



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



**HİDROJEN YAKIT HÜCRESİ**  
**MODELLEMESİ VE VERİMLİLİĞİ**  
**GELİŞTİRME YAKLAŞIMLARI**

**Cemaleddin UĞUZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**01-2026**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Cemaleddin UĞUZ tarafından hazırlanan “ HİDROJEN YAKIT HÜCRESİ MODELLEMESİ VE VERİMLİLİĞİ GELİŞTİRME YAKLAŞIMLARI ” adlı tez çalışması 08/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Sabri KOÇER

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN

.....

#### Üye

Dr. Öğretim Üyesi Kürşad UÇAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. HASAN AYDOĞAN

FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Cemaleddin UĞUZ

Tarih: 08/01/2026

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## HİDROJEN YAKIT HÜCRESİ MODELLEMESİ VE VERİMLİLİĞİ GELİŞTİRME YAKLAŞIMLARI

**Cemalettin UĞUZ**  
**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN**

**2026,45 Sayfa**

**Jüri**  
**Prof. Dr. Sabri KOÇER**  
**Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN**  
**Dr. Öğretim Üyesi Kürşad UÇAR**

Enerji tüketimi ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı, ülkelerin ekonomik bağımsızlığı ve çevresel istikrarı açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye gibi enerji ithalatına büyük ölçüde bağımlı ülkelerde, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önemli bir gereksinimdir. Hidrojenin düşük karbon salınımı ile çevre dostu bir enerji kaynağı olması, Kyoto Protokolü gibi uluslararası anlaşmalar kapsamında da dikkat çekmektedir. Ancak, hidrojenin düşük enerji yoğunluğu ve depolama zorlukları, bu teknolojinin yaygın kullanıma girmesini sınırlayan temel faktörlerdendir.

Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH), en yaygın kullanılan yakıt hücresi türlerinden biridir. PEMYH'ler, düşük sıcaklıklarda (60-80°C) çalışır ve kompakt yapıları nedeniyle özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır. Ana bileşenleri, proton iletkenliği sağlayan polimer bir membran, platin bazlı katalizör ve gaz difüzyon elektrotlarıdır.

Hidrojen enerjisinin depolanması ve kullanımı konusundaki zorluklar devam etmekle birlikte, yenilikçi depolama yöntemleri ve maliyetlerin düşürülmesi ile hidrojen, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynayabilir. Özellikle platin bazlı katalizörlerin kullanıldığı Proton Değişim Membranlı (Polimer Elektrolit Membran :PEM) yakıt hücrelerinin maliyet etkinliği üzerinde yapılacak simülasyonlar ile daha uygun fiyatlı ve verimli yakıt hücrelerinin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır. Bu tez çalışmasında, hidrojen yakıt hücresinin farklı yüklerdeki verimliliğinin artırılması için hava giriş oksijen oranının önemine odaklanılmıştır. Yüksek yüklerde hava giriş oksijen oranı hidrojen yakıt hücresinin verimliliğini %10-15 oranında arttırdığı ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrojen, Hidrojen Depolama, Katalizör, Matlab, Membran, Simülasyon, Yakıt Hücresi, Yakıt Hücresi Verimliliği

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS HYDROGEN FUEL CELL MODELING AND EFFICIENCY IMPROVEMENT APPROACHES**

**Cemaleddin UĞUZ**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL-  
ELETRONIC ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN**

**2025,45 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Sabri KOÇER**

**Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN**

**Assist. Prof. Dr. Kürşad UÇAR**

Energy consumption and the use of sustainable energy sources are of great importance for the economic independence and environmental stability of countries. In countries like Turkey, which are heavily dependent on energy imports, the use of domestic and renewable energy sources is a crucial requirement. Hydrogen's low carbon emissions and environmentally friendly nature have also drawn attention under international agreements such as the Kyoto Protocol. However, hydrogen's low energy density and storage challenges are key factors limiting the widespread adoption of this technology.

Proton Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMMFCs) are one of the most commonly used types of fuel cells. PEMMFCs operate at low temperatures (60-80°C) and are widely used, particularly in the automotive sector, due to their compact structure. Their main components are a polymer membrane that provides proton conductivity, a platinum-based catalyst, and gas diffusion electrodes.

While challenges in storing and utilizing hydrogen energy persist, innovative storage methods and cost reductions could enable hydrogen to play a significant role in sustainable energy production. Simulations on the cost-effectiveness of Proton Exchange Membrane (Polymer Electrolyte Membrane: PEM) fuel cells, particularly those using platinum-based catalysts, will enable the development of more affordable and efficient fuel cells. This thesis focuses on the importance of the air-inlet oxygen ratio in increasing the efficiency of hydrogen fuel cells under different loads. It has been shown that at high loads, the air-inlet oxygen ratio increases the efficiency of the hydrogen fuel cell by 10-15%.

**Keywords:** Hydrogen, Hydrogen Storage, Catalyst, Matlab, Membrane, Simulation, Fuel Cell, Fuel Cell Efficiency .

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak akademik gelişimime büyük katkı sağlayan, ne zaman danışsam ilgi ve desteğini esirgemeyen, güler yüzü ve tecrübeleriyle saat kaç olursa olsun yanımda olan Doç. Dr. Mehmet Akif ŞAHMAN' a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Onun motive edici yaklaşımı, anlayışı ve hayat felsefesi, çalışmalarımı bu noktaya getirmemde büyük bir rol oynamıştır. Meslek hayatımda da bana örnek olan, yardımseverliği ve mütevazılığıyla ilham veren hocamdan öğrendiğim değerli bilgiler, hayatım boyunca rehberim olacaktır. Ayrıca, her zaman yanımda olan, sevgisi ve desteğiyle beni motive eden, zorluklarla mücadele ederken en büyük dayanağım olan sevgili eşime şükranlarımı sunuyorum. Onların fedakârlıkları, sabırları ve duaları, bu yolculuğu başarıyla tamamlamamda en önemli güç kaynağım olmuştur. Bu çalışmanın gerçekleşmesinde emeği geçen sevgili anne ve babama, bana kattıkları değerli bilgiler ve destekleri için minnettarım.

Cemaleddin UĞUZ  
Konya-2026

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>8</b>
<b>2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>10</b>
<b>3.MATERYAL .....</b>	<b>15</b>
3.1.Yakıt Hücresi Çeşitleri.....	15
3.1.1 Proton değişim membranlı yakıt hücresi .....	15
3.1.2 Alkali yakıt hücresi .....	15
3.1.3 Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC) .....	16
3.1.4 Erimiş karbonat yakıt hücresi .....	17
3.1.5 Katı oksit yakıt hücresi (SOFC).....	17
3.2. PEMFC Yakıt Hücresi ve Temel Elemanları.....	18
3.3.Gaz Yayılım Plakası.....	20
3.4.Kutup Plakası .....	22
3.5.Polimer Elektrolit Membran (PEM).....	23
<b>4. YÖNTEM .....</b>	<b>25</b>
4.1. Deneysel İşletme Koşulları .....	25
4.2. Kimyasal Reaksiyon.....	26
4.3.Nernst Denklemi .....	26
4.4.Nafion Tipi Membran .....	26
4.5.Kayıplar.....	27
4.5.1.Aktivasyon kaybı ve omik kayıplar .....	27
4.5.2.Konsantrasyon kayıpları .....	28
4.5.3Konsantrasyon kayıplarının önemi ve azaltılması.....	29
4.5.4.Matlab simulink pem simülasyonu ve öğelerin açıklanması.....	29
<b>5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>31</b>
<b>6.SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>36</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>39</b>

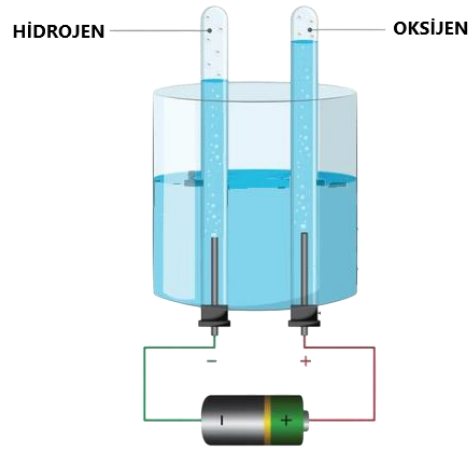
## **KISALTMALAR**

ANL	: Argonne National Lab
ÇKA	: Çok Katmanlı Algılayıcı
FC	: Yakıt Hücresi (Fuel Cell)
GDL	: Gaz Difüzyon Katmanı (Gas Diffusion Layer)
MCFC	: Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi
MEA	: Membran Elektrot Birimi (Membrane Electrode Assembly)
MFC	: Mikrobiyal Yakıt Hücreleri
MPPT	: Maksimum güç noktası takibi (Maximum Power Point Tracking).
ORR	: Oksijen İndirgeme Reaksiyonu (Oxygen Reduction Reaction )
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi
PEM	: Proton Elektrolit Membranı
PEMYH	: Proton Elektrolit Membranı Yakıt Hücresi
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Hücresi
SoC	: Şarj durumu (State of Charge)

## 1. GİRİŞ

Enerji, formu ne olursa olsun canlıların ihtiyaç duyduğu, bütün ilişkilerimizi etkileyen temel unsurlardan biridir. Türkiye, enerji ihtiyacını karşılamada büyük oranda ithal enerjiye bağımlı bir ülkedir. Enerjide büyük oranda dışa bağımlılık, ülkemizin bağımsızlığı önünde bir engel teşkil etmektedir. Yenilenebilir enerjinin temelinde sürdürülebilirlik bağlamında kesinti olmadan sağlanabilmesi, uygun maliyetli ve anında kullanıcıya arz edilmesi yatmaktadır. Teknolojinin ivmelenerek ve süratle geliştiği, arz talep dengesinde taleplerin arttığı yakın tarihimiz ve günümüzde, karbon emisyonu salınımı da Kyoto Protokolü ile dünya gündeminde yankı bulup kabul görmüştür.

Hidrojen, üretim yöntemlerine göre farklı isimlerle anılmıştır. Hidrojen üretiminin bilinen en yaygın yolu Şekil 1.1'de görüldüğü şekilde elektrolizdir. Elektroliz işlemi için gereken enerjiyi güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlıyorsa bu elektrolizden üretilen enerjiye yeşil hidrojen denir (Acar Canan, 2019). Fosil yakıtlardan sağlıyorsa bu da gri hidrojenidir ((IEA), 2019). Fosil yakıtlardan sağlanması durumunda ortaya çıkan karbondioksit gazı üretilen santrallerde karbon yakalama ve depolama teknolojisi ile atmosfere yayılması engellenmeye çalışılıyorsa mavi hidrojen olarak adlandırılır. Elektroliz için gereken güç şebekeden veya nükleer enerjiden sağlanıyorsa sarı hidrojen olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1.1 Su Elektroliz Prensi

Hidrojen enerjisinin düşük karbon salınımına olan katkısı, onun küresel bir ilgi odağı olmasını sağlamaktadır. Karbon emisyonu olmadan enerji üretimi sağladıkları

için çevre dostu bir teknoloji olarak kabul edilir. Yakıt hücreleri, özellikle ulaşım ve enerji üretimi gibi alanlarda temiz ve verimli bir enerji kaynağı olarak büyük ilgi görmektedir. Hibrit araçlar, elektrik ve hidrojen enerjisinin birleşimiyle çalışan çevre dostu bir ulaşım alternatifi sunmaktadır.

Hidrojenin depolanması, sıkıştırılması ve sıvılaştırılmasıyla ilgili olarak, teknik zorluklar ve güvenlik önlemleri dikkate alınmalıdır. Özellikle, yüksek basınçlı tanklarda hidrojen depolanması, güvenlik açısından endişe verici olabilir (Sherif, 2005). Burada, hidrojenin avantajları ve dezavantajları göz önüne alınarak, diğer yakıtlarla karşılaştırılması önemlidir.

Yakıt hücreleri, içten yanmalı bir motor temel mantığında kimyasal enerjiyi direkt elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal makinelerdir. Yakıt olarak genellikle hidrojen, oksitleyici olarak da oksijen kullanılır. Yakıt hücreleri, hidrojen gibi bir yakıtın ve oksitleyicinin kontrollü bir ortamda elektrokimyasal reaksiyona girerek elektrik enerjisi üretmesini sağlar. Bu süreç, anotta yakıtın protonlara ve elektronlara ayrılması, protonların elektrolit üzerinden katoda taşınması ve elektronların dış devrede elektrik akımı üretmesi ile gerçekleşir. Tepkimenin sonunda katotta protonlar, oksijenle birleşerek su üretir, bu da yan ürün olarak sadece suyun ortaya çıkmasını sağlar.

Bu tez çalışması PEM'in yüksek yüklerde, hücrenin hava girişinde oksijen yoğunluğunun artırılmasıyla verimin yükseleceğini ispatlamak amacıyla yapılmıştır. Kıtalar arası lojistik yük gemilerinin, yük trenlerinin çalışmasında verimin artırılmasıyla alternatif bir sistem oluşturması sebebiyle önemli bir yeri vardır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yakıt hücreleri uzun yıllardır literatürde çalışmaları süren insanlık adına çok mühim bir konudur. Hidrojenle çalışan yakıt hücreleri yıllar içinde türlü yöntemlerle farklı malzemelerle geliştirilerek bugünkü şeklini almıştır. Yakıt hücresinin temel mantığı hazır hidrojenin hidrojen girişinden girmesi ve oksijenin de hava girişinden girmesi ile kendi içinde reaksiyona giren hidrojen ve oksijenin su olarak reaksiyondan çıkış sağlaması üzerine kurulmuştur. Hidrojenin iyonlarına ayrılması ile bir elektrik devresinde akım döngüsünü sağlayan elektronlar elektrik üretmemize yarar.

Literatürde hidrojen yakıt hücresinin gelişimini temel mantık dışında membran üzerinden görmek mümkündür. Hidrojenlerin iyonlarına ayrılıp oksijen tarafına yani katot kısmına geçip reaksiyona girebilmesi için bu işe elverişli membranlar geliştirilmiştir. Bunun dışındaki incelemeler verimliliği arttırmak ve en ideal yakıt hücresini bulma üzerine yapılan çalışmalardır.

Jiao ve arkadaşları katalizörler üzerinde çalışmalar yapmışlar ve gözene yapısının kütle transfer dirençleri için hayati önemi olduğunu ortaya koymuştur. Verimliliği kısıtlayan bu detaylar ile kayıpların sonuçlara olan etkileri anlaşılmaktadır (Jiao, 2021)

Yakıt hücresinin verimliliğini arttırmada yakıt hücresi maliyetinin azaltılması da bir yöntem olarak kabul edilmektedir. PEMFC’de katalizör olarak kullanılan platinin kullanımı azaltma anlamında çalışmalar güncel yaklaşımlardan birisidir. Sui ve arkadaşları bu konuda platin maliyetini düşürmek adına nano yapılı ince film katalizörler geliştirerek aktif yüzey alanını arttırmayı amaçlamışlardır maliyetin düşmesi yanısıra verimliliğin %20 arttırılabileceğini ortaya koymuşlardır (Sui, 2020)

Yakıt hücresinin elektriksel çıkışında akış hızı, sıcaklık ve basıncın etkisini incelemiştir. Yakıt hücresini, yaklaşık olarak kübik polinomlar ile matematiksel olarak modellenmiştir. Kullanıcının simülatörü kullanmasına izin vermek için bir grafiksel kullanıcı arayüzü geliştirmiştir. Simülatörün mevcut çalışma durumunu bu arayüzde görüntüleyip kontrol etmiştir. Kullanıcının hidrojen akış hızını değiştirebilmesi sağlamıştır (P. R. Acharya, 2004).

PEM yakıt pillerinin içinde bir çok dinamik vardır. Bu dinamiklerin anlaşılması ve anlaşılır bir şekilde aktarılması matematiksel olarak bir zemine oturtulması bilim dünyası için büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda Rahimi-Esbo ve arkadaşları akış kanallarının gözle görülebilecek ve incelenebilecek saydam bir yakıt pili tasarlamış, bu transparan yakıt pilinin tasarımından üretimine montajından test aşamasında kadar bütün aşamalarını oluşturan bir çalışma ortaya koymuşlardır (M. Rahimi-Esbo, 2017)

Kılıçoğlu, çalışmalarında, laboratuvarlarındaki yakıt hücresinin MATLAB-SIMULINK'te modellemesini yaparak çıkış gerilimi ve gücünü incelemiştir aynı çalışmasında sıcaklıklarının çıkış gerilimine etkisini de incelemiştir. Bu çalışmasında PEM'in teorik altyapısı verilmiştir. PEM yakıt pili Nernst gerilimi ve Nernst gerilimini etkileyen kayıp gerilimleri tanımlanmıştır. Bu kayıp gerilimlerinin MATLAB-SIMULINK ortamında oluşturulan blok diyagramları gösterilmiştir (A.E. Kılıçoğlu, 2008).

Özdoğan ve ark. PEM hücresini, FLUENT 6.3 programında bulunan PEMFC modülü kullanılarak modellemiş ve 5 adet farklı geometri üzerinde çalışmıştır. 5 farklı durum için elde ettiği sonuçlara göre, akımın artması ile hücre potansiyelinin azaldığını görmüştür (Özdoğan M, 2016).

Devrim ve ark. simüle ettikleri yakıt hücresini bir laboratuvar ortamında yapmışlar ve yalıtımlı yalıtımsız farklarını incelemiştir. Yakıt hücresini hem enerji üreten hem de su ısıtan bir cihaz olarak kullanılabileceğini görmek istemişler, yalıtımlı ve yalıtımsız PEM yakıt hücresi testlerinde yakıt hücresi yığını oluşturulan hücreler sırasıyla  $\sim \pm 5C$  ve  $\sim \pm 10C$  sıcaklık farkları belirlemiştir. 1 cm kalınlığında cam yünü yalıtım malzemesi ile PEM hücre yığınları arasındaki sıcaklık farkı düşürülmüş ve daha aktif bir soğutmayı gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu kojenerasyon sisteminde hücre yığınlarının soğutulması ile meydana gelen atık ısı, oda sıcaklığındaki şebeke suyunu ısıtmak için kullanılmıştır. Şebeke kullanım suyu yalıtımlı haldeyken ortalama  $60^{\circ}C$  sıcaklığa kadar ulaşırken, yalıtımsız yığınlarda  $20^{\circ}C$  kayıpla  $40^{\circ}C$  olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kojenerasyon uygulamasının kullanılabilirliği ispatlanmıştır. (Devrim Y. , 2018).

Şefkat ve ark. PEM üzerinde yaptıkları modelleme ile yakıt hücresi girişine uygulanan hidrojen ve oksijenin debilerinin çıkış verileriyle ilişkilerini incelediklerinde

membran malzemesi olarak alüminyum kullanılmasının olumlu etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. (Şefkat G, 2018).

Kadir Geliş, şeffaf bir PEM yakıt hücresinin şeffaf olmayan bir yakıt hücresine göre performansını değerlendirirken de simülasyon kullanmıştır. Çalışma kapsamında tekli serpantin tipi kanal tasarımı şeffaf ve mat yakıt pili şeklinde üretilmiş ve deneysel performanslarını değerlendirmiştir. Mat yakıt pili tasarımında (0.3 mg Pt /cm<sup>2</sup>) 0.6 V değerinde 114,2 mA /cm<sup>2</sup> akım konsantrasyonu elde edilmişken; aynı işletme şartları altında mat yakıt hücresinden 62,2 mA/cm<sup>2</sup> akım konsantrasyonunu elde etmiştir. Yüksek katalizör yüklemelerinde deney yapıldıkça mat yakıt pili sonucu şeffaf yakıt pili sonuç değerlerinden oldukça uzaklaştığını görür. Bu metot ile düşük Pt yüklemeli katalizör içeren yakıt hücrelerinin simüle edilmesi ve akış alanında oluşan süreçlerin anlaşılmasını mümkün görmüştür (Geliş, 2020).

Kahraman ve ark. hücre içerisindeki aktif alan üzerindeki akım yoğunluğu ve reaksiyon sonucu oluşan suyun membran ve katot kanallarındaki dağılımlarını incelemiştir. Oluşturdukları bu tasarımın düşük akım yoğunluklarında yaklaşık olarak aynı performanslarda olduğunu görmüşlerdir. Çalışmaları boyunca farklı tasarımlar denemişler ve yüksek akım yoğunluğu noktalarında tabiattan esinlenerek tasarladıkları yakıt hücrelerinin performanslarının olumlu yönde değiştiğini gözlemlemişlerdir. (Kahraman H, 2021).

Marco Bonci yakıt hücreli araçların performans ve yakıt tüketiminin modellenmesine odaklanmaktadır. Çeşitli sürüş döngüleri sırasında tüm araç sistemini simüle edebilen bir MATLAB/Simulink modeli oluşturmuştur. Modelin batarya, yakıt hücresi yığını, elektrik motoru, aerodinamik sürüklenme ve araç parametreleri gibi ana parametreleri, 2017 Toyota Mirai Yakıt Hücreli Aracının parametrelerine göre ayarlanmıştır. Analiz, hem 2017 yılında Argonne National Lab (ANL) tarafından Toyota Mirai aracı üzerinde yapılan testler dikkate alınarak hem de benzer araçlara göre mevcut verilere bakarak gerçekleştirmiştir. Son olarak, Toyota Mirai aracını yakından temsil eden bir model oluşturmuştur. 5 farklı kontrol tekniğinin hangisinin daha avantajlı olduğunu simülasyon üzerinden doğrulamak istemiştir. Bu 5 farklı kontrol tipi aracın yüklü olması ve kullanım şekliyle ilişkilendirilen yöntemlerdir (Bonci M., 2021).

Yifeng Zhong deniz uygulamaları için PEMFC'lerin bir ömür tahmin modeli geliştirmiştir. İlk olarak, yakıt hücresi çalışmasının kapsamlı bir çalışması yürütülerek,

rölanti, başlatma-durdurma döngüleri ve yükleme döngüleri sırasında membran ve katalizör tabakasının bozulması da dahil olmak üzere PEMFC'nin temel bozulma mekanizmaları ve çalışma koşulları belirlemiştir. İkinci olarak, PEMFC'nin ömrü, membran iletkenlik kaybı ve ECSA için deneysel ilişkileri birleştiren 2D COMSOL model simülasyonu aracılığıyla yarı deneysel bir yaklaşım kullanılarak değerlendirmiştir. Üçüncü olarak, vaka çalışmalarına beş gemi operasyonel yük profili dahil edilmiş ve hibrit güç sistemi sabit güç çalışmasıyla birlikte incelenmiştir. Dördüncü olarak, ECSA bozulma modeli değişken yük seviyeleriyle iyileştirilmiş ve membran kalınlığı etkisinin bir analizi yapmıştır. 2D model, literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırıldığında benzer polarizasyon eğrileriyle doğrulanmıştır. İncelenen beş vakanın tümünün ömrü 10000 saatin altında olduğunu görmüş ve bazılarının teknik iyileştirmelerle 20 bin hatta 30 bin saate çıkabileceğini öngörmüştür (Zhong Y., 2022).

Jhalak Nath Subedi araştırmasında, güç üretimi, enerji depolaması ve kontrolüyle ilişkili zorlukları ele alarak, elektrikli ulaşım uygulamalarında hidrojen yakıt hücrelerinin etkili kullanımını araştırmaktadır. Yakıt hücresi sisteminin güç çıkışını optimize etmeyi, maksimum verimlilik ve performansı sağlamayı amaçlamaktadır. Sistemin genel enerji yönetimini geliştirmek için, bir pil ve süper kapasitör kombinasyonu tamamlayıcı enerji depolaması olarak kullanılmaktadır. Enerji dönüşüm sistemlerinin sorunsuz entegrasyonu için gereken tasarım ve kontrol stratejilerine dalar. Pilin SOC'si, yakıt hücresi voltajına göre sıkı bir şekilde düzenlenir ve bu da verimli enerji kullanımı ve gelişmiş sistem güvenilirliği sağlar. Araştırmasındaki bulgular, hidrojen yakıt hücresi tabanlı elektrikli ulaşım sistemlerinin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. MPPT tekniklerinin, pil ve süper kapasitör sistemlerinin entegrasyonu ile birlikte kullanımı, enerji dönüşümünü ve kontrolünü optimize etmek için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır (Subedi, 2023).

Leonardo Cavini OpenModelica adlı programda yakıt hücresi ve bileşenlerini havacılık alanında kullanılan verilerle simüle etmiştir. En çok kullanılan yakıt hücresi modellerini havacılık alanında kullanılan bazı teknik parametlerle ilişkilendirdi. Matematiksel model, mobiliteye uygulanabilir yakıt hücrelerinin performansını toplamak için zengin bir veri tabanı oluşturulduktan sonra piyasadaki bazı yakıt hücrelerinin polarizasyon eğrilerinden elde edilen verilerle doğrulandığını sonucuna vardı. Model polarizasyon eğrilerini %5'ten daha az bir hatayla yaklaşık olarak hesaplanabileceğini vurgulamıştır (Cavini, 2024).

Christophe Gerling yakıt hücresinin katot tarafında meydana gelen ORR kinetiği, çoğu çalışma koşulunda en yüksek performans düşüşüne yol açtığı ve literatürde hala tartışmalara konu olduğu için ayrıntılı olarak araştırdı. Çalışmasını literatürdeki çalışmalardan ayıran bir özellik; mevcut verilerin miktarı ve kalitesi eksik olduğu için yazarlar modellerini malzeme parametreleriyle beslemek için çeşitli diğer kaynaklara geri dönerler. Fakat Gerling çalışmasının deneylerinde, her noktanın stabilizasyonu için uzun tutma süreleri ve polarizasyon eğrilerinin yanı sıra döngüsel voltmetrenin yeniden üretilmesiyle yapılan düzenli kontrolleri yüksek veri kalitesiyle garantilediğini vurgulamıştır (Gerling., 2024).

Bu tez kapsamında incelenen çalışmalar değerlendirildiğinde, literatürde ele alınan yöntemlerin çoğunlukla belirli varsayımlar altında ve sınırlı parametre setleri ile ele alındığı, uygulama koşullarının ise genellikle ideal senaryolar üzerinden değerlendirildiği görülmektedir. Mevcut çalışmalar, problemin belirli yönlerine odaklanmakta olup, yöntemlerin karşılaştırmalı analizi, bütüncül bir değerlendirme yaklaşımı ve uygulama sonuçlarının kapsamlı biçimde tartışılması açısından sınırlılıklar içermektedir. Bu tez çalışması, literatürde yer alan yaklaşımları sistematik bir bakış açısıyla ele alarak, hem yöntemsel hem de uygulamaya yönelik boyutları birlikte değerlendirmekte; kullanılan yaklaşımın performansını farklı koşullar altında inceleyerek literatürdeki boşluklardan birini doldurmayı hedeflemektedir. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürdeki bulguları tekrar etmekten ziyade, ilgili problemin daha derinlemesine anlaşılmasına katkı sağlamayı ve ileride yapılacak çalışmalara yol gösterici nitelikte bir referans sunmayı amaçlamaktadır.

### 3. MATERYAL

Hidrojen yakıt hücreleri, bir yakıt ve bir oksitleyici arasındaki kimyasal reaksiyondan elektrik enerjisi üreten cihazlardır. Bu dönüşüm, hücrenin temel bileşenleri aracılığıyla gerçekleşir. Temel olarak hidrojen yakıt hücresi içindeki materyal, hidrojenin giriş sağladığı anot grubu oksijenin giriş sağladığı katot grubu, membran, elektrik devresi ve contalar olarak belirlenebilir. Detaylar bu başlık altında verilmiştir.

#### 3.1. Yakıt Hücresi Çeşitleri

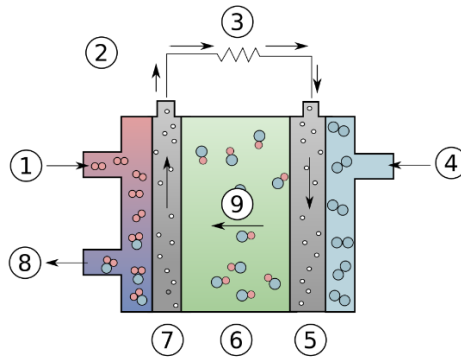
Hidrojen yakıt hücreleri tarihsel gelişiminin yanı sıra verimlilik ve çalışma şartlarına göre zamanlar çeşitlenmiştir. Temel yapısında bulunan elektrolit tipi veya çalışma sıcaklığı gibi temel durumlardan dolayı farklı şekillerde isimlendirilmiştir.

##### 3.1.1 Proton değişim membranlı yakıt hücresi

Tez konusu olarak bütün çalışmalar proton değişimli yakıt hücresi üzerinden işlenmiştir. Bütün detaylarıyla işleneceğinden diğer yakıt hücrelerinden ayrılan temel özellik olarak elektrolitin katı polimer membran olması 60-100 santigrat derece sıcaklık aralığında çalışması olarak söylenebilir. Portatif özelliği, hafifliği ve hızlı çalışması özellikleri sayesinde taşınabilir cihazlarda ve otomobillerde en çok tercih edilen yakıt hücresidir.

##### 3.1.2 Alkali yakıt hücresi

Alkali yakıt hücresi NASA'nın çalışmalarında en çok kullandığı çok verimli bir yakıt hücresidir. Elektrolit olarak bir membran yerine potasyum hidroksit çözeltisi kullanılır. Çalışma sıcaklığı proton değişim membranıyla aynı sıcaklık aralığındadır.



Şekil 3.1 Alkali yakıt hücresi (O'Hayre, 2016)

Şekil 3.1’de gösterilen alkali yakıt hücresinin numaralandırılan kısımları genel olarak 1 numaralı kısımdan hidrojen girişi sağlanmaktadır ve 4 numaralı girişte oksijen girişi sağlanmaktadır. 7 ve 5 numaralı kısımlar sırasıyla katot ve anot kısımlarıdır her yakıt hücresinin temel amacı olan elektron akışı ve yük kısmı ise sırasıyla 2 ve 3 numaralı bölümde gösterilmiştir. Alkali yakıt hücresi katı yakıt hücresi gibi katottan anota doğru iyonların hareket etmesiyle ve anotta reaksiyonun oluşmasıyla bilinir. 6 numaralı elektrolit de görüleceği üzere hidroksit iyonlarının anota doğru hareketi de 9 numara ile gösterilmiştir. Reaksiyon anotta oluştuğu için atık ürün su 8 numaralı çıkıştan çıkmaktadır.

Alkali yakıt hücreleri içinde kullanılmakta olan malzemeler diğer yakıt hücrelerine göre çok daha düşük maliyetli olduğu için deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Katı yakıt hücrelerinde elektrolit olarak seramik PEM yakıt hücrelerinde membran gibi özel ürünler kullanılırken alkali yakıt hücresinde içinde hidroksil bulunan sıvı yeterli olmaktadır. 2000 yılında Yakıt hücresinin denendiği ilk gemi 5000 W güç üreten 22 kişilik Hydra isimli gemi alkali yakıt hücresi ile çalışmaktaydı. 1999-2000 yıllarında 2000 yolcu taşıyan bir gemi olmasına rağmen alkali yakıt hücresinin en büyük dezavantajı nedeniyle 2001’de hizmetten çekilmiştir. Bunun nedeni ise alkali yakıt hücresi elektroliti potasyum hidroksit doğal ortamdaki karbondioksitle reaksiyona girince potasyum karbonat ürünü oluşur. Bu ürün katı bir tuzdur ve anot katot yüzeyleri dahil yakıt hücresinin gözeneklerini tıkar ve elektron akışı durur. Bu yüzden karbondioksit olmayan uzay ortamlarında verimli çalışabilir. Bu yakıt hücresinin geliştirilmesinin önündeki engelleri aşmak için yapılan çalışmalarla sıvı elektrolit yerine anyon değişim membranı kullanılarak katı halde alkali yakıt hücresi geliştirilmektedir.

### **3.1.3 Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)**

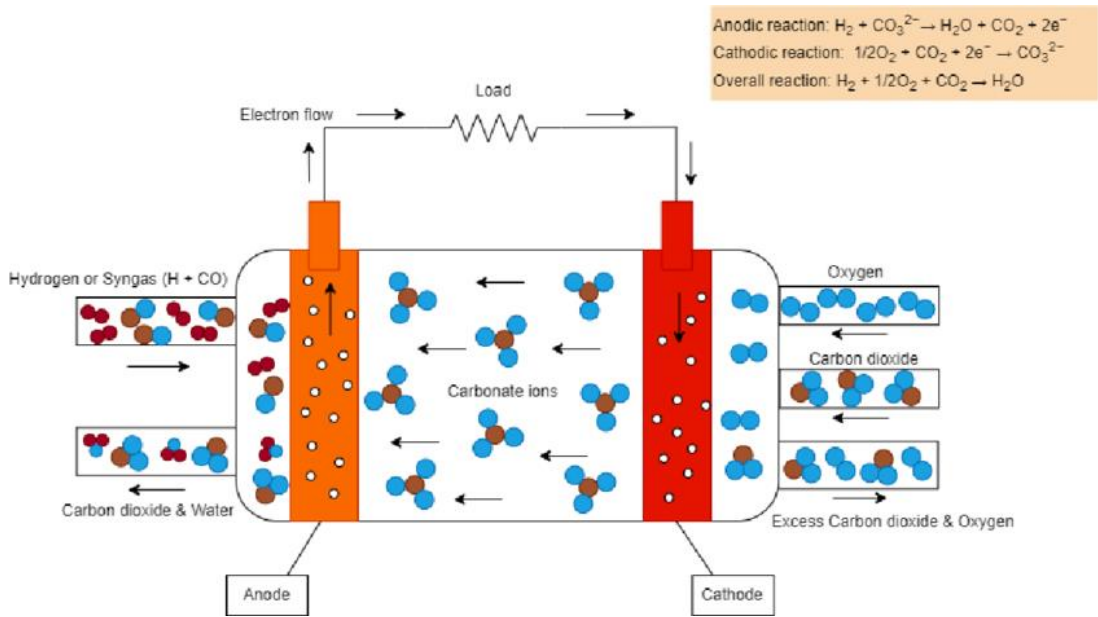
Bu yakıt hücresinde elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanıldığından fosforik asit yakıt hücresi olarak adlandırılmıştır. Çalışma sıcaklığı orta derecede olduğundan proton değişim membranlı yakıt hücresi ve alkali yakıt hücresinden daha fazla olarak 150-200 santigrat derece aralığında verimli bir şekilde çalışır. Ticari olarak yayınlanan bir tiptir. Ağır olduğu için büyük binalar ve otel pansiyon gibi ticari binalarda sabit güç kaynağı olarak kullanılmaktadır.

PAFC’ın elektrik üretimi anlamındaki verimliliği %40 civarındadır. Yakıt hücresinin çalışması esnasında açığa çıkan 150-200 derece arasındaki yüksek ısı

kojeneasyon olarak kullanıldığında bu verim % 85'lere kadar çıkabilmektedir (Larminie, 2003).

### 3.1.4 Erimiş karbonat yakıt hücresi

Şekil 3.2'de gösterildiği üzere elektrolit olarak erimiş lityum potasyum karbonat tuzları kullanıldığı için bu isimle adlandırılan yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı 600-700 santigrat derece gibi yüksek bir aralıktadır. Yüksek sıcaklık aralığında çalıştığı için egzostundan çıkan ısı yüksektir ve enerjiye dönüşebilecek bir potansiyeldedir. Endüstriyel enerji sağlayacak jeneratör görevinde kullanılması için çalışmalar vardır.



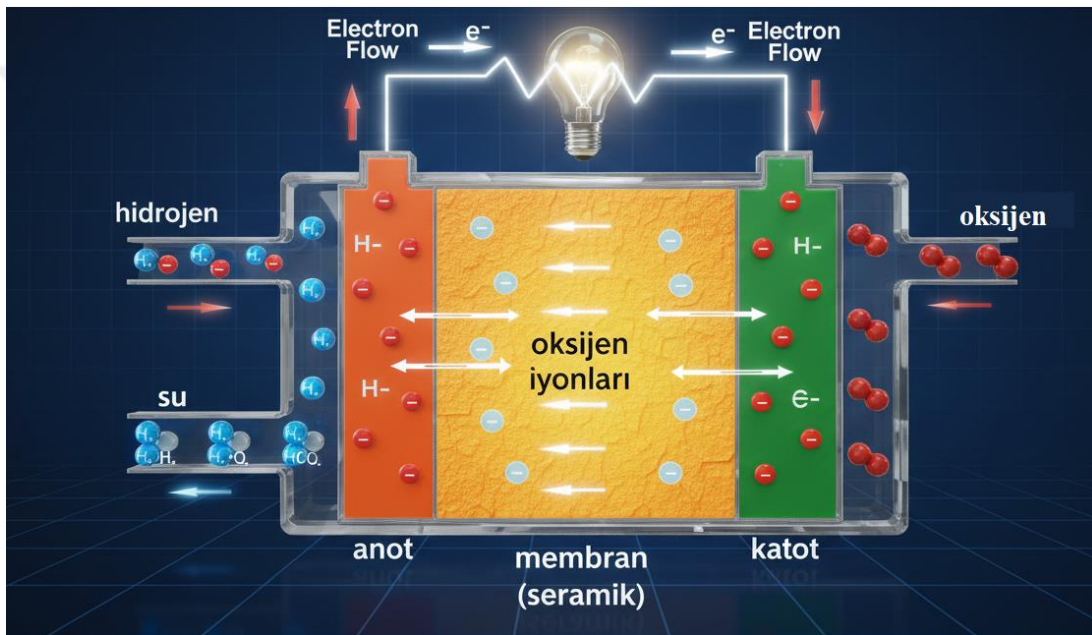
Şekil 3.2 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi ((DOE), 2011)

### 3.1.5 Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)

Şekil 3.3'te çalışma prensibi verilen SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) bütün yakıt hücreleri içinde sıcaklığa en dayanıklı bileşenleriyle en sağlam malzemeye sahip 800-1000 santigrat derece çalışma sıcaklığıyla büyük ölçekli güç sistemleri için kullanılan ve üzerinde bilimsel çalışmaların yoğunlaştığı bir çeşit yakıt hücresidir. Elektrolit olarak seramik malzeme kullanılmaktadır. Bu özelliği ile en yaygın model olan proton değişim membranlı yakıt hücresinin membranının koruma problemi gibi önemli bir problemi kökünden çözülmektedir. Seramik malzeme olarak yitrium ve zirkonya kullanılmıştır. Doğrudan hidrojen yakıtı kullanmadan içinde hidrojen elementinin bulunduğu bileşiklerle kullanılabilir. Yakıt girişi kısmına hidrojen yerine Amonyak verildiği

durumda amonyak içinde bulunan  $NH_3$  bir azot 3 hidrojeni yüksek çalışma sıcaklığının da yardımıyla ayırıştırıp hidrojeni kullanabilecek yapıya sahiptir.

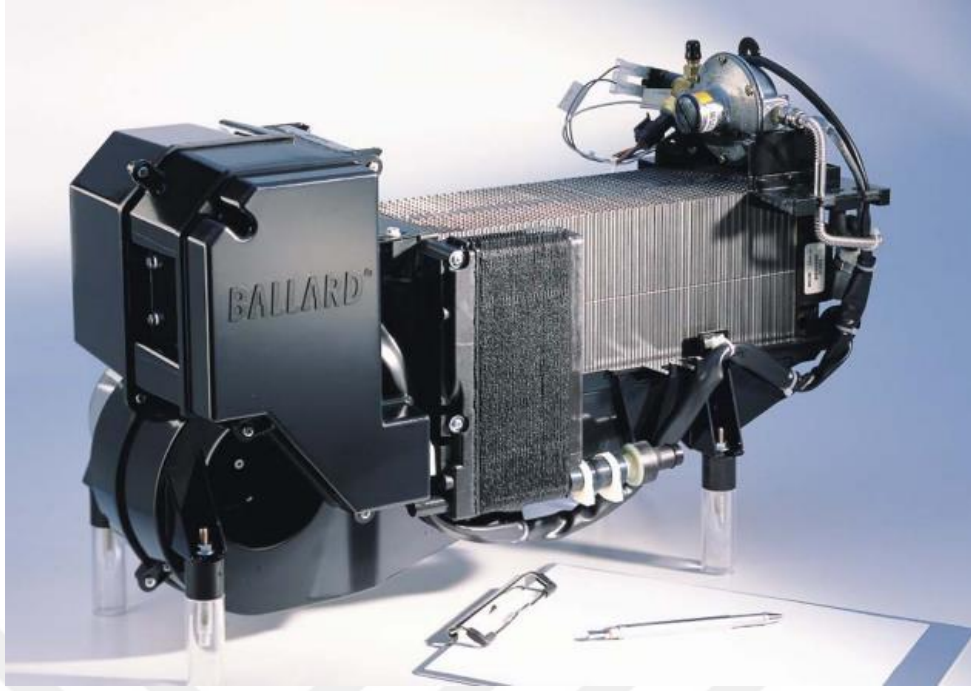
SOFC yakıt hücreleri içinde, en yüksek sıcaklık aralığında çalışan cihazlardan olduğu için kojenerasyon yani çalışırken oluşturduğu ısı enerjisini de kullanmak bu hücreler için de söz konusudur. Fakat Wang ve ekibi 1000 santigrat derecelerde çalışan bu hücrenin 600-800 santigrat derece bandına çekerek ömrünün uzatılması gerektiğini savunmuşlardır, ayrıca bu hücrelerde kullanılan seramik elektrolitin daha ince üretilip iyon direnci düşüreceğinden performansının arttığını ortaya koymuşlardır (Wang, 2021).



Şekil 3.3 Katı Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi (SOFC)

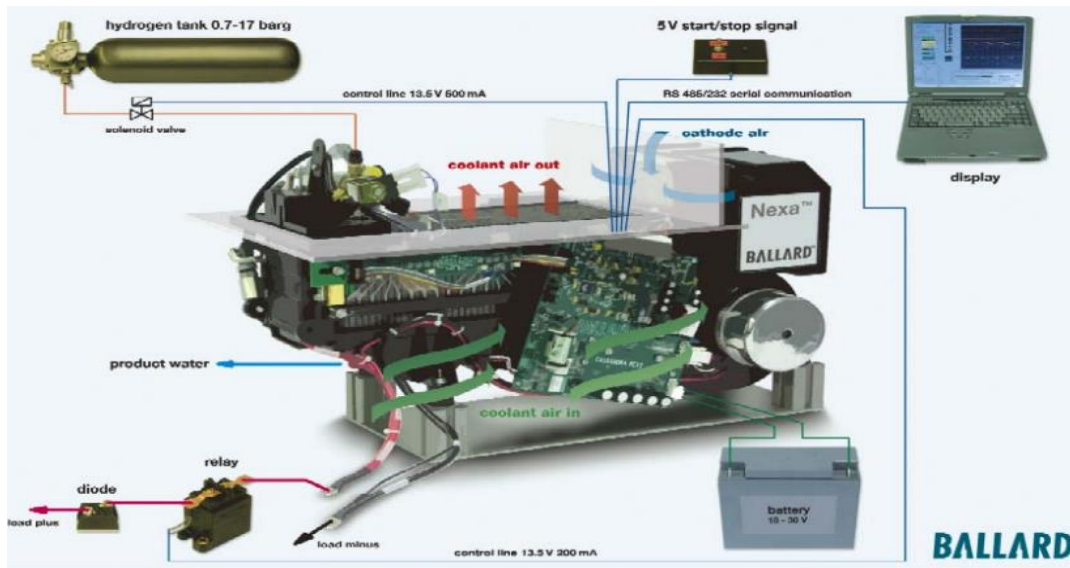
### 3.2. PEMFC Yakıt Hücresi ve Temel Elemanları

Yakıt hücresi, potansiyel kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen bir enerji kaynağıdır. Hidrojen ve oksijenin reaksiyona girmesiyle hem enerji üretilir hem de atık olarak su açığa çıkar. Bu sonuç nedeniyle, çevre dostu bir enerji teknolojisi olarak görülür. Yakıt pilleri, özellikle ulaşım ve enerji üretimi gibi alanlarda temiz enerji sağlama potansiyeline sahiptir. Sessiz çalışır ve zararlı emisyon yaymaz, bu yüzden yeşil enerji kaynaklarından biri olarak dikkat çeker. Şekil 3.4'de 2003 yılında üretilmiş modern bir yakıt hücresinin fotoğrafı görünmektedir.



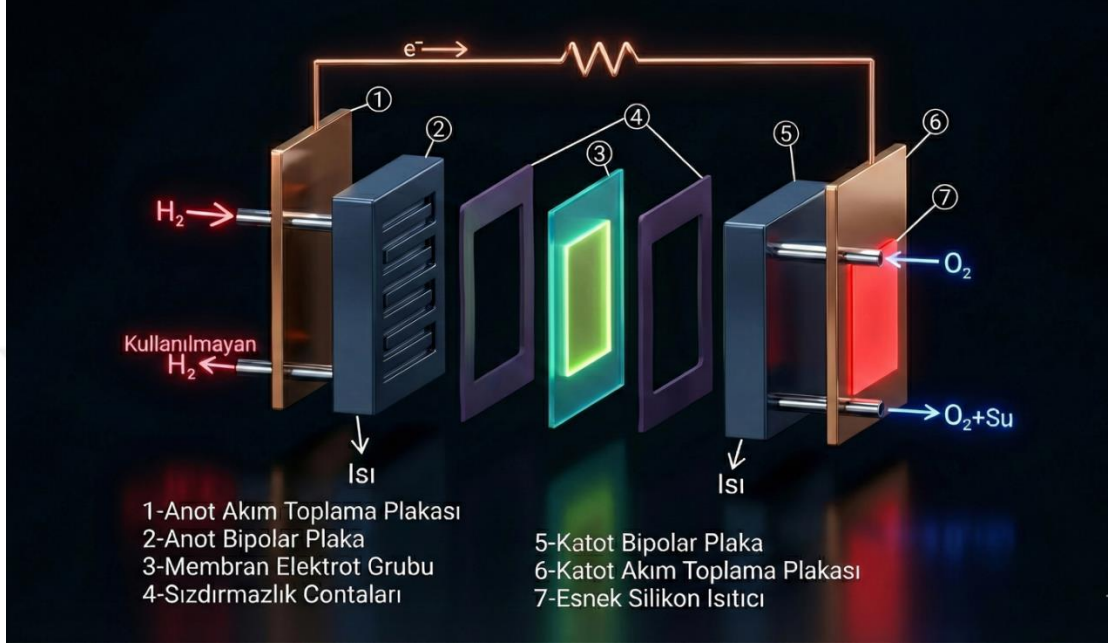
Şekil 3.4 Yakıt Hücresi Fotoğrafi (Inc, 2003)

Ballard marka yakıt hücresinin Nexa isimli versiyonunda Şekil 3.5’de bölümleri gösterilmiştir. Hidrojen yakıt tankından yakıt hücresi girişine giden bir hat bulunmakta ve bu hatta bir solenoid valf yerleştirilmektedir. Bu valf yakıt hücresinin içinde bulunan ana kart tarafından programlanmıştır. Yığınların içindeki reaksiyon hızına göre yüzey alana etki etmesi için valfi kısar veya açar. Ayrıca 5V başlama ve durdurma sinyal vericisi de aynı anakarta bağlıdır. Bir bilgisayar yardımıyla çalışma şartları ve zamanlamaları programlandırılabilir. Yakıt hücresi içinde gerçekleşen reaksiyon sonucu oluşan suyun tahliye kısmı da gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Yakıt Hücresi Ballard Nexa Temel Bileşenleri (Inc, 2003)

Yakıt hücresinin dört ana elemanı ayrıntılı olarak ele alındığında: gaz yayılım plakası, gaz difüzyon elektrodu, kutup plakası, polimer elektrolit membran ve katalizör. Yakıt hücresi temel elemanları Şekil 3.6'de gösterilmiştir.



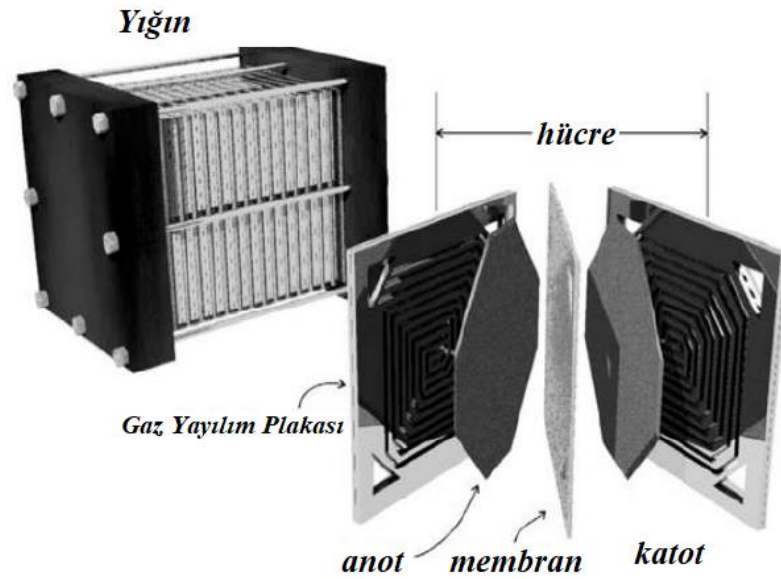
Şekil 3.6 Yakıt Hücresi Temel Elemanları

### 3.3. Gaz Yayılım Plakası

Gaz Yayılım Plakası (GYP), yakıt ve oksitleyicinin yakıt hücresinin aktif bölgesine homojen olarak dağıtılmasını sağlar. Bu plaka, genellikle gözenekli bir yapıya sahiptir ve yakıt hücresinin verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Gözenekli yapısı sayesinde, yakıtın (örneğin, hidrojen gazı) ve oksitleyicinin (örneğin, oksijen) elektrotlara sorunsuz bir şekilde ulaşmasını sağlar. Aynı zamanda reaksiyon sonucu açığa çıkan suyun hücreden uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Şekil 3.7'te yakıt hücresinde bulunan yığınların nasıl bir arada durduğu ve bir adet yığın hücresinin içinin ayrıntıları verilmiştir. Bu şekle göre yığının amacı yüzey alanı arttırmaktır. Her bir yığın hücresinin içinde ayrı ayrı gaz yayılım plakaları anot, katot ve membran bulunmaktadır ve bütün hücreler birbirine seri bağlanarak bir yığın oluşturmaktadır. Gaz yayılım plakalarının temel olarak dört belirgin görevi vardır hidrojenin homojen bir şekilde katalizöre dağılması, ikincisi oluşan ürünün yani suyun dışarı atılması, üçüncüsü elektronların iletimi ve son olarak malzeme mühendisliğinin üstünde durduğu ısı transferidir.

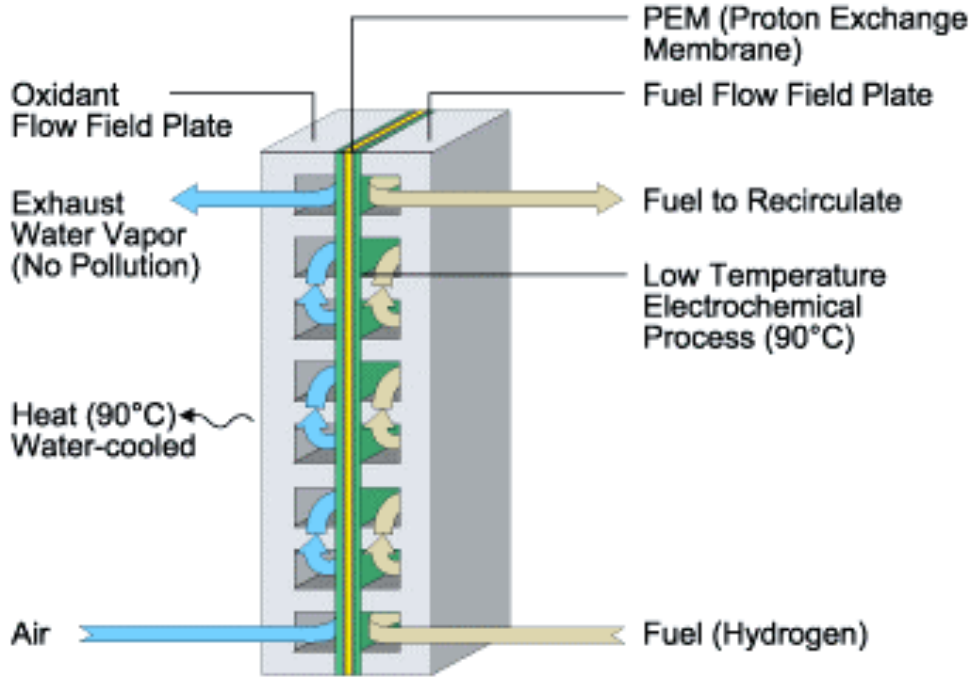
Gelişen teknoloji ile birlikte gaz yayılım tabakasına da yeni özellikler getirilmiştir. Katalizör ile gaz yayılım tabakası arasındaki bağlantıyı kuvvetlendirmek amacıyla MPL denilen (mikroporous layer) mikro gözenekli katman ismiyle anılan ince bir tabaka ile kaplanır. Omrani ve arkadaşları yüksek akım durumlarında hücrenin fazla su açığa çıkararak boğulmasını önlemek için gaz yayılım plakasının gözenekli yapıda olması gerektiğini vurgulamışlardır (Omrani, 2022).

Şekil 3.7’te gösterilen hücreler yığın olarak bir bütün şeklinde hidrojen yakıt hücresine yerleştirilir. Bu yığındaki hücrelerin seri şekilde yığın haline getirilmesinde birbirine çok sıkı bir şekilde dizilirse direnç düşer bu her ne kadar iyi bir durum gibi gözükse de gözeneklerin ezilmesi ile gaz geçişini zorlaştıracığından verimi ciddi oranda düşürür. Bu denge üzerine Tanasini ve arkadaşları önemli çalışmalar ortaya koymuştur (Tanasini, 2023)



Şekil 3.7 PEM Yakıt Hücresi Yığını Ve Yığın Bölümleri

Şekil 3.8’de bu yığınların girintili çıkıntılı bir yapıyla verilmesinin nedeni de aynı şekilde yüzey alanı arttırarak reaksiyonu daha büyük bir alanda gerçekleştirme çalışmasıdır.



Şekil 3.8 PEM Yakıt Hücresi Hücrelerinin Girintili Yapısı

Gaz Difüzyon Elektrodu (GDE), hem yakıt hem de oksitleyicinin elektrotlara ulaşmasını sağlayan bir ara katmandır. GDE, gazın elektrot yüzeyine düzgün bir şekilde dağılmasını sağlarken, aynı zamanda elektriksel iletkenliği de yüksek bir malzemeden yapılmıştır. Bu tabaka genellikle karbon fiber ve diğer iletken polimerlerden oluşur. Görevi, reaksiyon için gerekli gazların membrana ulaşmasını sağlarken, ortaya çıkan suyun etkin bir şekilde hücreden dışarı atılmasına yardımcı olmaktır.

### 3.4. Kutup Plakası

Kutup Plakası, yakıt hücresinin elektrotlarına elektronların taşınmasını ve aynı zamanda reaksiyon ürünlerinin hücreden dışarıya atılmasını sağlayan önemli bir bileşendir. Kutup plakaları, elektriksel iletkenliği yüksek, korozyona dayanıklı malzemelerden yapılır. Genellikle grafit veya metaller kullanılır. Kutup plakalarının iki ana işlevi vardır: Birinci işlevi elektronların dış devreye ve ardından katottan anoda geri taşınmasını sağlar. İkinci işlevi ise hücredeki gazların homojen dağılımını ve reaksiyon ürünlerinin dışarı atılmasını kolaylaştırır. Kutup plakalarının tasarımı verimliliği artırma konusunda ve yakıt hücresinin dayanıklılığını artırma konusunda etkisi büyüktür. Tasarımı ve yapısıyla hücre içindeki gazların akışını optimize eden özel kanallar içerebilirler. Günümüz teknolojisinde iki çeşit kutup plakası vardır grafit ve metal plakalar.

Metal plaka tercih edilen yakıt hücrelerinde kutup plakası üzeri kaplama yapılmak zorundadır. Paslanmaz çelik veya titanyum kullanılsa bile bu durum değişmemektedir. Metal plakanın ince yapısı asidik ortam korozyonla metal iyonlarını nafion membrana gönderip membranı deformasyona uğratar. Song ve arkadaşları metal kutup plakalarını kaplama üzerine yaptıkları çalışmada karbon veya nitrat bazlı kaplamalarla metal kutup plakalarını korumayı başarmışlardır (Song, 2023).

Grafit plakalar bozulmaz veya herhangi bir iyonuyla nafion membrana zarar vermez, grafit plakaların tercih edilmemesinin nedeni kırılkan ve kalın yapısıdır. Kutup plakaları yakıt hücresinin maliyet konusunda önemli bir bölümünü teşkil etmektedir.

### **3.5. Polimer Elektrolit Membran (PEM)**

PEM yani tam karşılığı polimer elektrolit membran protonların membrandan geçerek oksijenle reaksiyona girmesi sebebiyle proton değişim membranı olarak ta adlandırılmıştır ve yakıt hücresinin en kritik bileşenlerinden biridir. PEM, anotta üretilen protonların ( $H^+$ ) katoda taşınmasına izin veren bir yarı geçirgen yapıya sahiptir, ancak elektronların geçişine izin vermez. Bu süreç, elektrik akımının oluşmasını sağlar. Proton iletkenliği yüksek olan malzemelerden, genellikle Nafion gibi florlanmış polimerlerden yapılır. PEM'in özellikleri arasında düşük elektriksel direnç, yüksek kimyasal ve mekanik stabilite, su tutma kapasitesi ve sıcaklık dayanımı bulunur. PEM yakıt pillerinin içerisinde gerçekleşen dinamik süreçlerin anlaşılması ve bu süreçlerin daha anlaşılır bir şekilde ifade edilmesi konu hakkında çalışma yapan bilim insanları için önem arz etmektedir. Rahimi-Esbo ve arkadaşları akış kanallarının gözle görülebilecek ve incelenebilecek saydam bir yakıt pili tasarlamış, bu transparan yakıt pilinin tasarımından üretimine montajından test aşamasında kadar bütün aşamalarını oluşturan bir çalışma ortaya koymuşlardır. (M. Rahimi-Esbo, 2017)

Membranın etkinliği, yakıt hücresinin genel verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Proton iletim kapasitesinin artırılması, hücredeki iç direnç kayıplarını azaltarak enerji üretimini optimize eder. Ayrıca, membranın nem içeriği proton iletkenliği açısından kritik bir rol oynar, bu nedenle çalışma koşullarında nem dengesinin korunması önemlidir. Aslam ve arkadaşları, PEM yakıt pillerinin performansında membranın kuruması ve membrana uygulanan suyun taşmasını dayanıklılığını etkileyen iki ana unsur olduğunu vurgulamışlardır (R. M. Aslam, 2018). Membranın kuruması proton iletkenliğini düşürürken, aşırı nemlendirme ise kanallarda

su taşmasına sebep olmaktadır, bu durumda kanalların tıkanıp gaz geçişine engel olmakta yani reaksiyonun durmasına sebep olmaktadır (Yılmaz, 2006).



## 4. YÖNTEM

PEM güncel ve önemli bir konu olduğundan bu konuda yapılan çalışmalara birçok platformda rastlamak mümkündür. Matlab programında kullanılan simülasyon programı Simulink'te hidrojen üzerine yapılan çalışmalar neticesinde Nernst denklemi ile temellendirilen bir hidrojen yakıt hücresi bloğu tasarlanmıştır.

Simülasyon programında aşağıda detaylandırılacak bloklarla gerçeğe en yakın bir hidrojen yakıt hücresi tasarlayıp çalıştığı ideal ortamları sağlayıp üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bu tezde üzerinde çalışılan program için donanımı basit güncel bir işletim sistemini çalıştırabilen bilgisayar yeterlidir. Tezdeki yöntemleri uygularken gerçeğe en yakın sonuca ulaşabilmek adına Nernst denklemine sadık kalmak ve daha önce deneme yanılma yoluyla elde edilen empirik sayıları ideal yakıt hücresi için işlemek gereklidir.

PEM yakıt pillerinin teorik altyapısı incelenip; giriş çıkış kimyasal reaksiyon formülleri, Nernst gerilim denkleminde kayıp gerilimlerinin belirlenmesi MATLAB-SIMULINK programında simüle edilerek incelenip yorumlanacaktır.

### 4.1. Deneysel İşletme Koşulları

Simülasyonda yakıt hücresinin vereceği çıkış gerilimi için en doğru sonucu almak deneysel işletme şartlarının gerçeğe en yakın şekilde bilinmesi gerekir. Çizelge 4.1'de Simulink simülasyonda kullanacağımız Nernst denklemi temel değerleri

verilmiştir

PEM Yakıt Hücresi Model Parametreleri

Parametre	Değer	Açıklama
Hücre sıcaklığı (T)	80°C	Çalışma sıcaklığı
$e_1$	-0.9475	Empirik katsayı
$e_2$	0.0043255	Empirik katsayı
$e_3$	$6.8575 \times 10^{-5}$	Empirik katsayı
$e_4$	-0.00020273	Empirik katsayı
$e_5$	1	Empirik katsayı
İdeal gaz sabiti (R)	8.3144 J/mol·K	Termodinamik sabit
Faraday sabiti (F)	96487 C/mol	Elektron yük sabiti
Aktif hücre alanı (A)	375 cm <sup>2</sup>	Reaksiyon alanı
Anot basıncı	2 atm	H <sub>2</sub> giriş basıncı
Katot basıncı	2 atm	O <sub>2</sub> giriş basıncı
Membran kalınlığı (J)	0.0051 cm	Membran kalınlığı
Reaktomik	$1 \times 10^{-8}$ ohm	Ohmik direnç
$\lambda$ (Lambda)	16.567	Membran hidrasyon seviyesi

Çizelge 4.1 Yakıt Hücresi Standart Durum Değişkenleri (Ronald F. Mann ve Hooper, 2000)

## 4.2. Kimyasal Reaksiyon

PEM yakıt hücresi meydana geldiği unsurlarla anot kısmında hidrojen katot kısmında oksijenin gaz kanallarından geçerek membrana ulaşmaktadır. (Berning, 2002). Anota ulaşan hidrojen elektronları anottan katota geçerek devre oluşturur ve elektrik enerjisi üretir

Bu denklemlerde temel kimya periyodik cetveli elementlerinden H: Hidrojen , O: Oksijen, e: Elektron anlamına gelmektedir. Elektron transferleri sayesinde elektrik devresini tamamlandığından formülde yer verilmiştir.

## 4.3. Nernst Denklemi

Elektrokimyada, Nernst denklemi bir elektrokimyasal hücrenin elektrot potansiyelini, standart elektrot potansiyeli, sıcaklık ve reaksiyona giren maddelerin aktiviteleri (genellikle konsantrasyonlarla yaklaşık olarak hesaplanır) ile ilişkilendiren bir denklemdir. Bu denklem, hücrenin standart koşullardan farklı koşullardaki davranışını tahmin etmemizi sağlar.

$E_{Nernst}$ , hücrenin belirli sıcaklık ve basınç koşullarındaki elektrot potansiyelini (Volt) verir . 1.229; standart koşullarda (298.15 K ve 1 atm basınç) hidrojen-oksijen yakıt pilinin teorik açık devre gerilimi.  $8,5 \times 10^{-4}$  , sıcaklık değişiminin elektrot potansiyeli üzerindeki etkisini gösteren bir katsayı.  $T$ , kelvin cinsinden sıcaklık 298.15 sabit sayısı standart sıcaklık (25 °C) Kelvin cinsinden ifade edilmiştir.  $4,308 \times 10^{-5}$ ; hidrojen ve oksijen gazlarının kısmi basınçlarının elektrot potansiyeli üzerindeki etkisini gösteren bir katsayıdır (Denklem 4.1).

$$E_{Nernst}=1,229-(8,5 \times 10^{-4})(T-298,15+(4,308 \times 10^{-5})T(\ln P_{H_2}+ 1/2 \ln P_{O_2})) \quad (4.1)$$

## 4.4. Nafion Tipi Membran

Nafion, özellikle proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücrelerinde sıkça kullanılan özel bir polimerik membrandır. Bu membranlar, yakıt hücrelerinin verimli ve güvenli çalışması için hayati öneme sahiptir. Nafion, florlu bir polimerdir ve suda çözünmez. Moleküler yapısı, protonların ( $H^+$ ) kolayca hareket etmesine izin veren kanallar içerir. Proton İletkenliği, nafion'un en önemli özelliği, protonları yüksek verimlilikle iletmesidir. Bu özellik, yakıt hücresinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon için gereklidir. Protonları iletirken elektronlara karşı geçirgen değildir. Bu sayede, yakıt hücresinin anot ve katot bölmeleri arasında elektriksel bir devre

oluşturulur. Nafion, birçok kimyasal maddeye karşı dayanıklıdır ve yüksek sıcaklıklara karşı stabildir. Nafion membranlar, sadece yakıt hücrelerinde değil, aynı zamanda elektrolizörler, sensörler ve diğer elektrokimyasal cihazlarda da kullanılır. Özellikle, taşıt uygulamalarında kullanılan PEM yakıt hücrelerinde yaygın olarak tercih edilirler. Avantajları yüksek proton iletkenliği, kimyasal dayanıklılık, uzun ömürdür. Dezavantajları yüksek maliyet, su yönetimi zorlukları, düşük sıcaklıklarda performans düşüşü. Sonuç olarak, Nafion tipi membranlar, yakıt hücrelerinin performansı için kritik öneme sahiptir. Ancak, maliyet ve bazı performans sınırlamaları gibi konularda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir.

Nafion membranlar eşsiz yapısıyla suyla temas ettiğinde nano boyutlarda su kanalları oluşturur. Protonlar bu nano boyutlu kanallardan taşınır. Nafion membranlar üzerinde yapılan çalışmalar proton iletkenliğinden daha çok dayanıklılığının artırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Çelik ve arkadaşları nafion tabanlı membranların mekanik dayanımını arttırarak geliştirilmiş kompozit yapılarla optimize edilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır (Celik, 2023).

#### **4.5. Kayıplar**

Bütün elektrik devrelerinde kayıplar söz konusudur. Elektrik devresinin çıkış gücünden bu kayıpları çıkarttığımızda gerçek güce ulaşacağımızdan simülasyon için bu kayıpların hayati önemi vardır. Kayıplar sisteme doğru girildiği zaman hata payı % 1'in altına düşer. Kayıplar 3 grupta ifade edilir hiçbir dış müdahale olmadığında bile hücre içerisinde meydana gelen bu kayıplar temel olarak aktivasyon, direnç yani ohmik ve konsantrasyon kayıpları olarak belirtilir. (Meral, 2019).

##### **4.5.1. Aktivasyon kaybı ve omik kayıplar**

Anot ve katot bölümlerindeki oksijen ve hidrojenin reaksiyonunun hızına bağlı olarak gelişen kayıplara Aktivasyon kaybı denir. Denklem 4.2'deki gibi PEM anot ve katodundaki aktivasyon kaybı toplam olarak ele alınabilir. (Inc, 2003)

$$\eta_{akt} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot T + \varepsilon_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \varepsilon_4 \cdot T \cdot \ln(\hat{i}) \quad (4.2)$$

Formülde belirtilen ; $C_{O_2}$ , membranın yüzeyinde bulunan oksijen yoğunluğunu gösteriyor ve yakıt pili akımını da  $\hat{i}$  sembolize ediyor , $\varepsilon$ , yakıt pili teknolojilerine göre elde edilen sabit değerlerdir. Bu çalışmada kullanılan  $\varepsilon$  değerleri yakıt hücresi üreten bir

firmanın yakıt pili üretirken kullandığı standart değerlere uygun olarak seçilmiştir. (Inc, 2003)

Elektronların anottan katoda geçerken özellikle membranda ve yapılan bağlantılarda oluşan dirençler nedeniyle oluşan kayıplara omik kayıplar denir. Denklem 4.3'te gösterildiği gibidir.

$$\eta_{\text{omik}} = \eta_{\text{omik}}^{\text{elektronik}} + \eta_{\text{omik}}^{\text{proton}} = -i(R^{\text{elektronik}} + R^{\text{proton}}) = -iR_{\text{ic}} \quad (4.3)$$

Burada  $R^{\text{elektronik}}$ , yakıt hücremizin sabit direnç değeridir.  $R^{\text{proton}}$  ise hidrojen iyonunun pozitif kısımlarının yakıt hücresi membranından geçerken oluşturduğu dirençtir (Inc, 2003).

$$R^{\text{proton}} = \frac{r_M l}{A} \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'te belirtilen denklemde  $r_M$ ; membran direnci ; sıcaklık ve akıma bağlı olarak değişir,  $l$ ; polimer membrana ait kalınlıktır.  $A$ ; aktif hücre alanıdır. PEM yakıt pilinde Nafion tipi membran kullanılmıştır ve Nafion membran direnci ifadesi Buchi ve Scherer tarafından elde edilmiştir (F.N.Buchi, 1996).

#### 4.5.2. Konsantrasyon kayıpları

Konsantrasyon yani kütle aktarım kayıpları, anot ve katot elektrot yüzeyinde bulunan gazların yoğunluğunun değişimlerinden oluşmaktadır ve bu kayıp 4.5 denklemdeki gibi ifade edilmektedir (Ronald F. Mann ve Hooper, 2000).

$$\eta_{\text{kons}} = \varepsilon^5 \cdot \left(\frac{RT}{4F}\right) \cdot \log\left(1 - \left(\frac{i}{i_1}\right)\right) \quad (4.5)$$

$R$ ; ideal gaz sabiti,  $F$ ; faraday sabiti,  $i$ ; akım yoğunluğu ve  $i_1$ ; konsantrasyon kayıplarına bağlı sınırlı akım yoğunluğudur.

Bu tezin araştırma alanı büyük oranda konsantrasyon kayıplarını azaltmak üzerine odaklanmıştır. Konsantrasyon kayıpları yüksek yükteki çalışmaları ilgilendirdiği için bir çok hidrojen yakıt hücresi incelemesinde bu kayıplar ihmal edilmiştir. NASA çalışmalarında kütle aktarım sınırlamaları hakkında bilgi elde etmek

için yeterince yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılmadığından kütle aktarım terimi dahil edilmemiştir ibaresi geçmektedir (Phillip J. Smith, 2020).

#### **4.5.3 Konsantrasyon kayıplarının önemi ve azaltılması**

PEM'de konsantrasyon kayıplarındaki kasıt havanın içindeki girdilerin konsantrasyonudur. Hava içindeki oksijen oranı % 21'dir Yük % 90'a çıktığında PEM katot tarafında, hava girişinden % 100 oksijen sağlandığında, katot yüzey alanına tam etki edebilmesi adına basıncının da arttırılması konsantrasyon kaybının azaltılmasını sağlar.

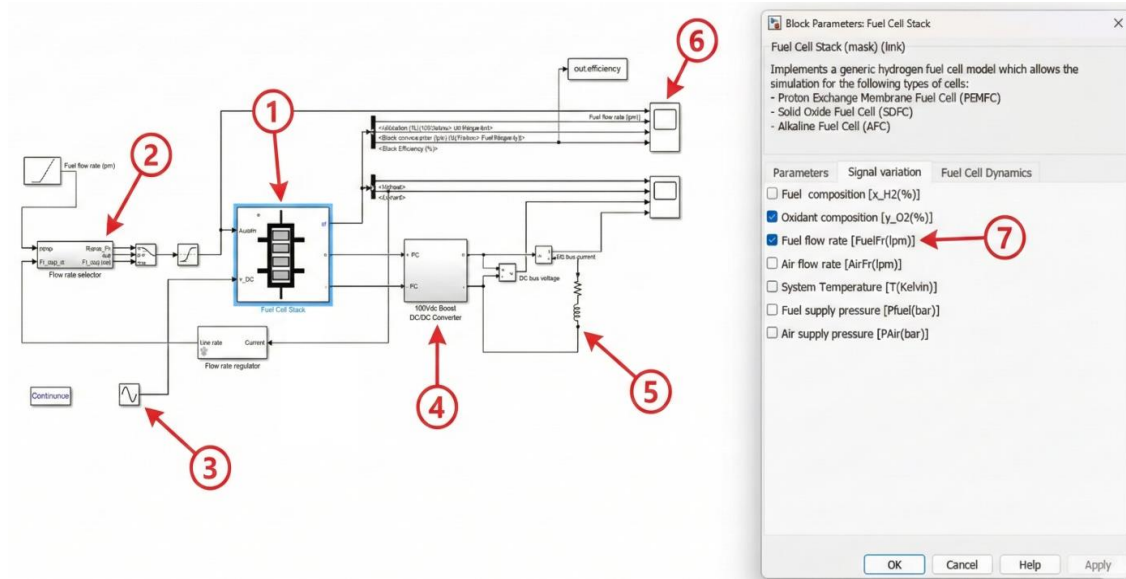
Saf oksijenle yakıt hücresinin hava girişini beslemek oksijen tüpleri veya tankları ile mümkündür. Standart bir oksijen tüpü 8 bar basınca kadar dayanıklı tanklarda muhafaza edilir. Oksijen tankının sistem üzerindeki tehlike arz edecek durumlarını birkaç maddeyle örneklendirmek gerekirse bunlar yangın riski hidrojenin yanıcılığı ve saf oksijenle daha kolay reaksiyona girmesi ve maliyet kavramlarıdır. Zhang ve arkadaşlarına göre Saf oksijenle benzer sınırlamalara sahip olan oksijenle zenginleştirilmiş hava dikkate alınmazsa, giriş havasının daha yüksek basınçlara sıkıştırılması muhtemelen en uygun çözümdür, ancak bu , tüm sistemin boyutunu ve maliyetini olumsuz etkileyen daha büyük bir hava kompresörü gerektirir.(J. Zhang, 2013)

Sistem içinde kullanılacak oksijen konsantrasyonunu uzun vadeli etkileri de bilinmemektedir. PEM içindeki en hassas organ şüphesiz ki membrandır. Bu bölüm kuruluktan geçirgenlik özelliğini bile yitirdiğinden PEM için su tedariki çok önemlidir. Bütün bu olumsuz etkilerin yanı sıra membranın uzun dönem kullanım etkileri de bilinmemektedir. Wang ve arkadaşlarına göre uzun süreli çalışmadan sonra platin metalinin konsantrasyonundaki azalmalar Pt'nin çözünmesinden ve anot katotta PtO ve PtO<sub>2</sub> oluşumundan kaynaklanabilir (Wang Z-B, 2009).

#### **4.5.4 Matlab simulink pem simülasyonu ve öğelerin açıklanması**

Şekil 4.2'de Matlab Simulink'te kurulmuş bir hidrojen yakıt hücresinin temel öğeleri gösterilmiştir. Simulink programında hazır bir şablon olarak bulunan PEM giriş ve çıkışlarını kullanıcı manuel olarak kurmak zorunda. Nernst denklemi ile kurulmuş bu yakıt hücresinin giriş ve çıkışlarına modellemek istenilen kullanım yerine göre değişkenlik gösteren sistemi kullanıcı oluşturmaktadır. PEM sistemi iki adet girişten

oluşturmuştur. Yakıt girişi; hidrojen ile beslenen bölüm diğer ise oksijen konsantrasyonu değişkenini kullanılabılır şekilde kurulmuştur.



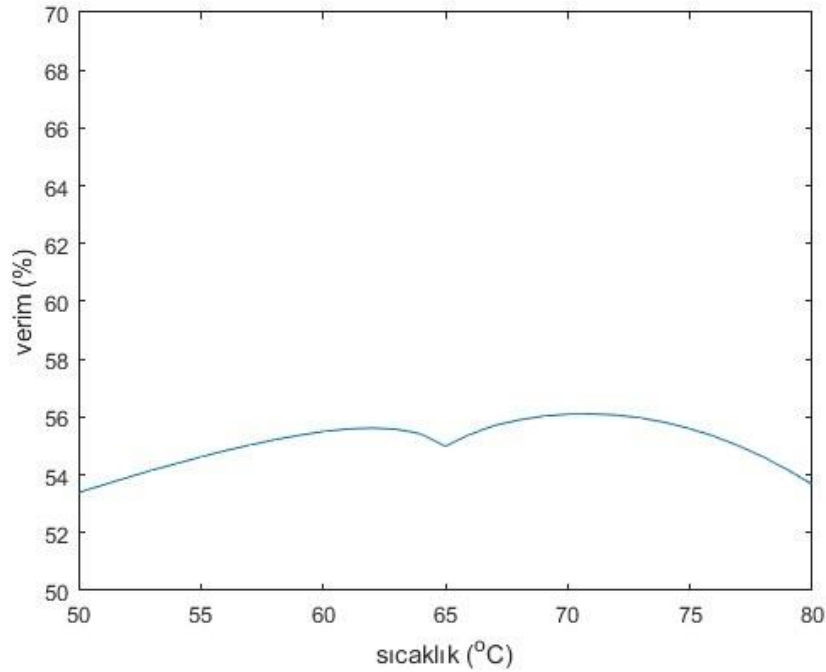
Şekil 4.1 Yakıt Hücresi PEM Simülasyonu Ve Öğeleri

Bir numaralı ok ile gösterilen bölümde, PEM'in yakıt ve oksijenin giriş yaptığı, bütün reaksiyonların gerçekleştiği ve elektrik enerjisinin üretildiği ana bölümü olan Yakıt hücresi yığının olduğu yerdir. 2 numaralı ok ile belirtilen yer ise, sisteme giren yakıt debisini ayarlayan ve bu debiyi kontrol eden Flow Rate Selector bloğudur; bu blok yakıtın hücreye hangi hızda gireceğini belirler. 3 numaralı ok ile işaret edilen bölüm, sistemin çalışma koşullarını test etmek, tepki davranışlarını incelemek ve değişken giriş oluşturmak amacıyla modele sinüzoidal sinyal uygulayan Sinyal Kaynağı bölümüdür. 4 numaralı ok, PEM'den elde edilen değişken DC gerilimi alarak bunu yüksek ve kararlı bir düzeye çıkartan DC/DC Boost Converter bölümünü göstermektedir. 5 numaralı ok ise, üretilen ve dönüştürülen elektriğin tüketildiği YÜK bölümünü gösterir ki bu yük gerçek bir elektriksel tüketiciyi temsil eden direnç ve endüktans elemanlarından oluşur. 6 no'lu ok, simülasyon sırasında oluşan akım, voltaj, verim ve akış hızı gibi kritik verilerin grafiksel olarak izlendiği Scope ekranına işaret etmektedir. Bu bölüm pratikte yoktur simülasyonda değerleri okuyabilmek için gerekli bir devre elemanıdır. Son olarak, 7 numaralı ok ile belirtilen kısım, yakıt hücresinin girişinin hangi değerleri bulduracağını belirlediği kısımdır. Bu tezin çalışma alanı olan oksijen konsantrasyonu seçilmiştir.

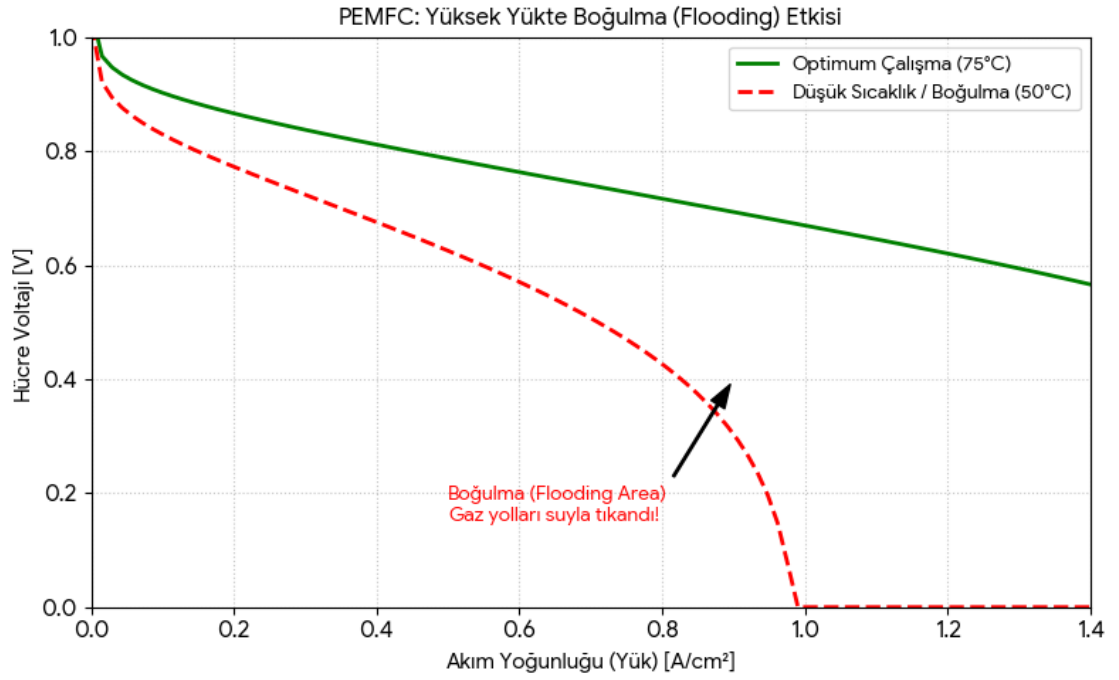
## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Rohendi ve arkadaşlarının çalışmaları ışığında ideal şartlarda bir PEM'in 100 saat çalıştırılması sonucu verimi %20 azalmaktadır.100 saat boyunca 80°C'de çalışan bir PEMFC, ortam sıcaklığındaki işlemlerden elde edilen ölçümlerle karşılaştırıldığında (<%15 OCV düşüşü) OCV'de yaklaşık %20'lik bir düşüşle önemli bir performans düşüşü gösterdi. (Rohendi a 2015)

Şekil 5.1'de sıcaklık verim grafiği verilmiştir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere 50-80 santigrat derece aralığında çalışan bir yakıt hücresi verimi sıcaklığa göre sabit kalmamıştır.50-65 santigrat derecede sıcaklık arttıkça verim de artıyor fakat 65 santigrat derecede bir çökme meydana geliyor. Bu çökmenin nedeni membranın bu noktada nem kontrolünün zorlanmasıyla alakalıdır. Optimum bölgeye geldikçe verim tekrar artmaktadır dolayısıyla bu yakıt hücresi en verimli çalışma sıcaklık aralığı 65-80 santigrat derece olarak etiket değerlerinde verilebilir.



Şekil 5.1 Optimum Yükte (%60-75) Sıcaklığın Verime Etkisi

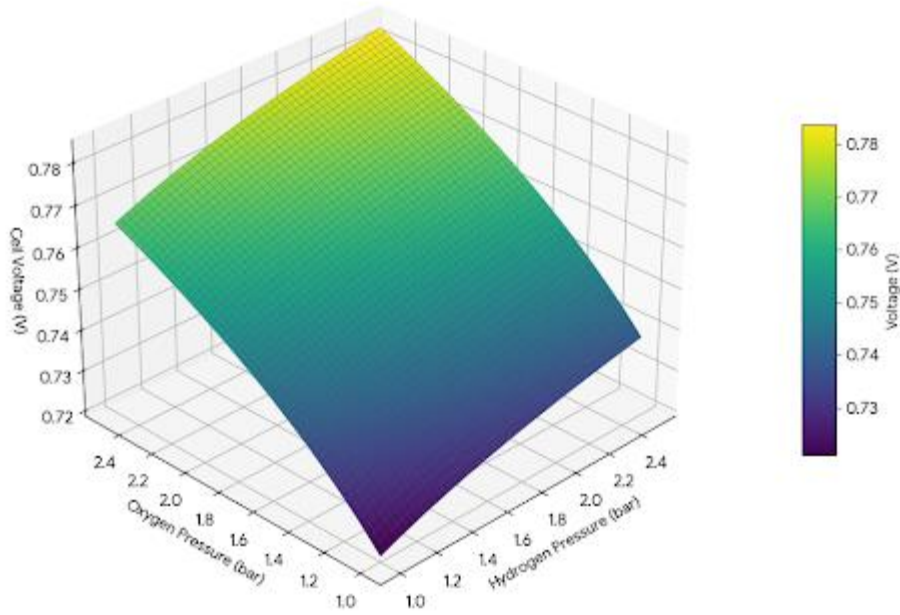


Şekil 5.2 %90 Yükte düşük sıcaklıkta boğulma

Şekil 5.2’de belirtildiği gibi optimum yükün üstünde bir çalışma daha fazla reaksiyon ve daha fazla su üretimi olduğundan suyu buharlaştırma hızına erişebilmek için yeterli sıcaklığa ulaşamayan hücre suyu tahliye edemez, su ile dolar ve gözenekler su ile tıkanığında gazlar katalizöre ulaşip reaksiyona giremez ve verim sert bir şekilde düşer. Bu grafikte olduğu gibi yüksek sıcaklık ve düşük yükte de reaksiyon az ve su üretimi düşük olduğu için membranın nem dengesi ayarlanamayacağından membran kuru ve elektronlar gözeneklerden geçecek su kanalları bulamaz dolayısıyla verim aynı şekilde düşer. Bu iç dengeyi sağlamak için optimum çalışma şartlarında su yönetiminin gaz yayılımını nasıl etkilediğini inceleyen Weber ve arkadaşları Nafion membranın bir plastik teknolojisinden ziyade nano ölçekli, dinamikleri olan durumlara göre farklı tepkiler veren kuruma boğulma gibi elektron geçişlerine karar veren kuralları olan bir yapı olduğunu kanıtladı (Weber, 2017) .

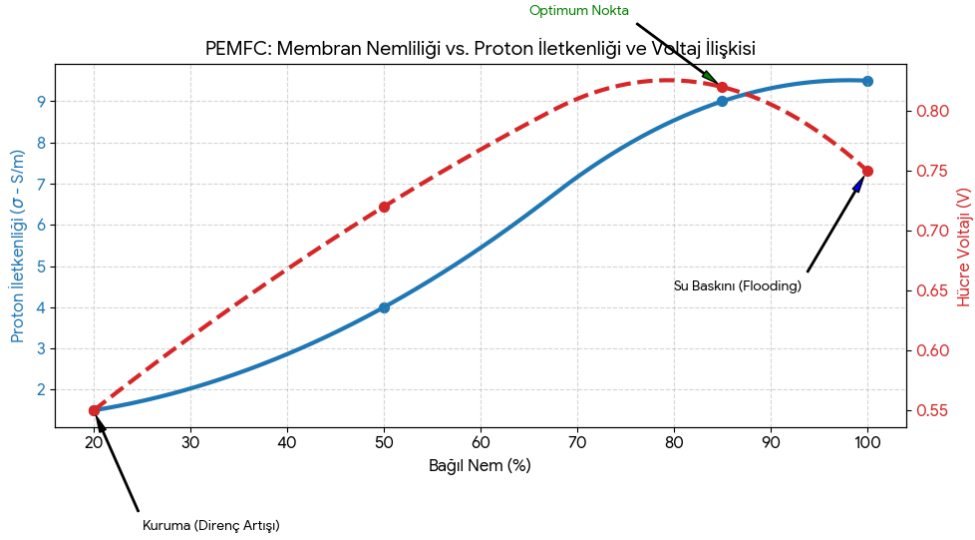
PEMFC modellemesinde kullanılan simulink bloklarında hidrojen ve oksijen girişlerinin basıncının çıkış gerilimine etkisi incelenmiştir.3d yüzey grafiği yöntemiyle meshgrid fonksiyonu kullanılarak renk skalasıyla gradyan analizi yapılmıştır. Böylelikle  $P_{H_2}$  ve  $P_{O_2}$  basınçlarına 1 bardan 2 bara kadar farklı değerler vererek çıkış gerilimine etkisi incelenmiştir.

Şekil 5.3’de görüleceği üzere her ne kadar hücre, oksijen ve hidrojenin eşit basınçlarla uygulandığında en verimli halini almış olsa da voltajın oksijen basıncına, hidrojen basıncından daha fazla duyarlı olduğu bu modelleme ile ortaya konulmuştur. Li ve arkadaşları hidrojen ve oksijen basıncı konusunda yüksek basınç farkının membran sağlığı için zararlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Oksijen basıncının hidrojen basıncından daha çok olumlu etki etmesine karşın aradaki ciddi basınç farkının membranı işlevsiz hale getireceğini de ortaya koymuşlardır (Li, 2023).



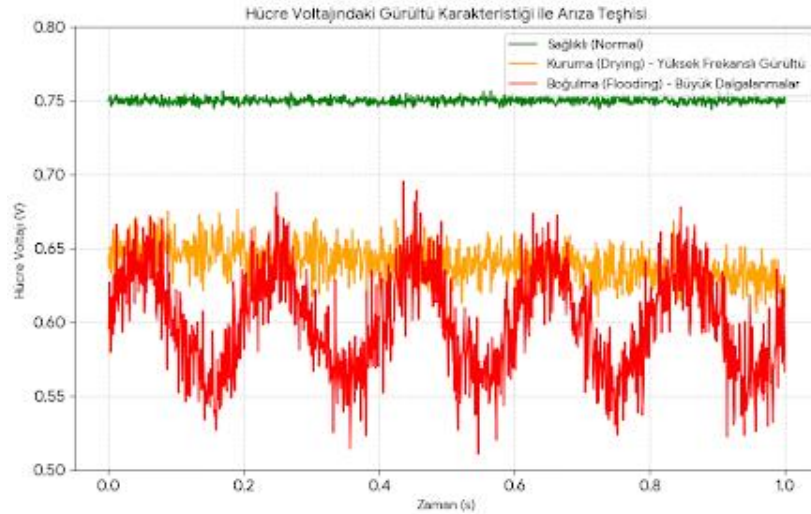
Şekil 5.3 Oksijen ve hidrojen basınç dengesinin çıkış gerilimine etkisi

PEMFC’de membran kuruluşunun optimum bir aralığı vardır % 70-90 arası nemlilik proton iletkenliğinin en verimli olduğu bölgedir. Membran nemi %20de ile proton iletkenliği çok düşüktür çünkü kuru membranın direnci yüksek olduğundan proton iletkenliği düşük olur dolayısıyla voltaj düşer. Membranın optimum nemlilik bandında çalışması proton iletkenliğini maksimum düzeye çıkaracağından voltajı yüksek seviyelere getirir. Nemlilik %100 ve üstüne çıktığında oksijen ve hidrojen gazları su yoğunluğundan katalizöre ulaşamayacağından voltaj düşmeye başlar bu evreye flooding yani boğulma bölgesi denir.



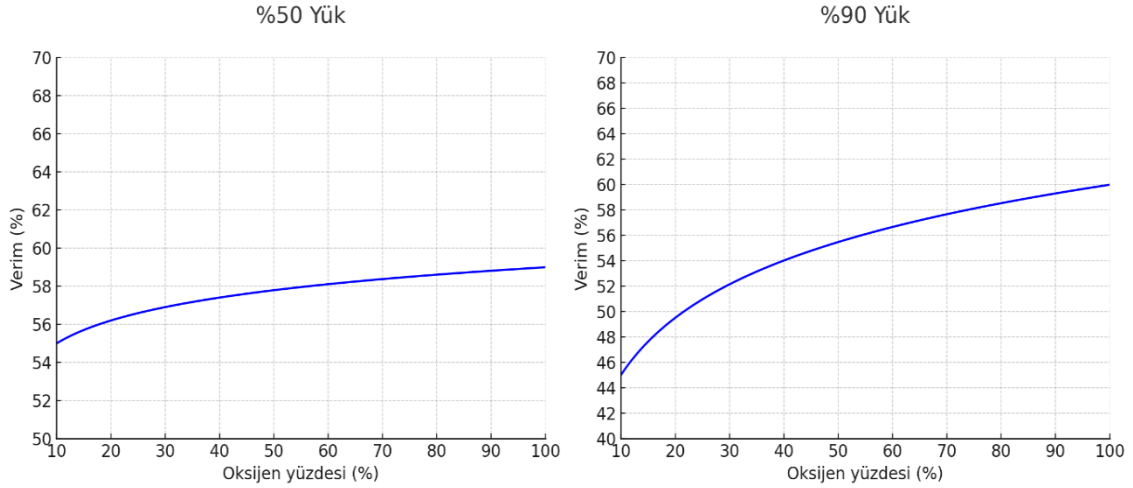
Şekil 5.4 PEMFC'de membran nemliliğinin iletkenlik ve voltaja etkisi

Springer ve arkadaşları PEMFC'de membran su dengesiyle alakalı yaptıkları çalışmada membran nemliliğinin proton iletkenliği ve voltaj dengesi ile doğrudan ilişkisini ortaya koymuşlardır.(Springer, 1991). Membrandaki bu temel nem dengesine günümüzde Zhang ve Jiao geliştirerek hücre boğulma anının etkilerini daha hassas bir şekilde modelleyerek gerçek verilerle birebir uyum sağlamışlardır (Zhang, 2022). Şekil 5.4'te Steiner ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada bağıl nem % 20'nin altına düştüğünde membranın direnci artacağından proton iletkenliği azalır ve membranın yüzeyinin kısmen kuru ve nemli kısımlarından geçmeye çalışan protonların grafik incelemesinde gürültülü bir şekilde yüksek frekanslı titreşimlerle grafik modellemesi de yapılmıştır (Steiner, 2011).



Şekil 5.5 PEMFC'de membran nemliliğinin sağlıklı, boğulma ve kuruma gürültü karakteristiği (Steiner, 2011)

Şekil 5.6'da elde edilen grafikler PEM modellemesinde oksijen konsantrasyonun sonuçlarıdır. %50 yükteki grafikte oksijenin hava içindeki doğal varlığı olan %21de verim %56 iken oksijen konsantrasyonunu %100'e çıkmasına rağmen %3 gibi küçük bir etki verdiği görülmektedir. %90 yükte verim %21 olan hava içindeki oksijen oranında %50 iken %100 oranında %10'luk bir artış gösterir.



Şekil 5.6 İki Farklı Yükteki Oksijen Oranının Verime Etkisi

Literatürde PEM'e hava basıncı uygulandığında verime etkisinin araştırıldığı birçok çalışma vardır. Genel görüş kompresörün harcadığı enerjinin sağladığı verimden çıkarınca ciddi bir artış olmaması üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla alakalı kompresörün verimini arttırma üzerine çalışmalar yapılmış ve bazı sonuçlar da alınmıştır. Bunlardan biri Nelson ve arkadaşlarının çift vidalı süperşarj kompresör ile turboşarj kompresörleri kıyasladığı ve basınçlı oksijen sağlama adına genleştirici kullandıkları deneyde genel verimi %45 e çıkarabilmişlerdir.(Dr. Douglas Nelson, 2001)

Oksijen konsantrasyonu ile hava basıncı arasındaki etki kıyaslandığından konsantrasyonun daha etkili olabileceği deneyi daha önce Butori ve arkadaşları tarafından yapılmış ve oksijen konsantrasyonu tam yükte olmayan bir PEM'de basınçtan daha fazla verim sağlayacağını görmüşlerdir.(Martina Butori 2023)

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hidrojen enerjisi, fosil yakıtların tükenmesi ve alternatif enerji kaynakları arayan dünyaya cevap verebilecek güçlü adaylardan biridir. Nüfusun artması ve endüstriyelleşmenin çok hızlı bir şekilde artması talebi arttırırken yenilenemeyen fosil yakıtlar günden güne azalmaktadır. British petrol'ün 2022 yılında yayımladığı raporunda toplam kanıtlanmış petrol ve doğalgaz rezervlerinin yıllık üretim miktarına oranına bakıldığında dünya için 2020 yılı başı itibariyle 50 yıllık bir fosil yakıt kalmıştır (BP, 2022) .

Karbon salınımı konusundaki çevreci durumu göz önüne alındığında gelişen teknoloji ile birlikte verimliliğinin arttırılmasıyla çok önemli bir aktör olacaktır. Yakıt hücresinin verimliliğinin arttırılması mevcut koşullarının pahalı olması açısından çok önemlidir. Yakıtı olan hidrojen elektroliz ile üretilmekte ve üretimi için enerji gerekmektedir. Hidrojenin taşınması ve depolanması için sıvılaştırılması veya yüksek basınçlı tanklarda muhafaza edilmesi de masraflı olduğundan verimliliğinin arttırılması çok önemlidir.

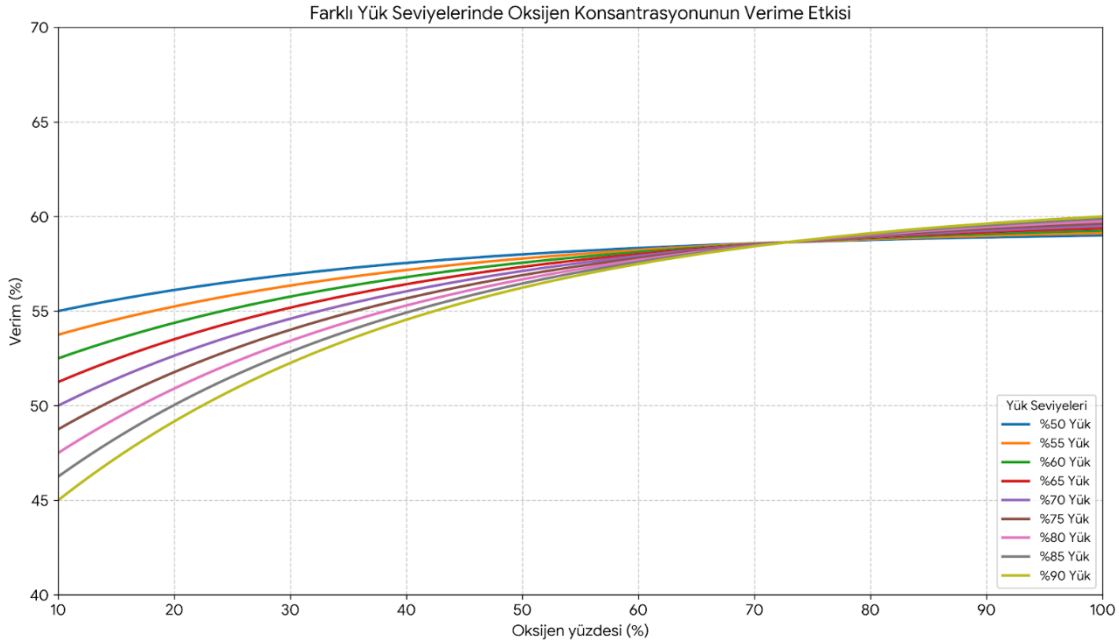
Bu tez çalışmasında yüksek yükte çalışan PEM için oksijen yoğunluğunun önemi modelleme yaparak ispatlanmıştır. Optimal yükte oksijen yoğunluğunun verimliliğe katkı sağlamadığı da grafiklerle gösterilmiştir.

Havadaki oksijen oranının %21 olduğu bir ortamda PEM optimum yükteyken oksijen yoğunluğunun arttırılmasının verimliliğe ciddi bir katkı sağlamadığı görülmektedir. Ancak yüksek yük altında çalışırken katot kısmına daha fazla oksijen gerektiğinden oksijen konsantrasyonu verimi %10 oranında arttırmaktadır.

Oksijen yoğunluğu yüksek bir katot girişi yüzey alana etkisini arttırmak için basınç sağlayacak ek elemanlar kullanılabilir. Bu basınçlandırma işlemi turbo kompresörlerle veya türevleri ile gerçekleştirilebilir.

Normal şartlarda %21 oksijen yoğunluklu hava girişinde membranda oluşan su dışarı atılmadan önce buharlaşır. Sıcaklık arttıkça bu suyun buharı daha da artar, su buharı giren havaya karışacağından oksijen daha seyreltik bir hal alır bu verimi azaltır. Mench sıcaklık artışının getireceği enerji kazancının oksijen azalmasıyla nötr hale geleceğini bildirmiştir. Ayrıca Mench çok sıcakta çalışacak bir hidrojen yakıt hücresinin su buharından dolayı gözeneklerinin boğulacağından dem vurarak saf oksijen ile bu boğulmanın da önüne geçileceğini savunur (Mench, 2008).

Şekil 6.1’de %50’den %90’a kadar bütün yüklerdeki verim-oksijen yoğunluğu grafiği verilmiştir. Bu grafikte vurgulanmak yük arttıkça başlangıç verimimiz düşüktür fakat oksijen konsantrasyonu arttıkça verim tolere edilir. %73 oksijen yüzdesinde kaybın sıfıra indiği görülmektedir.



Şekil 6.1 Farklı Yüklerdeki Verim Tolerasyonu

Yüksek yüklerde oksijen konsantrasyonunun artması gazın katalizör bölümüne etki hızını artırır dolayısıyla voltajın aniden düşmesi de önlenmiş olur. Voltaj düşmesinin önüne geçildiği için daha az hücre ile yığınlar oluşur dolayısıyla yakıt hücresinin ağırlığı ve hacmi de küçülür. Yakıt hücresinin hafif ve küçük olması özellikle ağırlık tasarrufunun çok önemli olduğu havacılık alanında büyük bir öneme sahiptir. Basınçlı oksijen kullanımının yanı sıra, katot bölümünün yüzey alanının genişletilmesi de verimliliği arttıracaktır. Katot yüzey alanının genişletildiği zaman daha fazla basınçlı ve yoğunluğu yüksek oksijen gerekmektedir.

PEM için yüksek yük PEM’in kapasitesine göre değişir, örneğin bir kargo gemisi tonlarca ağırlıktaki yükünü taşımak için yakıt hücresi kullanabilir. Boş gemiyi hareket ettirmek için harcadığı enerji, her ne kadar tonlarca ağırlığı hareket ettirmek için kullanılsa da asıl yüksek yükte çalışması tam kapasite yük ve maksimum güç olarak algılanır. %50 yükte çalışırken oksijen konsantrasyonu gerekmediğinden normal hava kullanıp %90 yükte devreye girecek hava girişinde hazır bulunan büyük çapta ve büyük basınçlarda oksijen tüpleri ile PEM’e destek verildiğinde konsantrasyon kayıpları sıfıra

indirilebilir ve bu tezin grafiklerle gösterdiği gibi verim %15 artabilir. Bu bağlamda yüksek yükte çalışacak PEMFC'ler için bu tez çalışması literatüre katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekte yapılacak çalışmalarda kullanılan yöntemin farklı veri setleri, değişen parametre aralıkları ve daha karmaşık senaryolar altında test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, çalışmada ele alınan yaklaşımın farklı yöntemlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, performans kriterlerinin çeşitlendirilmesi ve gerçek zamanlı uygulamalara entegrasyonunun incelenmesi, elde edilen sonuçların genellenebilirliğini artıracaktır. Donanım kısıtları, çevresel etkiler ve ölçeklenebilirlik gibi pratik faktörlerin dikkate alınması, yöntemin gerçek dünya uygulamalarındaki başarısını daha net ortaya koyacaktır. Bununla birlikte, bu tezde sunulan yaklaşımın farklı disiplinlerdeki benzer problemlere uyarlanması, hem yönetsel esnekliğin hem de literatüre sağlanan katkının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır.

## KAYNAKLAR

- (DOE), U. S. D. o. E., 2011, *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*.
- (IEA), I. E. A., 2019, The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities, *IEA Publications*.
- A.E. Kılıçoğlu, 2008, PE yakıt pilinin deneysel olarak incelenmesi ve modellenmesi, *Niğde Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı*.
- Acar Canan, D. I., 2019, Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (12), 5966-5977.
- Berning, T., Lu, D.M., Djilali, N, 2002, Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*.
- Bonci M., 2021, Fuel Cell Vehicle simulation: an approach based on Toyota Mirai, *Politecnico Di Torino*.
- BP, 2022, BP Statistical Review of World Energy 2022, *BP Global*, 14-32.
- Cavini, L., 2024, Fuel Cell Simulation Model for Aircraft Integration Analysis in Early Design Phases, *Politecnico di Torino and Concordia University, Aerospace Engineering*.
- Celik, S. U. U., M.; Bozkurt, A., 2023, Perfluorinated sulfonic acid membranes for fuel cells: State-of-the-art and recent developments, *Progress in Polymer Science*, 145.
- Devrim Y. , Ö. Y. E., 2018, Yakıt Hücresi Kojenerasyon Deneysel İncelemesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 38 (1), 73-82.
- Dr. Douglas Nelson, C. D. W. O. B. D. M. E., 2001, A Comparison of Two Air Compressors for PEM Fuel Cell Systems, *Galen W. Kulp Virginia Polytechnic Institute and State University Master of Science in Mechanical Engineering*.
- F.N.Buchi, G. G. S., 1996, J.Electroanal. , *Chem. 404.*, 37.
- Geliş, K., 2020, Şeffaf bir PEM Yakıt Hücresinin Performansının Değerlendirilmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1852-1863.
- Gerling., C., 2024, Experimental Characterization and Numerical Simulation of Differential PEM Fuel Cells, *Universität Stuttgart*.
- Inc, B. P. S., 2003, Nexa™ Power Module User's Manual. MAN5100078 5, 001 Series PBS

- J. Zhang, C. S., J. Zhang, R. Baker, L. Zhang., 2013, Understanding the effects of backpressure on PEM fuel cell reactions and performance, *J. Electroanal. Chem.*, 130-136.
- Jiao, K. X., J.; Du, Q.; et al., 2021, Designing next generation proton exchange membrane fuel cells, *Nature*, 595, 361-369.
- Kahraman H, Ö. İ., 2021, PEM Yakıt Hücresi Akış Alanlarının Üç Boyutlu Modellenmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 29, 65-69.
- Larminie, J. D., Andrew, 2003, Fuel Cell Systems Explained, 121-125.
- Li, M. Z., X.; Xu, L.; Liu, G.; Zhu, X.; Han, M., 2023, Investigation on the pressure management and performance optimization of PEM fuel cells under complex operating conditions, *Energy* 282.
- M. Rahimi-Esbo, A. R., A. A. Ranjbar and E. Alizadeh, 2017, Design, manufacturing, assembling and testing of a transparent PEM fuel cell for investigation of water management and 1860 contact resistance at dead-end mode, *Int. J. Hydrogen Energy*, 42, 11673-11688.
- Martina Butori , B. E., Nikola Nikoli'c , Carina Lagergren , Goran Lindbergh , Rakel 2023, The effect of oxygen partial pressure and humidification in proton exchange membrane fuel cells at intermediate temperature (80–120 °C) *Department of Chemical Engineering, Applied Electrochemistry, KTH Royal Institute of Technology, SE, 100 44, Stockholm, Sweden.*
- Mench, M. M., 2008, Fuel Cell Engines, *John Wiley & Sons*, 160-180.
- Meral, P., 2019, Pem tipi yakıt hücrelerinde tasarım ve işletme parametrelerinin hücre performansına etkisi *Sakarya Üniversitesi Yayınları.*
- O'Hayre, R. C., Suk-Won; Colella, Whitney; Prinz, Fritz B., 2016, Fuel Cell Fundamentals.
- Omrani, R. S., B., 2022, Gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: A review on functional properties and characterisation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157.
- Özdoğan M, Namlı L, Durmuş A., 2016, PEM Yakıt Hücrelerinde Geometrik Boyutların Hücre Performansı Üzerine Et kilerinin Sayısal İncelenmesi, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 7(2), 116-124.
- P. R. Acharya, 2004, An Advanced Fuel Cell Simulator, *Texas A&M University.*
- Phillip J. Smith, W. R. B., Ian J. Jakupca, and Ryan P. Gilligan, Glenn Research Center, Cleveland, 2020, Effect of Reactant Pressure on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance, *NASA/TP-20205011192.*

- R. M. Aslam, D. B. I., M. S. Ismail, K. J. Hughes, L. Ma and M. Pourkashanian, 2018, Simultaneous thermal and visual imaging of liquid water of the PEM fuel cell flow channels, *J. Energy Inst.*, 92, 1–8.
- Rohendi a , E. H. M. b., \* , A.B. Mohamad b,c , W.R.W. Daud b,c , A.A.H. Kadhum b,c , L.K. Shyuan b, 2015, Effects of temperature and backpressure on the performance degradation of MEA in PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, Pages 10960-10968.
- Ronald F. Mann, J. C. A., Michael A.I. ve Hooper, H. M. J., Brant A. Peppley, Pierre R. Roberge, 2000, Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. , *Journal of Power Sources*, 86, 173-180.
- Sherif, S. A., Barbir, F., Veziroğlu, T.N, 2005, Wind Energy and The Hydrogen Economy-Review of The Technology, *Solar Energy*, 78(5), 647-660.
- Song, Y. Z., C.; et al., 2023, Recent advances in surface protective coatings for metal bipolar plates, *Journal of Power Sources*, 556.
- Springer, T. E. Z., T. A.; Gottesfeld, S., 1991, Polymer Electrolyte Fuel Cell Model, *Journal of the Electrochemical Society*, 138 (8), 2334-2342.
- Steiner, N. Y. H., D.; Mocoteguy, P.; Candusso, D., 2011, Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes (flooding & drying) by non-intrusive methods, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (12), 7406-7417.
- Subedi, J. N., 2023, Energy Conversion and Control of Hydrogen Fuel Cell Based Electric Trans- port, *The Arctic University Of Norway*, Faculty of Science and Technology.
- Sui, S. W., X.; Zhou, X.; et al., 2020, A comprehensive review of Pt-based catalysts for oxygen reduction reaction, *Journal of Materials Chemistry A*, 8 (41), 21545-21584.
- Şefkat G, Ö. M. A., 2018, PEM YAKIT PİLİNİN SİMULİNK MODELİ ve ANALİZİ, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23 (2), 352-366.
- Tanasini, P. D., N.; et al, 2023, Impact of GDL compression on PEM fuel cell performance and durability, *Journal of Power Sources*, 564.
- Wang, Y. C., Bin; Cao, Junyu, 2021, Recent advances in solid oxide fuel cells: A review of material development and stack design, *Energy Reviews / Advanced Energy Materials*.
- Wang Z-B, Z. P.-J., Chu Y-Y, Shao Y-Y, Yin G-P., 2009, Durability studies on performance degradation of Pt/C catalysts of proton exchange membrane fuel cell., *Int J Hydrogen Energy* 4387e94, 34.

Weber, A. Z. K., Ahmet, 2017, New Insights into Perfluorinated Sulfonic-Acid Ionomers, *Chemical Reviews*, 117 (3), 987-1104.

Yılmaz, B., 2006, Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri için anot üretimi, *Yüksek Lisans tezi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi*,.

Zhang, G. J., K., 2022, Multi-phase models of water and heat transport in PEM fuel cells: A review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 92.

Zhong Y., 2022, Hydrogen Fuel Cell Lifetime Simulation in Marine Applications, *KTH Royal Institute Of Technology*.

