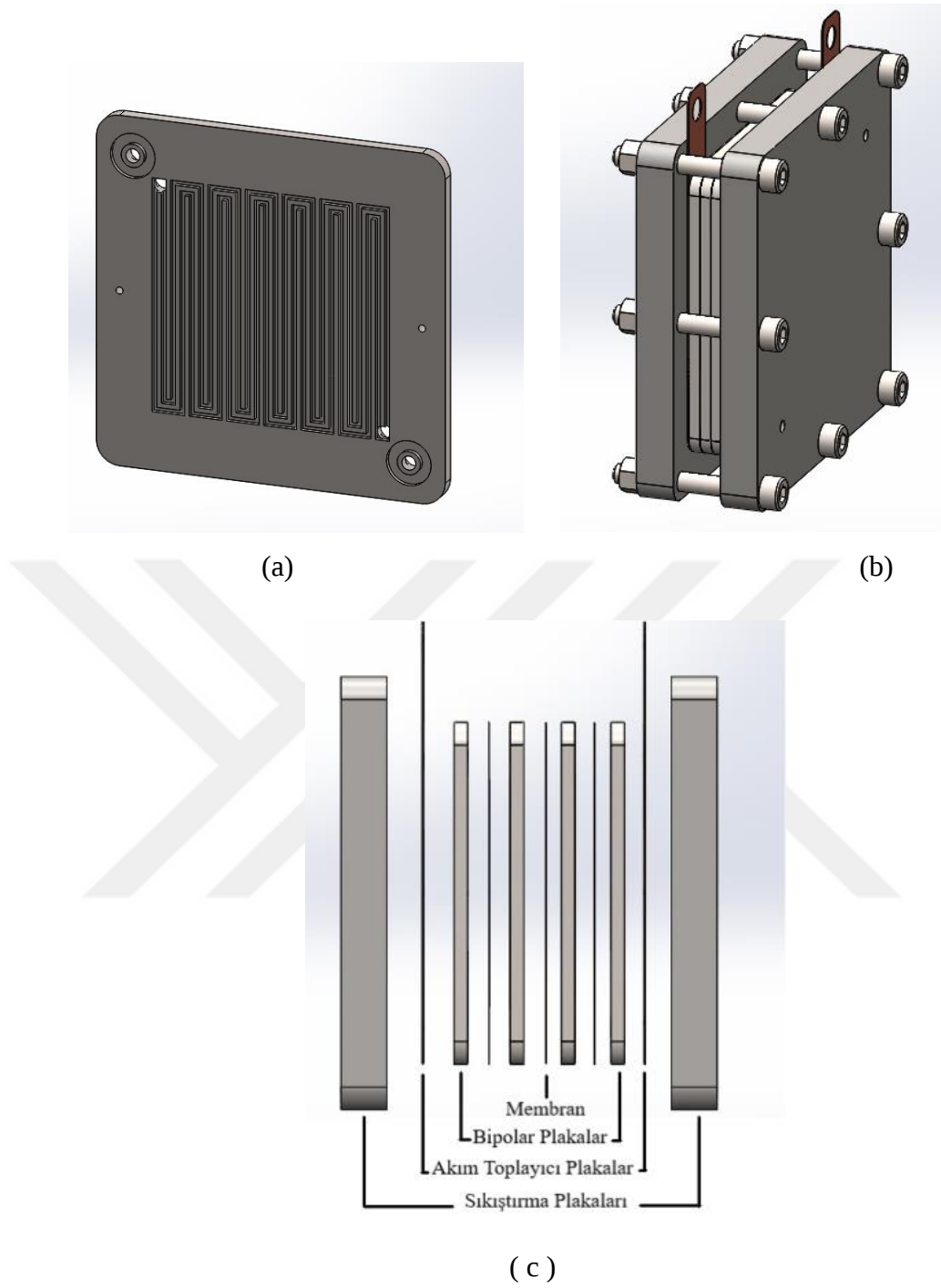


Şekil 4.8. Katot kanal girişindeki hava debisinin etkisi hücre voltajı – akım yoğunluğu (V-I) grafiği

Şekil 4.8.'den görüldüğü gibi hava debisinin artmasıyla yakıt hücresinin performansını olumlu yönde etkilemektedir.

4.6 DEYH Sistem Tasarımı

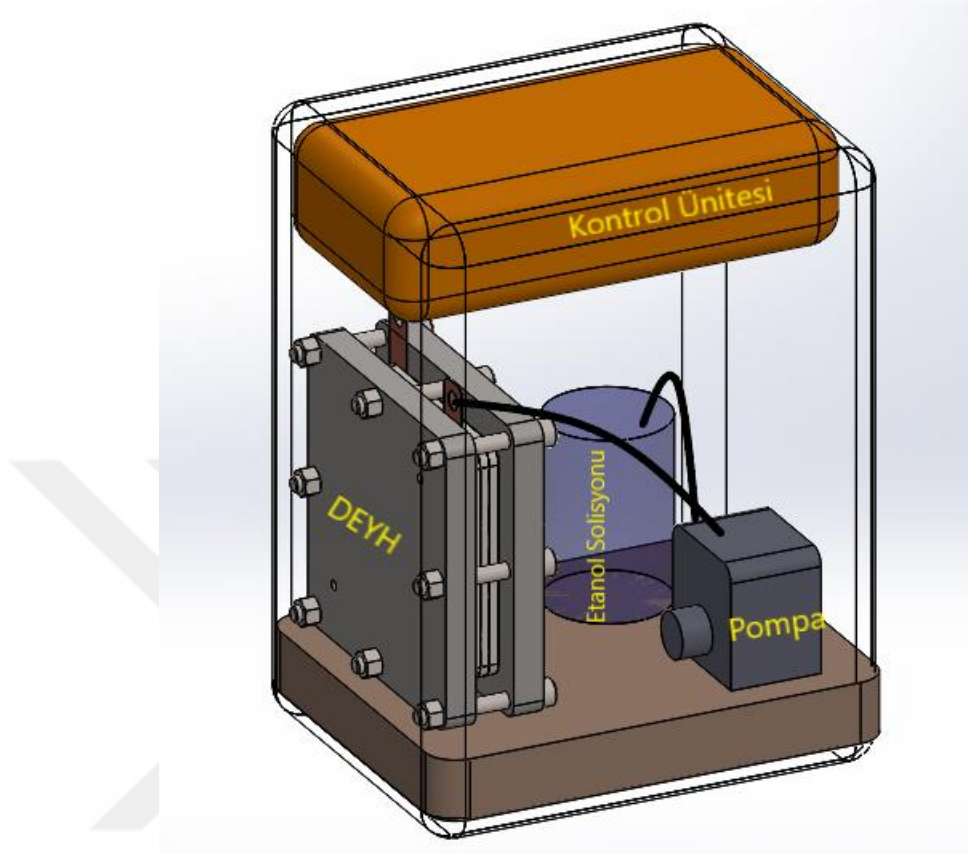
Bipolar plaka hem DEYH yığını oluşturarak Membran Elektrot Gruplarının (MEG) anot ve katotları arasında ayırıcı tabaka hem de üzerinde akış kanalları ile yakıt ve oksijenin etkin bir şekilde dağılımını sağlayan çok önemli bir elemandır. Tez çalışması kapsamında elde edilen teorik verilere bağlı olarak 25 cm² aktif alana sahip 10 W güç üretebilecek yığın 3 hücreden oluşmuştur. Tasarlanan yığın Şekil 4.9'da verilmiştir



Şekil 4.9. Üç hücreli yakıt hücresi yığın katı tasarımı; Bipolar plaka (a) , Yığının montajlanmış hali (b) ve Yığın elemanları (c)

DEYH sistem performansı, tasarımından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu sistemlerin karmaşık yapıları göz önüne alındığında, tasarımında birinci konfigürasyon, yakıt molaritesi, sıcaklık, katot basıncı ve hava debisi gibi birçok proses parametresi etki etmektedir. Bu çalışma kapsamında yığın tasarımına etki eden faktörler teorik olarak

incelenmiş ve elde edilen veriler ışığında tasarlanmıştır. Tasarlanan DEYH sistemi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. DEYH Tasarımı

Taşınabilir cihazlar için tasarlanan otomatik kontrollü yüksek performanslı DEYH sistemi kararlı bir şekilde performans kaybı yaşamadan çalışabilmesi için proses parametreleri detaylı olarak incelenmiştir.

Tek bir hücreye verilebilecek voltaj, teorik voltajın altında olup 1V değerine ulaşmamaktadır. Bahsi geçen sebeple daha yüksek voltajlar elde edilebilmesi, yani güç üretebilmek için hücrelerin seri bağlanması gerekmektedir. Seri bağlamanın en kolay yolu, bir hücrenin anodunu diğer hücrenin katoduna bağlamaktır. Birden fazla hücre arasında bağlantı yapabilmek için geliştirilen en iyi bağlantı elemanlarıdır.

Bipolar plaka malzemesinin korozyona dayanıklılığı, elektronik iletkenliği, gaz difüzyon/geçirgenliği, işlenebilirliği, yoğunluğu, ısı iletkenliği malzeme seçiminde önemli parametrelerdir. Bu çalışma kapsamında, uygun maliyetli monel alaşım esaslı

bipolar plakalar nano seviyede gümüş ile kaplama ile elektriksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirildiği tasarlanmıştır. Monel alaşımı oluşturan bakır, kurşun ve nikel farklı oranlarda birleştirilerek döküm yoluyla üretilmekte ve elektriksel iletkenliği yaklaşık bakıra (59 mega-siemens/m) yakın olmaktadır.



BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğrudan etanol yakıt hücresi performansını artıran parametreleri incelemek için Comsol Multiphysics programıyla bir model geliştirilmiştir. Yapılan modelin doğrulanması için aynı özellikleri içeren Heysiattalab vd. (2011) tarafından yayınlanan deneysel veriler kullanılmıştır. Doğrudan etanol yakıt hücresinin performansını iyileştirmek için doğrulanan model üzerinde sıcaklığın, katot basıncının, hava debisinin ve kullanılan çözeltideki etanol molaritesi gibi proses parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu araştırmalar sonucunda hücre voltajı-akım yoğunluğu, güç yoğunluğu-akım yoğunluğu grafikleri oluşturulmuştur. Bu çalışmaya göre doğrudan etanol yakıt hücresinin performansına sıcaklığın etkili olduğu etanol yakıt hücresinin performansını arttırdığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda etanolün konsantrasyonunun artmasının performansını etkileyen en önemli faktör olduğu ortaya koyulmuştur. Katot basıncının ve hava debisinin artırılması hücre performansına olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Sayısal analiz sırasında yakıt hücresi performansı için incelenen parametrelerin yanı sıra katotta oksidan olarak hava yerine oksijen kullanıldığında yakıt hücresi performansını arttırdığı görülmüştür.

Etanol, alternatif enerji çalışmaları kapsamında uygun bir yakıttır. Depolama ve taşıma gibi sorunlarını ortadan kaldıran yakıt olup çevreye zarar vermeyen, kolay ulaşılabilir ve zehirsiz özelliğiyle daha verimli alternatif enerji olmaktadır. Çalışma kapsamında etanolün diğer yakıtlara göre üstün özellikleri ile otomotiv sektöründe ve taşınabilir cihazlarda kullanılabilirliğinin ivmeleneyeceği görülmüştür.

DEYH'nin ticarileşmesi ve alternatif enerji üretici olarak kullanılmaya başlanması için endüstriyel çalışmaların yoğunlaşması umut vericidir.

Tez süresince yapılan çalışmalarda doğrudan etanol yakıt hücresini etkileyen parametreler, çalışma prensibi, tasarımı, dizaynı ve deneysel aktivitelerle ilgili önemli bilgi ve deneyim elde edilmiştir. Bilgi birikimi ve tecrübe ile 3 hücreden oluşan bir yığın tasarımı yapılmış ve teorik olarak 10 W güç elde edilmiştir. Bu güç birçok taşınabilir elektronik cihazın çalışması için yeterli olmaktadır. Elde edilen teorik

sonuçlar DEYH'nin taşınabilir elektronik cihazlarda sorunsuz olarak başarı ile kullanılabilceğini göstermiştir. Bu alışma ile DEYP'nin çalışma prensibi, karakteristikleri, hücre ve yığın dizaynı konularında çok önemli bilgi ve tecrübe elde edilmiş olup çok yakın bir gelecekte ilgili sanayilerce taşınabilir cihazlar için DEYH sistemleri hazırlanabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

Abdullah S., Kamarudin S.K., Hasran U.A., Masdar M.S. ve Daud W.R.W., ‘Electrochemical kinetic and mass transfer model for direct ethanol alkaline fuel cell (DEAFC)’, *Journal of Power Sources*, 320 ,111-119, 2016

Andreadis G ve Tsiakaras P. ‘Ethanol crossover and direct ethanol PEM fuel cell performance modeling and experimental validation’, *Chem Eng Sci* ,61(22):7 497-508, 2006

Barbir, F., “PEM fuel cells: theory and practice”, *Elseiver*, USA, 1-16, 33-61 (2005)

Chi Him A. ve Leung D.Y.C., ‘ Use of Pd-Pt loaded graphene aerogel on nickel foam in direct ethanol fuel cell’ , *Solid State Sciences* ,75 ,21-26, 2018

De Souza M.M., Gomes R.S. ve De Bortoli A.L., ‘A model for direct ethanol fuel cells considering variations in the concentration of the species’, *International Journal Of Hyydrogen Energy* ,43,13475-13488,2018

Ekiz A., Camcı T. , Türkmen İ. , Sankır M., Uslu S. , Baker D.K. Ve Ağar E., ‘ Pem Tipi Yakıt Pilleri İçin Çift Kutuplu Akış Plakalarının Modellenmesi’ , *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der* 26, 3, 591-605, 2011

Fuel Cells Module Manual, Ansys Fluent 12.0. ,2009

Gou, B., Woon, K. N. ve Diong, B., “Fuel Cells Modeling, Control, and Applications”, *CRC Press*, New York, 1-2, 2009

Heysiattalaba S.,Shakeria M., Safarib M.ve Keikhac M.M., ‘ Investigation Of Key Parameters influence On Performance Of Direct Ethanol Fuel cell (DEFC)’ , *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, 17 ,727–729, 2011

Hoogers, G., “Fuel Cell Technology Handbook”, **CRC Press**, New York, 13-17, 88-91,2003

Juan S.M. , Pablo A. García-Salaberri ve Marcos V. ‘ A genetically optimized kinetic model for ethanol electro-oxidation on Pt-based binary catalysts used in direct ethanol fuel cells’,**Journal of Power Sources**, 363,341-355,2017

Jeng K and Chen C. ,’Modeling and simulation of a direct methanol fuel cell anode’, **J Power Sources**, 112(2):367-75, 2012

Kanin C., Chaiwat P., Panitas S., Theeraporn S., Kanchaporn W., Paisan K., Stuart M. and Paweena P.,’ Application of response surface methodology to optimize direct alcohol fuel cell power density for greener energy production’, **Journal of Cleaner Production**, 142 ,1309-1320, 2017

Kareemulla D and Jayanti S.,’Comprehensive one-dimensional, semi-analytical, mathematical model for liquid-feed polymer electrolyte membrane direct methanol fuel cells’, **J Power Sources**, 188(2),367–78,2009

Larminie, J. and Dicks, A., “Fuel Cell Systems Explained (2nd Edition)”,**Wiley**, UK, 22-23,2003

Li Y.S., and T.S. Zhao, ‘ A passive anion-exchange membrane direct ethanol fuel cell stack and its applications’, **International Journal Of Hydrogen Energy**, 41 , 20336-20342, 2016

Liu, W. ve Wang, C-Y.,’Electron transport in direct methanol fuel cells’, **Journal of Power Sources**, 164, (2), 561–566, 2007

Matsuoka K, Iriyama Y, Abe T, Matsuoka M and Oguni Z. ,’Alkaline direct alcohol fuel cells using an anion exchange membrane’, **Journal of Power Sources**, 150,27-31,2005

Maya-Cornejo J., R. Carrera-Cerritos, D. Sebastian, J. Ledesma-García, L.G. Arriaga, A.S. Arico and Baglio V., 'PtCu catalyst for the electro-oxidation of ethanol in an alkaline direct alcohol fuel cell', *International Journal Of Hydrogen Energy* ,42, 27919-27928, 2017

Mench, M. M., "Fuel Cell Engines", *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken*, New Jersey, 9-16 ,2018

Murgia, G., Pisani, L., Shukla, A.K. and Scott, K., 'A numerical model of a liquid-feed solid polymer electrolyte DMFC and its experimental validation', *Journal of the Electrochemical Society*, 150, (9), 1231-1245,2003

Oliveira V.B., J.P. Pereira and Pinto A.M.F.R., ' Modeling of passive direct ethanol fuel cells', *Energy* ,133 ,652-666,2017

Özdemir, B., Serpantin kanallı PEM yakıt hücresinin sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,2012

Petri K., Maryam B., Janina H., Esko I. K.n, Virginia R., Tanja K.,' Temperature dependent performance and catalyst layer properties of PtRu supported on modified few-walled carbon nanotubes for the alkaline direct ethanol fuel cell', *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 793 ,48-57,2017

Pramanik H and Basu S. , 'Modeling and experimental validation of overpotentials of a direct ethanol fuel cell', *Chem Eng Process*, 49(7),635–642,2010

Ramos A., Hernandez-Guerrero B., Juarez-Robles D. and Li P. 'Numerical investigation of the performance of symmetric flow distributors as flow channels for PEM fuel cells'', *International Journal of Hydrogen Energy*,37:436-448, 2012

Roelofs K.S., Hirth T., Schiestel T., 'Dihydrogenimidazole modified silica-sulfonated poly (ether ether ketone) hybrid materials as electrolyte membranes for direct ethanol fuel cells', **Material Science and Engineering** , 176:727-735,2011

Sadiq A.B. and Shahad Al-Janabi M.A., "Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model", **Renewable Energy**, 32:1077–1101,2007

Sivertsen, B. R. and Djilali, N. "CFD-based modelling of proton exchange membrane fuel cells", **Journal of Power Sources**, 141,65–78 ,2005

Suresh N.S. and Jayanti ., S. , 'Cross-over and performance modeling of liquid-feed Polymer Electrolyte Membrane Direct Ethanol Fuel Cells', **International Journal of Hydrogen Energy**, 36 ,14648-14658,2011

Şahbudak B., Özkan G., Özkan G., 'Etanolde Pd-NiO, Ni-Cu-Pd/Aktif Karbon Katalizörleri İle H₂ Üretiminde Su/Ethanol Mol Oranının Hidrojen Verimi Ve Seçimliliğine Etkisi', **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 31, 2, 417-424, 2016

Taymaz İ. ve Benli M., 'Metanolün Taşıtlarda Enerji Kaynağı Olarak Farklı Kullanım Yöntemlerinin İncelenmesi', TMMOB Makina Mühendisleri Odası,11. Otomotiv Sempozyumu , Mayıs (2009)

Wang L, Husar A, Zhou T and Liu H. "A parametric study of PEM fuel cell performance". **Int J Hydrogen Energy**, 28(11):1263–72 ,2003

Wu, H., "Mathematical Modeling of Transient Transport Phenomena in PEM Fuel Cells", Doktora Tezi, **University of Waterloo**, Canada, 3-6 ,2009

Xu Q, Zhao TS, Yang WW, Chen R. , 'A flow field enabling operating direct methanol fuel cells with highly concentrated methanol', **International Hydrogen Energy** , 36:830-838,2011

Yang, W.W. ve Zhao, T.S. , ' A two-dimensional, two-phase mass transport model for liquid-feed DMFCs', *Electrochimica Acta*, 52, (20), 6125– 6140,2007

Yang W.W., Lu M.Y. and He Y.L., 'Performance study of an alkaline direct ethanol fuel cell with a reduced two-dimensional mass transport model', *International Journal Of Hyydrogen Energy*, 41 , 20693-20708,2016

Zhao, T., Nguyen, T. V. and Kreuer, K. D., "Advances in Fuel Cells", *Elsevier*, Kidlington, 2-4,2007



ÖZ GEÇMİŞ

Şule ÇELİK tarihinde 'da doğdu. İlk orta ve lise eğitimini 'da tamamladı. yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi 'nden 'de mezun oldu. 2019-2020 Öğretim yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Bilim dalındaki ilgi alanı yakıt pilleridir.



