

**T.C.  
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PEM (PROTON GEÇİRGEN MEMBRAN) TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE  
KULLANILAN BİPOLAR PLAKALAR İÇİN ISI TRANSFERİ  
SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**

**İLHAN KARA**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ADYAMAN, 2022**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**PEM (PROTON GEÇİRGEN MEMBRAN) TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE  
KULLANILAN BİPOLAR PLAKALAR İÇİN ISI TRANSFERİ  
SİMÜLASYON ÇALIŞMASI**

**İlhan KARA**

Adıyaman Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Danışman : Prof. Dr. Deniz SUNAR ÇERÇİ  
Yıl : 2022, Sayfa sayısı: 75

Jüri : Prof. Dr. Deniz SUNAR ÇERÇİ  
Doç. Dr. Hüseyin TOPAKLI  
Doç. Dr. Ali Osman AYAŞ

Hidrojen yakıt hücresi, yenilenebilir enerji üretimi için elektrokimyasal bir işlemle elektrik üretmek üzere hidrojen (H) ve oksijen (O<sub>2</sub>) kullanan önemli bir cihazdır. Bu tez çalışmasında PEM tipi yakıt hücresinde kullanılan ve anahtar elemanlardan biri olan bipolar plakalar için ısı transferi simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bipolar plakanın genel enerji denklemi MATLAB@Simulink programı kodlarına dönüştürülerek birkaç katmandan oluşan bir PEM tipi yakıt hücresinin sol ve sağ bipolar plakalarının soğutulmasıyla hücredeki ısı transferinin simülasyonu yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrojen Yakıt Hücresi, Bipolar Plaka Isı Transferi, BP Isı Transferi Simülasyonu.

## ABSTRACT

MSc Thesis

<b>HEAT TRANSFER SIMULATION STUDIES FOR BIPOLAR PLATES USED IN PEM (PROTON EXCHANGE MEMBRANE) TYPE FUEL CELLS</b>
---

**İlhan KARA**

Adiyaman University  
Graduate Education Institute  
Department of Physics

Supervisor : Prof. Dr. Deniz SUNAR ÇERÇİ  
Year : 2022, Number of pages: 75

Jury : Prof. Dr. Deniz SUNAR ÇERÇİ  
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin TOPAKLI  
Assoc. Prof. Dr. Ali Osman AYAŞ

A hydrogen fuel cell is an important device for renewable energy generation that uses hydrogen (H) and oxygen (O<sub>2</sub>) to generate electricity through an electrochemical process. In this thesis, heat transfer simulation studies were carried out for bipolar plates, which is one of the key elements used in PEM type fuel cells. The general energy equation of the bipolar plate was converted to MATLAB@Simulink program codes and the heat transfer in the cell was simulated by cooling the left and right bipolar plates of a PEM type fuel cell consisting of several layers.

**Key Words:** Hydrogen Fuel Cells, Bipolar Plate Heat Transfer, BP Heat Transfer Simulation.

## BEYAN

“PEM (Proton Geçirgen Membran) Tipi Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Bipolar Plakalar İçin Isı Transferi Simülasyon alışması” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden olduğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

İlhan KARA

imza

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırma çalışmamın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, değerli zamanını benim için harcayan, aynı titizlikle en ufak detaya kadar beni yönlendiren, teşvik eden değerli danışman hocam Prof. Dr. Deniz SUNAR ÇERÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmamın son bölümündeki simülasyon çalışmalarına hem matematiksel hemde MATLAB@Simulink Programı ve C# yazılım kodları ile ilgili değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyerek çalışmama değerli katkılar sağlayan Prof. Dr. Salim ÇERÇİ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmamı son aşamada okuyup yorumlayarak tamamlanmasına katkıda bulunan jüri deki değerli hocalarım Doç. Dr. Hüseyin TOPAKLI ve Doç. Dr. Ali Osman AYAŞ hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli aileme, sıkıldığım zamanlarda yaramazlıklarıyla beni mutlu eden çocuklarım Zeynep Ada ve Zümra'ya, yüksek lisans eğitimim sürecinde karşılaştığım tüm zorluklarda, beni asla yalnız bırakmayan, destek olan, fedakarlık gösteren sevgili eşim Gül KARA'ya ve çalışmama katkı sağlayan herkese teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
BEYAN.....	III
TEŞEKKÜR.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
RESİMLER DİZİNİ.....	IX
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	X
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yakıt Hücreleri ve Çeşitleri.....	3
1.1.1. Alkali Yakıt Hücresi.....	6
1.1.2. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi.....	7
1.1.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi.....	9
1.1.4. Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi.....	10
1.1.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi.....	12
1.2. Yakıt Hücre Uygulama Alanları.....	14
1.3. Yakıt Hücre Termodinamiği.....	15
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi.....	28
3.1.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresinde Taşıma Olayları.....	32
3.3.2. Yakıt Pili Yığınının Isı Transferi.....	34
3.3.3. Bipolar Plakalar.....	36
3.4. MATLAB@Simulink Programlama Dili.....	37
3.5. MATLAB@Simulink Programında Kullanılan Isı Transfer Denklemleri.....	41
3.5.1. Isı Transferinin Temelleri.....	42
3.6. Hücre Enerji Denklikleri.....	47
3.6.1. Genel Enerji Dengesi İşlemi.....	47
3.6.2. Yakıt Hücre Yığınının Enerji Dengesi.....	48
3.6.3. Yakıt Pili için Genel Enerji Dengesi.....	49
3.6.4. Nodal Ağ.....	50
3.6.5. Plakada Geçici İletim.....	51
3.6.6. Yakıt Hücre Katmanları için Enerji Dengesi.....	55
3.6.7. Uç Plakalar, Kontaklar ve Conta Malzemeleri.....	55
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	58
4.1. Bipolar Plaka Isı Transferinin MATLAB@Simulink Modellemesi.....	58
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	71
KİŞİSEL BİLGİLER.....	75

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Başlıca yakıt hücresi türleri, çalışma sıcaklıkları ve önemli uygulamaları .....	5
Çizelge 3.1 Temel bir PEM tipi yakıt hücresi bileşenleri, özellikleri ve genel çeşitleri .....	31
Çizelge 3.2 Bazı yakıt hücresi malzemelerinin 300 K'deki ısı iletkenliği.....	43
Çizelge 5.1 Bu tezde yapılan ısı transfer simülasyonunda kullanılan parametreler ve değerleri.....	67



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi .....	4
Şekil 1.2 Alkali yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi .....	7
Şekil 1.3 Doğrudan metanol yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi.....	8
Şekil 1.4 Fosforik asit yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi .....	9
Şekil 1.5 Erimiş karbonat yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi .....	11
Şekil 1.6 Katı oksit yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi .....	13
Şekil 2.1 Akış alanlarının tasarımları (a) serpantin - A, (b) serpantin - B, (c) serpantin - C, (d) düz kanallar, (e) pin tipi ve (f) dallı kanallar .....	18
Şekil 2.2 50 cm <sup>2</sup> aktif alana sahip tek yakıt hücresinin ağ görselleştirmesi ve bileşenleri .....	19
Şekil 2.3 Polarizasyon eğrileri .....	20
Şekil 2.4 GDL'li ve GDL'siz yakıt hücresi yığını boyunca çeşitli akış hızlarında ölçülen basınç düşüşü değerleri .....	24
Şekil 2.5 Giriş tarafından uzunlamasına yön boyunca dilim grafiğinin bir görünümü ve hava akışı .....	25
Şekil 2.6 Paralel tip soğutma modlarının üst yüzeyi ve merkezi kesme plakası boyunca (a), (b) ve (c) no'lu şekiller, soğutma modları için üst yüzeyin sıcaklık profilidir. Sırasıyla 4, 5 ve 6; (d), (e) ve (f), soğutma modları 4, 5 ve 6 için merkezi kesme plakasını sıcaklık profilidir. Giriş Reynolds numarası 2022'dir .....	26
Şekil 3.1 PEM tipi yakıt hücresini oluşturan bileşenler .....	29
Şekil 3.2 PEM tipi yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi .....	30
Şekil 3.3 PEM yakıt hücresinin temel yapısında yer alan gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve bipolar plakalar ile işleyişi .....	33
Şekil 3.4 Bir PEMYH'de taşıma olaylarının birleştirilmesi .....	34
Şekil 3.5 Hava soğutmalı bir yığın (soldaki) ve tek bir kanalda (sağdaki) ısı transferinin şeması.....	35
Şekil 3.6 (a) Bir yakıt hücresi yığınının ve bir katot kanalının 3 boyutlu şeması, hesaplama alanı. (b) Kanaldan önce ve sonra ortam havasını içeren hesaplama alanının 2D şeması; üstteki ve alttaki koyu çizgiler periyodik sınır koşulunu belirtir. ....	36
Şekil 3.7 Anot ve katot akış alanı plaka enerji dengesi.....	37
Şekil 3.8 Örnek fonksiyon dosyası. ....	38
Şekil 3.9 Isı akışı çalışması için yığın illüstrasyonu .....	42
Şekil 3.10 Termal temas direncine bağlı olarak sıcaklık düşmesi .....	45
Şekil 3.11 İki boyutlu iletimi .....	46
Şekil 3.12 Enerji dengesi denklemini elde etmek için ayrıntılı akış şeması .....	48
Şekil 3.13 Düğüm ağına sahip iki boyutlu iletim.....	51
Şekil 3.14 Hesaplama alanı boyunca eşit olarak dağıtılan düğümler.....	52
Şekil 3.15 Katman etrafındaki enerji dengesi .....	55
Şekil 4.1 Akış alanı plakası enerji dengesi.....	58
Şekil 5.1 L = 0.005 m plaka kalınlığına sahip çelik BP için elde edilen sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının üç boyutlu gösterimi (üstteki grafik), farklı nod sayıları için sıcaklığın simülasyon zamanı ile değişimi (alttaki grafik).....	64

Şekil 5.2 L = 0.005 m plaka kalınlığına sahip su geçirmez çelik BP için elde edilen üç boyutlu sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının gösterimi (üstteki grafik), sıcaklığın simülasyon zamanı ile farklı nod sayıları için gösterimi (alttaki grafik)...	65
Şekil 5.3 L = 0.005 m plaka kalınlığındaki polimer malzeme bir BP için elde edilen üç boyutlu sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının gösterimi (üstteki grafik), sıcaklığın simülasyon zamanı ile farklı nod sayıları için gösterimi (alttaki grafik)...	66
Şekil 5.4 Gerçekleştirilen simülasyon için ele alınan bir PEM yakıt hücresinin tüm katmanlarının kapalı (alttaki) ve açık hali (üstteki) .....	68
Şekil 5.5 t = 1 s simülasyon zamanında L (m) genişliğine göre sıcaklık (T) değişim grafiği. ....	69
Şekil 5.6 t = 60 s simülasyon zamanında L (m) genişliğine göre sıcaklık (T) değişim grafiği. ....	69
Şekil 5.7 t = 120 s simülasyon zamanında L (m) genişliğine göre sıcaklık (T) değişim grafiği. ....	70

## RESİMLER DİZİNİ

Resim 3.1 MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “fuelcellheattransferforBPP.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazım görseli. .....	39
Resim 3.2 MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “fuelcellheattransferforBPP.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazılımının simülasyon görseli.....	40
Resim 3.3 MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazılımının simülasyon görseli .....	40



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$CO$	: Karbon monoksit
$CO_2$	: Karbondioksit
$CO_3OH$	: Metanol; Metil Alkol
$e^-$	: Elektron
$H^+$	: Hidrojen İyonu
$H_2$	: Hidrojen Gazı
$H_2SO_4$	: Sülfürik Asit
$H_2O$	: Su
$I$	: Akım (A)
$J$	: Akım Yoğunluğu ( $A/m^2$ )
$O_2$	: Oksijen Gazı
$P$	: Güç (W)
$P$	: Basınç (atm)
$R$	: Direnç ( $\Omega$ )
$T$	: Sıcaklık (K)
$T$	: Zaman (s)
$V$	: Gerilim, Voltaj veya Potansiyel (V)
$Q$	: Yük (C)

### Kısaltmalar

BPP	: Bipolar Plaka
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CL	: Katalizör Katmanları
GDL	: Gaz Difüzyon Kanalları
KOYP	: Katı Oksit Yakıt Pili
MEA	: Membran Elektrot Düzeneği
MEM	: Membran
MP	: Tek Kutuplu Plakalar
PEMYH	: Proton Değişim Membran Yakıt Hücresi
PEM	: Polimer Değişimli Zar veya Polimer Elektrolit Membran
Re	: Akışkanlar mekaniğinde Reynolds sayısı, bir akışkanın, atalet kuvvetlerinin ( $vsp$ ) nin viskozite kuvvetlerine ( $\mu/D$ ) olan oranıdır .
W	: Watt; Elektrik Güç Birimi
KW	: Kilo Watt; 1000 Watt
MW	: Mega Watt; 1000000 Watt

**1. GİRİŞ**

Günümüzde fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması ve bu tip yakıtların oluşturduğu olumsuz çevresel faktörler, yeni ve temiz enerji üretim kaynakları arayışını zorunlu hale getirmektedir. Hidrojen enerjisi, konut binalarından ulaşıma, ticaretten sanayiye kadar geniş bir kullanım alanına sahip olmanın yanı sıra güvenli ve kolay bir şekilde taşınması mümkün ve bu taşınmada enerji kaybının az olduğu bir yenilenebilir enerji türüdür.

Hidrojen yakıt hücresi, yenilenebilir enerji üretimi için elektrokimyasal bir işlemle elektrik üretmek üzere hidrojen (H) ve oksijen (O<sub>2</sub>) kullanan önemli bir cihazdır. Yakıt hücresi tipleri, elektrokimyasal reaksiyonların tipine, katalizörlerin tipine ve bazı diğer faktörlere bağlıdır.

Yakıt pillerinin tarihi 150 yıldan uzun süredir bilinmektedir, on dokuzuncu yüzyılın başlarında, bir İngiliz kimyager ve fizikçi olan Humphry Davy'nin 1801'de bir yakıt hücresi kavramını ilk kez tanımladığı zamana kadar uzanmaktadır. 1838'de "The Philosophical Magazine", hidrojen ile oksijen arasındaki elektrokimyasal reaksiyonu anlatan Alman-İsviçreli kimyager Christian Friedrich Schönbein'in öncü bir makalesini yayınlanmıştır. Bu çalışmalar 1842 yılında İngiliz bir avukat ve amatör bilim adamı olan William Grove'u elektrik üretmek için hidrojen ve oksijen kullanan ilk yakıt hücresini tasarlamaya teşvik etmiştir. Cihaz "gaz voltaik batarya" olarak adlandırılıyordu sıklıkla "Grove bataryası" deniliyordu. Her ikisi de elektrolit olarak seyreltilmiş sülfürik asit içeren bir banyoya daldırılmış, biri hidrojen, diğeri oksijenle doldurulmuş iki küçük ters çevrilmiş kaba yerleştirilmiş platin elektrotları içeren birkaç hücreden oluşuyordu. Korozyona uğrayan elektrotlarla ilgili sorunlar ve malzemelerin dengesizliği, Grove'un yakıt hücresini pratik olmayan bir çözüm haline getirmiştir.

"Yakıt hücresi" terimi ilk kez 1889'da hava ve endüstriyel alanda kömür gazı kullanarak bir yakıt hücresi inşa etmeye çalışan Charles Langer ve Ludwig Mond tarafından kullanılmıştır. İçten yanmalı motorun geliştirilmesi, yakıt hücresi teknolojisini yarım yüzyıldan fazla bir süre boyunca ilgi odağının dışında kalmasına neden olmuştur.

1930'larda, İngiliz kimya mühendisi Francis Bacon yakıt hücrelerini başarılı bir şekilde yeniden gözden geçirerek kapsamlı araştırmalara devam etmiştir.

1932'de tasarımı geliştiren Bacon 1959'da 5 kW enerji üretebilen ilk alkalın yakıt hücrelerini sunmuştur. Aynı yıl Allis-Chalmers için çalışan başka bir ekip, alkali yakıt hücreleri (AYH) ile çalışan bir traktör yaptılar. Makine, Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak sergilenmiştir. Bu arada, General Electric (GE) için çalışan Willard Thomas Grubb ve Lee Niedrach, alternatif bir yakıt hücresi teknolojisi proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEMYH)'ni geliştirmiştir. Yakıt hücresi uygulamaları için PEM'lerin gelişimi, GE'nin kısmen sülfonatlı polistiren sülfonik asit membranlara dayalı yeni bir yakıt hücresi tipi geliştirmesiyle 1955'te başlamıştır.

Yakıt hücresi türlerinden biri olan proton geçirgen membran (PEM) yakıt hücreleri, düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunluğu ve büyük ölçekli üretim için dikkat çekicidir. Bu özellikler PEM yakıt hücrelerini umut verici bir alternatif haline getirmekte olup ayrıca mobil, portatif ve konut uygulamaları için de uygundur. Bir PEM yakıt hücresinin temel yapısı, bir elektrolit zarına ve bir zarın her iki tarafında bir katalizör katmanına sahip olan bir çift gaz difüzyon elektrodu içerir. Her ne kadar yakıt hücresi benzersiz ve etkileyici bir sistem olsa da bir yakıt hücresi performansı ve çalışması için iyileştirmeler hala gereklidir. Bu tür iyileştirmeler özellikle daha iyi tasarım, uygun malzeme bulma ve tüm bileşenlerin optimizasyonu için gereklidir. Bu iyileştirmeler ancak gerçekçi matematiksel işlemler varsa kullanılabilir. Elektrokimyasal ve transfer işlemleri arasındaki çok sıkı bağlantı nedeniyle yakıt hücrelerindeki işlemler çok karmaşıktır. Tek bir yakıt hücresinin doğru bir şekilde modellenmesi için elektrokimyasal kinetik, kütle transferi, ısı transferi, sıvı akışı ve tür transfer parametreleri dikkate alınmalıdır. Literatürde PEM yakıt hücreleri için yayınlanmış birçok model vardır. Ancak yeni modellere hala ihtiyaç bulunmaktadır.

PEM tipi yakıt hücrelerinin temel bileşenlerinden biri olan bipolar plakalar, bir PEM yakıt hücresinin hacmine, ağırlığına (yaklaşık olarak %80) ve maliyetine (yaklaşık olarak %50) önemli ölçüde katkı sağlar. Bipolar plakalar; yakıt gazını ve havayı aktif yüzey alanlarına eşit olarak dağıtmak, oluşan ısının ve suyun bu aktif alanlardan uzaklaştırılmasını sağlamak, elektriksel akımın bir hücreden diğerine

iletilmesini sağlamak, gaz ve soğutucu sızıntılarını önlemek gibi önemli birçok göreve sahiptir.

Bu tez çalışmasında hidrojen yakıt pili türlerinden PEM (Proton Geçirgen Membran) tipi yakıt hücresi sisteminin parçası olan bipolar plakaların, serbest konveksiyona sahip bir soğutma sistemi ile bir PEM tipi yakıt hücresinin katmanları boyunca MATLAB@Simulink programı kullanılarak tek boyutlu ısı transferinin simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

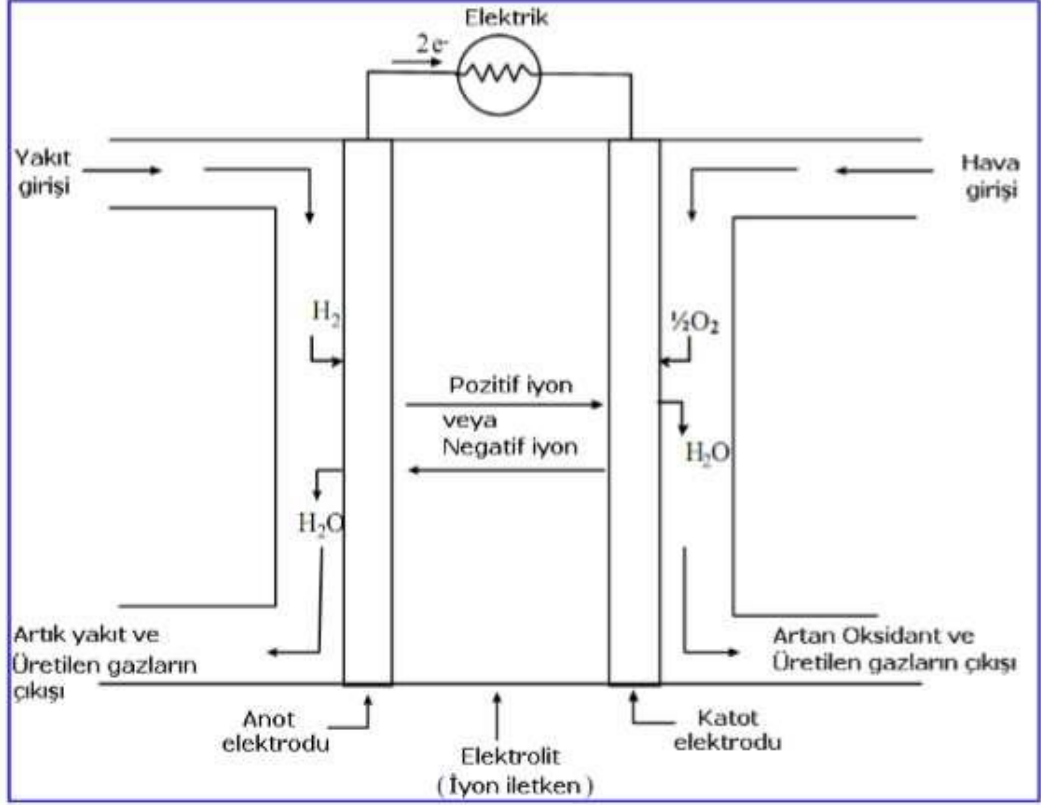
### **1.1. Yakıt Hücreleri ve Çeşitleri**

Yakıt hücresi alternatif bir üretim kaynağıdır. Temiz, doğa dostu ve yüksek verimliliğe sahiptir. Atık madde olarak sadece su ve ısı açığa çıkaran, çevreye ve insanlığa minimum zararı olup maksimum fayda sağlayan yakıt hücresi teknolojisi, yakın gelecekte diğer enerji üreten teknolojilerin önüne geçebilecek ve herkesin üzerinde çalışabileceği bir teknoloji türüdür.

Yakıt hücresinin çalışma sistemi suyun elektrolizi deneyi ile açıklanabilir. Bu deneyde suyu oksijen ve hidrojen olarak ayırştırmak üzere suya doğru akım verilmesi işlemi gerçekleştirilir. Yakıt hücresinde ise bu işlemin tersi yapılır. Sisteme hidrojen ve oksijen verilerek meydana gelen kimyasal tepkime sonucunda elektrik enerjisi üretilmesi beklenilmektedir [1].

Yakıt hücresi; bir anot ve bir elektroliti sandviçleyen bir katot olmak üzere iki elektrottan oluşur. Genel olarak, tüm yakıt hücresi teknolojileri hidrojen ve oksijen tüketir. Hidrojen ve oksijen gazları sırasıyla anoda ve katoda sürekli olarak beslenirler. Anotta, hidrojen yakıtı bir katalizörle tepkimeye girerek pozitif yüklü protonlar ( $H^+$ ) ve negatif yüklü elektronlar ( $e^-$ ) oluşturur. Elektrolit membran, yalnızca pozitif iyonların anottan katot tarafına geçmesine izin verir ve elektronlar için bir yalıtkan görevi görür. Bu elektronlar, kararlı bir sistem elde etmek için zarın diğer tarafında yeniden birleşirler, böylece serbest kalan elektronlar harici bir elektrik devresinden geçerler ve protonlar elektrolit yoluyla iletilirken katoda giderler. Bu değişim elektrik enerjisini açığa çıkartır. Eş zamanlı olarak, katot tarafında oksijen, elektrottan gelen

elektronlar ve elektrolitten protonlar arasındaki tepkimenin bir sonucu olarak su oluşur. Basitleştirilmiş bir yakıt hücresinin genel yapısı Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi [1]

Yakıt hücreleri genel olarak elektrolit, katalizör, çalışma sıcaklığı ve yakıt seçimine göre sınıflandırılır. Altı ana yakıt hücresi grubu vardır.

- Alkali Yakıt Hücresi (AYH)
- Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi (DMYH)
- Fosforik Asit Yakıt Hücresi (FAYH)
- Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi (EKYH)
- Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH)
- Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi (PEMYH)

Başlıca yakıt hücresi türleri, çalışma sıcaklıkları ve önemli uygulamaları Çizelge 1.1’de verilmektedir.

Çizelge 1.1 Başlıca yakıt hücresi türleri, çalışma sıcaklıkları ve önemli uygulamaları [2]

Yakıt Hücresi	Elektrolit	Elektriksel Güç (Watt)	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Hücre Verimi (%)	Sistem Verimi	Önemli Uygulama Alanları
Alkali Yakıt Hücresi	Potasyum Hidroksit	10 W – 100 W	50 – 100	40 – 50	26 – 31	Uzay, bekleme gücü*
Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi	Sülfirik Asit veya Polimer	1 MW – 100 kW	50 – 120	30 – 40	40	Taşıma, Bilgisayar, Cep telefonu
Fosforik Asit Yakıt Hücresi	Ortofosforik Asit	<10 MW	180 – 210	40 – 45	36 – 45	Cogen**, sabit güç
Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi	Lityum – Potasyum Karbonat	100 MW	630 – 650	50 – 60	43 – 55	Cogen**, sabit güç
Katı Oksit Yakıt Hücresi	Kararlı hale gelmiş Zirkon	<100 MW	900 – 10 <sup>3</sup>	50 – 60	43 – 55	Cogen**, sabit güç
Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi	Katı Polimer	100 W – 500 kW	50 – 125	40 – 50	32 – 40	Uzay, taşıma

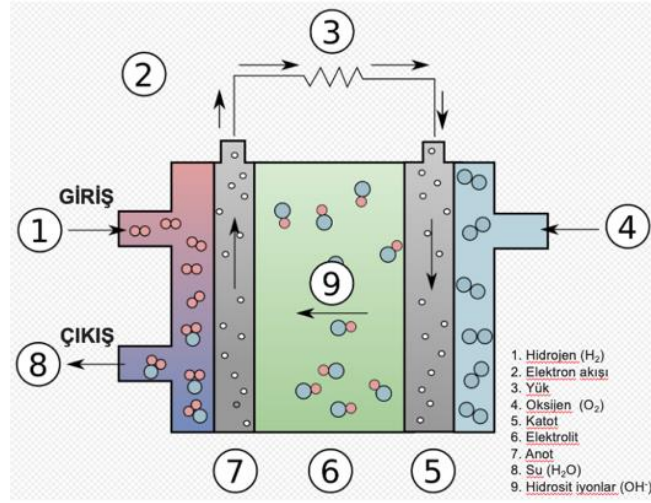
\***Bekleme gücü:** Alkali yakıt hücresi çalışma sıcaklığı ve hücre verimi göz önünde bulundurulursa daha uzun ömürlü çalışabilmektedir.

\*\***Kojenerasyon (Cogeneration):** Elektrik ve ısı enerjisinin eşzamanlı üretildiği sistemdir. Elektrik ve ısı enerjisinin tüketildiği yerde üretilmesini sağlayan bu sistem, elektrik üretilirken ortaya çıkan ısı enerjisi sisteme geri kazandırır ve enerji tasarrufu sağlar.

**1.1.1. Alkali Yakıt Hücresi**

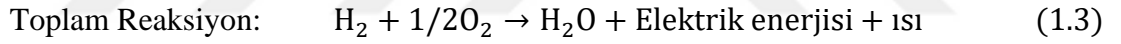
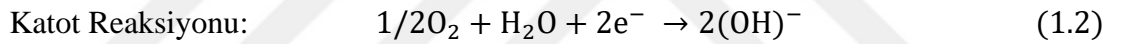
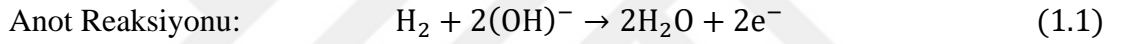
İlk olarak geliştirilen yakıt hücresi olup bir diğer ismi ise Bacon yakıt hücresidir. NASA tarafından uzay programları kapsamında kullanılmış ve bu alanda üzerinde en fazla durulan yakıt hücresidir. AYH'ler, elektrolit olarak sulu bir potasyum veya sodyum hidroksit çözeltisi kullanarak elektrik üretir. Anotta, hidrojen gazı, su moleküllerini ve elektronları serbest bırakmak için negatif yüklü hidroksil iyonlarıyla birleşir. Bu elektronlar katoda harici bir elektrik devresi aracılığıyla ulaşır, oksijen ve su ile birleşerek elektrolit yoluyla anoda aktarılabilen negatif yüklü  $\text{OH}^-$  iyonları oluşturur [3].

Alkali yakıt hücresi genellikle 60 °C ile 100 °C aralığında değişen çalışma sıcaklığına, yüksek elektriksel verimliliğe ve uygun dinamik çalışma modlarına sahiptir. Alkali yakıt hücresinin Anot kısmında nikel (Ni) ve katot kısmında ise gümüş (Ag) katalizörler kullanılmaktadır. Güç üretiminin düşük olması dezavantajlı bir özelliğidir. Alkali elektrolit, yakıt veya oksitleyici akışında bulunan karbondioksit ( $\text{CO}_2$ )'ye karşı oldukça hassastır ve hidroksit iyonlarının azalması ve gözenekli elektrot blokajı (metal karbonat çökmesi) nedeniyle alkali yakıt hücresinde önemli derecede bir bozulmaya yol açar. Giriş yakıtından ve oksitleyici akışından  $\text{CO}_2$ 'yi çıkarmak veya dışarıdaki fırçalama için elektroliti geri dönüştürmek, bu sorunu çözmek için alternatif bir çözümdür [4]. Bir alkali yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2 Alkali yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi

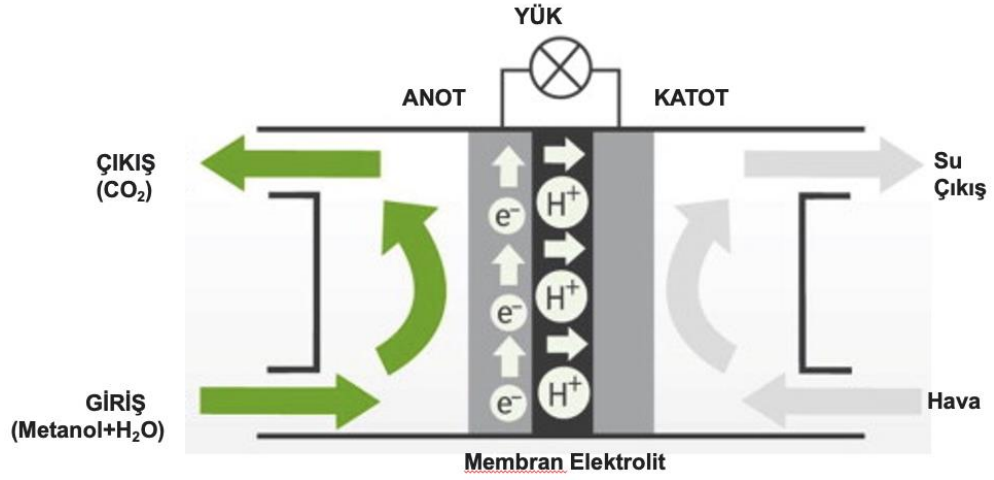
Alkali yakıt hücresinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar;



şeklindedir.

### 1.1.2. Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi

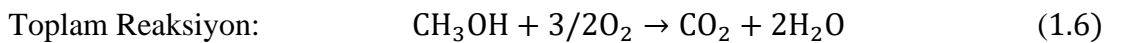
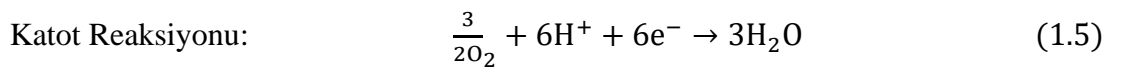
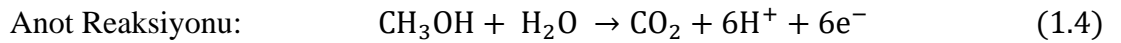
Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMYH) teknolojisi, diğer yakıt hücresi türlerine kıyasla yeni bir teknolojidir. Şekil 1.3'te doğrudan metanol yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Doğrudan metanol yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi

PEM yakıt hücresi gibi, DMYH de bir polimer elektrolit membran kullanır. Sistem, metanol ile doldurulur. Anotta, metanol suyla bir oksidasyon reaksiyonuna girerek karbondioksit, protonlar ve elektronlar açığa çıkarır. Protonlar, anottan zardan katoda taşınır ve burada oksijen ve elektronlarla reaksiyona girerek saf su oluştururlar. Anotta tüketilen su katotta çoğaltılır. DMYH'ler düşük verimlilikleri nedeniyle, enerji ve güç yoğunluğunun verimlilikten daha önemli olduğu kameralar veya dizüstü bilgisayarlar gibi taşınabilir elektronik uygulamaları, özellikle de 1 W ila 1 kW kapasite aralığı için geliştirilir [3].

Doğrudan metanol yakıt hücresinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibi yazılabilir:

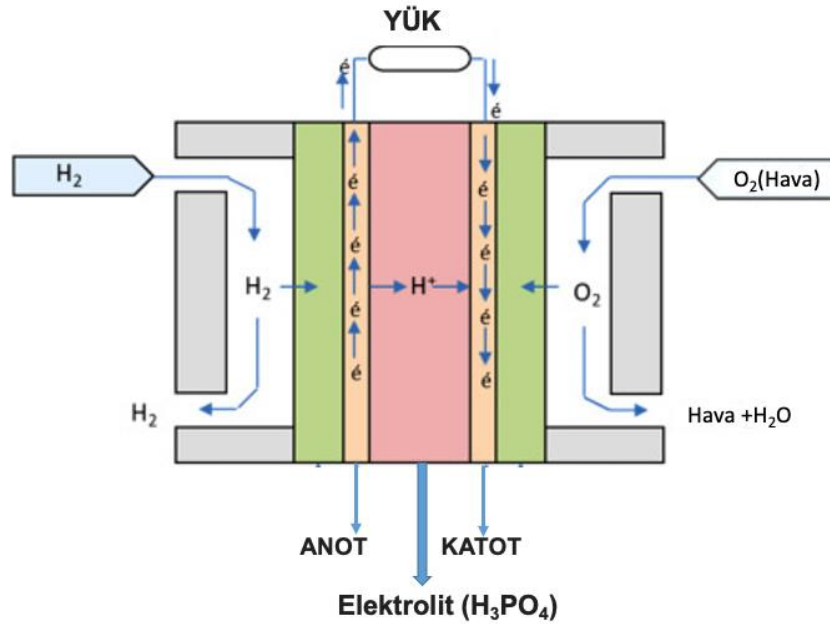


şeklindedir.

### 1.1.3. Fosforik Asit Yakıt Hücresi

Fosforik Asit Yakıt Hücresinde (FAYH) elektrolit olarak fosforik asit ( $H_3PO_4$ ) kullanılırken katalizör olarak da platin ve platin alaşımları kullanılır [1]. Bunun sebebi ise fosforik asidin temel metallerle çok çabuk reaksiyona giren kararlı bir asit olmasıdır. Ticari teknolojide hala geçerli tek yakıt hücresi çeşidi fosforik asit yakıt hücreleridir.

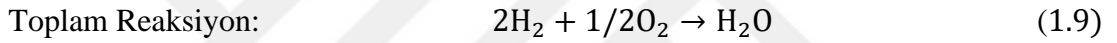
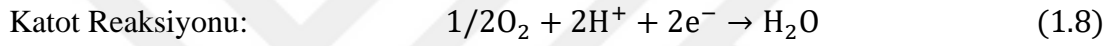
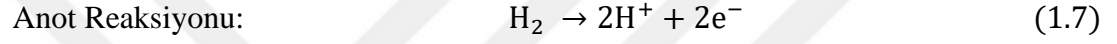
Şekil 1.4'te fosforik asit yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi gösterilmektedir. Elektroliti kapiler hareketle hareketsiz hale getirmek için genellikle gözenekli bir silikon-karbid (silicone carbide) matrisi kullanılır [5]. Kullanılan asit elektrolit nedeniyle, FAYH'lerin iç kısımları yüksek korozyon ortamlara dayanabilmelidir. Pozitif yüklü hidrojen iyonları asit elektrolit aracılığıyla anottan katoda geçer. Anotta meydana gelen reaksiyonlar sonucunda elektronlar üretilir. Üretilen bu elektronlar farklı bir yol izleyerek devrenin tamamlanmasını ve böylece elektrik enerjisinin oluşmasını sağlar. Bu oluşumun ardından elektronlar katoda varırlar. Katot bölgesinde ise elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijenin bir araya gelerek su oluşturmasını sağlarlar.



Şekil 1.4 Fosforik asit yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi

Fosforik asit yakıt hücreleri 150 °C ile 220 °C sıcaklıklarında çalışıp, %40 ile %50 arasında verim sağlamaktadırlar. Bu yakıt hücreleri genel olarak okul, otel ve hastaneler gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. Çalışma sıcaklığının yüksekliği sebebiyle bu sıcaklık derecesinde kullanılan malzemeler pahalı olduğundan üretim maliyeti yüksektir. Bundan dolayı, birçok uygulamada tercih edilmemektedir [6]. Fosforik yakıt hücrelerinin temel avantajı, aynı anda elektrik ve faydalı ısı üretme ve ayırma kapasiteleridir. Hücrelerden alınan atık ısı, çoğu ticari ve endüstriyel uygulamada kolaylıkla kullanılabilir [7].

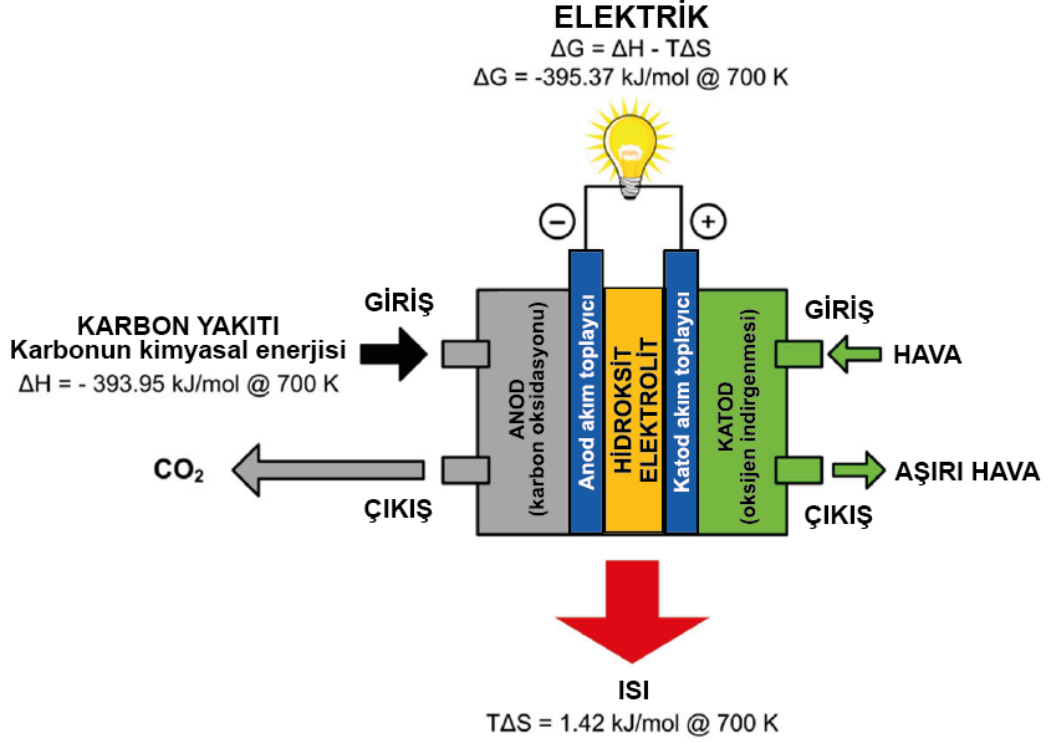
Fosforik asit yakıt hücresinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar;



olarak sıralanır.

#### 1.1.4. Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi

Erimiş karbonat yakıt hücreleri (EKYH) elektrolit olarak lityum (Li), sodyum (Na), potasyum (K) gibi alkali karbonatlarının  $\text{LiAlO}_2$  biçimindeki seramiklerini kullanır [6]. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi (PEMYH) ve fosforik asit yakıt hücresi (FAYH)'lerinin sınırlı olan çalışma sıcaklıklarına alternatif olarak geliştirilmiş sistemlerdendir [8]. Alkali metal karbonatın yakıt hücresi içerisinde elektrolit olarak çalışabilmesi için akışkan (sıvı) şeklinde olması gerekir. Çalışma sıcaklığı oldukça yüksek olup 600 °C ile 700 °C arasındadır. Verimi ise yaklaşık olarak %60 ile %70 seviyelerindedir. Şekil 1.5' te erimiş karbonat yakıt hücresinin genel yapısı ve işleyişi gösterilmektedir.



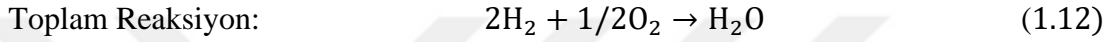
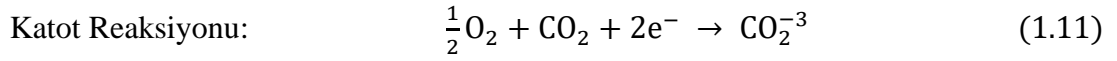
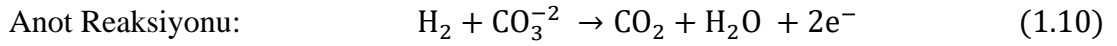
Şekil 1.5 Erimiş karbonat yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi [9]

Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısının kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır. Bu şekilde açığa çıkan ısı kojenerasyon sistemlerinde kullanılırsa verim %80'i bulabilir [6]. Yükseltgenme reaksiyonlarında karbonat kayıpları yüzünden belli aralıklarla karbonat takviyesi yapılmak zorunda kalınır. Bu genellikle ürünlerde mevcut olan karbondioksitin, havanın geldiği katot içine geri dönüşümü sayesinde sağlanmaktadır [2]. Katı erimiş karbonat yakıt hücreleri  $\text{CO}_2$  ve  $\text{CO}$ 'e karşı dayanıksız olmadıkları gibi sistemin çalışmasını olumlu yönde etkilerler. 1 MW ile 20 MW kapasite aralığında elektrik akımı üretilir. Çok yüksek çalışma sıcaklığına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit ve büyük santrallerin bulunduğu yerleşim yerlerinde kurulumları mümkün olmaktadır. Bu sebepten dolayı dünyada uygulama alanları sınırlıdır ve genelde askeri uygulamalarda faydalı elektrik üretiminde kullanılır.

Erimiş karbonat yakıt hücrelerinin en büyük dezavantajı ise yüksek çalışma sıcaklığında elektrolit üzerinde artan aşınmanın etkisi sonucunda sistemde arızaların (daha çok kısa devre) meydana gelmesi ve malzemelerin ömürlerinin kısılmasıdır.

Ayrıca katı yerine sıvı bir elektrolitle çalışmanın yarattığı zorluk ve karbonat iyonlarının anot reaksiyonunda harcanması nedeniyle sürekli katoda karbondioksit enjeksiyonu gerektirmesi de diğer dezavantajlarıdır [6].

EKYH'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar;



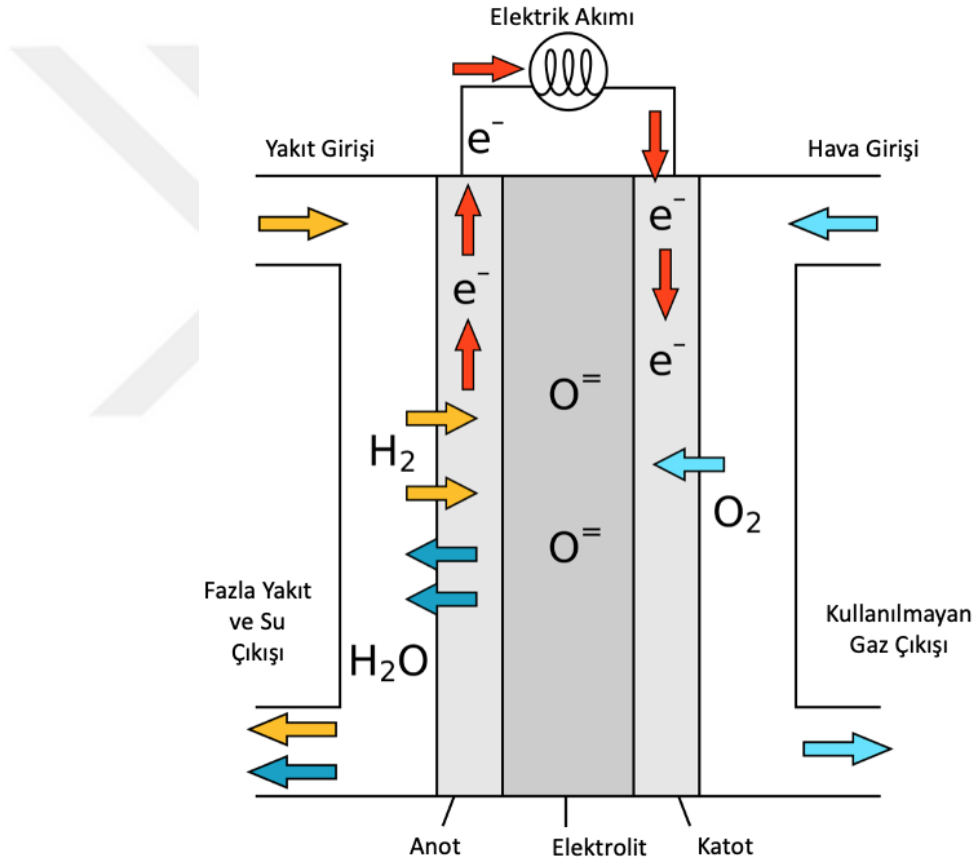
şeklindedir.

### 1.1.5. Katı Oksit Yakıt Hücresi

Katı oksit yakıt hücreleri (KOYH) 800 – 1000 °C sıcaklıklarda çalışabilen yüksek sıcaklıklı yakıt hücresi olarak ortaya çıkmıştır. Bu yakıt hücrelerinin en önemli özelliği, korozyona sebep olan ve elektrolitte su yönetimini gerektiren sıvı elektrolit kullanılmamasıdır. Gözeneksiz bir katı metal oksitin elektrolit olarak kullanılması sebebiyle katı oksit yakıt hücreleri diğer yakıt hücrelerine nazaran yapı bakımından daha basittir. Çünkü, yakıt hücresinin yapısında sadece iki faz; gaz ve katı söz konusu olmaktadır. Bu katı elektrolitin her iki tarafı da geçirgen özelliğe sahip elektrot maddeyle kaplanmıştır. Bu sistem, elektrolit olarak katı seramiklerin kullanılmasına ve yüksek sıcaklıklarda işlem görmesine dayanır. Yüksek sıcaklıkta, içsel yeniden oluşum ve değerli olmayan metallerle hızlı elektroliz sağlar. Aynı zamanda kojeneratörler için yan ürün olarak yüksek kalitede ısı üretir [8].

Elektrolit tipik olarak, oksijen iyonlarının ( $\text{O}^{-2}$ ) iletimini sağlayabilecek, itriyum ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) veya stabilize edilmiş zirkonyum dioksit ( $\text{ZrO}_2$ ) gibi katı, gözeneksiz oksitleri içerir. Genellikle anot olarak  $\text{Co} - \text{ZrO}_2$  veya  $\text{Ni} - \text{ZrO}_2$ , katot olarak ise Lanthanum manganite (Lantan Manganit) ( $\text{LaMnO}_3$ ) ile depolanan stronsiyum (Sr) kullanılır.

Bu katı oksit yakıt hücresinde yakıt anot tarafına verildiği anda katot tarafında bulunan oksijen iyonları elektrolit içinden geçerek anotta hidrojenle reaksiyona girer. Burada gerçekleşen reaksiyon sonucunda elektronlar ayrılır ve anot katot arasında bağlı dış devre iletkeninden geçerek elektrik enerjisini üretip katoda geri döner. Reaksiyon sonucunda, reaksiyona giren hidrojen, oksijen ve karbonmonoksit çıkış ürünü olarak su ve karbondioksiti üretir. Şekil 1.6'da katı oksit yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi gösterilmektedir.



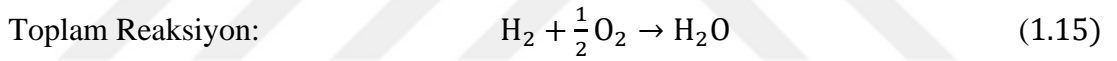
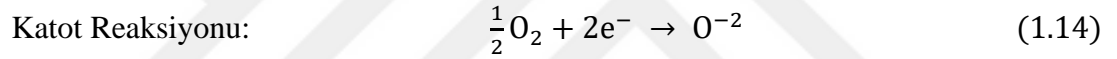
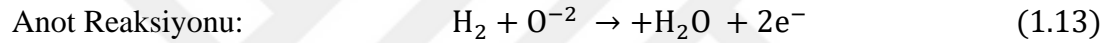
Şekil 1.6 Katı oksit yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi

Bu yakıt hücresinin verimliliği %60 civarındadır, ancak çalışma sıcaklığından oluşan yüksek ısı kojonerasyon edilirse verimlilik performansı %85'e ve çıkış gücü 100 KW'a kadar çıkabilmektedir [8]. Katı oksit yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen haricinde doğalgaz da kullanılabilir. Çalışma sıcaklığının yüksekliği doğalgazı hidrojene dönüştürürken kolaylık sağlamaktadır. Bunun yanında saf

hidrojen dışında yakıtlar kullanıldığında ortaya çıkan kükürt kirliliği en büyük sorunlardandır [6].

Gelecek vadeden bu yakıt hücreleri, endüstriyel alanlarda ve büyük ölçekli merkezi elektrik üretim istasyonlarında yüksek güç uygulamaları olarak kullanılabilir. Bazı tasarımcılar KOYH'nin motorlu araçlarda kullanılabileceğini düşünmekte ve bunun için yardımcı güç üniteleri geliştirmektedirler. Hem PEMYH'nin hem de KOYH'nin son maliyetleri yaklaşık 1000 \$/kW seviyesine indirilebilirse küçük ölçekli yerleşim uygulamaları için de elverişli olacaktır [8]. Bu yakıt hücresinde 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmak mümkün olduğundan, maliyeti düşük katalizör kullanılabilir. KOYH'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar;

KOYH'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar;



şeklindedir.

## 1.2. Yakıt Hücresi Uygulama Alanları

Yakıt hücresi teknolojisi geliştikçe aynı oranda da uygulama alanları genişleyerek endüstrideki pazar payı büyümektedir. Başlıca uygulama alanlarını;

1. Uzay çalışmaları ve askeri alanlar:
  - NASA roket ve kapsül çalışmaları,
  - Denizaltı ve tank uygulamaları.
2. Ulaşım ve taşıma:
  - Otobüsler, otomobiller, trenler ve gemiler,
  - Havaalanı içindeki terminal araçları.

### 3. Sabit güç sistemleri:

- Güç üretim istasyonları,
- Yedek üniteler,
- Kesintisiz güç kaynak sistemlerinin bir parçası olarak,
- Dağıtılmış güç üretimi (veri merkezleri, hastaneler, oteller, fabrikalar, okullar vb.),
- Kombine ısı ve güç üretim sistemi olarak konut kullanım.

### 4. Taşınabilir elektronik cihazlar

- Dizüstü bilgisayarlar,
- Hücresel telefonlar,
- Kameralar,
- Kablosuz araçlar,
- Şarj cihazları.

şeklinde sıralayabiliriz.

## 1.3. Yakıt Hücresi Termodinamiği

Termodinamik, enerjinin bir konum ve halden başka bir konum ve hale geçişteki hareketini inceleyen bilim dalıdır. Yakıt hücrelerinde ise, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdüklerinden dolayı, termodinamik denklemler kullanılarak bir yakıt hücresindeki potansiyel, sıcaklık, basınç ve hacim gibi temel termodinamik kavramların anlaşılabilmesi ve yakıt hücrelerinin tanımını, yapısını, çalışma şeklinin açıklanıp modellenmesinin tahmin edilebilmesi için gereklidir [10].

Bu bölümde ele alınacak başlıca konular yakıt hücresi analizinde tepkime esnasında sistemlerle ilgilidir:

- **Mutlak Entalpi:** Termodinamik bir nicelik olup, bir sistemin tüm iç süreçlerinde oluşan kimyasal ve hissedilen termal enerjinin toplamıdır. Oluşum entalpisi bir diğer deyişle kimyasal enerji ( $h_f$ ), kimyasal bağların enerjisi ile ilişkilidir. Hissedilen termal enerji ( $\Delta h_s$ ) ise bir referans ile sistemin sahip olduğu entalpi

arasındaki farka eşittir. “Entalpi” (H) olarak adlandırılan denklem aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$H = U + pV \quad (1.16)$$

Sıcaklık ve basınç bilindiği takdirde iç enerji ve entalpi değerleri termodinamik tablolardan elde edilebilir.

- **Özgül Isı:** Bir maddenin sıcaklığını 1 °C artırmak için gereken ısı enerjisi miktarını ölçer. Özgül ısı [11], özgül iç enerji  $u(T, v)$  ve özgül entalpi  $h(T, p)$ 'nin kısmi türevleri olarak tanımlanabilir:

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \quad (1.17)$$

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad (1.18)$$

- **Entropi:** Isı miktarının dönüşebilme olasılığı veya miktarını ölçebilen diğer önemli bir kavramdır. Yakıt hücrelerinde sıvı-buhar karışımlarıyla uğraşırken, özgül entropi, entalpi ile aynı şekilde hesaplanabilir.

- **Gibbs Serbest Enerjisi:** Kararlı bir durumda bulunan bir sistem kararsız duruma geçtiğinde, sabit basınç (izobarik) ve sıcaklıkta (izotermal) bulunan bir termodinamik sistemden elde edilebilecek maksimum iş miktarını ölçen potansiyeldir. Gibbs serbest enerji değişimindeki ( $\Delta G$ ) negatif değişiklik elektriksel iş ile verilir ve molar miktarlarda şu şekilde ifade edilebilir:

$$W_{\text{elek}} = -\Delta G \quad (1.19)$$

‘H’ ısı içeriği diğer bir deyişle oluşum entalpisi, ‘T’ mutlak sıcaklığı ve ‘S’ ise entropiyi temsil etmek ettiğinde elektriksel güç çıkışı  $W_{\text{elek}}$ ,

$$W_{\text{elek}} = \Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1.20)$$

olur.

**2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR**

Hidrojen yakıt hücresinin uygulama alanları oldukça geniş bir yelpaze oluşturmaktadır. İlk olarak Amerika Birleşik Devleti tarafından uzay araştırma araçlarındaki roketlerde kullanılmıştır. Daha sonraları ise denizaltılarda, tüm kara ulaşım araçlarında, hızlı trenlerde ve jetlerde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise bilgisayar, diz üstü bilgisayar, tablet, mobil telefon vb. elektronik cihazlarda kullanımı için çalışmalar yapılmaktadır.

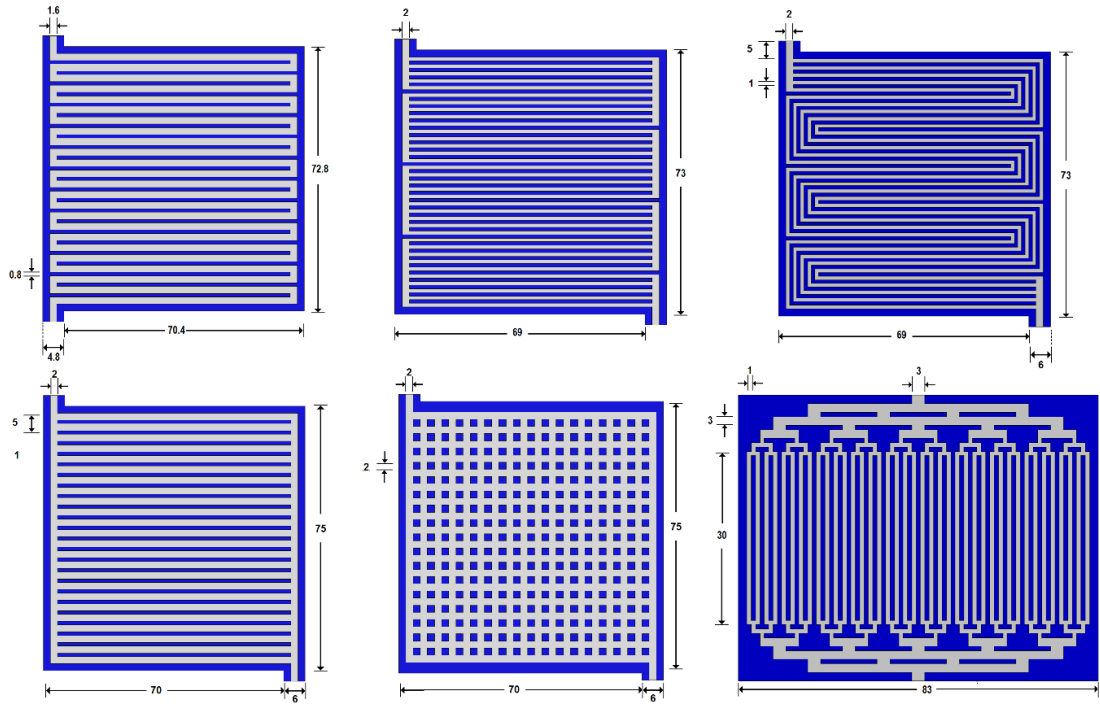
Hidrojen ekonomisinde en umut verici teknolojilerden biri olan yakıt hücreleri, yüksek dönüşüm verimliliği, modülerliği ve sıfır kirlilik ile karakterize edilir. Bununla birlikte, proton değişim membranı (PEM) tipi yakıt hücresi, düşük çalışma sıcaklıkları ve yüksek verimleri ile daha fazla dikkat çekmiştir. Bir yakıt hücresinin çalışma prensibi aslında oldukça basittir. Öncelikle, hidrojen ve oksijen hücreye ayrı ayrı verilir ve elektrik üretmek için elektrokimyasal olarak reaksiyona girerler. Gaz difüzyon katmanını (GDL) doldurduğundan elde edilen ürünler su ve ısıdır. Katot reaksiyonu tarafından üretilen su damlaları, oksijenin katalizör tabakalarının aktif bölgelerine ulaşmasını önler. Bu durum yakıt hücresinin performansını etkiler. Bununla birlikte, su genellikle hava akışı ve katoda beslenen oksijen ile çıkarılır. Ayrıca, bu sorunu çözmek için farklı akış alanları tasarımları önerilmiş olup en yaygın olanı paralel kanal tasarımıdır ve iç içe geçmiştir. Bu tasarım, suyu hücreden verimli bir şekilde dışarı atmayı sağlar [12].

Bir PEM tipi yakıt hücresinde (PEMYH) üretilen ısı, cihazın ürettiği toplam enerjinin yarısına denk gelebilir. Bu ısı üç ana sebepten oluşur:

1. Elektrokimyasal reaksiyonlar,
2. Omik ısıtma,
3. Yakıt hücresindeki su yoğunlaşmasıdır.

Bu mekanizmaların uygun şekilde yönetilmesi, yakıt hücresinde çözülmesi gereken bir sorundur. Bu kapsamda bir PEMYH' deki ısı transferinin 3 boyutlu sayısal bir çalışması Macedo-Valenciaa ve ark. [13] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada fizik yasalarına ve korunum ilkelerine göre en optimal sonuca ulaşabilmek için akışkan maddelerin sayısal verilerini bilgisayarla hesaplayabilen Hesaplamalı Akışkanlar

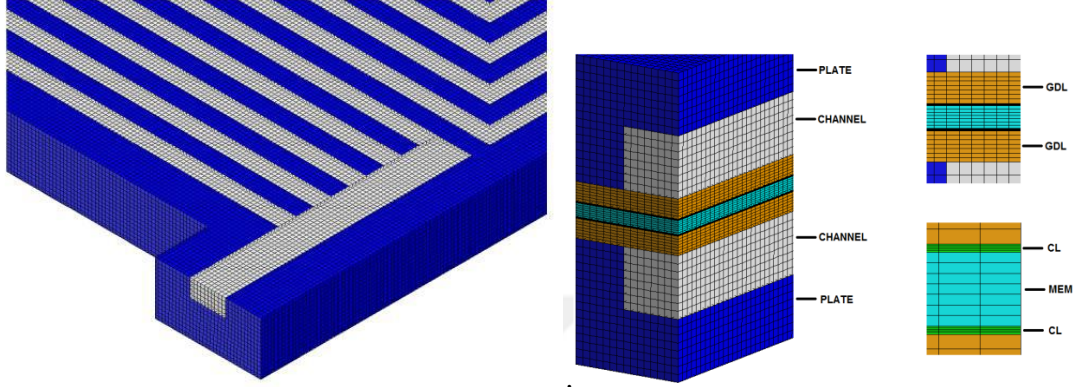
Dinamiği'nin (CFD) ticari kodu kullanılmıştır. Bu çalışmada sıcaklık, tür ve akım yoğunluğunun dağılımları elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, çok sayıda paralel kanala sahip tasarımların geleneksel tasarımlara göre daha fazla ısı yaydığını, geleneksel olmayan tasarımların geleneksel olan tasarımlardan daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca, katot bölgesinin anot bölgesinden daha yüksek sıcaklıklar sunduğu da ortaya konulmuştur. Sonuçlar, polarizasyon eğrileri ve literatürde bildirilen deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Yakıt hücresinin tasarımını iyileştirmek için ısı transferi ile ilgili bilgiler de elde edilmiştir. Bu çalışmada değerlendirilen hesaplama modelleri altı tip akış alanından oluşmaktadır. Akış alanları 50 cm<sup>2</sup> aktif alan olacak şekilde tasarlanmış, anot ve katot aynı tasarımlar kullanılmıştır. Plakalar, gazlar aynı akış yönünde beslenecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan bileşenlerin boyutları Şekil 2.1'de belirtilmiştir [13].



Şekil 2.1 Akış alanlarının tasarımları (a) serpantin - A, (b) serpantin - B, (c) serpantin - C, (d) düz kanallar, (e) pin tipi ve (f) dallı kanallar [13]

Bu çalışmada analizi yapmak için referans parametre olarak ortalama akım yoğunluğu kullanılmıştır. Modellerde kullanılan son ağ (Şekil 2.2) şu aralıklara sahiptir: kanallar ve plakalar (0.2), GDL'ler (0.035), MEM (0.007) ve CL'ler (0.0014).

Modellerde elde edilen ağ elemanları 1.2 milyon civarında bulunmuştur. Her polarizasyon eğrisi başına hesaplanan hesaplama süresi ise yaklaşık 80 saattir.

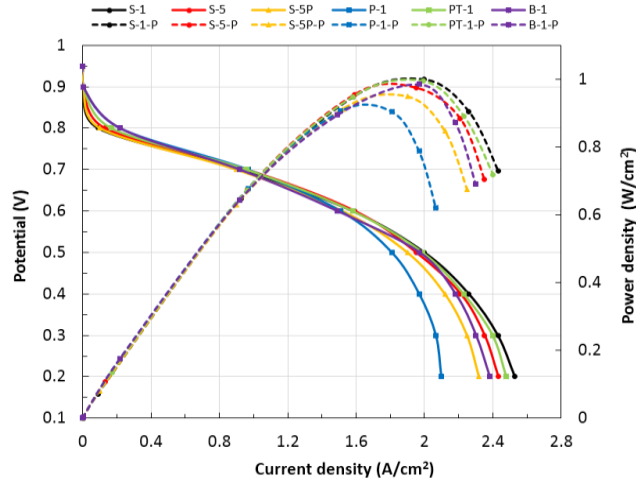


Şekil 2.2 50 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip tek yakıt hücresinin ağ görselleştirmesi ve bileşenleri [13]

Hesaplamalı modellerin sayısal simülasyonunu gerçekleştirmek için

- Kararlı durum koşulları,
- Kanallarda laminar akış,
- İzotropik gözenekli bölgeler,
- Elektrokimyasal reaksiyonlar katalizör üzerinde gerçekleşir katman yüzey,
- Türlerin gaz fazında taşınması,
- Zardaki sıvı suyun taşınması difüzyon mekanizmaları ve elektro-ozmotik sürüklenme ile kontrol edilmesi varsayımları kabul edilmiştir.

Yapılan simülasyon sonucunda elde ettikleri polarizasyon eğrileri Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Bu grafikler, serpantin tasarımının en iyi performansı sunduğunu ve paralel kanal tasarımının en düşük performansı verdiğini göstermektedir.



Şekil 2.3 Polarizasyon eğrileri [13]

Yine aynı yöntemle hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli kullanılarak serpantin gaz akış kanallarına sahip bir PEM tipi yakıt hücresinin üç boyutlu bir çalışması Nguyen [14] tarafından sunulmuştur. Çalışmanın sonucunda, serpantin akış kanallarına sahip PEM tipi yakıt hücresinin üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli geliştirilmiştir. Bu modelle, reaktif gaz konsantrasyonu dağılımı, sıcaklık dağılımı, membran ve gaz difüzyon katmanlarındaki potansiyel dağılımı, aktivasyon aşırı potansiyel dağılımı ve yerel akım yoğunluğu dağılımı gibi yakıt hücresi içindeki taşıma olayları hakkında veriler elde edilmiştir [14].

Pek çok araştırma grubunun PEMYH teknolojisi alanında öncelikli hedefleri, yüksek proton iletkenliği, düşük elektronik iletkenlik, düşük yakıt geçirgenliği, düşük elektro-ozmotik sürtünme katsayısı, iyi kimyasal ve termal kararlılık sağlayacak proton değişim membranları geliştirmeyi amaçlamaktadırlar. Kullanılabilirlik açısından mekanik özellikleri, yeterlilik, dayanıklılık ve rekabetçi üretim maliyeti gibi konuları dikkate alınarak PEM yakıt hücreleri için Polimer membranlar üretebilmek üzere en uygun olacak malzemeler sentezlenerek yeni stratejiler geliştirilmektedir. PEM yakıt hücresi teknolojilerinde yapılan bir diğer çalışma ise Walkowiak-Kulikowska ve ark. [3] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, polimer membranların sentezi detaylandırılarak PEMYH teknolojisi için farklı polimer sistem türleri açıklanmıştır.

Bipolar plakalar yakıt hücrelerinde maliyetin büyük kısmına neden olan ana maliyetlerinden ve ağırlık katkılarından biridir. Maliyetleri en aza indirebilmek için, literatürde paslanmaz çelik plakaların karbon bazlı malzemelerle kaplanmasına ilişkin birçok örnek bulunmaktadır. Husby [15] yüksek lisans tez çalışmasında, elektrokimyasal yöntemlerle polimer biriktirme gerçekleştiren kimyasal buhar biriktirme örnekleri vermektedir. İletken karbon karası içeren çok işlevli silan ve yine diğerleri, bıçak kaplamasıyla epoksi / grafit macunu ile bipolar plakaları kaplayarak metalik bipolar plakalar (BPP) ve GDL arasında düşük bir temas direnci elde etmenin uygun maliyetli bir yolunu bulmayı ve elektrokimyasal ölçümler ile bunu düşük tutmayı hedeflemiştir [15].

Afshari [16] çalışmasında ise PEM tipi yakıt hücresinin akış kanallarının termal yönetimi ile ilgili çalışma yapmış olup yakıt hücresinin performansının etkilendiğini ölçmüştür. Bu çalışmada, akış alanı olarak metal köpüklü kanallar kullanarak, daha homojen sıcaklık, gazlı reaktanlar ve akım yoğunluğu dağılımı sağlamak, maliyetini azaltmak ve yakıt hücresinin performansını artırma hedeflenmiştir. 3 boyutlu bir model ele alınıp elektrokimyasal kinetik işlemlerden geçirilerek, süreklilik, momentum, türler, enerji ve yük cinsinden denklemler oluşturularak sayısal olarak çözülmüştür. Akış alanı gaz dağıtıcısı olarak metal köpüklü PEM hücresi ile paralel kanal arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre; akış alanı olarak metal köpüğün kullanılmasının, reaktan gaz transferinde ve akım yoğunluğunda artışa yol açtığını ve akım yoğunluğu dağılımının iyileştiği gösterilmektedir. Metal köpüklü hücrede maksimum sıcaklık, klasik hücreye göre daha düşük olup sıcaklık dağılımı hücre içinde daha tekdüzedir. Düşük ve orta akım yoğunluklarında, metal köpüklü hücre, daha düşük sıcaklık ve daha düşük omik direnç nedeniyle klasik kanala göre daha iyi performansa sahiptir ve bu hücre, daha düşük kütle taşıma kayıpları nedeniyle yüksek akım yoğunluğunda daha verimlidir. Ayrıca, yüksek geçirgenliğe sahip metal köpük, düşük basınç kaybı ile reaktan gazların daha homojen bir dağılımını sağlar [16].

PEMYH'ler geleneksel soğutma kanalı akış alanları, hücre performansını düşürecek bazı zorluklara sahiptir. Diğer bir çalışma ise Vazifshenas ve ark. [17] tarafından yayımlanmıştır. Bu makalede, soğutma kanalı akış alanlarında ortaya çıkan

zorlukları aşmaya yönelik geliştirilen yöntem incelenmiştir. Gözenekli malzemelerin ısı transferindeki etkisini görmek için kanallara metal köpükler eklenmiştir. Geleneksel kanallardaki sürekli uzun akış geçitlerinin aksine, metal köpükler rastgele kesintiye uğramış akış geçitleri sağlar. Rastgele dağılmış kıvrımlı bağlar nedeniyle sıvının yeniden sirkülasyonu, bu yeni kanallardaki ısı transferini artırır. Soğutma kanallarında metal köpük kullanımının özelliklerini değerlendirmek için metal tipi, gözenek yüzdesi gibi farklı parametreler ve soğutma ortamı ayrıca araştırılmıştır. Soğutma mühendisliğinde hem termal hem de hidrolik bakış açıları önemli olduğundan, üç kanal tipinin tümü için ısı transferi ve basınç düşüşü doğrulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, metal köpüğün gözenekliliğinin artırılmasının hem ısı transferini hem de basınç düşüşünü azalttığı, çok kanallı tip, metal köpüklerin varlığında en iyi ısı transfer davranışının sergilendiği ortaya konmuştur [17].

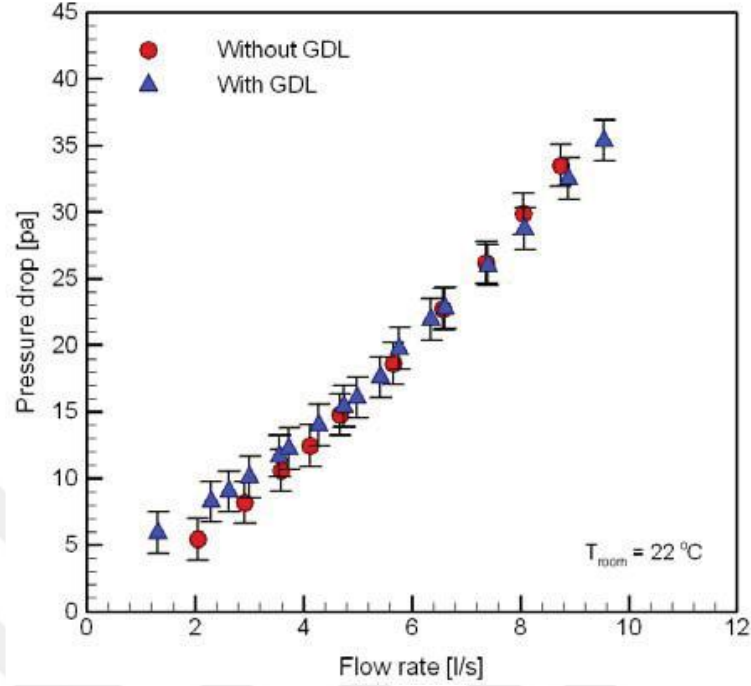
Vanderborgh ve ark. [18] çalışmasında PEM tipi yakıt hücresinin yığın performansını etkileyen termal ve su yönetimi prosedürleri açıklanmaktadır. İyon değişim membranlarının özellikleri, kütle ve ısı transfer etkileri ve termal etkiler tartışılmıştır. Başarılı PEM yığın işlemi için çeşitli tasarım seçenekleri de önerilmiştir. Nemlendirme stratejilerinde hem termal kontrol hem de aktif hücre alanları boyunca uygun iyonik iletkenliğin sürdürülmesi sağlanır. Anot gazlarının dehidrasyonu iki yaklaşımla değiştirilebilir: polimer içinde artan su geçirgenliği veya ilave su eklenmesiyle tekrarlanan nemlendirme, belki de aşırı doymuş bir besleme olarak veya kullanım yolu boyunca ilave ardışık nemlendirme sonucu ile değiştirilebilir. Bu çalışmada sonuç olarak, yüksek akım yoğunluklu, kararlı performansın hidrojen-oksijen, hidrojen-hava ve yeniden biçimlendirilmiş hava dahil olmak üzere çeşitli farklı PEM seçenekleri için uygun olduğu öngörülmüştür [18].

Akbari ve Ark. [19] tarafından yapılan çalışmada hava soğutmalı bir model ele alınıp PEM yakıt hücresinin yığın seviyesinde deneysel bir termal ve hidrodinamik değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışma için MEA içindeki ısı oluşumunu taklit etmek için kauçuk ısıtıcı filmler kullanılmıştır. Bipolar plaka yüzeyindeki basınç düşüşü ve bipolar plaka yüzeyindeki sıcaklık dağılımı 200-500 kanal Reynolds sayısı aralığı ve 100-250 W yığın giriş gücü aralığı için ölçülmüştür. Testler önce gaz difüzyonu ile ve sonra gaz difüzyonu olmadan yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bipolar

plakaların mevcut uzunluğu ile plak mini kanalının büyük bir kısmının gelişen bölge ile dolduğunu göstermektedir. Bu, daha yüksek bir ısı transfer oranlarına yol açar, böylece daha yüksek fan gücü gerektirmesi ile daha homojen bir yığın sıcaklığı elde edilebilir. Ölçülen minimum sıcaklık farkı yaklaşık 10 °C'dir ve Reynolds sayısı azaldığında değerler daha belirgin hale gelir. Gaz difüzyon katmanı (GDL)'nin varlığının, basınç düşüşü üzerindeki etkisi önemsizdir. Bu çalışmanın önemli sonuçları aşağıdaki gibi sıralanmıştır [19].

1. GDL, yığındaki hava akışının hidrodinamiği (genel basınç düşüşü) üzerinde ihmal edilebilir etkiye sahiptir.
2. Hava kanallarında gelişen akış, yığının hidrodinamiği ve ısı transferi üzerinde önemli bir rol oynar. Gelişen akış, istif boyunca daha yüksek basınç düşüşü ile birlikte, yığının ilk yarısında sıcaklıkta daha dik değişikliklere yol açar.
3. Ölçülen minimum sıcaklık farkı yaklaşık 10 °C'dir. Reynolds sayısı azaldığında bu sıcaklık daha belirgin hale gelir.
4. Deneysel veriler, maksimum yüzey sıcaklığının sıcaklığın çıkışının yakınında gerçekleştiğini göstermektedir. Akış hızı arttıkça bu sıcaklık düşer.

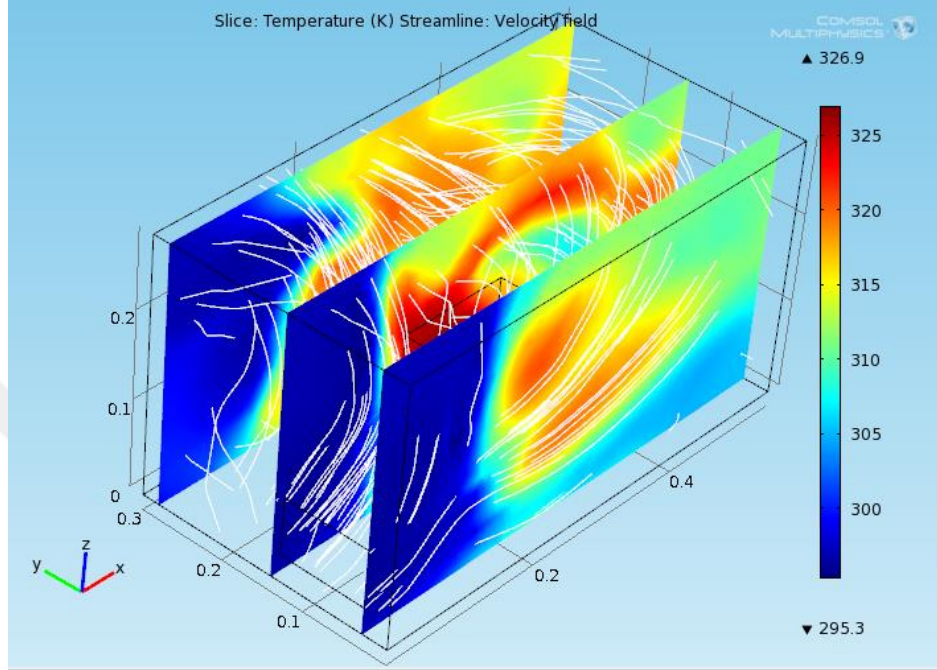
GDL'li ve GDL'siz yakıt hücresi yığını boyunca çeşitli akış hızlarında ölçülen basınç düşüşü değerleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 GDL'li ve GDL'siz yakıt hücresi yığını boyunca çeşitli akış hızlarında ölçülen basınç düşüşü değerleri [19]

Yakıt pilleri artık ticarileştirmeye her zamankinden daha yakın olup verimlilikte çevresel beklentileri karşılarken tüm küresel güç ihtiyaçlarını da karşılama yeteneğine sahiptirler. PEMYH nakliye uygulamalarının yanı sıra sabit yakıt hücresi uygulamaları ve taşınabilir yakıt hücresi uygulamaları için geliştirilen bir yakıt hücresidir. Ayırt edici özellikleri arasında bulunan en önemli özelliği düşük sıcaklık ve basınç altında çalışıyor olmasıdır. Çalışma sıcaklığı aralığı 50 °C ila 100 °C olan özel bir polimer elektrolit membrandır. Yakıt olarak hidrojeni kullanır. Amin [20] tarafından yayımlanan tez çalışmasında Genport 300 W yakıt hücresi sisteminin parametrik analizi çeşitli çalışma sıcaklıklarında ve çeşitli stokiyometrik oranlarda yapılarak analiz edilmiştir. Bu analiz ile PEM yakıt hücresi için optimum çalışma sıcaklığı ve stokiyometrik oran hücre sistemi bulunmuştur. Ayrıca bu optimum çalışma koşulunda, sistemin güç çıkışı ve güç kayıpları da analiz edilmiştir. Son olarak, sistemin ısıl dengesini, soğutma sisteminin performansını iyileştirmek ve sistemin mümkün olan en iyi konfigürasyonunu bilmek için çok önemli bir hesaplama olan ince yapı analizi (FEM) yapılmıştır [20]. Bu tez çalışmasında elde edilen yakıt

hücre sisteminin giriş tarafından uzunlamasına yön boyunca dilim grafiğinin bir görünümü ve hava akışı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



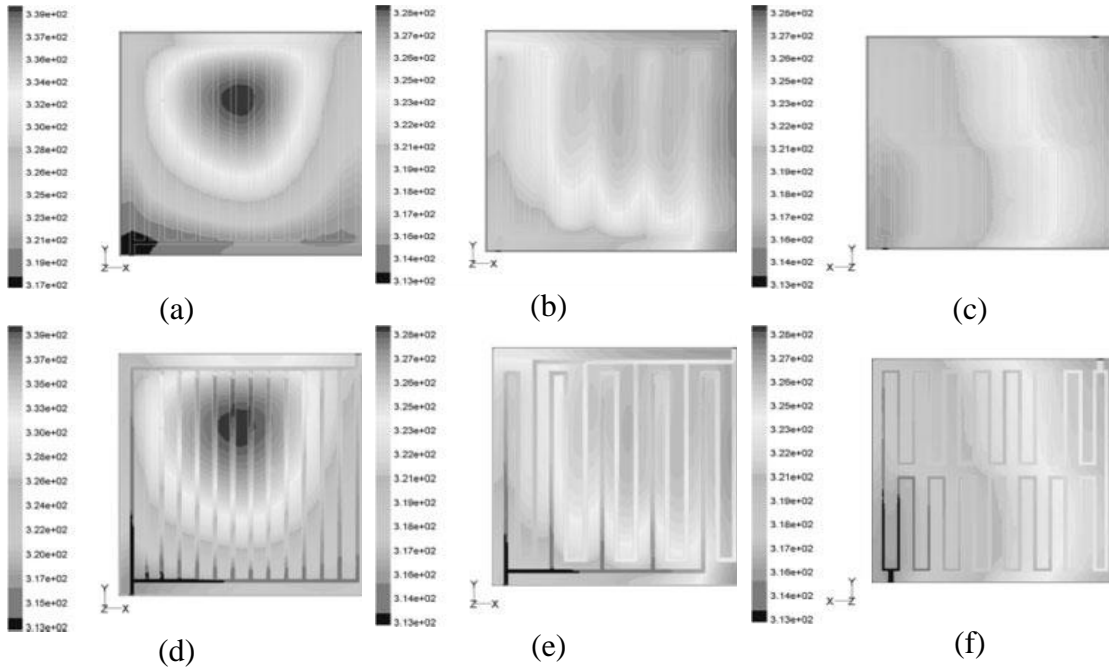
Şekil 2.5 Giriş tarafından uzunlamasına yön boyunca dilim grafiğinin bir görünümü ve hava akışı [20]

PEMYH'nin en ideal güç üretimi için, termal mühendislik operasyonel bir gerekliliktir. Birinci dereceden analiz, yığın sıcaklıklarının izlenmesini içeren bir süreç kontrolü sağlayan bir girdi görevi görür. Hücre başına 240 cm<sup>2</sup> aktif alana sahip 3 hücreli hava soğutmalı PEMYH, ikinci dereceden ısı transferi analizine kadar çalışan yakıt hücrelerinin termal davranışını analiz etmek için geliştirilmiştir [21]. Bu çalışmada yığın sıcaklıklarının fiziksel belirtilerinin analizi sunulmuştur.

Yüksek sıcaklık için PEMYH suyu, yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle soğutucu olarak kullanılmaya uygun değildir. Bunun yerine, göreceli olarak yüksek sıcaklıktan dolayı soğutucu olarak hava seçilebilir. Yüksek sıcaklıkta çalışan PEMYH için dört tip cebri hava soğutma modu Zheng ve ark. tarafından kaynak [22]'de tartışılmıştır. Bu çalışmada soğutma havası giriş hızı ve bipolar plaka malzemesinin ve kanatçıkların ısıl iletkenliği gibi diğer faktörlerin ısı yayılımı ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. 250 cm<sup>2</sup> tek hücre seviyesinde yüksek sıcaklıktaki

PEMYH’de sıvı akışını ve ısı transferini araştırmak için üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılmıştır. Uygun olan bir optimize edilmiş mod soğutma havası giriş hızı ve bipolar plaka malzemesi, gelecekteki deneysel çalışmalar için belirlenmiştir.

Bir yakıt hücresi yığınının soğutma tasarımının optimizasyonu için katı plaka ile soğutucu akışı arasındaki sıvı akışı ve ısı transferinde yer alan birleştirilmiş soğutma sürecini araştırmak üzere Chen ve ark. [23] tarafından bir HAD analizi yapılmıştır. Soğutma plakaları boyunca tek tip sıcaklık profilinin derecesini değerlendirmek için tüm alan boyunca bir Tekdüzen Sıcaklık İndeksi (IUT) kavramı sunulmuştur. Yakıt hücrelerinin soğutma modunun optimizasyonu için üç serpantin tipi mod ve diğer üç paralel tip mod dahil olmak üzere altı soğutma modu sunulmuş ve analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada, serpantin tipi soğutma modlarının soğutma etkisinin paralel tip soğutma modlarından daha iyi olabileceği bulunmuştur. Yakıt pilleri için gerçekleştirilen PEM yakıt hücresi soğutma plakasında optimal ısı transferinin analiz sonuçları Şekil 2.6’da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Paralel tip soğutma modlarının üst yüzeyi ve merkezi kesme plakası boyunca (a), (b) ve (c) no’lu şekiller, soğutma modları için üst yüzeyin sıcaklık profilidir. Sırasıyla 4, 5 ve 6; (d), (e) ve (f), soğutma modları 4, 5 ve 6 için merkezi kesme plakasını sıcaklık profilidir. Giriş Reynolds numarası 2022’dir [23]

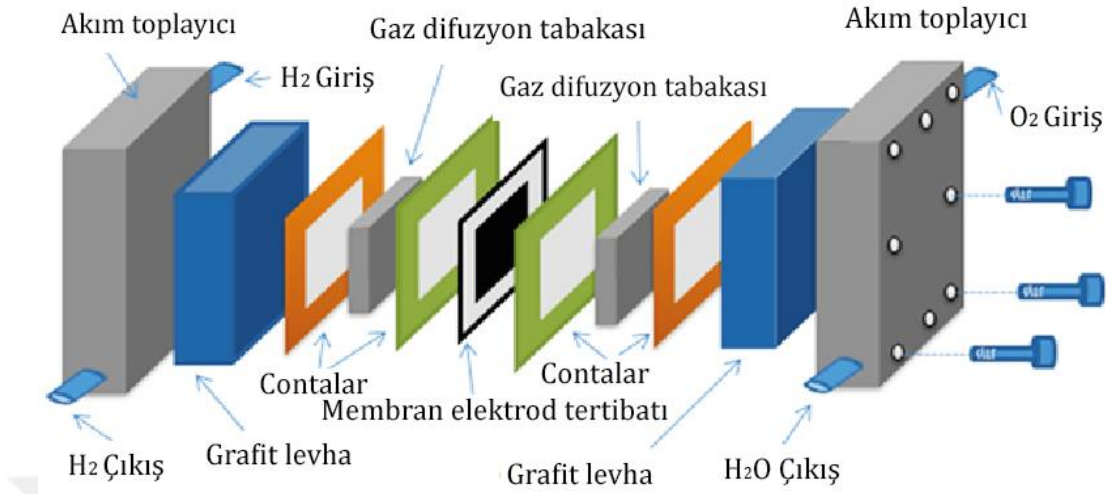
Bipolar plakalar öncelikle yüksek yoğunluklu grafitten imal edilmiştir, ancak son yıllarda uygun maliyetli ve uygulanabilir alternatif malzemelerin geliştirilmesine çok dikkat edilmiştir. İki farklı malzeme sınıfı metaller ve kompozitler dikkat çekmiştir. Metalik bipolar plakalar, kaplama malzemeleri ve imalat yöntemleri üzerinde yürütülen mevcut araştırmaların kapsamlı bir incelemesi kaynak [24]'de sunulmaktadır. Bir PEM yakıt hücresinin bipolar elemanına dair yapılan çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur [25-31].

Farklı tipteki bipolar plakalar hakkında çok sayıda yayına ek olarak, malzeme türü ve üretim süreçleri hakkında birkaç inceleme makalesi [32-38]'te yayınlanmıştır.

**3. MATERYAL VE YÖNTEM****3.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi**

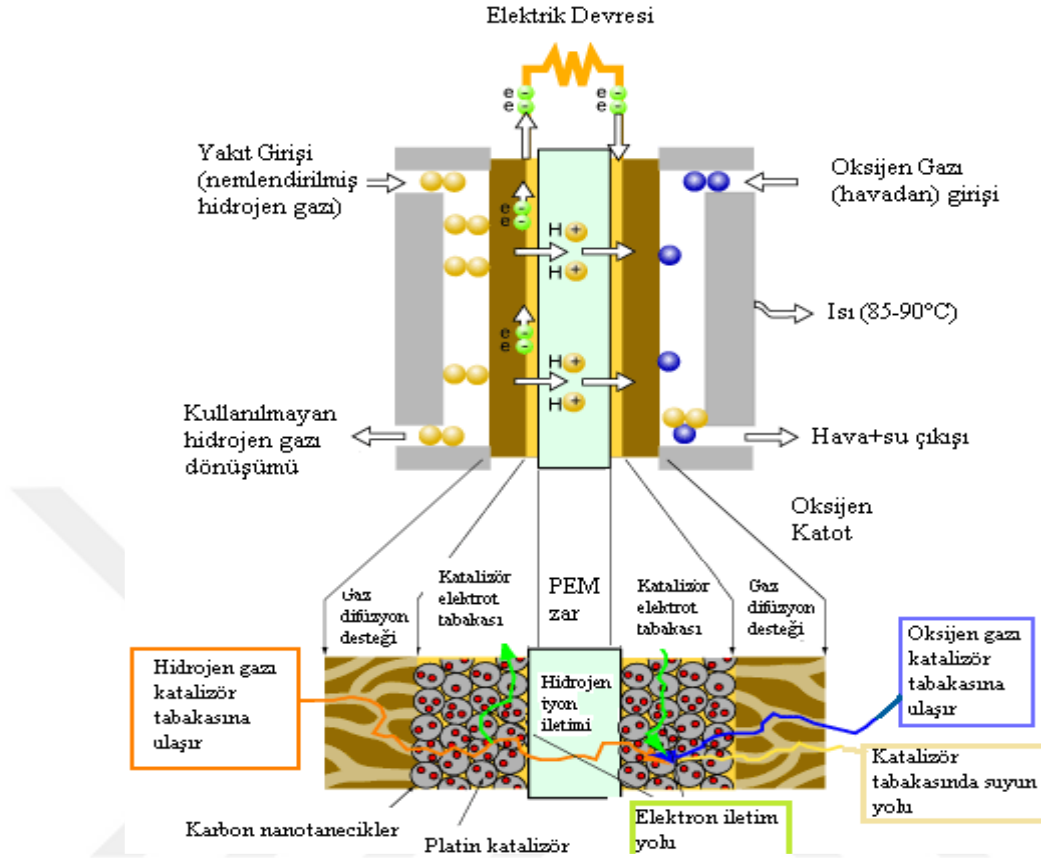
PEM yakıt hücreleri en popüler yakıt hücresi tipidir ve geleneksel olarak yakıt olarak hidrojen kullanırlar. PEM yakıt hücreleri, düşük çalışma sıcaklıkları, yüksek güç yoğunluğu ve büyük ölçekli üretim için dikkat çekicidir. Bu özellikler, PEM yakıt hücrelerini, otomotiv ve sabit uygulamalar için geleneksel güç kaynaklarına umut verici bir alternatif olarak sunar. PEM yakıt hücreleri ayrıca mobil, portatif ve konut uygulamaları için de uygundur [10].

Şekil 3.1’de gösterilen bir PEM tipi yakıt hücresinin temel yapısı, bir elektrolit membran (zar) ve bir membranın her iki tarafındaki katalizör katmanına sahip olan bir çift gaz difüzyon elektrotunu içermektedir. Bu zarın kalınlığı 12-20 mikron seviyesindedir ve inceldikçe verimlilik performansı artar. Anot ve katotta katalizör olarak Pt (platin) veya Pd (paladyum) gibi metaller kullanılmaktadır. PEM tipi yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen kullanılır ve oksitleyici olarak havanın oksijeni kullanılır. Bu yakıt hücresi türünün çalışma sıcaklığı 100 °C’nin altında olup, 60 °C ile 80 °C arasındadır. Temel bileşeni birbirlerinden polimer membran elektrot ile ayrılmış anot ve katot olmak üzere iki tane elektrottan oluşmaktadır. Bu elektrotlar bir kenarından ince platinyum katalizör tabakası ile örtülmüştür.



Şekil 3.1 PEM tipi yakıt hücresini oluşturan bileşenler [11]

Hücresinin anot tarafına verilen hidrojen atomları burada iyonize olurlar. Protonlar pozitif yükü yüklenerek geçirgen zarı (membran) geçerek katoda doğru yönelirler. Elektronlar ise anottan katoda doğru geçerken, polimer zar iletken olmadığı için harici bir yoldan (dış devreden) akmaya zorlanarak elektrik akımı üretmeleri sağlanmış olur. Katoda geçen elektronlar burada hidrojen protonları ve havadan alınan oksijen ile birleşerek su atığı oluştururlar [2, 6]. Şekil 3.2’de PEM tipi yakıt hücresinin çalışma prensibi ve işleyişi gösterilmektedir.



Şekil 3.2 PEM tipi yakıt hücresi genel yapısı ve işleyişi [2]

PEM yakıt hücreleri çalıştıkları esnada, kullanılan malzemelerde aşınma meydana gelmez. Oldukça sesiz çalışırlar ve reaksiyon sonucunda su ile ısı haricinde herhangi bir atık oluşmaz. Bunun sebebi kurulum sisteminde hareketli parçalar olmamasından kaynaklanır. PEM yakıt hücrelerinin verimlilikleri ise oldukça yüksek olup yaklaşık olarak %50 civarındadır. Düşük güç seviyelerinde daha verimli çalışmaktadırlar. Fakat, gücün artırılmasıyla verim performansları doğrusal olarak azalmaktadır.

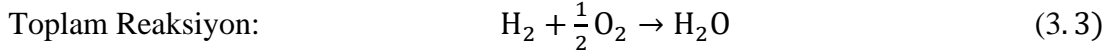
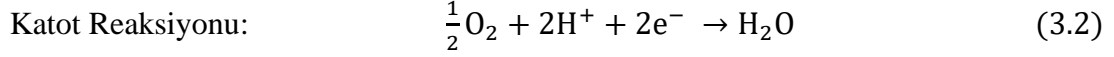
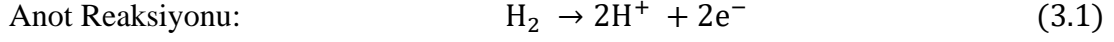
Üretim maliyetlerinin pahalı olması gibi bir dezavantajına rağmen yüksek akım ve güç yoğunluğuna sahiptirler. Performans için kritik noktalardan birisi de yan ürün olarak çıkan suyun idaresidir. Bu durum, yakıt hücrelerinde seri üretime imkan verebilmektedir. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı günümüzde geliştirilen yakıt hücreleri arasında PEM tipi yakıt hücresi teknolojisi en yoğun ilgiyi çeken ve en çok

gelecek vaat eden bir yakıt hücresidir. Temel bir PEM tipi yakıt hücresi bileşenleri, özellikleri ve genel çeşitleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Temel bir PEM tipi yakıt hücresi bileşenleri, özellikleri ve genel çeşitleri

BİLEŞEN	ÖZELLİKLERİ	GENEL ÇEŞİTLERİ
<b>Polimer elektrolit membran (proton değişim membran)</b>	Anot ve katot arasında yalnızca pozitif yüklü iyonların geçişine izin verir. Elektronları bloke eder.	Persülfonik asit membranı (112, 115, 117’de Nafi)
<b>Katalizör katmanları</b>	Membranın her iki tarafına bir katalizör katmanı eklenir. Hidrojen moleküllerinin protonlara ve elektronlara ayrışmasını sağlar. Protonlar, yakıt hücresi katodunda su oluşturarak oksijenin indirgenmesini sağlar. Elektronlar yüke doğru hareket eder.	Platin / karbon katalizörü
<b>Gaz difüzyon katmanları (GDL)</b>	GDL'ler katalizör katmanlarının dışında yer alır. Reaktanların katalizör katmanına taşınmasını ve ayrıca ürün suyunun çıkarılmasını kolaylaştırır.	Karbon bez veya Toray kağıdı
<b>Akış alanı plakaları</b>	Yakıtı ve oksidantı gaz difüzyon katmanına dağıtır.	Grafit, paslanmaz çelik
<b>Contalar (Gazketler)</b>	Yakıt sızıntısını önleyip basıncın eşit olarak dağıtılmasına yardımcı olur.	Kauçuksu polimer, silikon, teflon
<b>Uç plakaları</b>	Yığın katmanlarını yerinde tutar.	Paslanmaz çelik, grafit, polietilen, PVC

PEMYH’de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar;



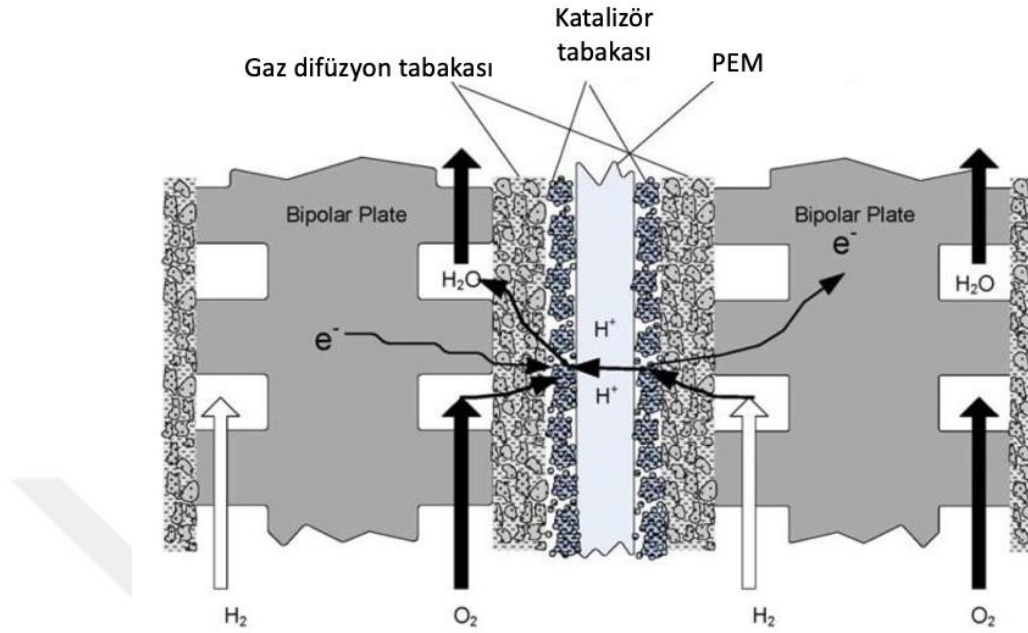
şeklindedir.

Gaz difüzyon elektrotlarından biri (anot) hidrojen veya metanol biçiminde yakıtla beslenirken, diğer gaz difüzyon elektrotu (katot) oksijen veya hava stabilitesi formundaki bir oksidanla beslenir.

Her ne kadar yakıt hücresi benzersiz ve etkileyici bir sistem olsa da performansı ve çalışması için iyileştirmeler hala gereklidir. Bu tür iyileştirmeler özellikle daha iyi tasarım, uygun malzeme bulma ve tüm bileşenlerin optimizasyonu için gereklidir. Bu konular ancak gerçekçi matematiksel işlem modelleri mevcutsa ele alınabilir. Elektrokimyasal ve transfer işlemleri arasındaki çok sıkı bağlantı nedeniyle yakıt hücrelerindeki işlemler çok karmaşıktır. Tek bir yakıt hücresinin doğru bir şekilde modellenmesi için elektrokimyasal kinetik, kütle transferi, ısı transferi, sıvı akışı ve tür transfer parametreleri dikkate alınmalıdır. Literatürde PEM yakıt hücreleri için yayınlanmış birçok model olmasına rağmen yeni modellere de hala ihtiyaç duyulmaktadır. Fiziksel ve sayısal modelleri doğrulamak için bazı deneysel verilerle karşılaştırmak oldukça arzu edilir [6].

### **3.1.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresinde Taşıma Olayları**

MEA, katalizör ve gaz difüzyon katmanları arasına sıkıştırılmış bir proton değişim membranından oluşur ve son iki bileşen esas olarak elektrotu oluşturur. Bu elektrot, bir dizi işlemi kolaylaştıran bir tampon bölgedir. MEA’nın Şekil 3.3’te şematik olarak gösterilen katot tarafı, PEMYH’lerde çeşitli taşıma olayları arasındaki karmaşık eşleşmenin iyi bir örneğini teşkil eder.



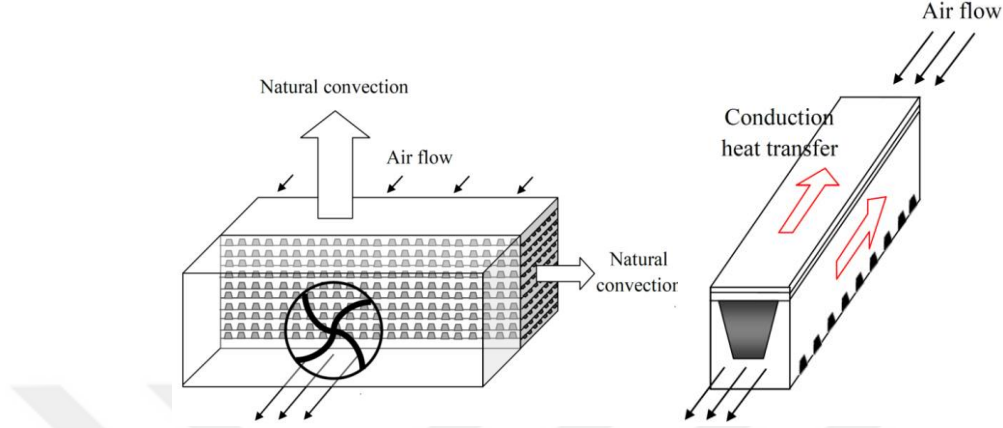
Şekil 3.3 PEM yakıt hücresinin temel yapısında yer alan gaz difüzyon tabakası, katalizör tabakası ve bipolar plakalar ile işleyişi [39]

Geliştirilen çoğu yakıt hücresi modeli, membran sisteminin tek fazlı olduğunu varsaymaktadır. Membran sisteminin zar, protonlar ve su olmak üzere üç ana bileşeni olduğu varsayılır. Bu nedenle, üç ana taşıma özelliği vardır. Bu varsayım, zar da olabilecek diğer iyon türlerini ihmal eder ve zar da hidrojen veya oksijen geçişini dikkate almaz. Hidrojen veya oksijen geçişinin etkisi, su veya proton taşınmasını önemli ölçüde etkilemez ve bu nedenle çoğu yakıt hücresi modelinde model verimliliğini etkilemeden ihmal edilebilir.

PEMYH'lerin hesaplamalı modellenmesinin en zorlu yönlerinden biri, taşıma süreçlerinin çoklu fizik yapısı ve Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bu süreçler arasındaki bağlantıdır. Şekildeki her daire, belirli bir süreci yöneten bir taşıma denklemini, dışarıyı gösteren oklar ise belirli bir taşıma sürecinin diğer denklemler üzerindeki etkilerini temsil eder.

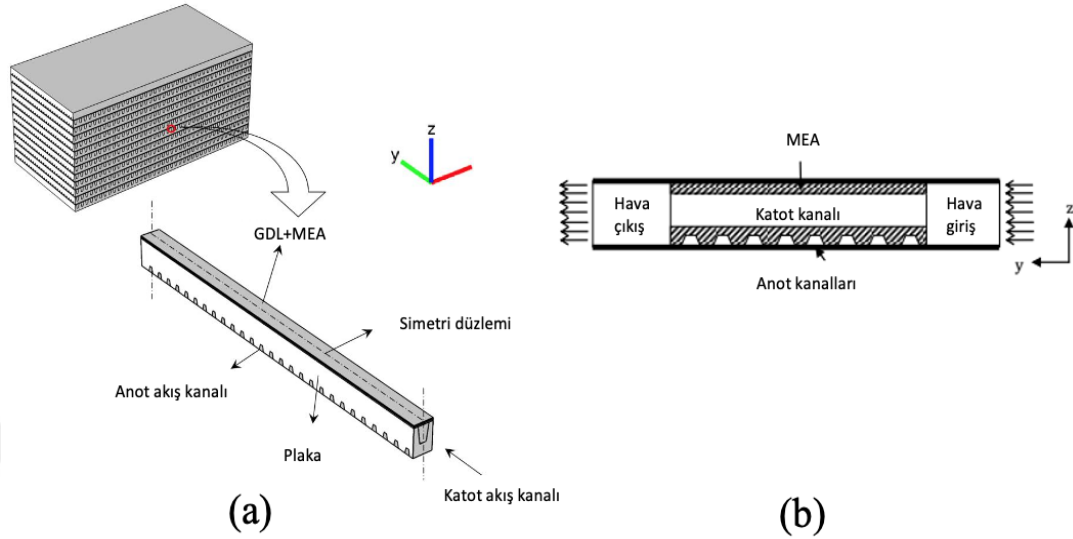


Hava soğutmalı bir yığın ile tek bir kanalda farklı ısı transfer modlarının şeması Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Hava soğutmalı bir yığın (soldaki) ve tek bir kanalda (sağdaki) ısı transferinin şeması [39]

Daha önce açıklandığı gibi, yakıt pili sisteminin izin verilen maksimum sıcaklığın biraz altındaki bir sıcaklıkta çalıştırılması gerekir. Bu nedenle, bir yığındaki maksimum sıcaklığı belirlemek çok önemlidir. Maksimum sıcaklığın bir yakıt hücresi yığınının merkezi hücrelerinde bir yerde meydana geldiği düşünülebilir. Dış yüzeye daha yakın olan diğer hücreler, dış yüzeyden ısı transferi sonucu daha düşük bir sıcaklığa sahip olur. Benzer şekilde, tek bir hücrede, merkezi kanaldaki sıcaklığın diğer kanallardan daha yüksek olması beklenir. Tüm yığında maksimum sıcaklığa sahip olan merkezi hücrede onu çevreleyen plaka ve GDL'lere sahip merkezi katot kanalı dikkate alınmıştır. Yakıt hücresi geometrisindeki simetriden yararlanan hesaplama alanı, Şekil 3.6 (a)'da gösterildiği gibi tek bir katot kanalının yarısıdır. Burada hava soğutmalı yığın incelendiği için, katot kanalına girmeden önce ve çıkıştan çıktıktan sonra hava alanı dahil edilmelidir. Aksi takdirde, uç duvarlardan gelen ısı transferi modelde doğru bir şekilde yakalanamaz. Eşdeğer bir konvektif ısı transfer katsayısının dikkate alınması bile hava alanını giriş ve çıkışa dahil ederken elde edilen sonuçlarla aynı sonuçlara yol açmaz. Giriş ve çıkış havasını içeren hesaplama alanının bir şeması Şekil 3.6 (b)'de gösterilmektedir.



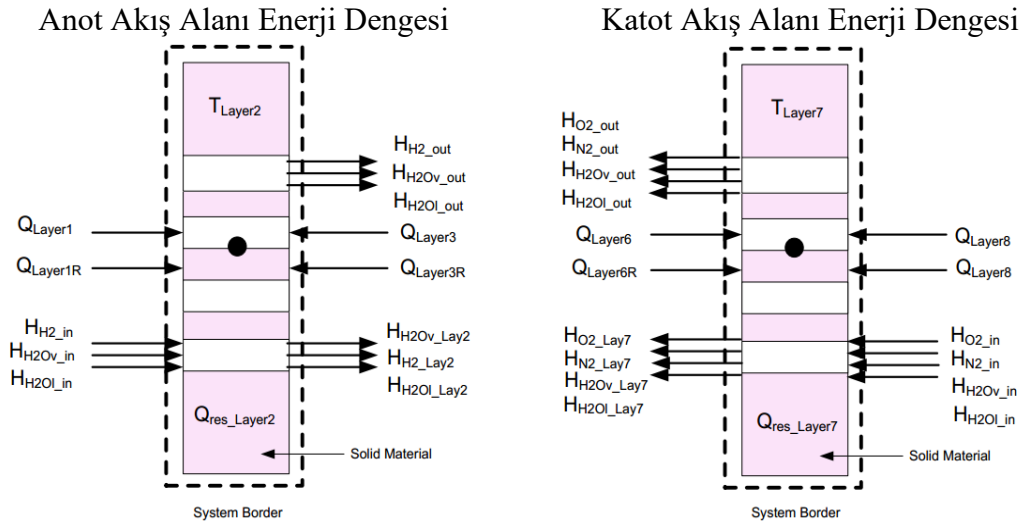
Şekil 3.6 (a) Bir yakıt hücresi yığınının ve bir katot kanalının 3 boyutlu şeması, hesaplama alanı. (b) Kanaldan önce ve sonra ortam havasını içeren hesaplama alanının 2D şeması; üstteki ve alttaki koyu çizgiler periyodik sınır koşulunu belirtir

### 3.3.3. Bipolar Plakalar

Bipolar veya akış alanı plakaları (BBP), çok işlevli karaktere sahip PEM yakıt hücrelerinin önemli bir bileşenidir. Yakıt gazını ve havayı eşit olarak dağıtırlar. Elektrik akımını hücreden hücreye iletirler. Bipolar plakaların her iki tarafında reaktan akış kanalları bulunur. Bu akış kanalları hücrelerin anot ve katot bölmelerini oluştururlar. Yüksek iletkenliğe sahip olan BBP'lar aktif alandan ısıyı uzaklaştırırlar. Gaz ve soğutucu sızıntısını önlerler. Ayrıca BBP'ın yapıldığı malzeme, reaktan gazların ve katalizörün varlığından dolayı korozyona dayanıklı ve kimyasal olarak inert olmalıdır. BBP'lar, PEM yakıt hücresi yığınlarının hacmine, ağırlığına ve maliyetine önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu nedenle, BBP'ler için uygun malzemeleri bulmak için yoğun çaba ve araştırmalar bulunmaktadır. Bu malzemelerin arasında gözeneksiz grafit, kaplanmış metalik levhalar, polimer kompozitler vb. bulunur. Enerji dengesinin bir göstergesi Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

BPP, plakadaki gaz kanalları nedeniyle hem iletken hem de taşınım ile ısı transferine sahiptir. Kanalları olan BBP'nin yüzdesi, tüm plakanın ısı transferini

etkiler, bu nedenle alanı temsil eden iletim ısı transferi için etkin kesit alanı hesaplanarak açıklanır. Katman<sub>1</sub> (Layer1) ve katman<sub>3</sub> (Layer3) ile temas halindeki katı malzemenin Anot çift kutuplu plakadaki ısı transferi denklemleri ve hesaplamaları 4. Bölüm’de ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.7 Anot ve katot akış alanı plaka enerji dengesi [40]

### 3.4. MATLAB@Simulink Programlama Dili

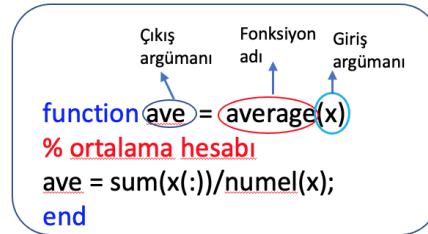
MATLAB [40], Matrix Laboratory (Matris Laboratuvarı) kelimelerinin kısaltılmasıyla oluşturulan matris tabanlı bir programdır. Fizik, kimya, matematik ve mühendislik alanlarındaki dönüşüm sistemleri ve ürünleri analiz etmenin yanı sıra tasarlamak için kullanılan bir yazılım aracıdır. MATLAB; anten, biyoenformatik, iletişim, bilgisayar vizyonu, kontrol sistemi, eğri uyumlama, veri toplama, veritabanı, derin öğrenme, bulanık mantık, görüntü işleme, robotik sistemler, sinyal işleme, istatistik ve makine öğrenmesi vb. gibi pek geniş bir çalışma alanına olanak sağlayan araç kutuları (toolbox) içermektedir [41].

MATLAB; tasarım, problem çözme, sayısal hesaplama ve görselleştirme işlemleri gibi üst düzey ve etkileşimli özelliklere sahip bir bilimsel hesap makinesi olarak düşünülebilir. MATLAB kullanıcı arayüzlerinin oluşturulmasının yanında C/C++, C#, Java ve FORTRAN gibi diğer dillerde yazılmış programlarla arayüz

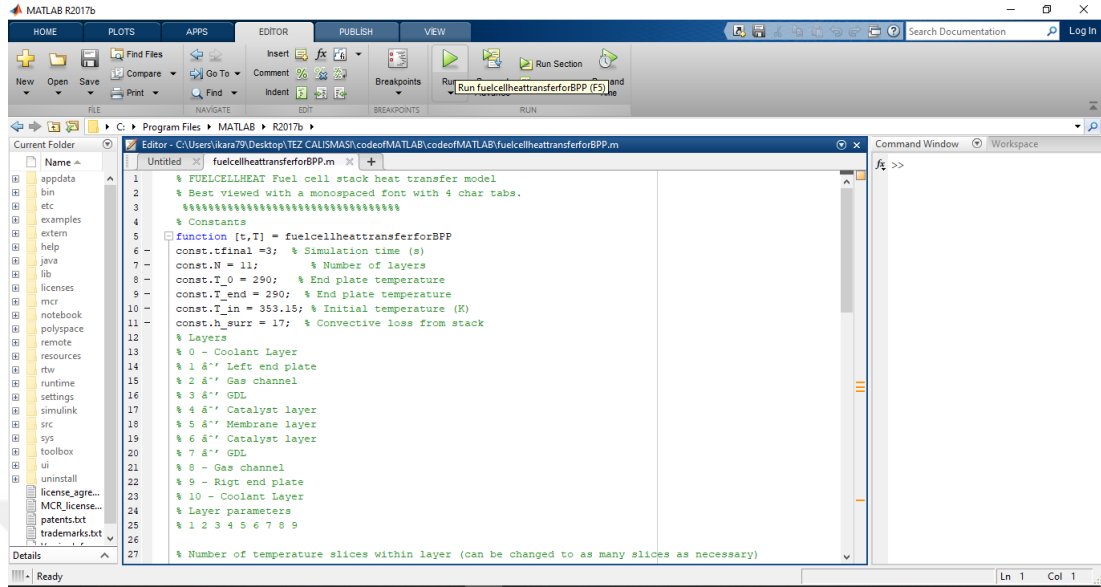
oluşturma özelliklerine sahiptir. MATLAB'ta problem çözümü yada analiz sırasında komut satırında çalışan programlar yazılabildiği gibi MATLAB GUI aracı kullanılarak nesnelere oluşan görsel şekillerle yazılımlar geliştirmek de mümkündür [41].

MATLAB fonksiyonları M-file olarak adlandırılan “.m” uzantılı dosyalarla çalışır. Bu dosyalara ulaşabilmek için mutlaka tam yolu belirtilmelidir. Ancak dosyanın tam yolu belirtilmediğinde, MATLAB öncelikle mevcut klasördeki dosyaları akabinde arama yolunda var olan tüm klasörlerdeki dosyaları arar. MATLAB'ın kendi bünyesinde “.m” uzantılı dosyalar olduğu gibi her bir analiz için ayrıca bir “.m” uzantılı dosya da yazılıp saklanabilir.

Fonksiyon dosyaları Şekil 3.8'de gösterildiği bir örnek ile açıklanabilir. 1. Satırda fonksiyonun ismi tanımlanarak fonksiyonun verilecek bir değerinde fonksiyonun hangi değeri döndüreceği belirlenir. İkinci satır açıklama satırındır. Üçüncü satır fonksiyonun görevini yerine getirecek olan formüller, şartlar, döngüleri vb. içerir. Resim 3.1'de “.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyon yazımına bu tez çalışması için yazılan “fuelcellheattransferforBPP.m” örneği gösterilmektedir.



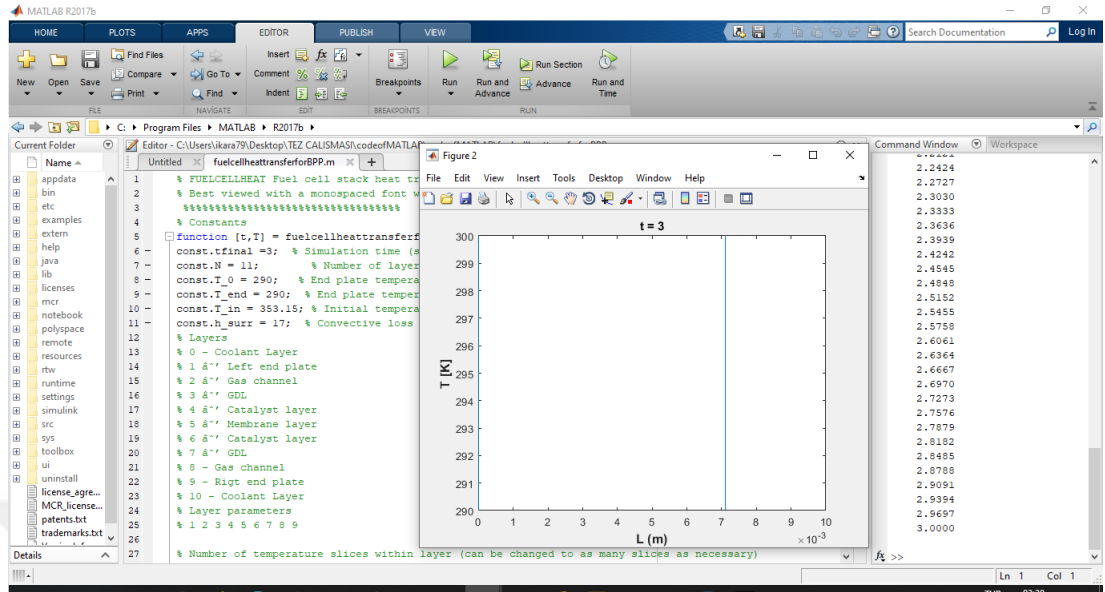
Şekil 3.8 Örnek fonksiyon dosyası



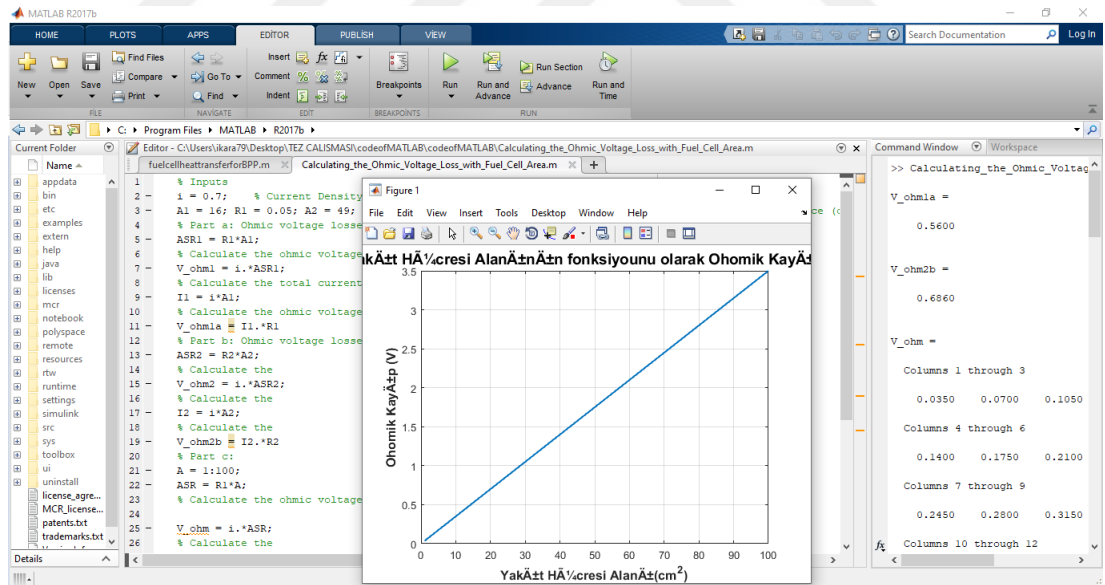
Resim 3.1 MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “fuelcellheattransferforBPP.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazım görseli

MATLAB'ın yanında ek bir ürün olan Simulink®, çok alanlı simülasyon ve Model Tabanlı Tasarım için bir blok diyagram ortamıdır [42]. Dinamik sistemlerin tasarımı, modellenmesi, simülasyonu ve analizi için, otomatik kod oluşturma ve gömülü sistemlerin sürekli test ve doğrulamasını destekler. Kullanıcı ile etkileşimli bir grafiksel ortam sağlar. Simulink, dinamik sistemleri modellemek ve simüle etmek için bir grafik kullanıcı arayüzü (GUI), özelleştirilebilir blok kitaplıkları ve çözücüler sağlar. Simulink®, MATLAB® ile entegre olup, MATLAB algoritmalarını modellere dahil etmeye ve simülasyon sonuçlarını daha fazla analiz etmek için MATLAB'a aktarılmasına olanak tanır.

Resim 3.2 ve Resim 3.3'te bu tez çalışmasında MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “fuelcellheattransferforBPP.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazılımının simülasyon görseli verilmektedir.



Resim 3.2 MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “fuelcellheattransferforBPP.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazılımının simülasyon görseli

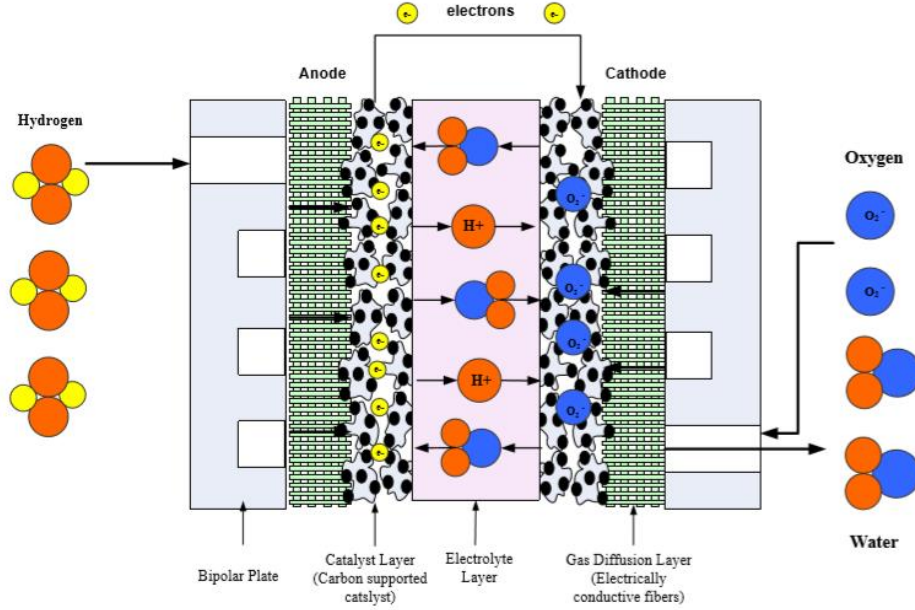


Resim 3.3 MATLAB@Simulink programı kullanılarak oluşturulan “.m” uzantılı MATLAB dosyası fonksiyonu yazılımının simülasyon görseli

**3.5. MATLAB@Simulink Programında Kullanılan Isı Transfer Denklemleri**

Bir yakıt hücresindeki sıcaklık, su faz değişimi, soğutma sıvısı sıcaklığı ve katalizör tabakası tarafından üretilen hava ısısı nedeniyle genellikle aynı değildir. Sıcaklığa bağlı parametreleri doğru bir şekilde tahmin etmek için yakıt hücresinin bileşenleri boyunca ısı dağılımının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bir yakıt hücresindeki ısı dağılımını belirlemek için sistemdeki enerji dengelerini belirlemek gerekir. Enerji dengeleri, belirli bir katmandan ısının, konum veya zamanın bir fonksiyonu olarak difüzyonu üzerine araştırma yapabilmek için yakıt hücresi katmanlarının her birinin etrafında tanımlanabilir.

Bir yakıt pili istifinde ısı dağılımının belirlenmesindeki ilk adım, sistem üzerinde enerji dengeleri gerçekleştirmektir. Yakıt hücresi etrafındaki toplam enerji dengesi, üretilen enerjiye, yakıt hücresi reaksiyonlarına ve bir yakıt hücresinde meydana gelen ısı kaybına dayanır. Konvektif ısı transferi katı yüzey ile gaz akımları arasında gerçekleşir ve katı ve/veya gözenekli yapılarda iletken ısı transferi oluşur. Oluşturulan reaktantlar, ürünler ve elektrik, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi bir yakıt hücresinde temel ısı transferini modellemede dikkate alınması gereken temel bileşenlerdir.



Şekil 3.9 Isı akışı çalışması için yığın illüstrasyonu [38]

Genel enerji dengesinde, hücrenin içine giren reaktiflerin entalpisi, hücrenin terk ettiği ürünlerin entalpisi ile güç çıkışı tarafından üretilen ısının toplamı ve çevredeki ısı kaybı oranıyla eşittir. Temel ısı transferi hesaplamaları, toplam yakıt hücresi yığınının ve yığın bileşenlerin sıcaklık ve ısisını tahmin etmede yardımcı olacaktır.

### 3.5.1. Isı Transferinin Temelleri

İletim, parçaların arasındaki etkileşim nedeniyle enerjinin daha enerjik parçacıklardan daha az enerjik parçacıklara taşınması olarak tanımlanabilir. Homojen bir madde içindeki bir sıcaklık eğimi, ortamdan enerji aktarımı ile sonuçlanır, bu da daha enerjik enerjiden daha az enerjili moleküllere bir enerji aktarımı ile sonuçlanır. Bu ısı transferi işlemi hız denklemleri ile nicelleştirilebilir. Sonlu bir kesit alanı  $A$  aracılığıyla  $x$  yönünde ısı aktarımı oranı Fourier kanunu olarak bilinir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.4)$$

burada k, termal iletkenliktir, W/(m.k). Isı transferi kararlı durum koşullarında doğrusal olduğunda sıcaklık eğrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$q_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (3.5)$$

Termal iletkenlik, difüzyon işlemi ile enerjinin hangi hızda iletildiğinin bir göstergesi olan bir taşıma özelliğidir. Bu özellik, maddenin atomik ve moleküler yapısına bağlıdır. Bazı yakıt hücresi malzemelerinin ısı iletkenliği Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Bazı yakıt hücresi malzemelerinin 300 K’deki ısı iletkenliği [40]

<b>Malzemeler</b>	<b>300 K’deki Termal İletkenlik (W/mK)</b>
Alüminyum	237
Nikel	90.5
Platinyum	71.5
Titanyum	22
Paslanmaz çelik 316	13
Grafit	98
Karbon bez	1.7
Teflon	0.4

Isı üretmeyen, tek boyutlu, kararlı durumlu ısı iletiminde, ısı akısı sabittir ve  $x$ ’ den bağımsızdır. Şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (3.6)$$

Bir dahili enerji üretimi ve sabit özellikleri olmayan tek boyutlu ısı transferini analiz ederken, ısı ve elektrik yükü difüzyonu arasında bir analogi vardır. Bir ısı direnci ısı iletimi ile ilişkili olabilir ve bir düzlem duvarda şu şekilde ifade edilebilir:

$$R_{\text{cond}} = \frac{T_1 - T_2}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (3.7)$$

Isı, farklı termal iletkenliklere sahip iki bitişik malzeme boyunca iletildiğinde, üçüncü sınır durumu arabirimdeki sıcaklığın her iki malzeme için de aynı olması şartıyla ortaya çıkmaktadır:

$$q = h_{\text{tc}}A\Delta T \quad (3.8)$$

$h_{\text{tc}}$  konvektif ısı transfer katsayısı olmak üzere birimi BTU / hft<sup>2</sup>F veya W / m<sup>2</sup>K'dir. A; ft<sup>2</sup> veya m<sup>2</sup> biriminde ısı akısının yönüne normal alan ve  $\Delta T$  ise katı yüzey ile sıvı arasındaki sıcaklık farkı olup F veya K birimindedir.

Isıl direnç, bir yüzeydeki ısı taşınımı ile de ilişkilendirilebilir:

$$R_{\text{conv}} = \frac{T_1 - T_2}{q_x} = \frac{1}{hA} \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. İletim ve konveksiyon dirençleri seri olduğundan;

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2A} \quad (3.10)$$

gibi toplanabilir. Yakıt hücresi tabakaları, farklı malzemelerin katmanlarına bağlı olarak seri termal dirençli “kompozit bir duvar” olarak düşünülebilir. “Kompleks” bir sistemde, genel bir ısı transfer katsayısı U ile çalışmak uygundur. Aşağıdaki gibi toplanabilir:

$$q = UA\Delta T \quad (3.11)$$

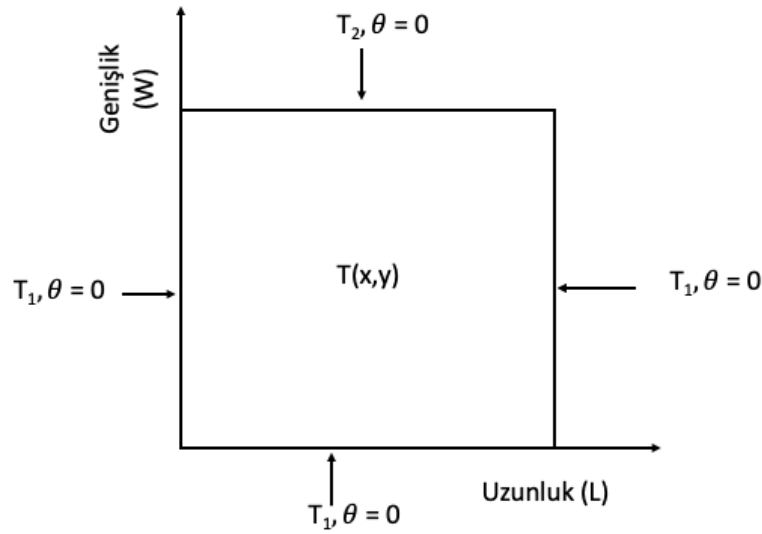


Yığın tarafından çevredeki ışınlım yoluyla kaybedilen ısı, radyoaktif ısı direnç ( $R_R$ )

$$R_R = \frac{1}{\sigma F A_s (T_s + T_0)(T_s^2 + T_0^2)} \quad (3.15)$$

olarak tanımlanır. Burada,  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabiti [ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2\text{K}^4)$ ],  $F$  şekil faktörü ve  $A_s$   $\text{m}^2$  cinsinden yığının açıkta kalan yüzey alanıdır. Bazen sıcaklık gradyanının yalnızca bir yönde önemli olduğu varsayımını kullanmak, sorunun aşırı basitleştirilmesidir.

Isı oluşumu olmayan iki boyutlu, kararlı durum koşulları Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 İki boyutlu iletimi

Sabit ısı iletkenliği, ısı akışı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} = 0 \quad (3.16)$$

İç yakıt hücresi ısı üretimi,  $q_{int}$  birim hacim başına ısı üretimi oranını temsil etmek üzere, Poisson denklemi ile tanımlanabilir:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q_{int}}{k} = 0 \quad (3.17)$$

### 3.6. Hücre Enerji Denklikleri

#### 3.6.1. Genel Enerji Dengesi İşlemi

Bir yakıt hücresi sistemini doğru bir şekilde modellemek için, yakıt hücresi alt sisteminde ve yakıt hücresinde her bir işlem birimine giren ve çıkan enerji, sürecin genel enerji gereksinimini belirlemek için hesaba katılmalıdır. Tipik bir enerji dengesi hesaplaması, reaktanın bileşimini, sıcaklıkları, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kullanımını, üretilen beklenen enerjiyi ve ısı kaybının yüzdesini bilerek hücre çıkış sıcaklığını belirler. Bir enerji dengesi formülasyonu işlemi şöyledir:

1. Bir akış çizelgesi çizilmeli ve etiketlenmelidir. Akış bileşeninin spesifik entalpisini belirlemek için akış şemasına yeterli bilgi verilmelidir. Buna bilinen sıcaklıklar, basınçlar, mol fraksiyonları, kütle akış hızı ve fazlar dahildir.

2. Tüm akış bileşenlerinin akış oranlarını belirlemek için kütle denge denklemlerinin yazılması gerekebilir.

3. Spesifik entalpilerin her bir akış bileşeni için belirlenmesi gerekir. Bunlar termodinamik tablodan elde edilebilir veya bu veriler mevcut değilse hesaplanabilir.

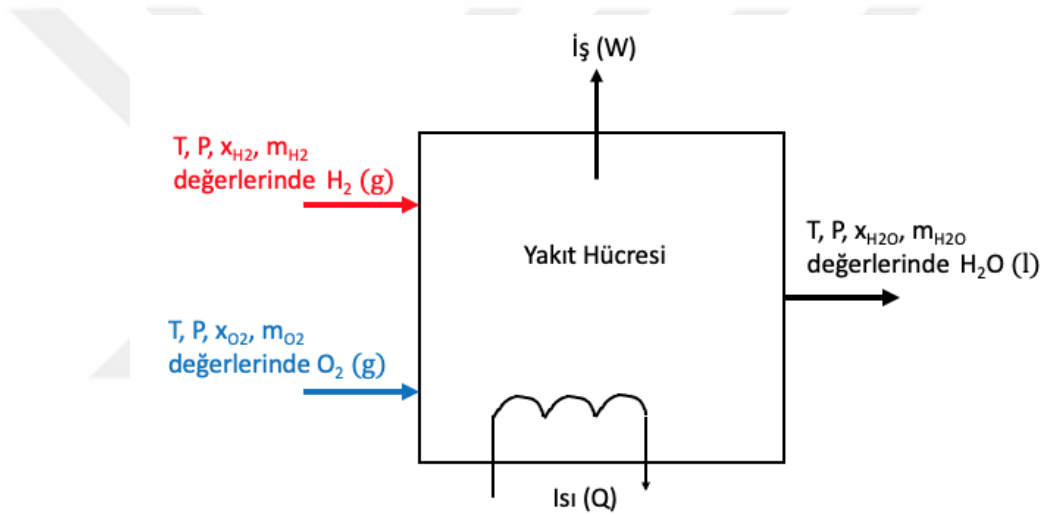
4. Son adım, enerji dengesi denkleminin uygun formunu yazmak ve istenen miktarı bulmaktır.

Yukarıda anlatılan işlemlere göre örnek bir akış şeması Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Yakıt, T sıcaklığında ve P basıncında hücrenin içine girer. Oksijen belli bir T, P, x<sub>O2</sub> (mol fraksiyonu) ve m<sub>O2</sub> (kütle akış hızı) cinsinden yakıt hücresine girer. Hidrojen ve oksijen, belirli bir T, P, x (mol fraksiyonu) ve m (kütle akış hızı)'de su üretmek için hücre içerisinde tamamen reaksiyon verir. Bu reaksiyon aşağıdaki yollarla tanımlanabilir:



$Q$ , yakıt hücresinden çıkan ısı ve  $W$ , kimyasal kullanılabilirlik vasıtasıyla elde edilen iştir. Bu örnek için sadece enerji dengesi denklemi yazılmıştır. Spesifik entalpiler termodinamik tablolar ya da hesaplamalar yoluyla elde edilebilir. Bu örnekte yakıt hücresi için genel enerji dengesi ise şöyledir:

$$\frac{W}{m_{\text{H}_2}} + \frac{Q}{m_{\text{H}_2}} = h_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}h_{\text{O}_2} - h_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.19)$$



Şekil 3.12 Enerji dengesi denklemini elde etmek için ayrıntılı akış şeması

### 3.6.2. Yakıt Hücresi Yığınının Enerji Dengesi

Yakıt hücresindeki enerji dengesi, enerji girdilerinin toplamı, enerji çıktılarının toplamına eşittir. Herhangi bir yakıt hücresi istasyonundaki genel ısı dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$\sum Q_{\text{in}} - \sum Q_{\text{out}} = W_{\text{el}} + Q_{\text{dis}} + Q_{\text{c}} \quad (3.20)$$

burada  $Q_{\text{in}}$ , reaksiyona giren gazların entalpisi ( $1s_1$ ),  $Q_{\text{out}}$ , kullanılmayan reaktan gazlarının entalpi ( $1s_2$ ) ve üründen üretilen ısı,  $W_{\text{el}}$  elektrik üretilir,  $Q_{\text{dis}}$  çevreye yayılmış ısı ve  $Q_{\text{c}}$  aktif soğutma yöntemiyle yığından uzaklaştırılan ısıdır.  $1s_1$ ,

reaksiyona giren gazlar, ürün suyu ve çevrede kaybolan madde ile taşınır; kalan ısının istiften soğutulması yoluyla alınması gerekir. Yakıt hücresindeki ısı oluşumu gerilim kayıplarıyla ilişkilidir. Isıların çoğu katalizör katmanlarında, omik kayıplara bağlı olarak membranda ve daha sonra omik kayıplardan dolayı yakıt hücresinin elektrik iletken katı parçalarında yaratılır.

Yakıt pil yığını enerji dengesinin iyi bir tahmini, tepkimeye giren yakıtın enerjisini, üretilen ısı ve elektrikle eşitleyerek elde edilebilir:

$$\frac{1}{2F} H_{HHV} n_{cell} = Q_{gen} + IV_{cell} + n_{cell} \quad (3.21)$$

Ürün suyunun tamamı, oda sıcaklığında yığın bırakırsa, bir yakıt pili istifinde oluşan ısı,

$$Q_{gen} = (1.482 - V_{cell}) I n_{cell} \quad (3.22)$$

Burada,  $Q_{gen}$  istifin Watt cinsinden üretilen ısıdır,  $n_{cell}$ , hücrelerin sayısı ve  $V_{cell}$ , ise hücre voltajıdır. Ürün suyunun tamamı istif olarak buhar çıkarsa

$$Q_{gen} = (1.254 - V_{cell}) I n_{cell} \quad (3.23)$$

denklemini yerine kullanılabilir.

### 3.6.3. Yakıt Pili için Genel Enerji Dengesi

Yakıt hücresi enerji dengesini birleştirmenin bir başka yolu, tüm enerji girdilerinin toplamı ve tüm enerji çıktılarının toplamıdır:

$$\sum (h_i)_{in} = W_{el} + \sum (h_i)_{out} + Q \quad (3.24)$$

Girişler; yakıt, oksidan ve mevcut su buharı entalpileri, çıktılar ise üretilen elektrik enerjisi, yakıt hücresindeki akışların entalpileri ve yakıt hücresini soğutma sıvısı, konveksiyon veya radyasyon yoluyla terk eden ısıdır.

Her kuru gaz veya kuru gaz karışımı için entalpi (J/s)

$$h = \dot{m}c_p T \quad (3.25)$$

m gazın veya karışımın kütle akış hızı (g/s),  $c_p$  özgül ısı (J / [g \* K]) ve T ise °C cinsinden sıcaklıktır. Gaz yüksek bir ısıtma değerine (yanıcı) sahipse, entalpisi

$$h = \dot{m}(c_p T + h_{HHV}^0) \quad (3.26)$$

burada  $h_{HHV}^0$  0 °C'de o gazın yüksek ısıtma değeri (J/g)'dir. Isıtma değerleri genellikle 25 °C'de bildirilir, bu nedenle seçilen sıcaklıkta daha yüksek ısıtma değerinin hesaplanması gerekebilir. Böylece;

$$h = \dot{m}_{H_2O(g)} c_{p,H_2O(g)} T + h_{fg}^0 \quad (3.27)$$

elde edilir. Sıvı suyun entalpisi ise;

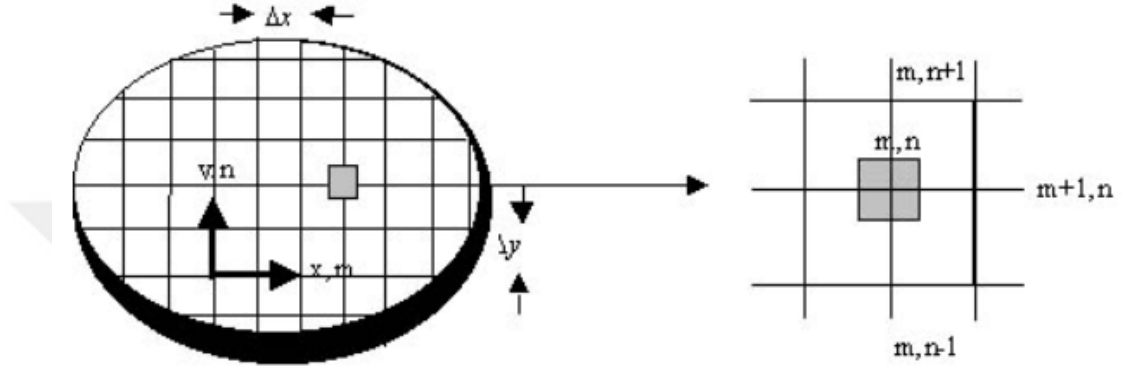
$$h = \dot{m}_{H_2O(l)} c_{p,H_2O(l)} T \quad (3.28)$$

olur. Isı dengesi her bir yakıt hücresi tabakası için gerçekleştirildiğinde ve/veya istif ısıtma ve soğutma dahil edildiğinde enerji dengesinin girdileri ve çıktıları hızla karmaşıklaşabilir.

#### 3.6.4. Nodal Ağ

Isı transferi için daha doğru çözümler elde etmek üzere “Sonlu Fark Denklemlerine” dayalı sayısal teknikler genellikle kullanılır. Bu tez çalışmasında nodal ağ, yakıt hücresinin katmanları arasındaki ısı transfer akışını belirlemek için kullanılmaktadır. Nodal (düğüm) ağ, sıcaklığı ayrı noktalarda belirleme olanağı sağlar. Bu teknikte, önce ilgilenilen ortam az sayıda bölgeye bölünür, daha sonra merkezine bir referans noktası atanır. Bu referans noktası “düğüm noktası” veya “düğüm” olarak adlandırılır ve birçok noktadan dolayı düğüm ağı bir ızgara veya ağ haline gelir. Şekil

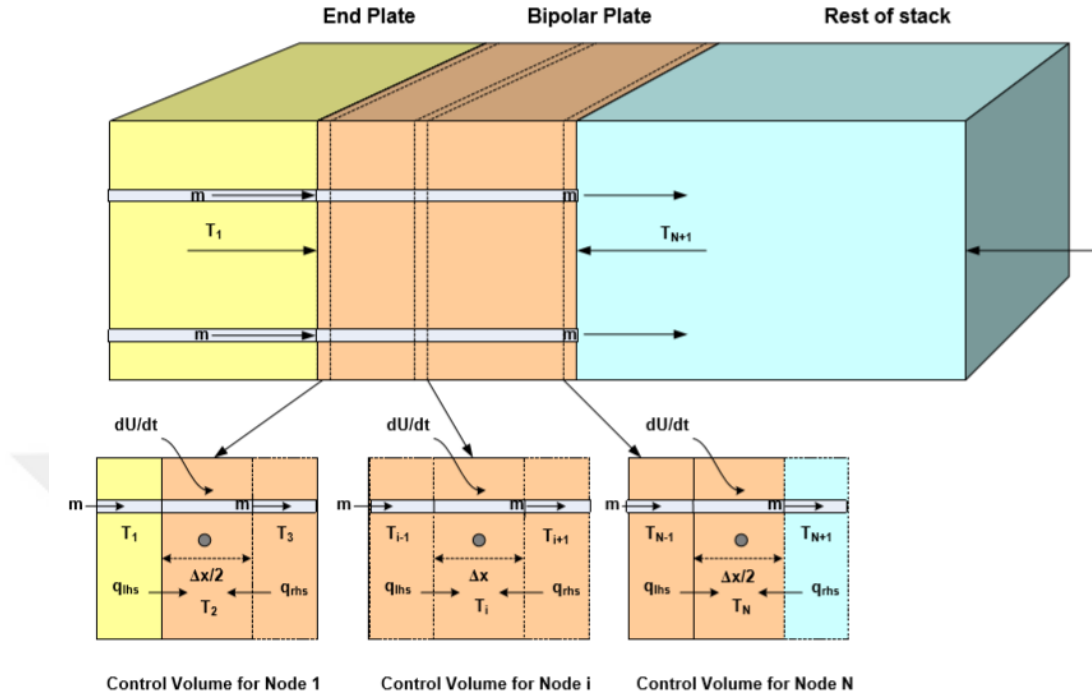
3.13, 2 boyutlu bir bölgeyi göstermekte olup bu bölge birçok küçük ağlara bölünmüştür. Bir düğüm noktası merkezde küçük bir bölgedir, indeksi  $(m, n)$ , komşu noktalarının düğüm indeksi  $(m, n+1)$ ,  $(m, n-1)$ ,  $(m+1, n)$ , vb. Tüm bu noktaların toplamı düğüm ağı olarak bilinir. Bu adıma genellikle ağ oluşturma (meshing) denir.



Şekil 3.13 Düğüm ağına sahip iki boyutlu iletim [43]

### 3.6.5. Plakada Geçici İletim

Tek boyutlu ve geçişli bir iletkenlik sorununa sayısal bir çözüm elde etme süreci, Şekil 3.14'te gösterildiği gibi bir yakıt hücresi istifinde bulunan bir katman bağlamında gösterilecektir.



Şekil 3.14 Hesaplama alanı boyunca eşit olarak dağıtılan düğümler [40]

Şekil 3.14'te gösterilen düğümlerin tek biçimli dağılımı için her düğümün konumu ( $x_i$ ):

$$x_i = \frac{(i-1)}{(N-1)} L \quad \text{for } i = 1 \dots N \quad (3.29)$$

ile ifade edilir.  $N$  simülasyon için kullanılan düğüm sayısıdır. Bitişik düğümler arasındaki mesafe ( $\Delta x$ ) ise şöyledir:

$$\Delta x = \frac{L}{N-1} \quad (3.30)$$

Enerji dengeleri her düğümün çevresinde tanımlanmıştır (kontrol hacmi). Şekil 3.14'te ilk, son ve keyfi iç düğümlerin kontrol hacmi gösterilmektedir. Her bir kontrol hacmi, enerji depolamasına ek olarak her bitişik düğümle iletken ısı transferi özelliğine sahiptir:

$$\dot{q}_{LHS} + \dot{q}_{RHS} = \frac{dU}{dt} \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'deki her terim yaklaşık alınmalıdır. A plakanın alanı olmak üzere bitişik düğümlerden iletme terimleri şu şekilde modellenmiştir:

$$\dot{q}_{LHS} = \frac{kA(T_{i-1} - T_i)}{\Delta x} \quad (3.32)$$

$$\dot{q}_{RHS} = \frac{kA(T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} \quad (3.33)$$

Enerji depolama hızı, düğüm sıcaklığının zaman değişim oranının ve kontrol hacminin termal kütesinin ürünüdür:

$$\frac{dU}{dt} = A\Delta x\rho c \frac{dT_i}{dt} \quad (3.34)$$

Denklem (3.32), Denklem (3.33) ve Denklem (3.34)'ü Denklem (3.31)'de uygulanırsa:

$$A\Delta x\rho c \frac{dT_i}{dt} = \frac{kA(T_{i-1} - T_i)}{\Delta x} + \frac{kA(T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} \quad (3.35)$$

elde edilir. Sıcaklık değişiminin zaman hızını ise;

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{k}{\Delta x^2\rho c} (T_{i-1} + T_{i+1} - 2T_i) \quad \text{for } i = 2 \dots (N-1) \quad (3.36)$$

şeklinde hesaplayabiliriz.

Kenarlarda bulunan kontrol hacimleri, daha küçük bir hacim ve farklı enerji aktarımlarına maruz kaldıkları için ayrı olarak ele alınmalıdır. Dış yüzeylerde (N düğüm) bulunan düğümün kontrol hacmi aşağıdaki enerji dengesine sahiptir:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{q}_{LHS} + \dot{q}_{conv} \quad (3.37)$$

ya da;

$$\frac{A\Delta x\rho c}{2} \frac{dT_N}{dt} = \frac{kA(T_{N-1} - T_N)}{\Delta x} + hA(T_f - T_N) \quad (3.38)$$

N düğümü için sıcaklık değişiminin zamana oranı için çözüm:

$$\frac{dT_N}{dt} = \frac{2k}{\rho c\Delta x^2} (T_{N-1} - T_N) + \frac{2h}{\Delta x\rho c} (T_f - T_N) \quad (3.39)$$

elde edilir. Denklemlerin düğümlerin sıcaklıkları göz önüne alındığında her düğüm sıcaklığı için zamanla değişim oranını sağladığı unutulmamalıdır. Her bir kontrol hacmi için enerji dengesi, sıcaklığın sıcaklığa göre değişme zamanı oranı için bir eşitlik sağlar. Bu nedenle, her bir kontrol hacmi için yazılan enerji dengesi, zaman değişim oranı için bir dizi denklem içerir.

Her düğümün sıcaklığı hem konum hem de zamanın (t) fonksiyonudur. Düğümün konumunu belirten dizin,  $i = 1$  adyabatik plakaya karşılık gelir ve  $i = N$  plakanın yüzeyine karşılık gelir. Zamanı ( $T_{i,j}$ ) göstermek için her bir düğüm sıcaklığına ikinci bir indeks  $j$  eklenir;  $j = 1$  simülasyonun başlangıcına karşılık gelir ve  $j = M$  simülasyonun sonuna karşılık gelir. Toplam simülasyon süresi  $M$  adımlara bölünmüştür; eşit sürenin çoğunda,

$$\Delta t = \frac{\tau_{sim}}{(M - 1)} \quad (3.40)$$

olur. Herhangi bir zaman adımı ile ilişkili zaman:

$$t_j = (j - 1)\Delta t \quad \text{için} \quad j = 1, \dots, M \quad (3.41)$$

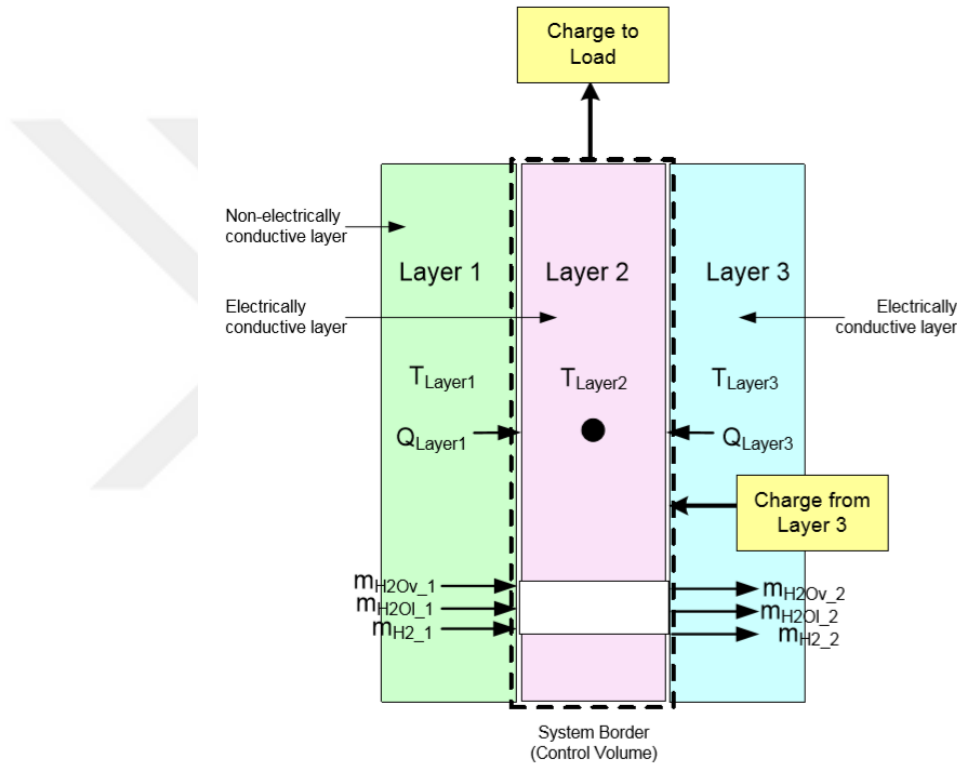
şeklinde tanımlanır. Bu sorunun başlangıç koşulları,  $t = 0$ 'daki tüm sıcaklıkların Kalaya eşit olmasıdır.

$$T_{i,j} = T_{in} \quad \text{for} \quad i = 1 \dots N \quad (3.42)$$

T değişkeninin iki boyutlu bir dizide yani bir matris olduğuna dikkat edilmelidir.

### 3.6.6. Yakıt Hücresi Katmanları için Enerji Dengesi

Enerji dengeleri, zamanın veya konumun bir fonksiyonu olarak belirli bir tabaka boyunca ısının difüzyonunun incelenmesini sağlamak için yakıt hücresi tabakalarının her birinin çevresinde tanımlanabilir. Şekil 3.15, kontrol hacmi olarak bir yakıt hücresi tabakasının örneğini göstermektedir.



Şekil 3.15 Katman etrafındaki enerji dengesi [40]

### 3.6.7. Uç Plakalar, Kontaklar ve Conta Malzemeleri

Uç plakası tipik olarak bir metal veya polimer malzemeden yapılır ve sıkıştırma kuvvetlerini yakıt hücresi istasyonuna düzgün bir şekilde iletmek için kullanılır. Uç plakası, yakıt hücresi istifini destekleyecek kadar mekanik olarak sağlam olmalıdır ve sıkıştırma kuvvetlerini yakıt hücresi istifi içindeki her tabakanın tüm ana yüzeylerine düzgün bir şekilde dağıtabilmelidir. Yığın tasarımına bağlı olarak, yakıt hücresi istifinde temas ve conta tabakaları da olabilir. Conta tabakaları gaz sızıntısını

önlemeye ve istif sıkışmasını iyileştirmeye yardımcı olur. Temas tabakaları veya akım toplayıcılar, iki kutuplu plakadan ve gaz difüzyon tabakasından (GDL) elektron toplamak için kullanılır.

Uç plakaları, contalar veya kontak katmanlarında tipik olarak gaz veya sıvı akışı olmaması nedeniyle iletkenlik ısı transferinin tek modudur. Bu tabakaların her birinin bir tarafı bir izolasyon malzemesine (veya çevre ortamına) maruz bırakılır ve diğer taraf da iletken bir akım toplayıcı plakaya veya izolasyon malzemesine maruz bırakılır. Uç plakası, temas ve GDL katmanları için genel enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$(\rho_{\text{Layer2}} A_{\text{Layer2}} t_{\text{Layer2}} c_{p\text{Layer2}}) \frac{dT_{\text{Layer2}}}{dt} = Q_{\text{Layer1}} + Q_{\text{Layer3}} \quad (3.43)$$

burada  $\rho_{\text{Layer2}}$  Layer2 yoğunluğu,  $A_{\text{Layer2}}$ , Layer2 alanı,  $c_{p\text{Layer2}}$ , Layer2'nin özgül ısı kapasitesi,  $Q_{\text{Layer1}}$ , Layer1'den gelen ısı akışı ve  $Q_{\text{Layer3}}$ , Layer3'ten gelen ısı akışı. Sol taraftaki türev, kontrol hacim sıcaklığının değişim oranıdır ( $dT_{\text{Layer2}} / dt$ ). Katman1'den Katman2'ye ısı akışı şu şekildedir:

$$Q_{\text{Layer1}} = U_{\text{Layer1}} A (T_{\text{Layer1}} - T_{\text{Layer2}}) \quad (3.44)$$

burada,  $U_{\text{Layer1}}$ , Katman 1 için toplam ısı aktarım katsayısıdır,  $A$  katın alanıdır ve  $T$  katmanın sıcaklığıdır. Katman3'ten Katman2'ye ısı akışı şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q_{\text{Layer3}} = U_{\text{Layer3}} A (T_{\text{Layer3}} - T_{\text{Layer2}}) \quad (3.45)$$

Isı çevreden geliyorsa, toplam ısı transferi katsayısı şu şekilde hesaplanabilir:

$$U_{\text{surr}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer2}}}{k_{\text{Layer2}}} + \frac{1}{h_{\text{surr}}}} \quad (3.46)$$

burada,  $t_{\text{Layer2}}$ , Tabaka2' nin kalınlığıdır,  $k_{\text{Layer2}}$ , Tabaka2'nin ısı iletkenliğidir ve  $h_{\text{surr}}$ , yığından havadaki konveksiyon kaybıdır. Katman1'den gelen ısı için genel ısı transfer katsayısı:

$$U_{\text{Layer1}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer2}}}{* k_{\text{Layer2}}} + \frac{t_{\text{Layer1}}}{* k_{\text{Layer1}}}} \quad (3.47)$$

Katman3'ten gelen ısı için genel ısı transfer katsayısı:

$$U_{\text{Layer3}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer3}}}{* k_{\text{Layer3}}} + \frac{t_{\text{Layer2}}}{* k_{\text{Layer2}}}} \quad (3.48)$$

Katman elektriği (örn. Temas katmanı) iletirse, Katman 2'de ( $Q_{\text{res\_Layer2}}$ ) elektrik direnci nedeniyle ek bir ısı oluşumu oluşur ve bu da şu şekilde hesaplanabilir:

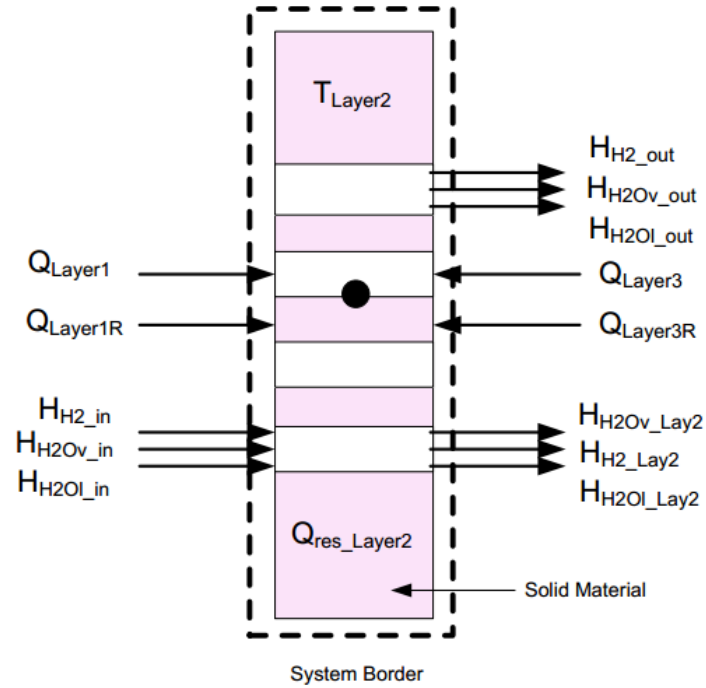
$$Q_{\text{res\_Layer2}} = (iA)^2 \frac{\rho_{\text{res\_Layer2}} t_{\text{Layer2}}}{A} \quad (3.49)$$

burada  $i$  akım yoğunluğu,  $A$  katmanın alanı,  $\rho_{\text{res\_Layer2}}$ , malzemenin spesifik direnci ve  $t_{\text{Layer2}}$  katmanın kalınlığıdır. Tipik olarak, uç plakası, temas veya conta tabakalarında ısı oluşmaz. Bununla birlikte, bazı yakıt hücresi istif tasarımlarında, uç plakası ısıtılabilir, bu nedenle, model formülasyonuna ek bir ısı üretimi teriminin eklenmesi gerekecektir.

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

## 4.1. Bipolar Plaka Isı Transferinin MATLAB@Simulink Modellemesi

Bipolar Plaka (BP) diğer bir deyişle iki kutuplu plakalar; komşu hücrelerin tepkime gazlarını ayırır, hücreleri elektrikle bağlar ve bir destek yapısı olarak görev yapar. Çift kutuplu plakaların her iki tarafında, çift kutuplu plakanın karşıt taraflarındaki birim hücrelerin anot ve katot bölmelerini oluşturan tepken akış kanalları bulunur. Akış kanalı geometrisi, reaktant akış hızlarını, kütle transferini ve yakıt hücresi performansını etkiler. BP malzemeleri yüksek iletkenliğe sahip ve gazlar için geçirimsizdir. Ayrıca, malzemesi reaksiyon gazları ve katalizörlerin varlığı nedeniyle korozyona dayanıklıdır. BP'lerde ısı transferini hesaplamak için kullanılan enerji dengesi Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Akış alanı plakası enerji dengesi [27]

BP'deki gaz kanallarından dolayı hem iletken hem de konvektif ısı transferi gerçekleşir. BP'deki kanallar, levhanın tümünün ısı transferini etkiler. BP'deki ısı aktarımı için geçerli denklem şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} & (c_{p_{avg}}(n_{gases} + n_{liq}) + \rho_{Layer2}(A_{Layer2}t_{Layer2})c_{p_{Layer2}}) \frac{dT_{Layer2}}{dt} = \\ & Q_{Layer1} + Q_{Layer1R} + Q_{Layer3} + Q_{Layer3R} + Q_{res\_Layer2} + H_{H2\_in} \\ & + H_{H2Ov\_in} + H_{H2OI\_in} - H_{H2Lay2} - H_{H2OvLay2} - H_{H2OILay2} - H_{H2out} \\ & - H_{H2Ovout} - H_{H2OIout} \end{aligned} \quad (4.1)$$

burada,  $\rho_{Layer2}$  Layer2 yoğunluğu,  $A_{Layer2}$  alanı,  $c_{p_{Layer2}}$ , Layer2'nin spesifik ısı kapasitesi,  $Q_{Layer1}$ , Katman1'den kanallara ısı akışı,  $Q_{Layer1R}$ , Katman1'den katı malzemeye yapılan ısı akışı,  $Q_{Layer3}$  Katman 3'en kanallara ısı akışı,  $Q_{Layer3R}$  Katman3'ten katı maddeye ısı akışı,  $Q_{res\_Layer2}$  ise elektriksel direnç nedeniyle katmandaki ısı oluşumu ve  $H_A$  Katman2'ye giren veya çıkan Katman A'nın entalpisini temsil etmektedir. Eşitliğin sol tarafındaki türev, kontrol hacim sıcaklığının değişim oranıdır ( $dT_{Layer2} / dt$ ).

Katman1'den kanallara ısı akışı şu şekildedir:

$$Q_{Layer1} = U_{Layer1}A_{void}(T_{Layer1} - T_{Layer2}) \quad (4.2)$$

Burada  $A_{void}$  kanalların alanıdır.  $A_{1R}$  katı alanı temsil etmek üzere Katman1'den katı maddeye ısı akışı ise:

$$Q_{Layer1R} = U_{Layer1R}A_{1R}(T_{Layer1} - T_{Layer2}) \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilir. Katman3'ten (GDL) kanallara ısı akışı şu şekildedir:

$$Q_{Layer3} = U_{Layer3}A_{void}(T_{Layer3} - T_{Layer2}) \quad (4.4)$$

Katman3'ten (GDL) katı malzemeye ısı akışı:

$$Q_{\text{Layer3R}} = U_{\text{Layer3R}} A_{1R} (T_{\text{Layer3}} - T_{\text{Layer2}}) \quad (4.5)$$

Elektrik direncine bağlı olarak Katman2'deki ( $Q_{\text{res\_Layer2}}$ ) ısı oluşumu şöyledir:

$$Q_{\text{res\_Layer2}} = (iA)^2 \frac{\rho_{\text{res\_Layer2}} t_{\text{Layer2}}}{A_{1R}} \quad (4.6)$$

burada  $i$  akım yoğunluğu,  $\rho_{\text{res\_Layer2}}$ , malzemenin spesifik direnci ve  $t_{\text{Layer2}}$  katmanın kalınlığıdır.

Layer2 katmanının içine giren veya dışına çıkan gaz yahut sıvı akışının entalpisi şu şekilde tanımlanır.

$$H_A = n_A h_A T_{\text{Layer2}} \quad (4.7)$$

$H_A$ , tabakaya giren veya çıkan akımın entalpisi,  $n_A$ , A'nın molar akış hızı ve  $h_A$ , tabakanın sıcaklığında A'nın entalpi maddesidir ( $T_{\text{Layer2}}$ ).

Toplam ısı transfer katsayısı terimleri şu şekilde hesaplanabilir:

$$U_{\text{Layer1R}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer1}}}{*k_{\text{Layer1}}} + \frac{t_{\text{Layer2}}}{*k_{\text{Layer2}}}} \quad (4.8)$$

$$U_{\text{Layer1}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer1}}}{*k_{\text{Layer1}}} + \frac{1}{h_1}} \quad (4.9)$$

$$U_{\text{Layer3R}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer2}}}{*k_{\text{Layer2}}} + \frac{t_{\text{Layer2}}}{*k_{\text{Layer2}}}} \quad (4.10)$$

$$U_{\text{Layer3}} = \frac{1}{\frac{t_{\text{Layer3}}}{*k_{\text{Layer3}}} + \frac{1}{h_1}} \quad (4.11)$$

Gaz/sıvı karışımının termal kütesinin hesabı aşağıdaki gibidir:

$$\text{termal}_{\text{kütle}} = c_{p\text{avg}}(n_{\text{gases}} + n_{\text{liq}}) \quad (4.12)$$

burada  $c_{p\text{avg}}$ , Katman2 sıcaklığında gazların (hidrojen ve su) ortalama özgül ısıdır. Katman2'nin sıcaklığındaki gazların molar akış hızı şu şekilde hesaplanabilir:

$$n_{\text{gases}} = \frac{PV_{\text{gases}}}{RT_{\text{Layer2}}} \quad (4.13)$$

burada kanaldaki gazların hacmi  $V_{\text{gases}} = \varepsilon V_{\text{void}}$ ,  $\varepsilon$  boşluk fraksiyonu ve  $V_{\text{void}}$  kanal boşluğunun hacmini temsil etmekte olup aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$V_{\text{void}} = A_{\text{void}} t_{\text{Layer2}} \quad (4.14)$$

Katman2'deki kanallardaki sıvının molar akış hızı:

$$n_{\text{liq}} = \frac{V_{\text{liq}}}{MW_{\text{H2O}}} \quad (4.15)$$

şeklinde verilir. Burada gazların hacmi ise aşağıdaki yöntemlerle hesaplanabilir:

$$V_{\text{liq}} = V_{\text{void}} - V_{\text{gases}} \quad (4.16)$$

Yukarıda verilen tüm denklemler yazıldığı zaman elde edilen son denklem aşağıdaki hali alır:

$$\begin{aligned} & (c_{p\text{avg}}(n_{\text{gases}} + n_{\text{liq}}) + \rho_{L2}(A_{L2}t_{L2})c_{pL2}) \frac{dT_{L2}}{dt} = \\ & \frac{1}{\frac{t_{L1}}{*k_{L1}} + \frac{1}{h_1}} A_{\text{void}}[T_{L1} - T_{L2}] + \frac{1}{\frac{t_{L1}}{*k_{L1}} + \frac{t_{L2}}{*k_{L2}}} A_{1R}[T_{L1} - T_{L2}] \\ & + \frac{1}{\frac{t_{L3}}{*k_{L3}} + \frac{1}{h_{L3}}} A_{\text{void}}[T_{L3} - T_{L2}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\frac{t_{L3}}{* k_{L3}} + \frac{t_{L2}}{* k_{L2}}} A_{1R} [T_{L3} - T_{L2}] + (iA)^2 \frac{\rho_{res\_L2} t_{L2}}{A_{1R}} \\
& + m_{H2\_in} (c_{p,H2} T_{in} + h_{HHV}^0) \\
& + m_{H2O\_in} (c_{p,H2O} T_{in} + h_{fg}^0) + m_{H2O\_L2} (c_{p,H2O} T_{in} + h_{fg}^0) \\
& - m_{H2\_L2} (c_{p,H2} T_{L2} + h_{fg}^0) \\
& - m_{H2Ov\_L3} (c_{p,H2Ov} T_{L2} + h_{fg}^0) - m_{H2OI\_L2} (c_{p,H2OI} T_{L2} + h_{fg}^0) \\
& - m_{H2\_out} (c_{p,H2} T_{out} + h_{fg}^0) \\
& - m_{H2Ov\_out} (c_{p,H2Ov} T_{out} + h_{fg}^0) - m_{H2OI\_out} (c_{p,H2OI} T_{out} + h_{fg}^0) \quad (4.17)
\end{aligned}$$

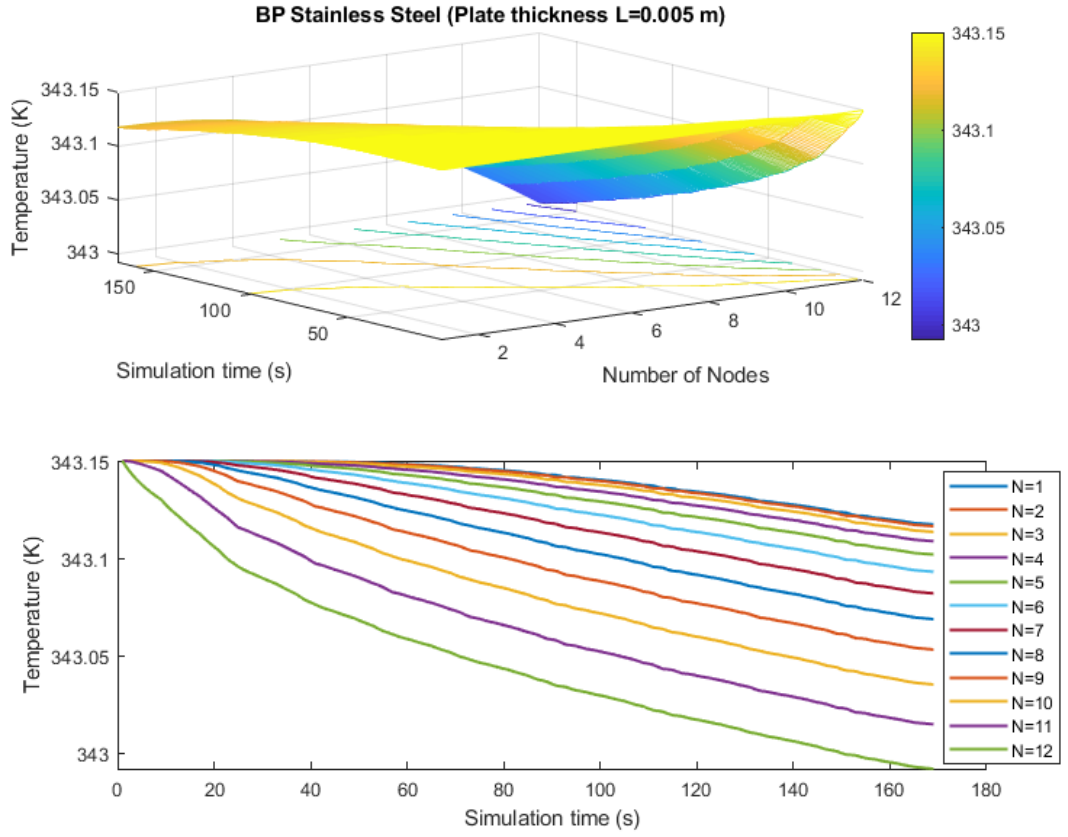
Bu çalışmada, tüm etki alanındaki ısı transferini ve oksidan kanalındaki laminer sıvı ve gaz akışı ele alınmıştır. Hidrojen kanalları ve gözenekli gaz difüzyon katmanlarındaki konvektif ısı transferi, bu bölgelerdeki sıvının nispeten düşük hızı nedeniyle ihmal edilmiştir. Ayrıca, hesaplama alanı olarak merkezi kanal dikkate alındığında, sıcaklığın yüksek olmaması ve uçların yüzey alanının toplam yüzey alanına kıyasla küçük olması nedeniyle radyasyon ısı transferi de ihmal edilmiştir.

**5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER**

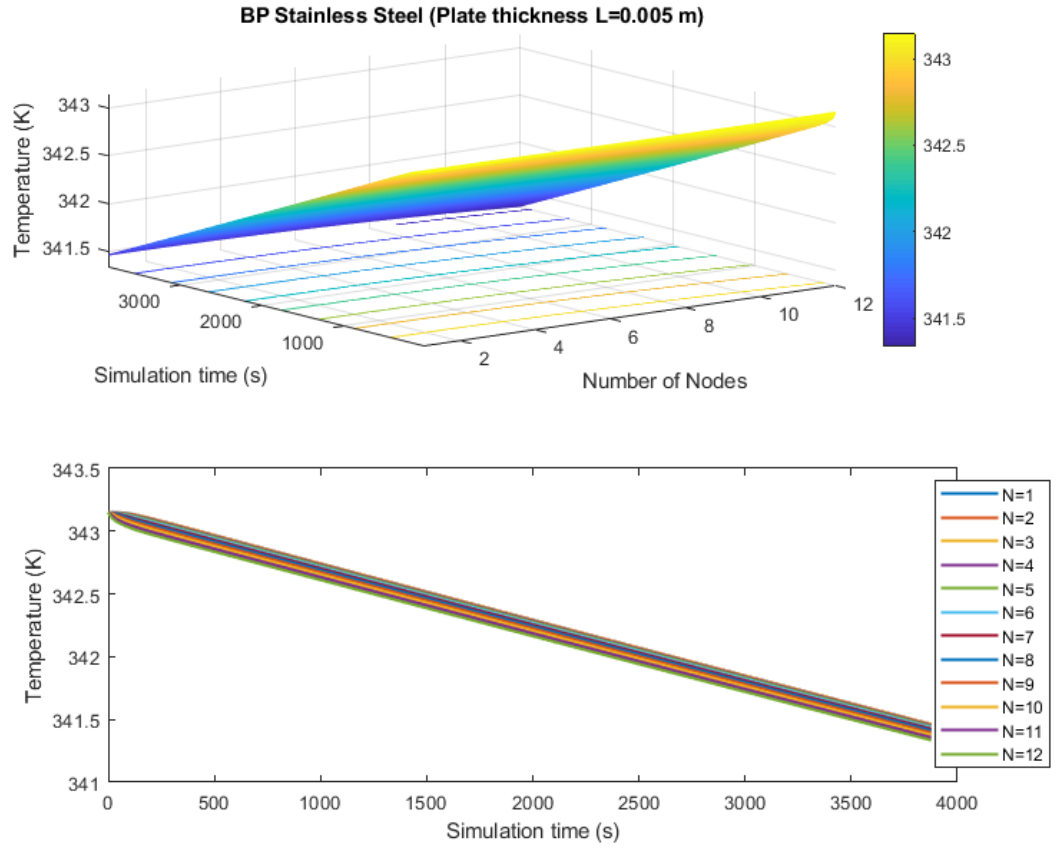
Bir yakıt pili yığını soğutmak için en basit çözümlerden biri serbest konveksiyondur. Bu yöntem, herhangi bir karmaşık tasarım veya soğutma sıvısı gerektirmez ve küçük veya düşük güçlü yakıt hücresi yığınları için uygun olabilir. Bu tez çalışmasında serbest konveksiyona sahip bir soğutma sistemi ile bir PEM yakıt hücresinin katmanları boyunca MATLAB@Simulink programı kullanılarak tek boyutlu ısı transferinin simülasyonları yapılmıştır. Bir önceki bölümde bahsedilen denklem (4.1)'den denklem (4.10)'a kadar olan tüm denklemler MATLAB@Simulink yazılım programında uygulanmıştır. Yakıt pili katmanları boyunca ısı transferinin simülasyonu için, ilk adım olarak, 0.005 m kalınlıkta ve çelik ve polimer gibi iki farklı malzemeden yapılmış plaka için daha önceki bölümde anlatılan nodal ağ tekniği kullanılarak bir ısı transfer simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Plaka bir tarafından yalıtılmış ve diğer taraftan ise 293.15 K'de soğutma sistemine maruz bırakılmıştır. Plaka sıcaklığı başlangıç olarak 343.15 K olarak alınmıştır.

0.005 m kalınlığında bir çelik plakası için 5 ve 120 simülasyon zamanlarında 12 nodal düğümdeki sistemin ısı transfer grafikleri Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının üç boyutlu gösterimi üstteki grafikte, farklı nod sayıları için sıcaklığın simülasyon zamanı ile değişimi ise alttaki grafikte yer almaktadır. Sıcaklık dağılımının yüzey üzerindeki nodal sayısı arttıkça daha hızlı bir ısı transferinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Elde ettiğimiz grafiklerin simülasyon zamanını arttırdığımızdaki değişimi ise Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Burada simülasyon zamanını arttırdığımızda ısı transfer hızının nodal sayısına göre çok fazla değişiklik göstermediğini dolayısıyla kısa zamanda hızlı bir ısı transferi hesabı için nodal sayısının artırılması gerektiği görülmektedir.

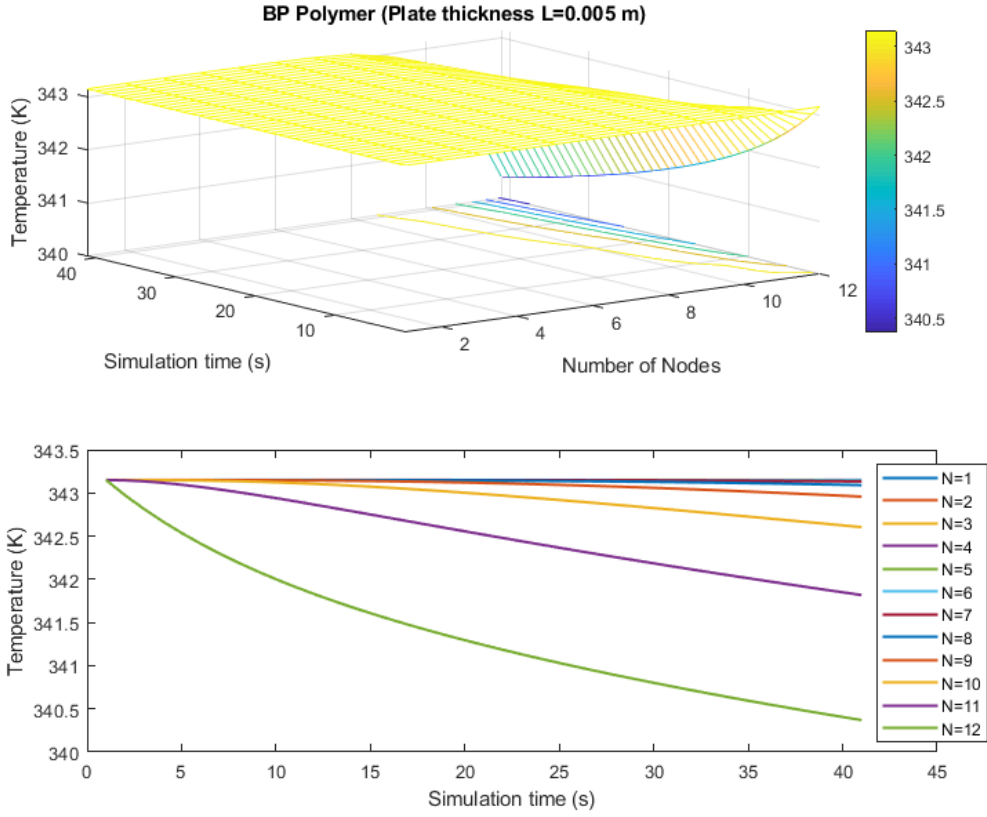
Yukarıda incelenen plaka ile aynı özelliklere sahip yalnızca malzeme olarak çelik yerine polimer kullanıldığında farklı malzeme kullanımının sonuçları nasıl etkileyeceği durumu da ele alınmıştır. Böylece, Şekil 5.3'te 0.005 m kalınlığındaki polimer malzemeden yapılmış plaka için elde edilen sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının üç boyutlu gösterimi (üstteki grafik) ile farklı nod sayıları için sıcaklığın simülasyon zamanıyla değişimi (alttaki grafik) yer almaktadır.



Şekil 5.1  $L = 0.005$  m plaka kalınlığına sahip çelik BP için elde edilen sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının üç boyutlu gösterimi (üstteki grafik), farklı nod sayıları için sıcaklığın simülasyon zamanı ile değişimi (alttaki grafik)



Şekil 5.2  $L = 0.005$  m plaka kalınlığına sahip su geçirmez çelik BP için elde edilen üç boyutlu sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının gösterimi (üstteki grafik), sıcaklığın simülasyon zamanı ile farklı nod sayıları için gösterimi (alttaki grafik)



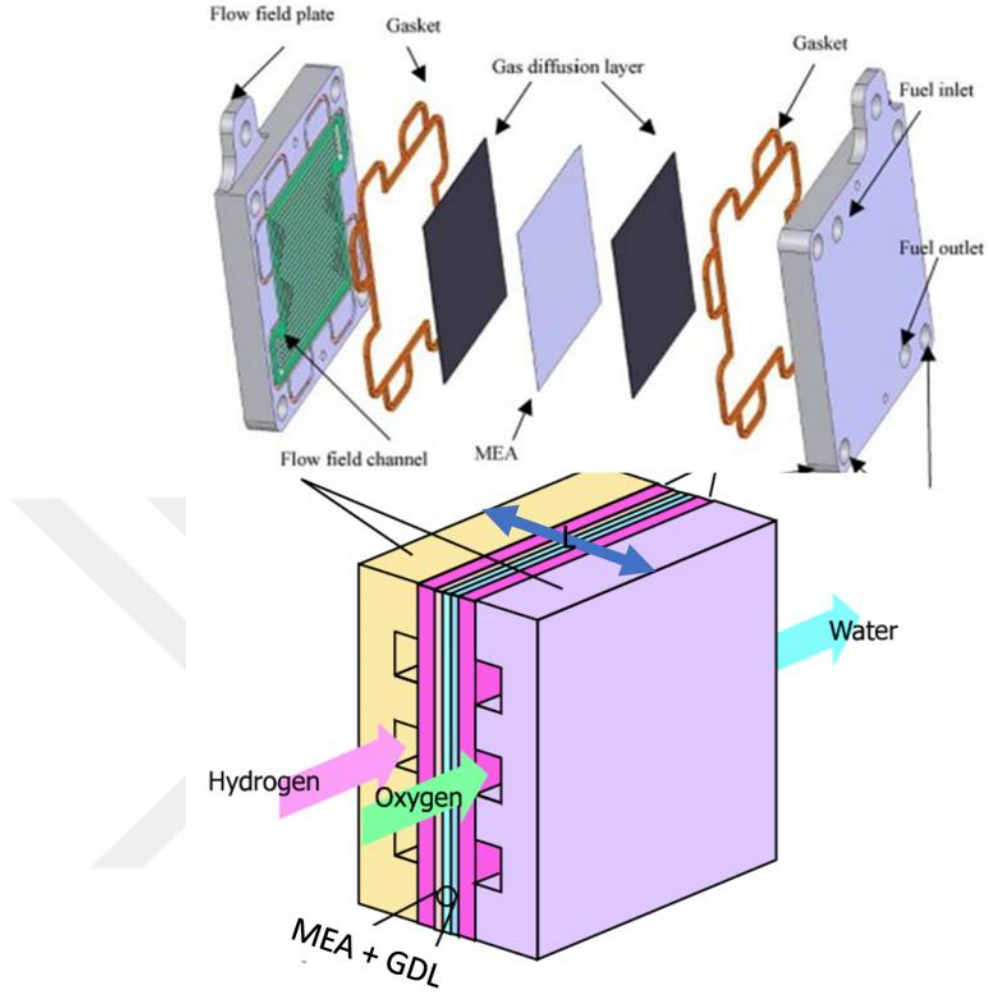
Şekil 5.3  $L = 0.005$  m plaka kalınlığındaki polimer malzeme bir BP için elde edilen üç boyutlu sıcaklık (K), simülasyon zamanı (s) ve nod sayısının gösterimi (üstteki grafik), sıcaklığın simülasyon zamanı ile farklı nod sayıları için gösterimi (alttaki grafik)

Bu tezde yapılan ikinci simülasyon çalışması ise Şekil 5.4'te gösterilen 7 katmandan oluşan bir PEM tipi yakıt hücresinin sol ve sağ BP'lerine yerleştirilmiş bir soğutucu sisteminden dolayı sıcaklık transferinin simülasyonudur. Simülasyon için yakıt hücresinin  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $373.15\text{ K}$ )'lik çalışma sıcaklığında olduğu varsayılarak soğutma sisteminin sıcaklığı ise  $297\text{ K}$  olarak alınmıştır. Isı transfer simülasyonu enerji dengesi Denklem (4.1) kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonda BP için  $0.005\text{ m}$  kalınlığında çelik malzeme kullanılmıştır. BP kanal derinlikleri ise  $0.001\text{ m}$  olarak alınmıştır. Simülasyon için alınan diğer parametreler ise aşağıdaki Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Bu tezde yapılan ısı transfer simülasyonunda kullanılan parametreler ve değerleri

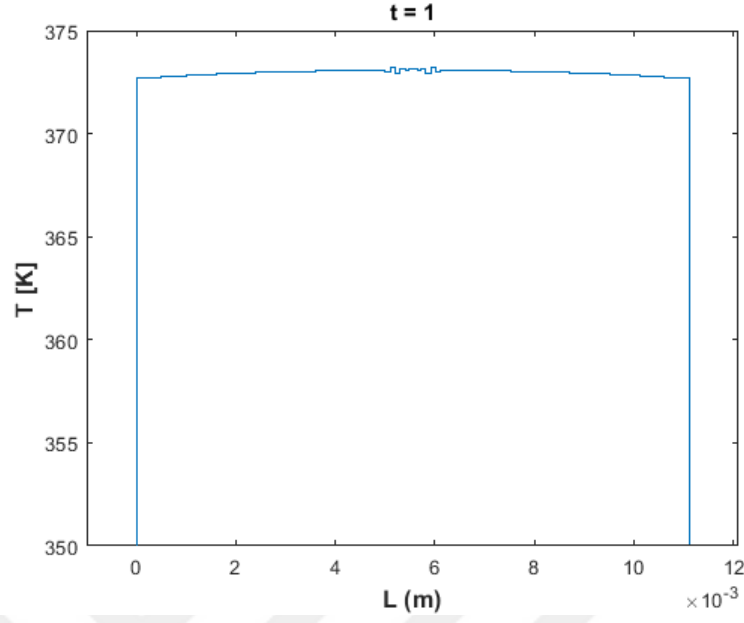
<b>Katman</b>	<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Alan (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Kalınlık (m)</b>	<b>Isı İletkenliği (W/m-K)</b>	<b>Isı Sığası (J/kg-K)</b>
<b>Katman1 (BP) Çelik</b>	790	0.01	0.005	16	1465
<b>Katman 2 GDL</b>	2000	0.01	0.0004	65	840
<b>Katman 3 Kataliz Katmanı</b>	387	0.01	0.000065	0.2	770
<b>Katman 4 MEA</b>	1967	0.01	0.000183	0.21	1100
<b>Katman 5 Kataliz Katmanı</b>	387	0.01	0.000065	0.2	770
<b>Katman 6 GDL</b>	2000	0.01	0.0004	65	840
<b>Katman 7 (BP) Çelik</b>	790	0.01	0.005	16	1465

Şekil 5.5'te bu tez çalışmasında gerçekleştirilen simülasyon için ele alınan bir PEM yakıt hücresinin tüm katmanlarının kapalı ve açık hali gösterilmektedir. Soldan sağa doğru 7 katman kullanılmıştır. Katalizör katmanı MEA katmanının içerisinde gösterilmektedir. Daha ayrıntılı bir çalışma yapmak için bu tezde yapılan simülasyonda katalizör katmanı MEA katmanından ayrı bir şekilde değerlendirilmiştir. Gasket katmanının ısı transferine katkısı olmadığından dolayı simülasyonda ihmal edilmiştir.

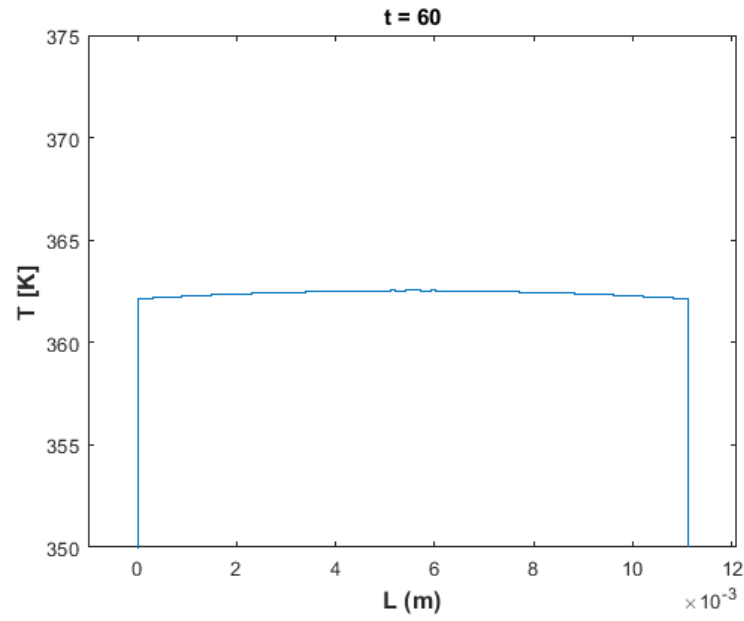


Şekil 5.4 Gerçekleştirilen simülasyon için ele alınan bir PEM yakıt hücresinin tüm katmanlarının kapalı (alttaki) ve açık hali (üstteki)

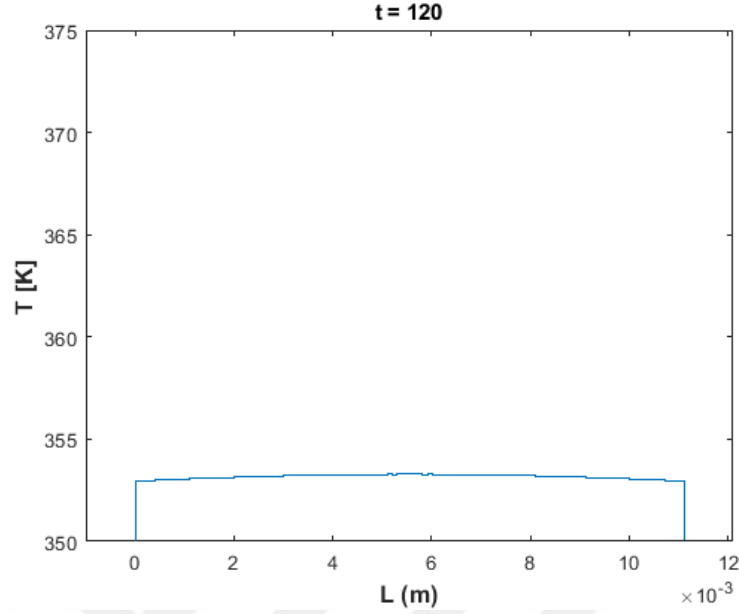
373.15 K sıcaklığında çalışan bir PEM yakıt hücresinin tüm katmanlarındaki ısı transferinin sıcaklığın PEM Hücresinin L genişliğine göre 1 s, 60 s ve 120 s simülasyon zamanlarındaki dağılımları Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere kısa bir simülasyon zamanı içerisinde nodal ağ yöntemiyle gerçekleştirilen simülasyonla hızlı bir şekilde sıcaklık dağılımı belirlenebilmektedir. Yapılan simülasyon çalışmasıyla şunu söyleyebiliriz ki 100 °C lik bir çalışma ortamındaki bir PEM yakıt hücresi soğutucu yardımıyla 120 s’lik bir simülasyon zamanı sonunda 80 °C’ye kadar soğutulmuştur.



Şekil 5.5  $t = 1$  s simülasyon zamanında  $L$  (m) genişliğine göre sıcaklık (T) değişim grafiği



Şekil 5.6  $t = 60$  s simülasyon zamanında  $L$  (m) genişliğine göre sıcaklık (T) değişim grafiği



Şekil 5.7 t = 120 s simülasyon zamanında L (m) genişliğine göre sıcaklık (T) değişim grafiği

Bir yakıt hücresi yığını yoluyla ısı dağılımı, sistemin verimli çalışması için hassas sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyar. Bir PEM yakıt hücresi daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırıldığında, kinetik daha hızlı olacaktır, bu da tipik olarak aktivasyon voltaj kayıplarını aşan bir voltaj kazancı sağlar. Daha yüksek çalışma sıcaklığı ayrıca ürün suyunun daha fazla buharlaşması anlamına gelir; böylece daha fazla atık ısı buharlaşma gizli ısısına gider ve yakıt hücresinden dışarı atılacak daha az sıvı su kalır. Çoğu yakıt hücresi yığını, yakıt hücresi yığını boyunca sıcaklık homojenliğini korumak için bir tür soğutma sistemi gerektirir.

**KAYNAKLAR**

- [1] A. Yılmaz, S. Ünvar, M. Ekmen, ve S. Aydın “Yakıt Pili Teknolojisi”, *Technological Applied Sciences (NWSATAS)* vol. 12, no. 4, pp. 185-192, 2017.
- [2] F. Ay, “Pem Tipi Yakıt Hücrelerini İçin Bipolar Plaka Geliştirilmesi”, Doktora tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2009.
- [3] J. Walkowiak-Kulikowska, J. Wolska, H. Koroniak, “Polymers application in proton exchange membranes for fuel cells (PEMFCs)”, *Physical Sciences Reviews*, vol. 2, no. 8, pp.1-18, 2017.
- [4] Y. Luo, Y. Shib, N. Cai, *Hybrid Systems and Multi-energy Networks for the Future Energy Internet*, Chapter 3: Bridging a bi-directional connection between electricity and fuels in hybrid multienergy systems, ScienceDirect, pp. 41-84, 2020.
- [5] Y.N. Sudhakar, M. Selvakumar, D. Krishna Bhat, *Biopolymer Electrolytes, Fundamentals and Applications in Energy Storage*, Chapter 5: Biopolymer Electrolytes for Fuel Cell Applications, Elsevier, pp. 151-166, 2018.
- [6] A.Y. Arabul, “Yakıt Pillerinin Şebekeden Bağımsız Ev Uygulaması”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2010.
- [7] D.G. Çağlayan “Investigation of Temperature Profile in High Temperature PEM Fuel Cell”, Yüksek lisans tezi, ODTÜ, 2016.
- [8] U. Özveren, “PEM Yakıt Hücrelerinin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2006.
- [9] R. Zarzycki, A. Kacprzak ve Z. Bis, “The use of direct carbon fuel cells in compact energy systems for the generation of electricity, heat and cold”, *Energies*, vol. 11, no. 3061, pp. 1-11, 2018.
- [10] C. Spiegel, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB®*. California 92101-4495, USA: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2008.
- [11] R. Vivek ve M. Muthukumar, “Performance Improvement of Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, *Innovative Energy and Research*, vol. 7, no. 2, pp. 63-76, 2018.

- [12] X. Li, I. Sabir, “Review of bipolar plates in PEMFCs: Flow-field designs”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, pp. 359 – 371, 2005.
- [13] J.M. Valencia ve ark., “Numerical study of heat transfer in a PEM fuel cell with different flow- fields”, in *XV International Congress of the Mexican Hydrogen Society Mexico*, Mexico, 2015, pp. 1-11.
- [14] P.T. Nguyen, “A Three-Dimensional Computational Model of PEM Fuel Cell with Serpentine Gas Channels”, Yüksek lisans tezi, University of Western, 2001.
- [15] H. Husby, “Carbon Based Coatings for Metallic Bipolar Plates in PEM Fuel Cells”, Yüksek lisans tezi, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2013.
- [16] E. Afshari, “Computational analysis of heat transfer in a PEM fuel cell with metal foam as a flow field”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, no. 4, pp. 1-10, 2020.
- [17] Y. Vazifeshenas, K. Sedighi, M. Shakeri, “Heat Transfer in PEM Cooling Flow Field with High Porosity Metal Foam Insert”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, pp. 81-89, 2019.
- [18] N.E. Vanderborghm, J.R. Huff, J. Hedstrom, “Heat and mass transfer effects in PEM fuel cells”, in *24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Washington, 1989.
- [19] M. Akbari, A. Tamayola, M. Bahramib, “Thermal Assessment of Convective Heat Transfer in Air- Cooled PEMFC Stacks: An Experimental Study”, *Energy Procedia*, vol. 29, pp. 1-11, 2012.
- [20] F.H.M. Amin, “Heat Transfer Analysis of PEMFC System Using FEM”, Yüksek lisans tezi, Politecnico Milano, 2010.
- [21] R. Atan, W.A. Najmi W.M., “Temperature profiles of an air-cooled PEM fuel cell stack under active and passive cooling operation”, *Procedia Engineering*, vol. 41, pp.1735-1742, 2012.
- [22] X. Zheng, D. Yang , K. Tao, H. Zhang and J. Ma, “Design of Forced Air-cooling Structure for Elevated Temperature PEMFC”, *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 464-469, 2010.

- [23] F.C. Chen, R. Loutfy, Z. Gao, M. Hecht, “Analysis of Optimal Heat Transfer in a PEM Fuel Cell Cooling Plate”, *Fuel Cells From Fundamentals to Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 181-188, 2004.
- [24] S. Karimi, N. Fraser, B. Roberts, ve F.R. Foulkes, “A Review of Metallic Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials and Fabrication Methods”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2012, Article ID 828070, pp. 1-22, 2012.
- [25] E. A. Cho, U.S. Jeon, ve H. Y. Ha, “Characteristics of composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, vol. 125, no. 2, pp. 178–182, 2004.
- [26] A. Heinzl, F. Mahlendorf, O. Niemzig, ve C. Kreuz , “Injection moulded low cost bipolar plates for PEM fuel cells”, *Journal of Power Sources*, vol. 131, no. 1-2, pp. 35–40, 2004.
- [27] C. Shen, M. Pan, Z. Hua, ve R. Yuan, “Aluminate cement/ graphite conductive composite bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, vol. 166, no. 2, pp. 419–423, 2007.
- [28] B.D.Cunningham, J. Huang, ve D.G.Baird, “Development of bipolar plates for fuel cells from graphite filled wet-lay material and a thermoplastic laminate skin layer”, *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 764–773, 2007.
- [29] B.Cunningham ve D.G.Baird, “The development of economical bipolar plates for fuel cells”, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, no. 45, pp. 4385–4388, 2006.
- [30] Y. Wang ve D.O.Northwood, “Effects of O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> on the corrosion of SS316L metallic bipolar plate materials in simulated anode and cathode environments of PEM fuel cells”, *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 24, pp. 6793–6798, 2007.
- [31] T. Wilberforce, Z. El Hassan, E. Ogungbemi, O. Ijaodola, A. Durrant, J. Thompson, A. Baroutaji, A.G. Olabi, “A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 111, pp. 236, 2019.
- [32] V. Mehta ve J.S.Cooper, “Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing”, *Journal of Power Sources*, vol. 114, no. 1, pp. 32–53, 2003.

- [33] J.S.Cooper, “Design analysis of PEMFC bipolar plates considering stack manufacturing and environment impact”, *Journal of Power Sources*, vol. 129, no. 2, pp. 152–169, 2004.
- [34] X.Z.Yuan, H. Wang, J. Zhang, ve D.P.Wilkinson, “Bipolar plates for PEM fuel cells—from materials to processing”, *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 257–267, 2005.
- [35] D.J.L.Brett ve N.P.Brandon, “Review of materials and characterization methods for polymer electrolyte fuel cell flow-field plates”, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 29–44, 2007.
- [36] H. Tawfik, Y. Hung, ve D. Mahajan, “Metal bipolar plates for PEM fuel cell-A review”, *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 2, pp. 755–767, 2007.
- [37] M. Li, L. Zhang, S. Wang, ve S. J. Hu, “Design, manufacturing, and performance of PEM fuel cell metallic bipolar plates”, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 1-10, 2008.
- [38] H. Wang ve J.A.Turner, “Reviewing metallic PEMFC bipolar plates”, *Fuel Cells*, vol. 10, no. 4, pp. 510–519, 2010.
- [39] S. Shahsavari, “Thermal Analysis Of Air-Cooled Fuel Cells”, Uygulamalı Bilimler Yüksek lisans tezi, Simon Fraser Üniversitesi, 2011.
- [40] C. Spiegel, “A One-Dimensional Heat, Mass and Charge Transfer Model for a Polymer Electrolyte Fuel Cell Stack”, *Fuelcell store*, <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/heat-mass-charger-transfer-model-pem-fuel-cell>. [Erişim tarihi: 15- Kasım- 2021].
- [41] MathWorks “MATLAB&SIMULINK”, <https://www.mathworks.com/>. [Erişim tarihi: 15- Kasım- 2021].
- [42] MathWorks “SIMULINK”, <https://www.mathworks.com/help/simulink/>. [Erişim tarihi: 15- Kasım- 2021].
- [43] Meshing ve Node Index, <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level2/ch03/html/12c03s06.html/>. [Erişim tarihi: 5-Aralık- 2021].