

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

PEM TİPİ YAKIT HÜCRESİNİN ISIL,
MEKANİK, ELEKTRO-KİMYASAL VE AKIŞ
DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ

Mustafa ESMER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2010

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

PEM TİPİ YAKIT HÜCRESİNİN BİLGİSAYAR
ORTAMINDA MODELLENEREK ÇALIŞMA
PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA
ETKİLERİNİ İLE ISIL VE MEKANİK YÜKLER
ALTINTA GERİLME DAĞILIMININ
İNCELENMESİ

Mustafa ESMER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Ali ATA

GEBZE

2010

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : PEM TİPİ YAKIT HÜCRESİNİN ISIL, MEKANİK, ELEKTRO-KİMYASAL VE AKIŞ DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ
YAZAR ADI : MUSTAFA ESMER

Yakıt hücresi reaktantların sahip olduğu kimyasal enerjiyi yanma olmadan doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektro-kimyasal bir cihazdır. Kabaca yakıt hücresi anot ve katotu oluşturan elektrotlar ile seçici geçirgen elektrolitten (membran) oluşur. Anotta hidrojen elektron ve protonlarına ayrılır. Protonlar membrandan geçerken, elektronlar membranın elektriksel olarak yalıtkan olması nedeniyle harici bir devre üzerinden akarak katota ulaşır. Burada oksijen, proton ve elektronlar ile birleşerek elektrik, su ve ısıyı oluşturur. Teorik olarak reaktantlar dışarıdan beslendiği sürece elektrik üretimi sonsuza kadar devam eder. Yakıt pilleri, yanma gerçekleşmediğinden dolayı yüksek verime, yüksek akım yoğunluğuna, düşük emisyon değerlerine sahip olmaları ve hareketli parçaları barındırmamaları nedeniyle mobil uygulamalarda, içten yanmalı motorlar ile pillerin yerini almaya adaydırlar.

Bu çalışmada yakıt hücrelerinin çalışma parametrelerinden basınç, sıcaklık ve havanın stokiyometrik oranının hücre performansına etkisi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) programı kullanılarak incelenmiştir. Deneysel ve teorik I-V eğri sonuçları matematiksel modelin doğruluğu açısından karşılaştırılmıştır. Proses sırasında oluşan sıcaklık farkları ile yakıt hücresine uygulanan sıkma kuvveti etkisi, Sonlu Elemanlar Analizi (FEM) programında incelenerek hücre içerisindeki gerilme dağılımı bulunmuştur.

SUMMARY

**TITLE : PEM TYPE FUEL CELL THERMAL, MECHANICAL,
ELECTRO-CHEMICAL AND FLUID COMPUTER MODELLING**

AUTHOR : MUSTAFA ESMER

Fuel cell is an electro-chemical equipment that converts the chemical energy directly to the electrical energy without combustion. Basically, fuel cell is composed of electrodes which are anode, cathode and a selective electrolyte (membrane). At anode side hydrogen gas is broken into electrons and protons. Protons pass through the membrane, whereas electrons reach the cathode over an external circuit. At the cathode side, oxygen gas reacts with the hydrogen ion and the electrons which generate electricity and heat as outputs and water as a product. Theoretically, electricity generation can continue forever if the reactants are supplied. Fuel cell technology is a candidate for being used at mobile applications instead of internal combustion engines, since they have higher efficiency and zero or lower emissions. The process doesn't involve burning or moving parts.

In this study, the effect of fuel cell working parameters, such as pressure, heat and reactant stoichiometric ratios, on fuel cell performance is analyzed by using Computational Fluid Dynamics (CFD) programming. Theoretical I-V curve results obtained from the mathematical model are verified with the real time performance measurements. Stress distribution in the fuel cell cross section is analyzed with Finite Elements Analysis (FEM) programs.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada sırasında desteğini esirgemeyen aileme, çalışmayı tamamlamanda büyük emeği geçen Prof. Dr. Ali Ata ve Araştırma Görevlisi Sn. Furkan Dünder'a, yoğun çalışma temposuna rağmen derslere devam etmem konusunda hertürlü desteği veren Sn. Mehmet Özyürek ve Sn. Şansal Erbay' a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2.YAKIT HÜCRELERİ	3
2.1 Yakıt Hücrelerinin Çeşitleri	5
2.2 Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Çalışma Prensibi	7
2.2.1 Hücre Elemanları ve Malzemeleri	9
2.2.2 Yakıt Hücresi Sistemi Elemanları	10
2.3 Yakıt Hücresinde Elde Edilen Gücün Parametrelere Göre Değişim	11
2.3.1 Gerilim Eldesi ve Kayıplar	11
2.3.1.1. Aktivasyon Kayıpları	13
2.3.1.2. Direnç Kayıpları	14
2.3.1.3. Kütle Transferi Kayıpları	14
2.3.1.4. Yakıt Sızmasından Doğan Kayıplar	15
2.3.1.5. Hücre Potansiyeli	15
2.3.2 Çalışma Koşullarının Performansa Etkisi	16
3. PEM TİPİ YAKIT HÜCRE MODELİ	17
3.1 Giriş	17
3.2 Geometri	19
3.3 Sonlu Elemanlar Modeli	21
3.4 Kabuller	22
3.5 Matematiksel Model	24
3.5.1 Elektro-Kimyasal Model	24
3.5.2 Akım ve Kütlenin Korunumu	25
3.5.3 Isı Kaynakları	25

3.5.4 Bazı Katsayılar ve Özellikler	26
3.5.4.1 Gaz Fazında Maddelerin Difüzyon Özelliği	26
3.5.4.2 Elektrot İyonik İletkenliği	26
3.5.4.3 Osmotik Sürüklenme Katsayısı	27
3.5.4.4 Tersine Difüzyon Akısı	27
3.5.4.5 Membranda Su Difüzyon Özelliği	27
3.5.4.6 Su İçeriği	27
3.5.4.7 Su Buhar Basıncı	27
3.5.4.8 Doygunluk Basıncı	27
3.5.5 Yakıt Hücresindeki Gerilmeler	27
4. YAKIT HÜCRE MODELİ ANALİZ SONUÇLARI	29
4.1 Giriş	29
4.2 Matematiksel Modelin Doğrulanması	29
4.3 Hücre içerisindeki Akım Yoğunluğu, Reaktant Kütle Oranları, Isı Dağılımına ait şekiller	30
4.4 Çalışma Parametrelerinin Yakıt Hücre Performansına Etkilerinin İncelenmesi	34
4.4.1 Basıncın Hücre Performansına Etkisi	34
4.4.2 Sıcaklığın Hücre Performansına Etkisi	35
4.4.3 Oksijenin Stiyometrik Oranının Hücre Performansına Etkisi	36
4.5 Yakıt Hücresi Üzerindeki Isıl ve Mekanik Yük Altında Gerilme Dağılımı	38
5. SONUÇ	40
6. ÖNERİLER	41
KAYNAKÇA	42
ÖZGEÇMİŞ	45

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- E :İdeal hücre gerilimi
- ΔG :Gibbs serbest enerji değişimi
- n :Elektron sayısı
- F :Faraday sabiti
- η :Verim
- ΔH :Entalpi değişimi
- ΔV_{akt} :Aktivasyon kayıpları
- A :Katalizöre bağlı sabit
- i :Akım
- i_o :Dönüm akım yoğunluğu
- $\Delta V_{direnç}$:Direnç kayıpları
- r :Direnç
- ΔV_{kt} :Kütle transferi kayıpları
- R :İdeal gaz sabiti
- $\Delta V_{yakıa}$:Yakıy sızıntı kayıpları
- i_n :Sızan gazdan elde edilebilecek akım
- V :Gerilim Farkı
- i_l :Sınırlayıcı akım yoğunluğu
- $V_{aç}$:Açık hat gerilimi
- R_{anot} :Anottaki hacimsel transfer akımı
- $c_{H_2}^{ref}$:Anot referans konsantrasyonu
- γ_{anot} :Anot konsantrasyon üsteli
- α_{anot} :Anot transfer katsayısı
- R_{katot} :Katot hacimsel transfer akımı
- $c_{O_2}^{ref}$:Katot referans konsantrasyonu
- γ_{katot} :Katot konsantrasyon üsteli

- α_{katot} :Katot transfer katsayısı
- R_c : Temas Direnci
- ε :Gözeneklilik
- κ : Geçirgenlik
- S :Elektrik iletkenliği
- k :Isıl iletkenliği
- δ :Genleşme katsayısı
- ψ :Poisson oranı
- ξ :Elastisite modülü
- h :Hacim Yüzey Oranı
- ρ_m :Nem içermeyen membranın yoğunluğunu
- β :Protonik iletkenlik katsayısı
- ω :Protonik iletkenlik üsteli
- $\sigma_{katı}$:Katı fazdaki hücre elemanlarına ait elektrik iletkenliği
- $\phi_{katı}$:Katı fazdaki hücre elemanlarına ait elektrik potansiyeli
- $R_{katı}$:Katı fazdaki hücre elemanlarına ait hacimsel transfer akımı
- ϕ_{mea} :Membrana ait elektrik potansiyeli
- σ_{mea} :Mebrana ait elektrik iletkenliği
- R_{mea} :Katı fazdaki hücre elemanlarına ait hacimsel transfer akımı
- ζ_{anot} :Anottaki belirli aktif yüzey alanı
- j_{anot}^{ref} :Anottaki dönüm akım yoğunluğu
- $[]_{ref}$:Lokal madde konsantrasyonu, referans değer ($kgmol / m^3$)
- γ :Konsantrasyona bağlılık
- η_{anot} :Anot yüzeyindeki ortalama gerilim kaybı
- R_{katot} : Katottaki hacimsel transfer akımı
- ζ_{katot} : Anottaki belirli aktif yüzey alanı
- j_{katot}^{ref} : Katottaki dönüm akım yoğunluğu
- η_{katot} : Anot yüzeyindeki ortalama gerilim kaybı
- S_{H2} :Hidrojen stiyometrik oranı

- M_{w,H_2} :Hidrojen içerisindeki su miktarı
- S_{O_2} :Oksijen stiyometrik oranı
- M_{w,O_2} :Oksijen içindeki su miktarı
- S_{H_2O} :Su stiyometrik oranı
- M_{w,h_2O} :Suyun içindeki su buharı miktarı
- r_{ohm} :Omik direnç
- h_L :Suyun buharlaşması ile oluşan entalpi değişimi
- D_i :Gaz difüzyon özelliği
- D_i^o :Referans referans basınç ve sıcaklıkta i'ninci terime ait gaz difüzyon özelliği
- ε :Gözeneklilik
- r_s :Gözenek tıkanıklılık üsteli
- P :Basınç
- P_o :Referans basınç
- γ_p :Gaz difüzyon özelliğine ait basınç katsayısı
- T :Sıcaklık
- T_o :Referans sıcaklık
- γ_t :Gaz difüzyon özelliğine ait sıcaklık katsayısı
- σ_{mea} :Membrana ait iyonik iletkenlik
- λ :Su oranı
- n_d :Osmotik sürüklenme katsayısı
- j_w^{diff} :Tersine difüzyon akısı
- M_m :Nem içermeyen membran ağırlığı
- D_l :Membran su difüzyon özelliği
- a :su aktivitesi
- P_{wv} :Su buhar basıncı
- P_{sat} :Yoğuşma basıncı
- x_{H_2O} :Molar buhar oranı

- $\log P_{\text{doyg}}$:Buhar doygunluk basıncı
- $\sigma_{eş}$:Eşdeğer von Misses gerilmesi
- $\sigma_{1,2,3}$:Asal gerilmeler

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Örnek bir yakıt hücresi	2
2.1. Yakıt hücresi kısa tarihi	4
2.2. Örnek bir yakıt hücresi	8
2.3. Örnek bir yakıt hücresi sistemi	10
2.4 Tipik bir yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi	13
3.1 Kullanılan model için analiz akış şeması	18
3.2 Yakıt hücresine ait bipolar plaka genel görünüşü	19
3.3 Analiz için hazırlanmış yakıt hücre modeli kompleksi ve detayları	20
3.4 Yakıt hücresi kesitine ait sonlu elemanlar yapısı	21
3.5 Yakıt hücresi boyuna sonlu elemanlar yapısı	21
4.1 Deneyisel veriler ile modele ait polarizasyon eğrisi	30
4.2 Yakıt hücresinin bir kesitine ait akım yoğunluğu ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa, $T=333.15$ K)	31
4.3 Katot üzerindeki akım yoğunluğu ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa, $T=333.15$ K)	31
4.4 Yakıt hücresinin boydan kesitine ait oksijen kütle oranları ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa, $T=333.15$ K)	32
4.5 Yakıt hücresinin bir kesitine ait sıcaklık dağılımı ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa, $T=333.15$ K)	33
4.6 Yakıt hücresinin muhtelif kesitlerine ait sıcaklık dağılımı ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa, $T=333.15$ K)	33
4.7 Basıncın Yakıt Hücre Performansına Etkisi ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa ve $P=100$ kPa, $T=333.15$ K))	35
4.8 Sıcaklığın Yakıt Hücresi Performansına Etkisi ($So_2=2$, $SH_2=1.1$, $P=200$ kPa , $T=333.15$ K ve $T=303.15$))	36
4.9 Oksijen Stiyometrik Oranının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi ($So_2=2$, $SH_2=1,2-2-5.1$, $P=200$ kPa , $T=333.15$ K ve $T=303.15$)	37
4.10 Yakıt Hücresine Ait Bir Dik Kesitteki Von-Misses Gerilme Dağılımı-1 ($So_2=2$, $SH_2=2$, $P=200$ kPa , $T=333.15$ K)	39

4.11 Yakıt Hücrelerine Ait Bir Dik Kesitteki Von-Mises Gerilme Dağılımı-2
($\text{SO}_2=2$, $\text{SH}_2=2$, $P=200$ kPa , $T=333.15$ K)

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Yakıt Hücresi Türlerinin Karşılaştırılması	6
2.2 Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Malzemeler	9
3.1 Elektro-kimyasal parametreler	22
3.2 Malzeme özellikleri	23

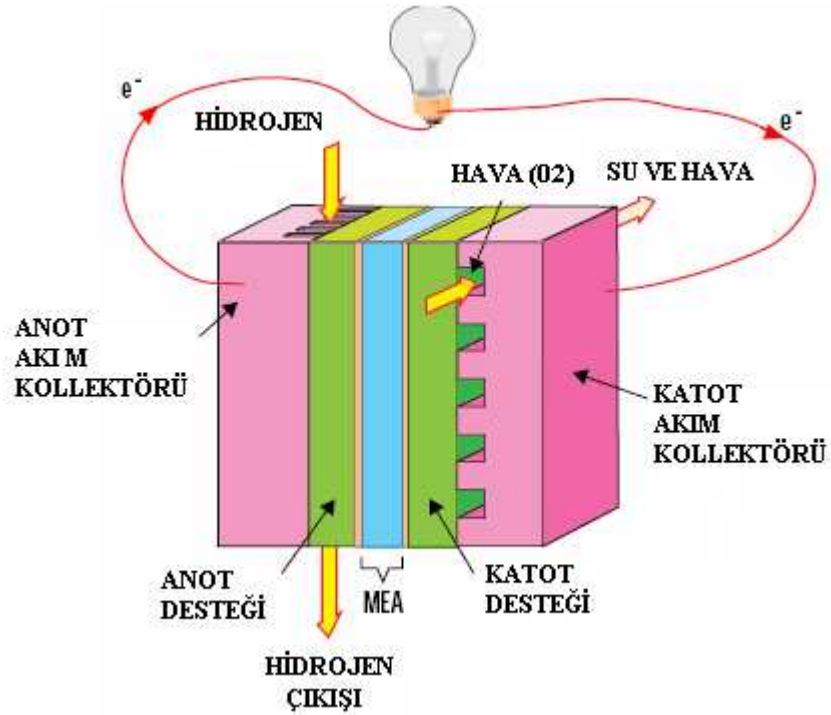
1. GİRİŞ

Özellikle son iki asırdır tahmin edemeyeceğimiz bilimsel ve teknik gelişmelerle karşı karşıya kaldık. Bu gelişmeler bir yandan yaşam tarzımızı değiştirirken bir yandan da sanayinin ve endüstrinin gelişmesini sağlamıştır. Buna paralel nüfusun da artması neticesinde enerji kaynakları hızla tüketilmektedir. Dolayısıyla dünyada enerji kaynaklarına olan talep hızla artmakta, yeni kaynak arayışları ve çözüm yolları aranmaktadır.

Dünyada kullanılan enerji kaynaklarının başında %60 ile fosil yakıtlar gelmektedir. Fosil yakıtlar sınırlı rezervlere sahip, emisyonlarının çevreye zararlı (sera etkisi, asit yağmurları, sağlık problemleri gibi), belli coğrafi bölgelerde yer alması, fiyatların manipüle edilebilir olması belli başlı dezavantajlardır. Nükleer santraller radyoaktif atıklar oluşturmakta, hidroelektrik santraller geniş göl alanlarına ve baraj inşaatı gerektirmekte, jeotermal kaynaklar belli coğrafi alanlarda yer almakta, rüzgar ve güneş enerjisi ise geniş alanlara ihtiyacı hasıl etmektedir.. Dolayısıyla enerjinin stabil, devamlı, kolay ulaşılabilir ve çevreye dost olması arayışları insanlığı alternatif enerji kaynaklarına yönelik arayışlara itmiştir [1].

Bu gün bilim adamları artan enerji ihtiyacını karşılamada ve alternatif enerji kaynağı olarak çevreye dost, sürdürülebilir, kolay ulaşılabilir enerji kaynağı olarak hidrojen enerjisini 21. yüzyılın enerjisi olarak görmektedir [2].

Hidrojenden enerji elde etmede doğrudan içten yanmalı motorlarda ya da katalitik yüzeylerde alevsiz yakma metodları kullanılabilir. Fakat dünyada enerji elde etmede ve üzerine yapılan araştırmalarla ilk sırayı hidrojeni elektro kimyasal yolla elektriğe çeviren yakıt pilleri gelir. Yakıt pilleri içten yanmalı motorlara göre yüksek verime sahip, ekonomik, düşük emisyon değerleri nedeniyle çevreye dost, sessiz çalışabilme ve taşınabilir özelliği sahip olmaları nedeniyle tercih edilirler. Yakıt pilleri çalışma özelliklerine göre çok çeşitli olmakla beraber en çok kullanılan ve üzerinde araştırma yapılan tipi PEMFC (proton exchange membrane fuel cell)'dir.



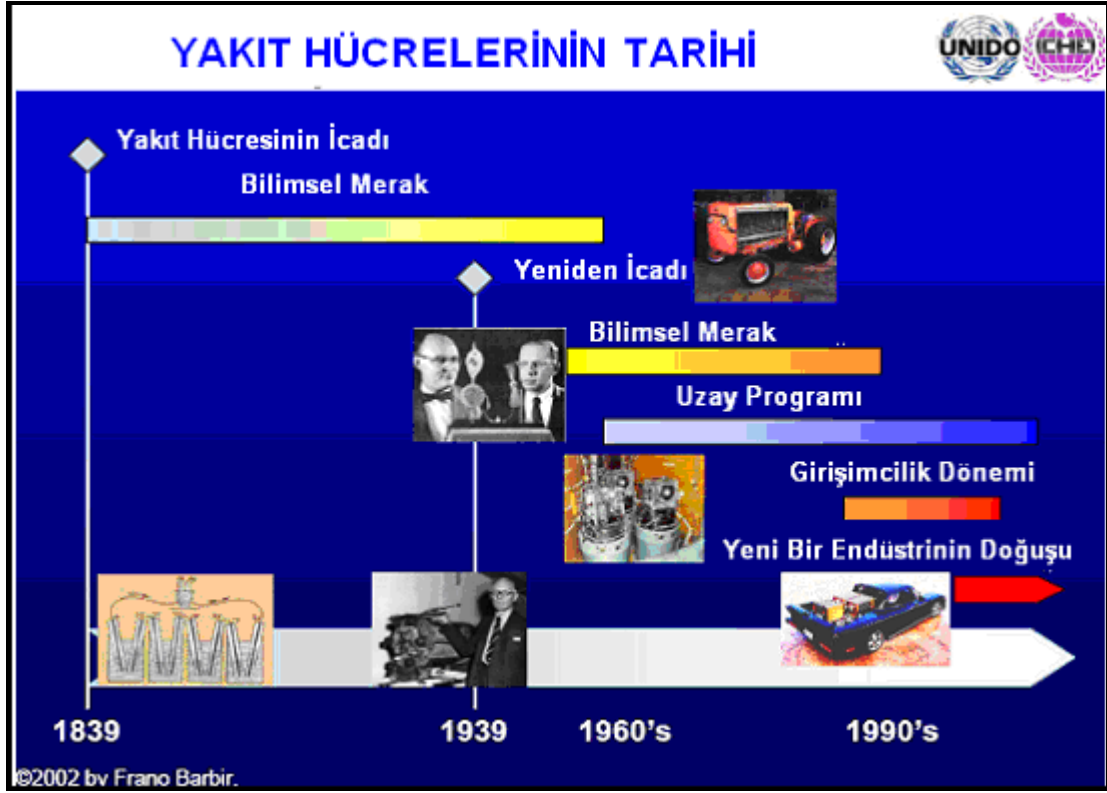
Şekil 1.1. Örnek bir yakıt hücresi [3].

Özellikle son 10 yıldır PEM tipi yakıt hücreleri üzerine çalışmalar hızla artmıştır. Çalışmalarda zaman ve maliyet tasarrufunu sağlamak, karmaşık ve iç içe elektro-kimyasal reaksiyonları, termodinamik olayları, sıvı transfer mekanizmalarını, ısı ve mekanik yüklere göre stress-strain ilişkilerini içeren modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmalar deneysel veriler ile birçoğu karşılaştırılarak doğruluğu kabul edilmiştir. Dolayısıyla, yakıt hücresinin çalışma koşullarından (basınç, sıcaklık, nem oranı, vb.), geometrik yapısına kadar birçok parametrenin gerçekte ne gibi sonuçlara neden olacağı bilgisayar ortamında simülasyonu yapılabilmektedir. Bu durum ise yakıt hücresinin çok daha iyi anlaşılmasını ve araştırma-geliştirme faaliyetlerinin çok daha hızla gitmesini sağlamaktadır. İş akışını üret-test et mantığından mantığından modelle-simülasyonunu yap-üret-test et mantığına kaydırarak hem zamandan, hem de maliyetten önemli tasarrufların yapılmasını sağlamıştır [4,5,6,7].

2. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri, kesintisiz olarak dışarıdan sağlanan yakıta ait enerji ile, reaksiyonların gerçekleşmesi için yine dışarıdan devamlı olarak beslenen oksitleyiciye ait enerjinin elektro kimyasal reaksiyonlar neticesinde elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [8].

Yakıt hücre çalışmaları ilk defa William Grove 1839'da keşfetmiştir. Kullanılan yakıt hücresi prensibi bugün de yaygın biçimde kullanılan hidrojen ve oksijen kullanarak tersine hidroliz reaksiyonu ile elektrik üretimi prensibi üzerine kurulu idi [9]. Kullanılabilir yakıt hücresi çalışmalarına ilk defa Francis T. Bacon 1937 başlamış olup, 1950'lerin sonuna doğru 6 kWlık yakıt hücresi geliştirmeyi başarmıştır. Fakat endüstriyel uygulama anlamında 1960'lı yılların başlarında Amerika'da öncelikle GEMINI Uzay Programı, daha sonra ise APOLLO Uzay Programı'nda kullanılmıştır. 1990'lü yılların başlarına kadar insanların günlük hayatta kullanabileceği yakıt hücresi uygulaması yoktur. İlk olarak günlük hayata dair ilk uygulama 1993 yılında Ballard Power System tarafından sunulan ilk yakıt hücreli otomobildir. Özellikle bu yenilikten sonra bilim adamları ve mühendisler yakıt hücresi üzerinde çalışmalarını hızla artırmışlardır [10].



Şekil 2.1. Yakıt hücresi kısa tarihi [10]

Yakıt hücreleri kabaca anot, katot ve elektrolit görevi gören geçirgen bir zardan meydana gelir. Dışarıdan sürekli olarak sağlanan yakıt ve oksitleyici anot ve katotta reaksiyonlara girerken ürünler hücreyi terk eder. Reaksiyonlar sonucu oluşan iyonlar geçirgen seçici zardan geçerken anot ve katot arasında elektriksel potansiyel fark oluşur. Anot ile katot arasına konulan üreteç üzerinden elektron akımının sağlanması ile elektrik üretilir. Teorik olarak yakıt hücresine reaktantlar dışarıdan beslendiği, ürünlerinde hücreden uzaklaştırıldığı sürece elektrik üretimi devam eder. Yakıt hücrelerinde genellikle hidrojen, alkol veya diğer hidrokarbonlar yakıt olarak kullanılmaktadır [10].

Yakıt hücreleri tipik pillere benziyor görünsede birçok farklı özelliğe sahiptir. Öncelikle tipik piller enerji depolarlar ve çekilecek maksimum enerji depolanmış reaktantların kimyasal enerjisi kadardır. Ayrıca özellikle şarj edilebilir tipik pillere dışarıdan enerji verildiği takdirde, reaksiyonlar tersine yönlendirilerek tekrar enerji depolanabilir. Fakat yakıt hücreleri teorik olarak yakıt ve oksitleyici sürekli beslendiği takdirde sonsuza dek enerji verebilir [11].

2.1 Yakıt Hücrelerinin Çeşitleri

Kullanılan yakıt çeşidine, sıcaklığa, basınç ve nem gibi çalışma şartlarına göre çok çeşitli yakıt hücreleri vardır. Maliyeti düşürme, verimi artırma vb amaçlarla yakıt hücreleri geliştirilmektedir. Yakıt genellikle kullanılan elektrolit tipine göre sınıflandırılmaktadır. Günümüzde kullanılan başlıca yakıt karşılaştırılması çizelge 2.1. verilmiştir.

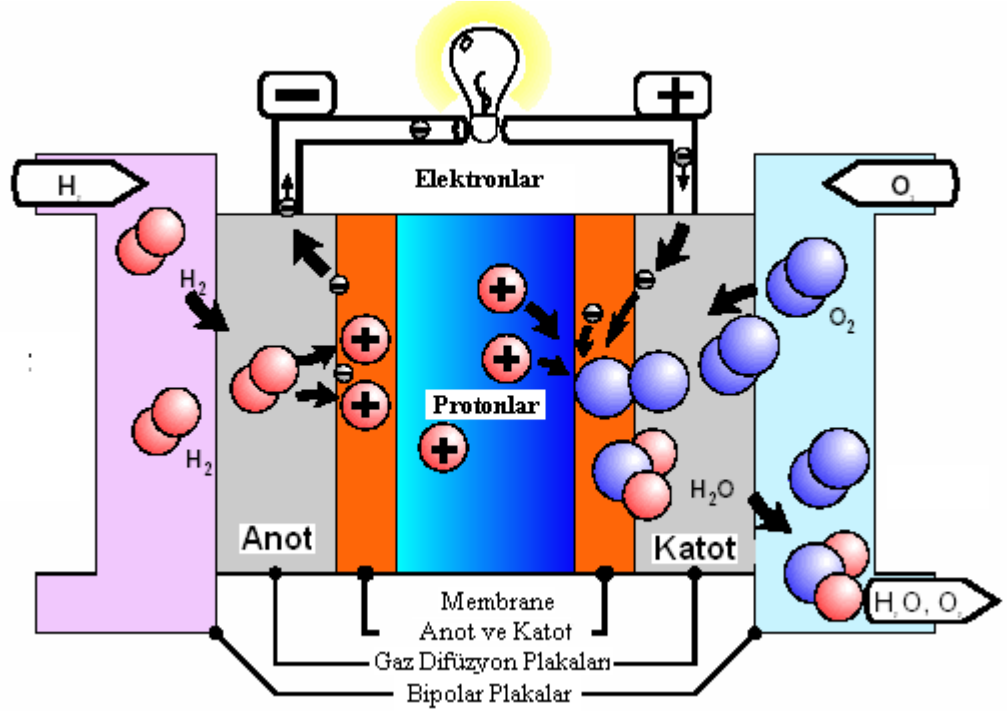
Çizelge 2.1 Yakıt Hücresi Türlerinin Karşılaştırılması [12].

Yakıt Hücresi Türü	Zar	Mobil İyon	Çalışma Sıcaklığı	Çalışma Aralığı	Yakıt	Verim	Avantajları	Dezavantajları	Uygulama Alanları
Proton Geçirgen (Polimer Elektrolit) Zarlı Yakıt Hücresi (PEMFC) [Larminie and Dicks, 2005]	PTFE (Nafyon) (katı)	H ⁺	20–100°C	<1W – 200kW	H ₂	35–50%	- Düşük sıcaklık - Yüksek enerji yoğunluğu, hafif - Hızlı ilk çalışma - Katı Elektrolit	- Çok saf H₂ - Pahalı katalizör	Portatif Sistemler, Jeneratör, Askeri Sistemler
Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC) [Larminie and Dicks, 2005]	Seramikler (YSZ, CeO ₂) (katı)	O ⁻²	500–1000°C	1W – 250kW	H ₂ , CO, CH ₄	45–60%	- Yüksek verim - Yakıt çeşitliliği - Ucuz katalizör - Katı Elektrolit...	- Yüksek sıcaklık – Korozyon - Hücre üretimi zor ve pahalı	Elektrik Santralleri, Orta Ölçekli İşletmeler için Isı ve elektrik, Portatif Sistemler
Alkaline (Bazik) Yakıt Hücresi (AFC) [Larminie and Dicks, 2005]	Bazik Solüsyonlar (NaOH, KOH) (sıvı)	OH ⁻	50–100°C	200W – 10kW	H ₂	35–50%	- Katottaki aktivasyon kaybı düşük - Sıvı elektrolit, yüksek temas	- Çok saf H₂ - Pahalı katalizör	Uzay Araçları
Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC) [Larminie and Dicks, 2005]	Fosforik Asit (H ₃ PO ₄) (sıvı)	H ⁺	190–220°C	10kW – 1MW	H ₂	35–50%	- Saflığı düşük hidrojen kullanılabilir - Sıvı elektrolit, yüksek temas	- Pahalı katalizör - Düşük Enerji yoğunluğu	Elektrik Santralleri, Orta Ölçekli İşletmeler için Isı ve Elektrik
Eriyik Karbonat Yakıt Hücresi (MCFC) [Larminie and Dicks, 2005]	Eriyik Alkali Karbonatlar (Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃) (sıvı)	CO ₃ ⁻²	600–650°C	200kW–10MW	H ₂ , CO	45–60%	- Yüksek verim - Yakıt çeşitliliği - Ucuz katalizör - Sıvı elektrolit, yüksek temas	Yüksek sıcaklık – Korozyon	Elektrik Santralleri

2.2 Proton Değişim Zarlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Çalışma Prensipleri

Bu piller proton değişim zarlı yakıt hücreleri olarak bilindiği gibi katı polimer yakıt pilleri veya polimer elektrolit yakıt pili olarak bilinir. Pem tipi yakıt pilleri en genel anlamda anot, katot ve bunların arasında iyon iletimi sağlamak için gerekli zardan (membran) oluşur. Anot tarafından hidrojen gazı beslenirken, katot tarafından oksitleyici olarak katot gazı beslenir. Anot ve katot arasındaki gazların direk olarak birbiri ile direk temasını aradaki membran engeller. Anot ve katot tarafında oluşan reaksiyonlar sonucu potansiyel fark oluşur. Yakıt piline bağlanan üreteç yardımı ile elektron hareketi sağlanır ve elektrik üretilmiş olur. Oksijen katottan gelen elektronlar ile membrandan gelen hidrojen iyonları ile reaksiyona girerek su oluşturur. Tipik bir yakıt hücresi elemanları şekil 2.2'de verilmiştir [13,14].

Anot ve katota gaz besleme amacıyla elektron iletkenliği yüksek tabakalar kullanılır. Bu plakalara bipolar plakalar da denir. Anot ve katot ile bipolar tabakalar arasında gaz ve elektron geçirgenliği yüksek gaz geçirgen tabakalar bulunur. Bu gaz geçirgen tabakalar reaktantların katalizör yüzeyinde homojen dağılımını sağlar. Ayrıca bu bölgeden gaz sızıntısını önlemek için contalar kullanılır [10].



Şekil 2.2. Örnek bir yakıt hücresi [15].

Elektrolit denince genelde akla ilk gelen anlamı bir materyalin suda pozitif veya negatif iyonlarına ayrılmış şeklidir. Yakıt pilleri için değişik firmalara ait çok çeşitli elektrolitler olmasına karşın en yaygın olarak kullanılan Dupont tarafından üretilen Nafion dur. Genellikle kalınlıkları 50 mikrondan daha incedir. Elektrolit tabaka hidrojen iyonlarını anottan katoda geçmesine izin verirken, elektronların geçmesine izin vermez ve hidrojen yakıtını oksitleyiciden ayrı tutabilme özelliğine sahiptir [10].

PEM lerde yükseltgenme ve indirgenme olmak üzere 2 farklı reaksiyon oluşur: Yükseltgenme reaksiyonunda anottaki gaz halindeki hidrojen iyonize olur ve membran üzerinden katoda geçer. Katotta ise atmosferden sağlanak O_2 hidrojen iyonları ve elektronlar indirgenme reaksiyonu ile su formuna atık ısı çıkarak dönüşür. Bu iki reaksiyonlar yaklaşık $80^\circ C$ de oluşur. Bu reaksiyonları hızlandırmak için platin destekli karbon elektrotlar kullanılır [13].

PEM tipi yakıt hücresi aşağıda verilen avantajlarından dolayı taşınabilir cihazlarda ve taşıtlarda tercih edilmektedir [16].

- Yüksek güç yoğunluğu ve enerji dönüşüm verimi

- Fazla yer kaplamaz
- Düşük çalışma sıcaklığı
- Hafiflik

2.2.1 Hücre Elemanları ve Malzemeleri

PEM tipi yakıt hücrelerinde kullanılan elemanlardan daha çok kullanılan malzemeler ile kullanılma nedenleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

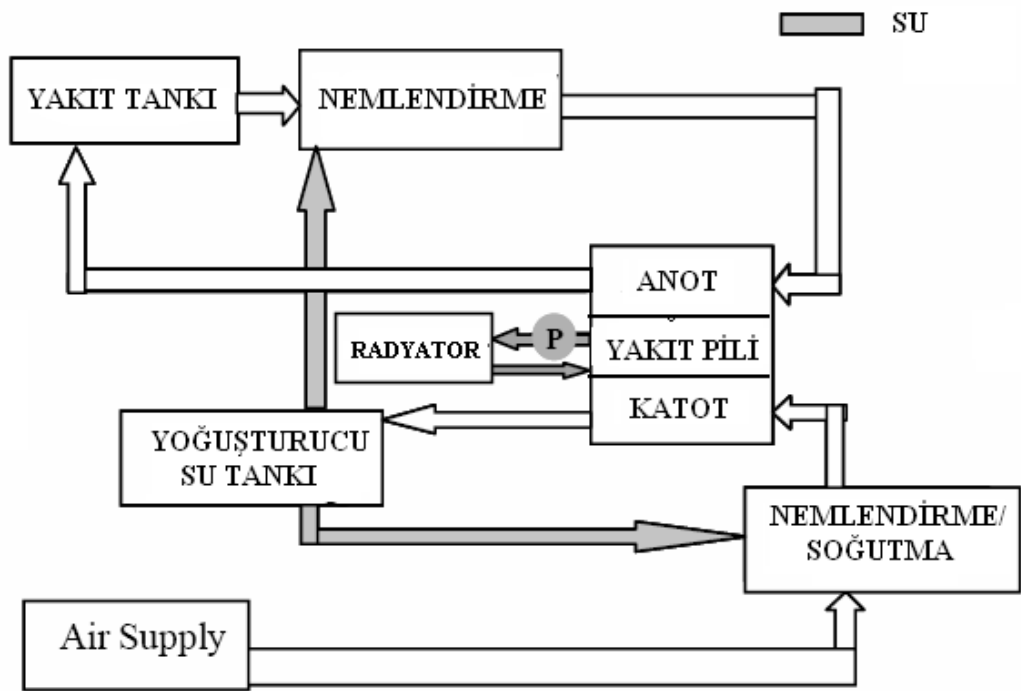
Çizelge 2.2 Yakıt Hücrelerinde Kullanılan Malzemeler [17].

İsim	Malzeme	Seçilme Nedeni
Zar	Nafyon 112	Yüksek H^+ iyonik iletkenliği
Katalizör	Platin	Anot ve katot reaksiyonlarını en iyi aktive eden malzeme
Katalizör Desteği	Karbon	Yüksek yüzey alanı için
Gaz Geçirgen Tabaka (GGT)	Karbon Kâğıdı	Hem gaz geçirgen, hem elektronik iletkenliği yüksek
Çift Kutuplu Tabaka (Akım Toplayıcı Tabaka)	Grafit / Polimer Kompozit Malzeme	Elektronik iletkenliği yüksek, işlenebilir
Çift Kutuplu Tabaka Akış Kanalı Tipi	Çoklu Serpantin (Kıvrıla kıvrıla dönen birkaç kanal)	Homojen gaz dağılımı, tıkanmaya karşı önlem
Conta	Silikon Lastik	Esneklik, sızdırmazlık

2.2.2 Yakıt Hücresi Sistemi Elemanları

Yakıt hücre sistemleri tasarlanırken öncelikle sistemde kullanılacak reaktantlar ile çalışma koşullarına göre malzeme seçimi ve kapasite tanımı yapılmalıdır. Örneğin sisteme verilecek havayı sıkıştırma durumunda muhtemelen yakıcı gaz olan oksijen yanıcı olan yağı tutuşturup yangın çıkaracaktır.

Tipik bir yakıt hücresine ait bir sistem Şekil 2.3'te verilmektedir. Öncelikle yakıt piline sağlanan hidrojen nemlendiriciden geçirilerek yakıt pilinin anot tarafına ulaşır. Hava ise yine şartlandırıcıdan geçerek yakıt pilinin katot tarafına girer. Yakıt pilinde oluşan ısıyı dışarı atmak için ise sistemde soğutma suyu dolaştırılır.

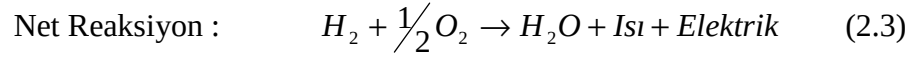
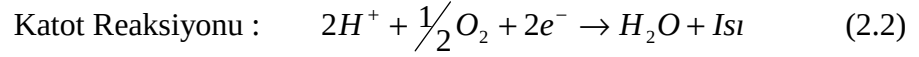
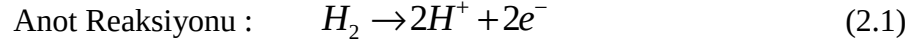


Şekil 2.3. Örnek bir yakıt hücresi sistemi [18].

2.3 Yakıt Hücresinde Elde Edilen Gücün Parametrelere Göre Değişimi

2.3.1 Gerilim Eldesi ve Kayıplar

PEM tipi yakıt hücrelerinde basınç altında gaz kanallarından gelen hidrojen gazı polar plakadan geçerek anot katalizörüne ulaşır. Burada hidrojen elektron ve protonlarına ayrılır. Katot tarafında ise oksijen içeriğine sahip bir gaz gönderilir. Bu gaz gözenekli plakadan geçerek katot katalizörüne ulaşır. Burada anottan gelerek membran üzerinden geçen protonlar ile dış devreden gelen elektronlar reaksiyona girer. Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [6].



Bu reaksiyonlar sonucu oluşan enerjinin bir bölümü elektriğe dönüştürülürken, bir bölümünde ısıya dönüştürülür. Örneğin reaksiyonun $25^\circ C$ gerçekleşmesi durumunda toplam 286.02 kJ/mol miktarında bir enerji açığa çıkar. Bu enerjinin 237.34 kJ/mol elektrik enerjisine dönüştürülürken, 48.68 kJ/mol kadar kısmı ısıya dönüştürülür. Yakıt hücrelerinde kimyasal reaksiyonlar sonucu üretilebilecek maksimum elektrik enerjisine Gibbs serbest enerjisi olarak adlanır. Yakıt hücresinde anot ve katot arasında hiçbir kayıp olmadığı düşünülürse elde edilecek gerilim farkı değeri 1,23 V kadardır. Bu değere açık uç gerilimi denilmektedir ve denklem 2.4 te verilmiştir. [Barbir, 2005].

$$E = \frac{-\Delta G}{n \cdot F} \quad (2.4)$$

Burada, F Faraday, n ise her bir H_2 molekülünde yer alan elektron sayısıdır.

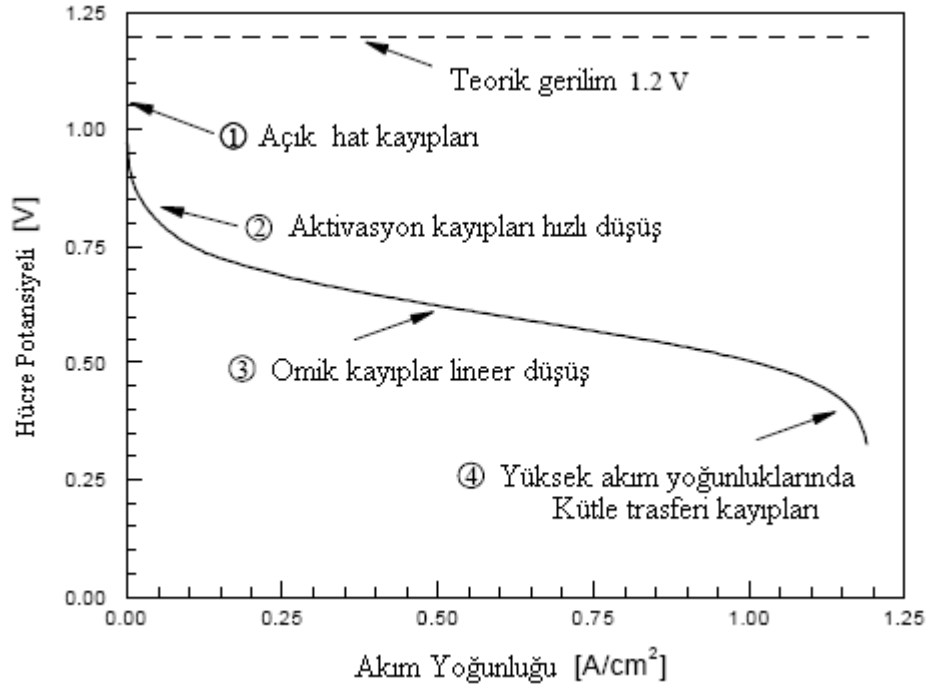
$$E = \frac{-237,340 \text{ Jmol}^{-1}}{2.96,485 \text{ Asmol}^{-1}} = 1,23 \text{ Volt} \quad (2.5)$$

Enerji dönüşüm ekipmanları için verim; kullanılabilir enerjinin toplam enerji girdisine oranı olarak tanımlanır. Yakıt hücrelerinde teorik olarak maksimum verim değeri %83'dir ve ilgili eşitlik denklem 2.6'da verilmiştir. ΔG yakıt hücresinde elektrik enerjisine dönüştürülebilecek maksimum enerji ve daha önce söylendiği gibi değeri 237.34 kJ/mol, ΔH yakıt hücresinde birim reaksiyon sonucu oluşan enerjidir ve değeri 286.02 kJ/mol'dur [10].

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot 100 = \frac{237.34}{286.02} \cdot 100 = \%83 \quad (2.6)$$

Teorik olarak yakıt hücrelerinde hem maksimum açık uç gerilim farkına hem de maksimum verime ulaşmak zordur. Yakıt hücrelerinde birçok faktörün etkilemesi ile verim değeri %50 değerlerine düşer. Açık uç gerilim farkı ise 1 volt değerlerine düşer. Bu açık uç gerilim farkı değerini etkileyen faktörlerin başında sıcaklık ve basınç gelir. Öncelikle oda sıcaklık değerlerinin üzerinde sıcaklık arttıkça elde edilecek değerler düşmektedir. Basıncın artması ile bu değerler artmaktadır. Bu faktörlerin dışında aktivasyon, direnç, kütle transferi ve yakıt sızıntısı kaybı gelir. Bu kayıpların her biri çekilen akım değerlerine göre farklı etki gösterirler. Yakıt hücrelerinde akım ile gerilim arasındaki değişimi gösteren grafiklere polarizasyon eğrileri denir. neden olan faktörlerin başında sıcaklık, basınç ve konsantrasyon değerleri gelir. Sıcaklık oda sıcaklığının üzerine çıkdık.a bu değere ulaşmak zordur. İlk olarak bu değer sıcaklık, basınç ve konsantrasyona bağlı olarak değişir. Sıcaklık oda sıcaklığının üstüne çıktıkça elde edilebilecek değer düşmektedir. Bunun aksine basınç arttıkça elde edilebilecek değer artmaktadır. Bunların dışında bu değeri olumsuz yönde etkileyen birçok farklı kayıp vardır. Bu kayıpların en önemlileri aktivasyon kaybı, direnç kaybı, kütle transferi ve yakıt sızıntısı kaybıdır. Bu kayıplar farklı çalışma koşullarında, özellikle sistemden çekilen akım miktarına bağlı olarak, önem kazanırlar. Gerilim-akım değişimini veren eğrilere polarizasyon eğrileri

denilmektedir. Şekil 2.4.'de tipik bir yakıt hücresine ait polarizasyon eğrisi verilmiştir [10,19].



Şekil 2.4 Tipik bir yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi [20].

2.3.1.1. Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kaybı anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlarda, elektron koparmak ve taşımak, kimyasal bağları koparmak için harcanan enerji kaybıdır. Özellikle düşük akım yoğunluklarında, düşük ve orta sıcaklıklarında çalışan yakıt pillerinde çok büyük kayıp etkisi oluşturur. Özellikle sistemde çekilen akım düşük ise bu kayıp çok önemlidir. Anot ve katotta ayrı ayrı aktivasyon kayıpları vardır. Anottaki aktivasyon kaybı katottakine göre ihmal edilebilir. Aktivasyon kaybı kullanılan elektrota ait malzemeye, iyon-iyon etkileşimine ve iyon-çözücü etkileşimine v.b. birçok faktöre bağlıdır. Aktivasyon kaybını düşürmek için yakıt pilini yüksek sıcaklıkta çalıştırmak ve katalizörün aktif yüzey alanını artırmak gerekir. Aktivasyon kaybı 2.7 numaralı eşitlikte görüldüğü üzere logaritmik olarak azalan miktarlarda akımla beraber artmaktadır. Buradaki i_0 (Dönüm akım yoğunluğu) katalizöre bağlı sabittir [10].

$$\Delta V_{akt} = A \cdot \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.7)$$

2.3.1.2. Direnç Kayıpları

Direnç kaybı iyon ve elektronun geçmiş olduğu yol üzerindeki yakıt hücre elemanları ile bu elemanlar arasındaki temas direncinden kaynaklanan kayıplardır. Bu değer deneysel olarak yada her bir ekipmanın kalınlık ve iletkenlik değerleri bilinerek numerik olarak hesaplanabilir. Ohm kanunu yakıt hücresinde direnç kayıplarını bulmak için kullanılabilir. Denklem 2.8’de görüleceği gibi akım değeri ve direnç değeri ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Burada akım i , direnç ise r ile sembolize edilmiştir[21].

$$\Delta V_{direnç} = i \cdot r \quad (2.8)$$

2.3.1.3. Kütle Transferi Kayıpları

Kütle transferi kayıpları, reaktantların yüksek akım yoğunluklarında ürünler dolayısıyla katalizör yüzeyine ulaşamaması sonucu karşılaşılan kayıpları ifade etmektedir. Anot tarafında oluşan proton zardan geçip geldiği kanala geri dönmediği için anot tarafında bu kayıp pek gözlemlenmez. Genel anlamda kütle transferi kayıpları katot tarafında görülür. Çünkü oksijenin hidrojene göre molekül büyüklüğü dolayısıyla difüzyon hızı, hidrojenin yayınma hızından küçüktür. Katotta oluşan su ve elektro-osmotik sürüklenmeden gelen su oksijen moleküllerinin bir kısmının katalizör yüzeyine gitmesine engel olur. Akımın artması, oluşan su miktarını artıracığından dolayı kütle transferi kayıpları artar. Kütle transferi kayıpları 2.7 numaralı eşitlikte verilmiş olup i_1 sınırlayıcı akımı göstermektedir [10].

$$\Delta V_{kt} = -\frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \left(1 - \frac{1}{i_l} \right) \quad (2.9)$$

2.3.1.4. Yakıt Sızmasından Doğan Kayıplar

Yakıt sızması dolayısıyla oluşan kayıplara yakıt sızıntı kaybı denilir. Yakıt sızıntısı anota gelen hidrojenin reaksiyona girmeyip, hücre elemanlarının gözenekli yapıda olması sayesinde katot gaz kanalına geçmesi olayıdır. Hidrojen iyonize olmadığından ve herhangi bir e^- anottan katota geçmediğinden dolayı sızan bu gazlardan elektrik elde edilmez ve katot gaz kanallarından harcanmadan dışarı atılır. Yakıt hücrelerinde elde edilen açık uç geriliminin teorik gerilimden çok düşük olması durumunda yakıt sızıntısı kaybı akla gelmelidir. Yakıt sızıntısından dolayı oluşan yakıt 2.10 numaralı eşitlikte aktivasyon kaybı ile beraber verilmiştir. Eşitlikteki i_n zardan geçen gazdan elde edilebilecek akımdır [10].

$$\Delta V_{yakit} = -A \cdot \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) \quad (2.10)$$

2.3.1.5 Hücre Potansiyeli

Tük kayıplar bir araya getirilirse anot ve katot arasındaki gerilim farkı 2.11 numaralı eşitlik ile hesaplanabilir.

$$V = E - i \cdot r - A \cdot \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (2.9)$$

Burada E açık uç gerilimi, i çekilen akım, r direnç, i_n yakıt sızıntısından elde edilebilecek akım, A ve i_0 katalizöre bağlı sabitler, R gaz sabiti, T sıcaklık, F Faraday sayısı, i_l sınırlayıcı akımdır.

2.3.2 Çalışma Koşullarının Performansa Etkisi

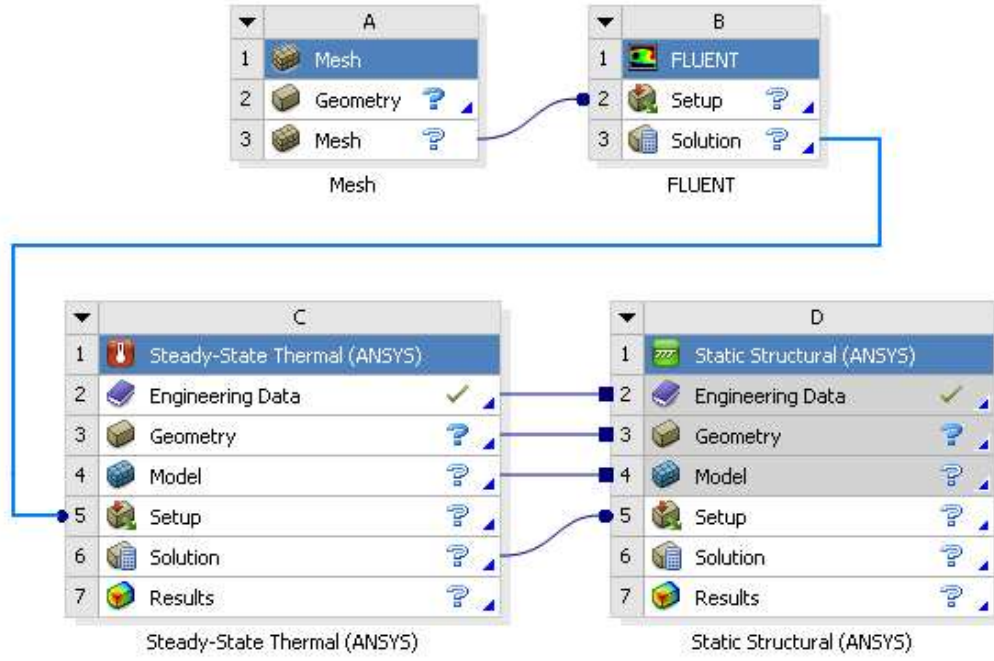
Yakıt hücrelerinde çalışma gazların basıncı, sıcaklığı, nemliliği ve stokiyometrik oranları yakıt hücresinin performansına etkide bulunmaktadır. Reaktantların basıncının artması hücre performansını artırırken gerekli güç ihtiyacı, parazitik güç ve hücre sisteminin daha büyük olmasına sebebiyet verir. Sıcaklığın artması katalizör aktivitelerini, membranın iletkenliğini ve elektro-kimyasal reaksiyon hızlarını artırdığı için hücre performansını artırır. Anotta hidrojen kullanıldığı, hidrojenin difüze edebilme kabiliyeti çok yüksek olduğu için anot stiyometrik oranının yükseltilmesi performansı çok değiştirmez. Bunun yanında katottaki stiyometrik oranın artması oksijen miktarını artırdığı ve fazladan oluşan suyu dışarı attığı için hücre performansını artırır. Doymuş nem oranında gönderilen gaz, sistemin nemini kendi çekmediğinde zarın iyonik iletkenliğinde bir azalma gerçekleşmez. Fakat kuru gaz sistemin nemini çekerek membranı kurutur. Bu durum ise yakıt hücresinin performansını azaltır

3. PEM TİPİ YAKIT HÜCRE MODELİ

3.1 Giriş

PEM tipi yakıt hücrelerinde çalışma koşulları yakıt hücresinin performansını önemli oranda etkiler. Dolayısıyla stabil yakıt hücre performansı için optimum çalışma şartları gereklidir. Yakıt hücre modelleri PEM tipi yakıt hücrelerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu modeller elektro-kimyasal reaksiyonları, termodinamik olayları, sıvı transfer mekanizmalarını, ısı ve mekanik yüklere göre stress-strain ilişkilerini içerir. Özellikle Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (CFD) ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEM) programları kullanılarak son yıllarda çokça modeller geliştirilmiştir. Tüm bu yazılımlarla ile geliştirilmiş modeller, yakıt hücre üretimindeki iş akışını üret-test et mantığından modelle-simülasyonunu yap-üret-test et mantığına kaydırarak hem zamandan, hem de maliyetten önemli tasarrufların yapılmasını sağlamıştır [22].

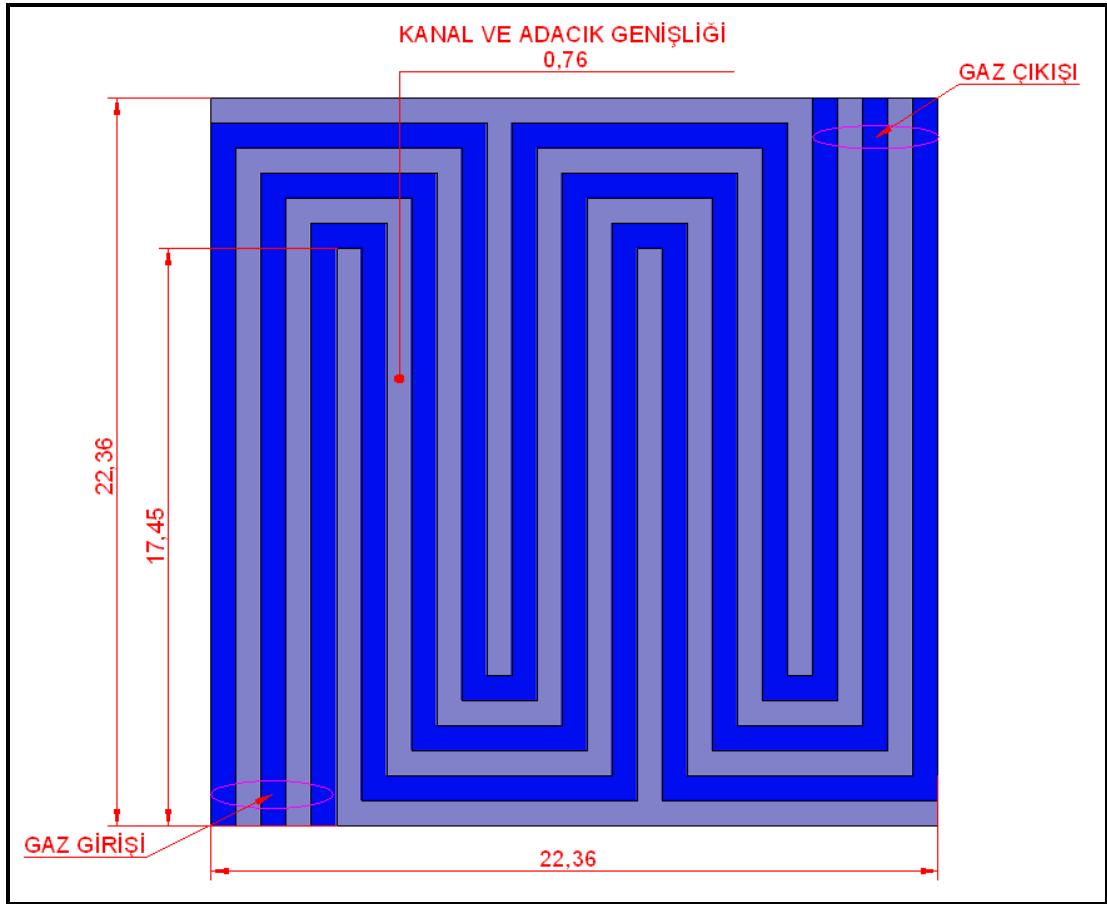
Bu tez kapsamında hazırlanan modelde yakıt hücre modeli toplam dokuz ayrı parça halinde modellenip montajı yapılmıştır. Bu parçalar anot ve katot akım toplayıcıları, gaz kanalları, gaz dağıtıcı plakalar ve membrandan oluşmaktadır. Modelleme için katı modelleme programları Solid Edge 18 ve Ansys Design Modeler programları kullanılmıştır. Analiz için ise Fluent 12 Fuel Cell, Ansys 12 Mekanik ve Ansys 12 Isı Modülü kullanılmıştır. Elektro-kimyasal reaksiyonlar, termodinamik olaylar ve sıvı transfer mekanizmaları öncelikle Fluent 12 programı kullanılarak çözülmüştür. Bilgisayar ortamındaki I-V eğrisi deneysel olarak bulunan I-V eğrisi ile karşılaştırılarak matematiksel modelin doğruluğu test edilmiştir. Burada basınç, sıcaklık, havanın stiyometrik oranının hücre performansına etkileri araştırılmıştır. Daha sonra Fluent programındaki ısı yükler Ansys Isı Modülü'ne aktararak ısı dağılımı mekanik modülde kullanılabilecekhale dönüştürülmüştür. Buradaki ısı yükleri Ansys 12 Mekanik modülüne aktarılmış ve sıkma kuvveti uygulanarak yakıt hücresindeki gerilme dağılımı bulunmuştur. Şekil 3.1 analiz için kullanılan için kullanılan akış şemasını göstermektedir.



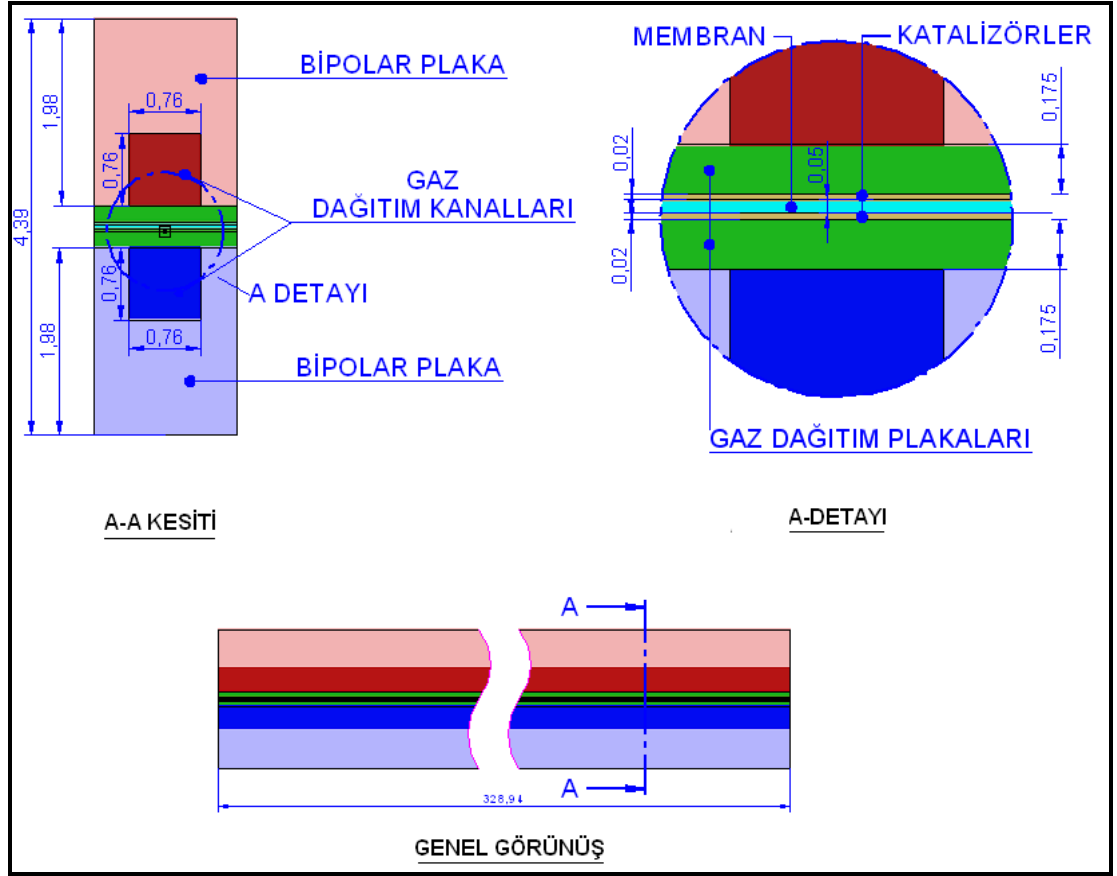
Şekil 3.1 Yapılan modelleme için analiz akış şeması

3.2 Geometri

Analiz için kullanılacak katı model Solid Edge 18 ve Ansys Design Modeler kullanılarak hazırlanmıştır. Yakıt hücresi, eleman sayısının fazla olması, çözüm için sürenin uzayacak olması vb. nedenlerden dolayı, yakıt hücresi düz bir kanal şeklinde modellenmiştir. Böylece hem zamandan tasarruf sağlanmış, hem de birim alanda çok fazla eleman yerleştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.2’ de orijinal modele ait bipolar plaka, Şekil 3.3’ de ise düz bir kanal halinde modellenmiş yakıt hücre modeli görülmektedir.



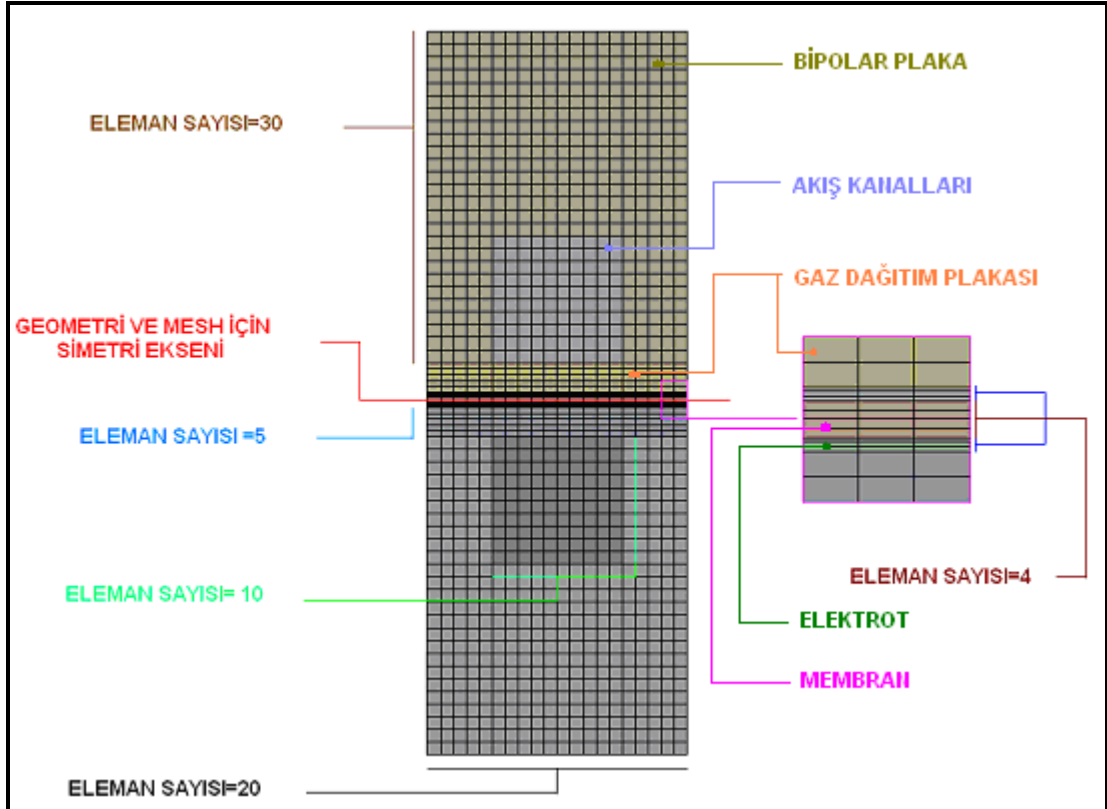
Şekil 3.2 Yakıt hücresine ait bipolar plaka genel görünüşü



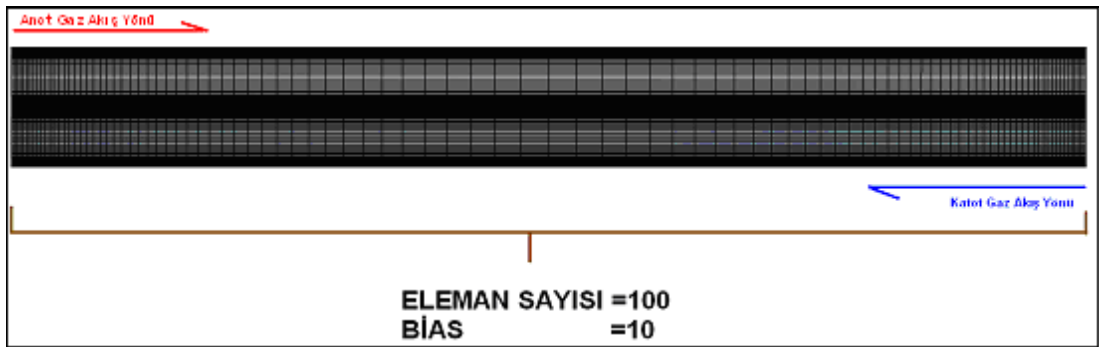
Şekil 3.3 Analiz için hazırlanmış yakıt hücre modeli kompleksi ve detayları

3.3 Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modelini oluşturmak için Ansys Workbench 12 Meshing modülü kullanılmıştır. Özellikle sınır tabakalardaki sonuçları daha iyi gözlemlemek gaz giriş ve çıkışlarında daha sık elemanlar kullanılmıştır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 modele ait eleman yapısını göstermektedir.



Şekil 3.4 Yakıt hücresi kesitine ait sonlu elemanlar yapısı



Şekil 3.5 Yakıt hücresi boyuna sonlu elemanlar yapısı

3.4 Kabuller

Analiz yapılırken aşağıdaki kabuller ile çizelge 3.1 ve 3.2 deki özellikler göz önüne alınmıştır.

- Gazlar için ideal gaz kanunları uygulanmıştır.
- Akışın laminar olduğu kabul edilmiştir.
- Akım toplayıcıları, gaz kanalları, katalizörler ve membran izotropik kabul edilmiştir.
- Membranın tamamen nemli olduğu ve protonik iletkenliğinin sabit olduğu kabul edilmiştir.
- Membranın gaz geçirmez olduğu ve hiçbir şekilde reaktantların diğer gaz kanalına geçmediği varsayılmıştır.
- Yakıt hücre elemanları arasında relatif hareket olmadığı varsayılmıştır.

ELEKTRO-KİMYASAL PARAMETRELER				
	Sembol	Değeri	Birim	Ref
Açık hat gerilimi	$V_{aç}$	0,963	<i>volt</i>	
Anottaki hacimsel transfer akımı	R_{anot}	1,5E+09	A / m^3	[23]
Anot referans konsantrasyonu	$c_{H_2}^{ref}$	1	$kmol / m^3$	[23]
Anot konsantrasyon üsteli	γ_{anot}	0,5	-	[23]
Anot transfer katsayısı	α_{anot}	1	-	[23]
Katot hacimsel transfer akımı	R_{katot}	4E+06	A / m^3	[23]
Katot referans konsantrasyonu	$c_{O_2}^{ref}$	1	$kmol / m^3$	[22]
Katot konsantrasyon üsteli	γ_{katot}	1	-	[23]
Katot transfer katsayısı	α_{katot}	1,25	-	[22]
Temas Direnci	R_c	2,5E-6	$ohm - m^2$	

Çizelge 3.1 Elektro-kimyasal parametreler

MALZEME ÖZELLİKLERİ				
	Sembol	Değeri	Birim	Ref
GAZ DİFÜZYON PLAKASI				
				[23]
Gözeneklilik	ε	0,5		[23]
Geçirgenlik	κ	1E-12	m^2	[23]
Elektrik iletkenliği	S	1000	$1/ohm-m$	[23]
Isıl iletkenliği	k	2,08	W/mK	[23]
Genleşme katsayısı	δ	-0,8E-06	$1/K$	[24]
Poisson oranı	ψ	0,25	-	[24]
Elastisite modülü	ξ	30,94	MPa	[25]
KATALİZÖR TABAKASI				
Gözeneklilik	ε	0,5		[23]
Geçirgenlik	κ	1E-12	m^2	[23]
Elektrik iletkenliği	S	1000	$1/ohm-m$	[23]
Isıl iletkenliği	k	2,08	W/mK	[23]
Genleşme katsayısı	δ	-0,8E-06	$1/K$	[24]
Poisson oranı	ψ	0,25	-	[24]
Elastisite modülü	ξ	10000	MPa	[24]
Hacim Yüzey Oranı	h	2E+05	$\frac{1}{m}$	[23]
BİPOLAR PLAKA				
Elastisite modülü	ξ	10000	MPa	[24]
Elektrik iletkenliği	S	1000	$1/ohm-m$	[24]
Isıl iletkenliği	k	55	W/mK	[26]
Genleşme katsayısı	δ	5E-06	$1/K$	[24]
Poisson oranı	ψ	0,25	-	[24]
MEMBRAN				
Gözeneklilik	ε	0,5		[23]
Geçirgenlik	κ	1E-08	m^2	[23]
Kuru yoğunluk	ρ_m	1980	kg/m^3	[23]
Isıl iletkenliği	k	2	W/mK	[23]

Genleşme katsayısı	δ	123E-06	$1/K$	[24]
Poisson oranı	ψ	0,25	-	[24]
Elastisite modülü	ξ	249	MPa	[24]
Protonik iletkenlik katsayısı	β	2	-	[23]
Protonik iletkenlik üsteli	ω	1	-	[23]

Çizelge 3.2 Malzeme özellikleri

3.5 Matematiksel Model

Matematiksel modelde iki elektriksel alan çözülüyor. İlki membran ile katalizör arasında, diğeri ise katalizör ile gaz dağıtım plakaları ve akım toplayıcı arasındadır. Daha sonra katalizörlerdeki reaksiyon oranları girdilere göre hesaplanır. Verilen voltaj değerine göre akım yoğunluğu bulunur.

3.5.1 Elektro-Kimyasal Model

Elektro kimsayal olayların merkezi anot ve katotta yer alan elektro-kimyasal reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar katı fazdaki potansiyel ile membran arasındaki potansiyel farktan kaynaklanan gerilme kayıplarından oluşur. Denklem 3.1 elektronun katı yakıt hücre elemanları üzerinden akması durumundaki potansiyeli, denklem 3.2 ise protonun taşınması sürecindeki potansiyeli vermektedir.

$$\nabla \cdot (\sigma_{katı} \nabla \phi_{katı}) + R_{katı} = 0 \quad (3.1.)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_{mea} \nabla \phi_{mea}) + R_{mea} = 0 \quad (3.2.)$$

Hacimsel transfer akımlarının anot ve katottaki değerleri 3.3 ve 3.4 numaralı denklemler ile verilen Butler-Volmer fonksiyonu yardımıyla bulunur.

$$R_{anot} = \left(\zeta_{anot} \cdot j_{anot}^{ref} \right) \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{anot}} \left(e^{\alpha_{anot} F \eta_{anot} / RT} - e^{\alpha_{katot} F \eta_{anot} / RT} \right) \quad (3.3.)$$

$$R_{katot} = \left(\zeta_{katot} \cdot j_{katot}^{ref} \right) \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{katot}} \left(e^{\alpha_{anot} F \eta_{katot} / RT} - e^{\alpha_{katot} F \eta_{katot} / RT} \right) \quad (3.4.)$$

3.5.2 Akım ve Kütlenin Korunumu

Kütle korunumu ile alakalı eşitlikler denklem 3.5, 3.6, 3.7' de verilmiştir.

$$S_{H_2} = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} \cdot R_{anot} < 0 \quad (3.5.)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} \cdot R_{katot} < 0 \quad (3.6.)$$

$$S_{HO_2} = -\frac{M_{w,HO_2}}{4F} \cdot R_{katot} < 0 \quad (3.7.)$$

Toplam elektrik akımının anot ve katotta üretildiğinden, anot ve katotta üretilen akım değerlerinin aynı olması gerekir. Dolayısıyla akımın korunumu için 3.8. numaralı eşitlik yazılabilir.

$$\int_{anot} R_{anot} \cdot dV = \int_{katot} R_{katot} \cdot dV \quad (3.8.)$$

3.5.3 Isı Kaynakları

Bazı tersinmez olayların etkisi ile yakıt hücre proseslerinde reaktantların kimyasal enerjisinin tamamı elektrik enerjine aktarılamaz. Aşağıda toplam enerji denklemi verilmiştir.

$$S_h = \Delta H - R_{anot,katot} \cdot \eta_{anot,katot} + i^2 r_{ohm} + h_L \quad (3.9.)$$

Burada ΔH elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucunda net entalpi değişimini, $R_{anot,katot}\eta_{anot,katot}$ anottaki ve katottaki gerilim kayıpları ve transger akımın sonucu, $i^2 r_{ohm}$ ise omik direnç sonrası oluşan ısıyı, h_L ise suyun yoğuşma/buharlaşma sonucu entalpi değişimini ifade eder.

3.5.4 Bazı Katsayılar ve Özellikler

3.5.4.1 Gaz Fazında Maddelerin Difüzyon Özelliği

Gaz fazındaki malzemelere ait difüzyon özelliğinin bulunması denklem (3.11) ile ifade edilmiştir.

$$D_i = \varepsilon^{1.5} (1-s)^{r_s} D_i^o \left(\frac{p_o}{p} \right)^{\gamma_p} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{\gamma_t} \quad (3.10.)$$

D_i^o referans basınç ve sıcaklıkta i'ninci terime ait kütle difüzyon özelliğini ifade etmektedir. Buradaki referans katsayılar $(p_o, T_o, \gamma_p, \gamma_t, r_s)$ için $(101325 \text{ N/m}^2, 300 \text{ K}, 1, 1.5, 2.5)$ değerleridir.

3.5.4.2 Elektrot İyonik İletkenliği

Elektrolit faz iletkenliği denklem 3.12 faz iletkenliği 3.12 denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_{mea} = \beta (0.514\lambda - 0.326)^w e^{1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.11.)$$

λ su içeriğini ifade etmektedir.

3.5.4.3 Osmotik Sürüklenme Katsayısı

Osmotik sürüklenme katsayısı 3.13 nolu denklem ile ifade edilmektedir.

$$n_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \quad (3.12.)$$

3.5.4.4 Tersine Difüzyon Akısı

Tersin difüzyon akısı 3.14 nolu denklem ile ifade edilmektedir.

$$j_w^{diff} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{h2o} D_l \nabla \lambda \quad (3.13.)$$

ρ_m nem içermeyen membranın yoğunluğunu, M_m ise yine nem içermeyen membran ağırlığıdır.

3.5.4.5 Membran Su Difüzyon Özelliği

Membran su difüzyon özelliği denklem 3.15'te verilmiştir.

$$D_l = f(\lambda) e^{2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.14.)$$

3.5.4.6 Su İçeriği

λ simgesi ile ifade edilen su içeriği 3.16 nolu denklem ile ifade edilmiştir.

$$\lambda = 0,043 + 17,18.a - 39,85a^2 + 36a^3 (a < 1) \quad (3.15.)$$

$$\lambda = 14 + 1,4(a-1)(a > 1)$$

Buradaki a su aktivitesi olarak verilmiş olup denklem 3.17 ile tanımlanmıştır.

$$a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (3.16.)$$

3.5.4.7 Su Buhar Basıncı

Su buhar basıncı buhar molar oran ile lokal basınç kullanılarak hesaplanır.

$$P_{wv} = x_{H_2O} P \quad (3.17.)$$

3.5.4.8 Doygunluk Basıncı

Doygunluk basıncı 3.19 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \log P_{doyg} = & -2,1794 + 0,02953(T - 273,17) - \\ & 9,1837 \times 10^{-5}(T - 273,17)^2 + \\ & 1,4454 \times 10^{-9}(T - 273,17)^3 + \end{aligned} \quad (3.18.)$$

3.5.5 Yakıt Hücresindeki Gerilmeler

Gerilme hesabında operasyon esnasında oluşan ısı yükleri ile yakıt hücresini sıkırmak için kullanılan kuvvet göz önüne alınmıştır. Bileşik gerilme analizi kriteri olarak von Mises gerilme kriteri kabul edilmiş olup bileşik gerilme değeri 3.19 numaralı denklemde verilmiştir.

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.19.)$$

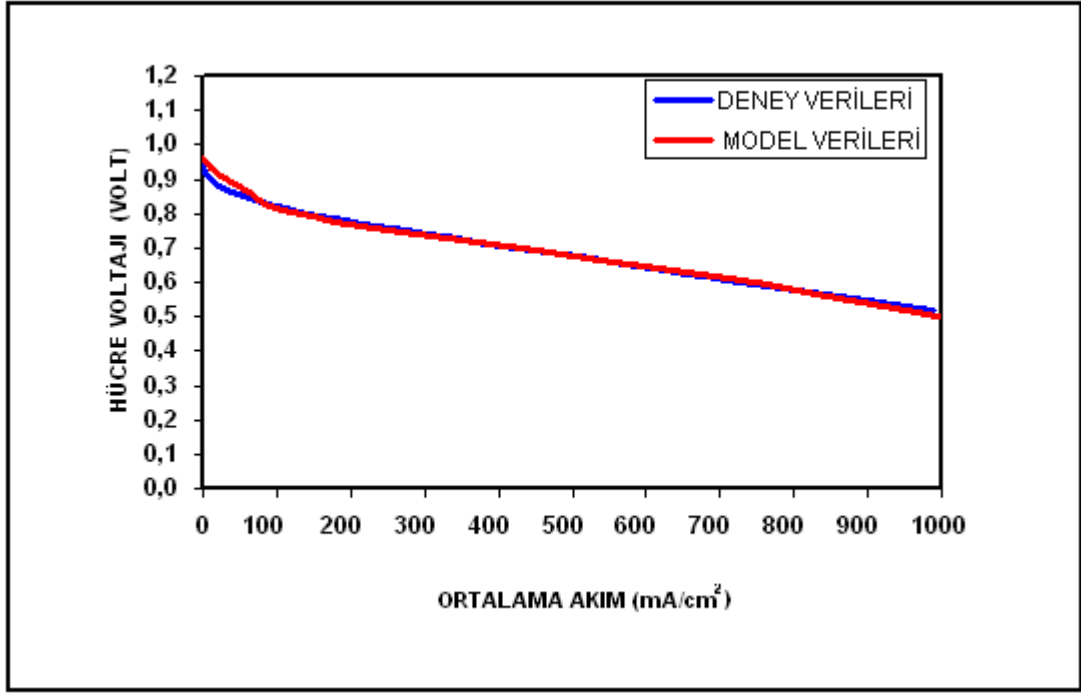
4. YAKIT HÜCRE MODELİ ANALİZ SONUÇLARI

4.1 Giriş

Bu bölümde öncelikle yakıt hücresi modelinin laboratuvar ortamında alınan veriler ile doğrulanması irdelenecektir. Daha sonra yapılan analizler doğrultusunda hücre içindeki akım yoğunluğu, reaktantların kütle oranları, yakıt hücresine ait ısı dağılımları ile sıkma kuvveti ve ısı yükleri altındaki gerilme dağılımlarını gösteren bilgiler verilecektir.

4.2 Matematiksel Modelin Doğrulanması

Yakıt hücre çalışma parametrelerinin hücre performansına etkileri ile ısı yük ve sıkma etkisi altında yakıt hücresi içerisindeki gerilme dağılımı çalışmalarına geçmeden önce matematiksel modelin doğrulanması gerekmektedir. Bu amaçla G.Y.T.E. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında yakıt hücresi polarizasyon eğrisinin bulunmasına yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde reaktant olarak hidrojen ve oksijen sabit debi değerinde yakıt hücresine gönderilmiştir. Daha sonra aynı çalışma koşulları altında yapılan analizler ile deneyler sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılmış olup karşılaştırma grafiği şekil 4.1. de gösterilmiştir.



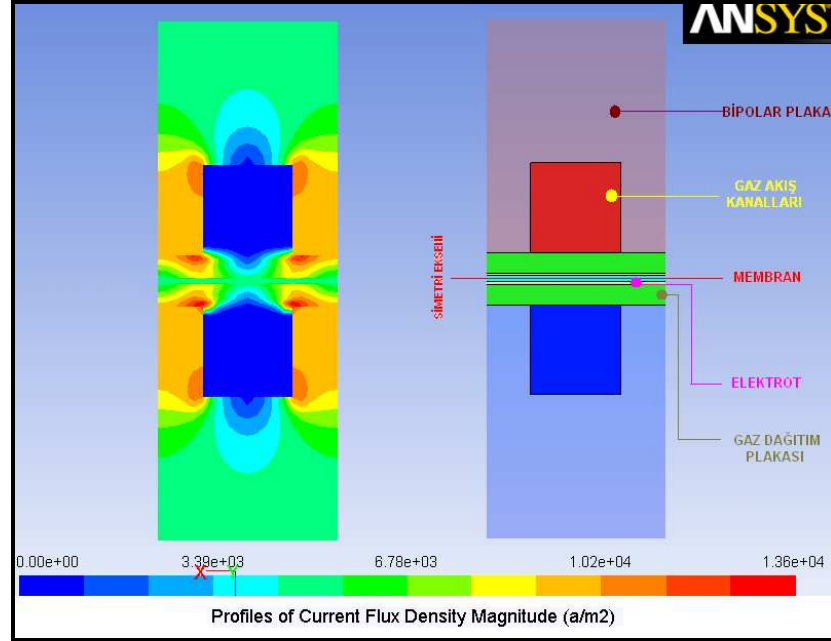
Şekil 4.1 Deneysel veriler ile modele ait polarizasyon eğrisi

Deneysel veriler ile modele ait polarizasyon eğrisinin karşılaştırılmasından da görüleceği üzere benzeşim büyük oranda sağlanmıştır. Eğride bazı bölgelerdeki değerlerin tam olarak örtüşmemesi modellemede kullanılan katsayılar, kalınlıklardaki olabilecek farklılıklar, modellemede yoğunlaşmanın hesaba katılmaması gibi nedenlerden kaynaklanmıştır. Yinede kullanılan matematiksel model benzeşim kurmak için yeterlidir.

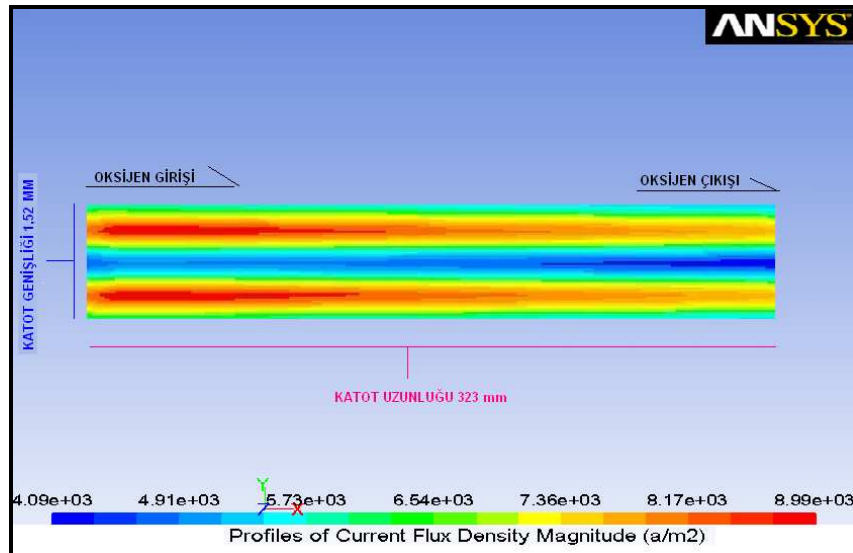
4.3 Hücre içerisindeki Akım Yoğunluğu, Reaktant Kütle Oranları, Isı Dağılımına Ait Şekiller

Şekil 4.2 de $S_{H_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa çalışma koşullarında anot girişinden 60 mm ilerideki kesitte akım yoğunluğuna ait şekil verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere anottan ağırlan elektronların yoğunluğu bipolar plaka kanal açıklıklarının köşelerinde fazladır. Çünkü elektronlar en yakın yoldan devreyi tamamlamak istemektedir. En yakın yolda bipolar plakanın kanal açıklıklarının köşelerinden geçer. Kanal kesiti üzerinde ise elektronların transferi için

gerekli alan geniş olduğu için buralarda akım yoğunlukları daha azdır. Gaz kanallarının iki yan bölgelerinde ise yine elektron transferi için alan dar olduğu için akım yoğunluğu buralarda nisbeten fazladır.



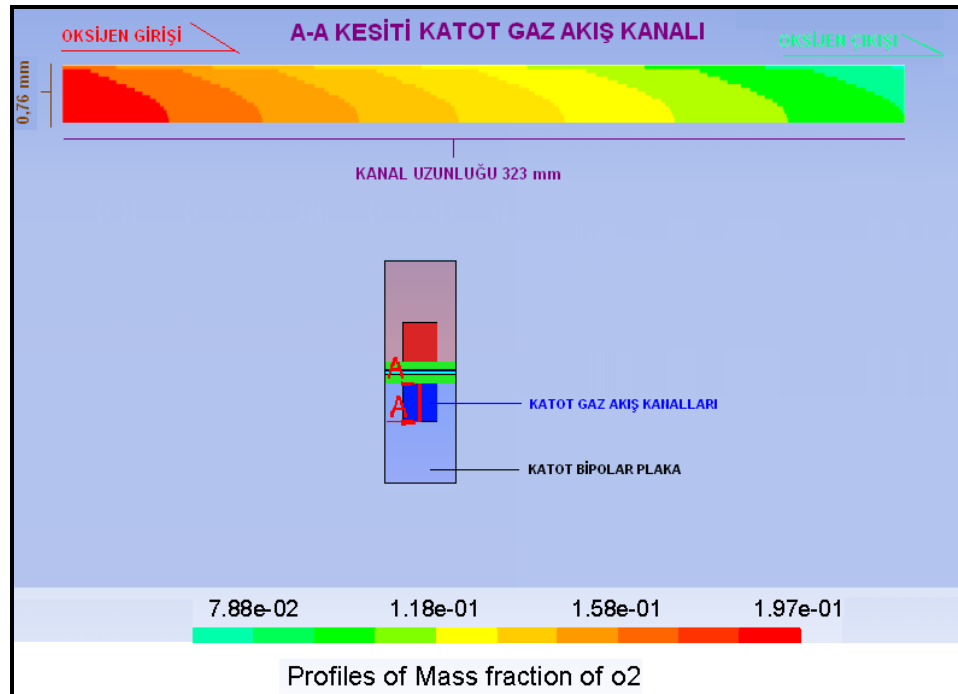
Şekil 4.2 Yakıt hücresinin bir kesitine ait akım yoğunluğu ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa)



Şekil 4.3 Katot üzerindeki ait akım yoğunluğu ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa)

Şekil 4.3 de yine $S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa çalışma koşullarında yakıt hücresinin boyunca katot üzerindeki akım yoğunluğu görülmektedir. Katot giriş tarafındaki akım yoğunluğunun yüksek olmasının sebebi bu bölge oksijen bakımından en zengin bölge olmasıdır.

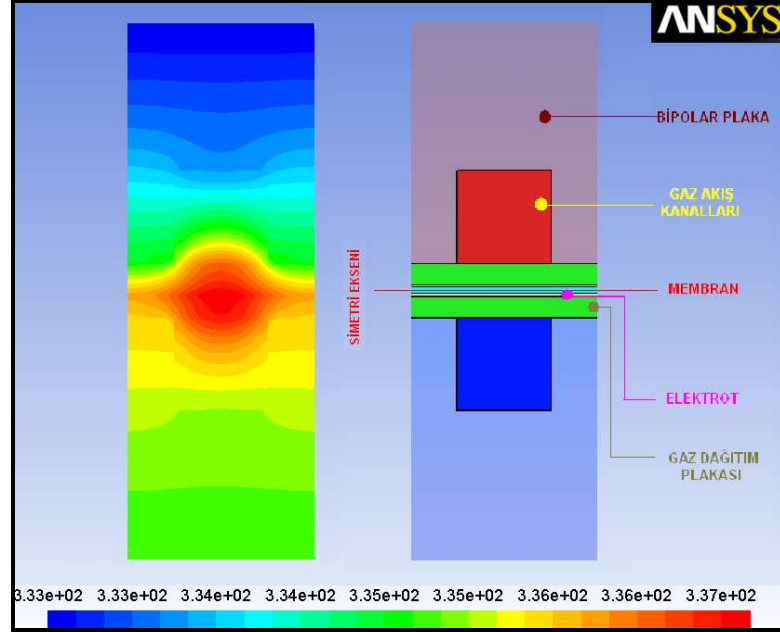
Şekil 4.4 de yine $S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa çalışma koşullarında yakıt hücresinin boydan kesitinde, oksijene ait kütle oranları gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği katot çıkışına doğru reaksiyonlarda oksijenin harcanması neticesinde oksijene ait kütle oranı azalmaktadır.



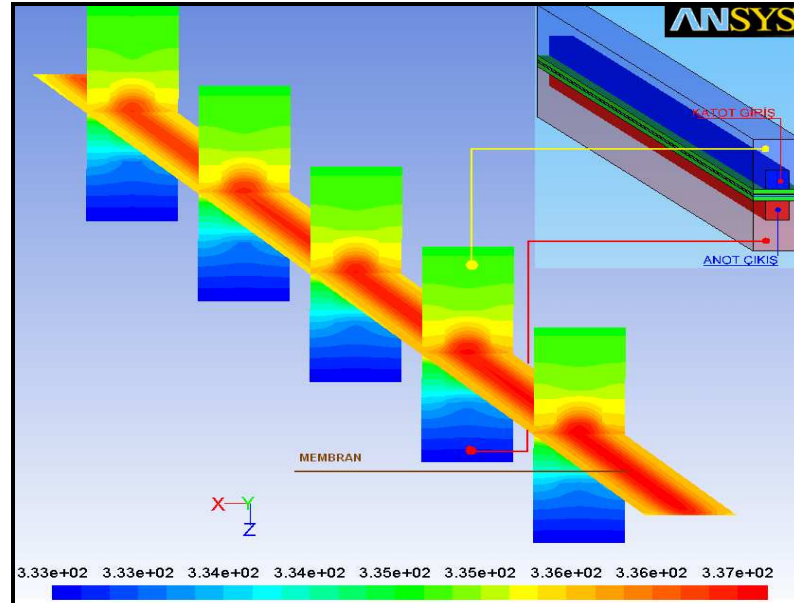
Şekil 4.4 Yakıt hücresinin boydan kesitine ait oksijen kütle oranları ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa)

Şekil 4.5 de $S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa çalışma koşullarında yakıt hücresinin anot başlangıcından 60 mm sonraki dik kesitte, Şekil 4.6 da ise yine anot tarafından 60, 120, 180, 240, 300 mm sonra dik kesitteki ve yakıt hücresinin boylamasına membran üzerindeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere katotta oluşan indirgenme reaksiyonu neticesinde ısı açığı çıktığı için bu bölgede sıcaklık değerleri artış göstermiştir. Sıcaklık dağılımı membran orta

noktasındaki dik eksene göre simetrik, yatay eksene göre ise asimetrik olup ortalama sıcaklık değerleri katot bölgesine ait tarafta daha yüksektir.



Şekil 4.5 Yakıt hücresinin bir kesitine ait sıcaklık dağılımı-1 ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa)



Şekil 4.6 Yakıt hücresinin muhtelif kesitlerine ait sıcaklık dağılımı ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa)

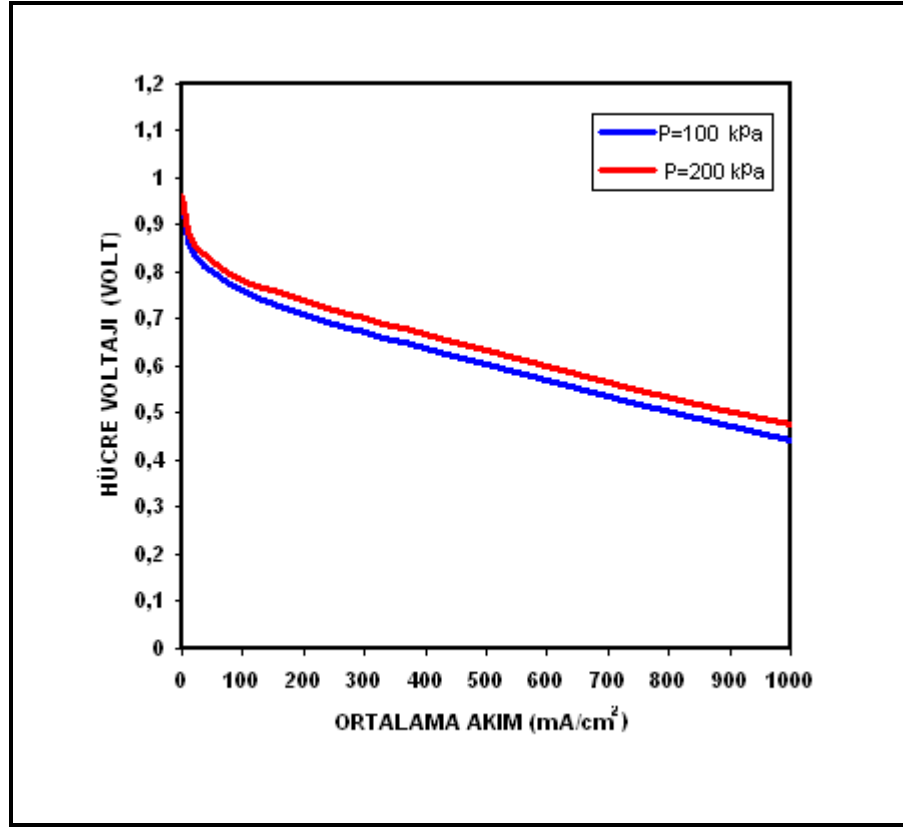
4.4 Çalışma Parametrelerinin Yakıt Hücre Performansına Etkilerinin İncelenmesi

Daha önceli bölümlerde de bahsedildiği gibi yakıt hücresinin performansını etkileyen basınç, sıcaklık, nemlilik, reaktantların stiyometrik oranları gibi birçok parametre vardır. Bu tez kapsamında sırası ile basınç, sıcaklık, ve oksijene ait stiyometrik oranın yakıt hücresinin performansına etkileri incelenmiştir. Bu incelemelerde katotta reaktant olarak hava kullanılmıştır.

4.4.1 Basıncın Hücre Performansına Etkisi

Şekil 4.7 de $S_{H_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $T = 333,15$ K çalışma şartlarında, $P = 100$ kPa ve $P = 200$ olmak üzere iki farklı basınç değerlerinde polarizasyon eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere basıncın değişmesi hücre performansını büyük oranda etkiler. Bunun nedeni yüksek basınç değerindeki artış, reaktantların konsantrasyon oranlarını artırır. Konsantrasyondaki bu artış oksijenin gaz dağıtım plakası üzerine daha iyi nüfuz edebilmesini, neticesinde katalizörlere kütle transferinin artmasını sağlar. Basıncın yüksek olması oksijen ve hidrojenin katalizörlere daha kolay ulaşmasını sağlar. Bu durum ise kütle transferinden kaynaklanan kayıpları azaltır.

Fakat basıncın yüksek olması diğer yandan parasitik güç, kompresör için yüksek güç ve yakıt hücre sisteminin büyük olması gibi birçok dezavantajı beraberinde getirir [22].

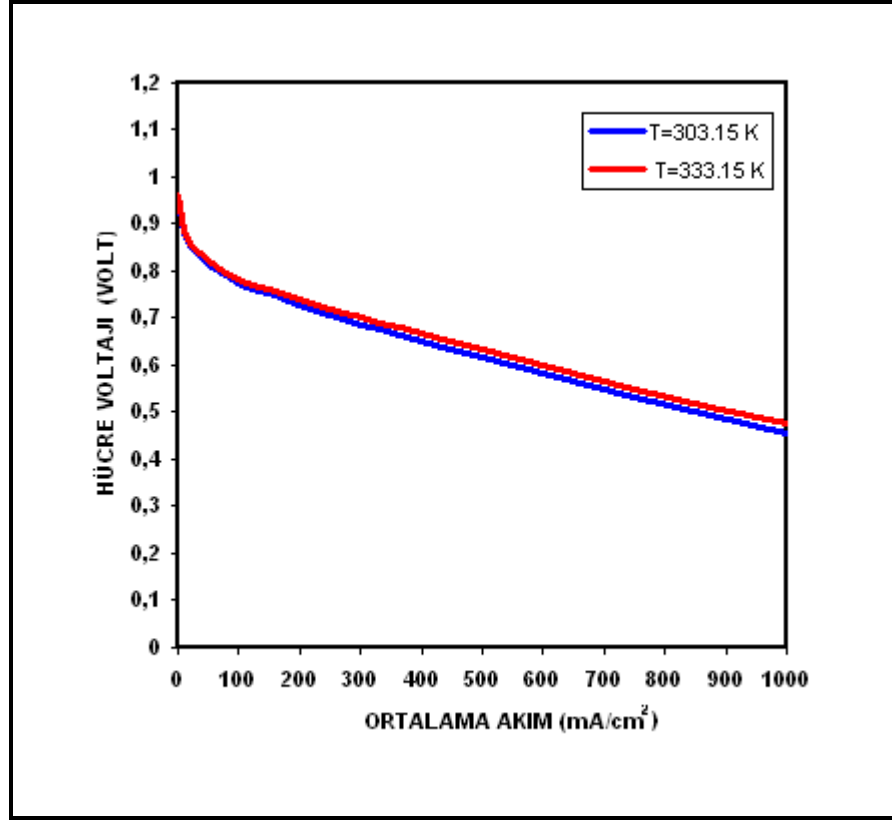


Şekil 4.7 Basıncın Yakıt Hücresi Performansına Etkisi ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{o_2} = 2$, $T = 333,15$ K, $P = 200$ kPa ve $P = 100$ kPa)

4.4.2 Sıcaklığın Hücre Performansına Etkisi

Şekil 4.7 de $S_{h_2} = 1.1$, $S_{o_2} = 2$, $P = 200$ kPa çalışma şartlarında, $T = 333,15$ ve $T = 303,15$ olmak üzere iki farklı sıcaklık değerlerinde polarizasyon eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere düşük akım yoğunluklarında sıcaklığın etkisi çok fazla değil iken yüksek sıcaklıklarda daha fazladır. Bunun nedeni düşük akım yoğunluklarında çok fazla su oluşmamasıdır. Yüksek akım yoğunluklarında hem çok fazla su oluşur hem de elektro-osmotik sürüklenme neticesinde anottan katoda su geçişi olur. Bu ise oksijenin katoda difüzyonunu büyük oranda engeller. Sıcaklığın yüksek olması durumunda ise, oluşan fazla suyun bir bölümü buharlaşarak hücrenin dışına atılır. Dolayısıyla oksijenin katoda kütle transferi hızlanır. Sıcaklığın artması katalizör aktiviteleri için etkileyici bir parametredir. Sıcaklık arttıkça katalizör

aktiviteleri artar ve elektro-kimyasal reaksiyonlar hızlanır. Ayrıca sıcaklık arttıkça limit akım değeri de artar [22].

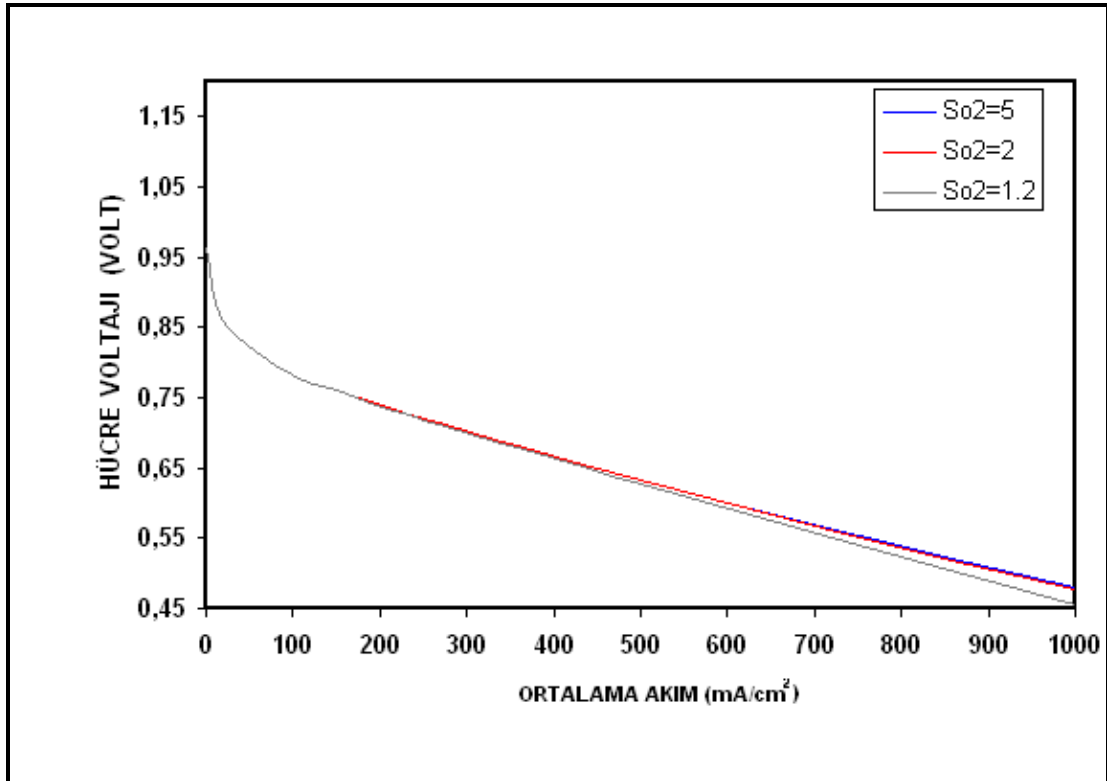


Şekil 4.8 Sıcaklığın Yakıt Hücresi Performansına Etkisi ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{o_2} = 2$, $P = 200$ kPa, $T = 303,15$ K ve $T = 333,15$ K,)

4.4.3 Oksijenin Stiyometrik Oranının Hücre Performansına Etkisi

Şekil 4.9 da $S_{h_2} = 1.1$, $P = 200$ kPa, $T = 333,15$ K çalışma şartlarında, $S_{o_2} = 1,2 - 2 - 5$ olmak üzere üç farklı stiyometrik değerlerinde polarizasyon eğrileri verilmiştir. Oksijen stokiyometrik oranının yakıt hücresi performansına çok büyük etkisi iki şekilde açıklanabilir. İlki yüksek debide oksijen akışı, yüksek yoğunluklu oksijen demektir. Bu durum ise doğal olarak reaksiyon oranlarını artıracaktır. Diğeri ise yüksek hava debisi artık su miktarını ortamdan daha kolay uzaklaştıracaktır. Bu

iki durum yakıt hücresi performansını önemli ölçüde artırır. Özellikle ikinci faktör havanın yeterli neme sahip olmaması durumunda membranı susuz bırakabilir. Düşük akım yoğunluklarında havanın stokiyometrik oranının artması performansı çok değiştirmezken, yüksek akım yoğunluklarında önemli oranda artırır. Bunun nedeni yüksek akım yoğunluklarına oluşan fazla suyu ortamdan atarak okijenin katalizöre difüzyonunu kolaylaştırmaktır. Ayrıca stokiyometrik oranın yüksek olması, oksijen konsantrasyonunun yüksek olması nedeniyle lokal akım yoğunluklarının eşit dağılmasını sağlar. Bu durum ise yakıt hücrelerinde performansı artırıcı bir durum olan yakıt hücresi içerisinde sıcaklık farkı gradyanının düşük olmasını netice verir [47].



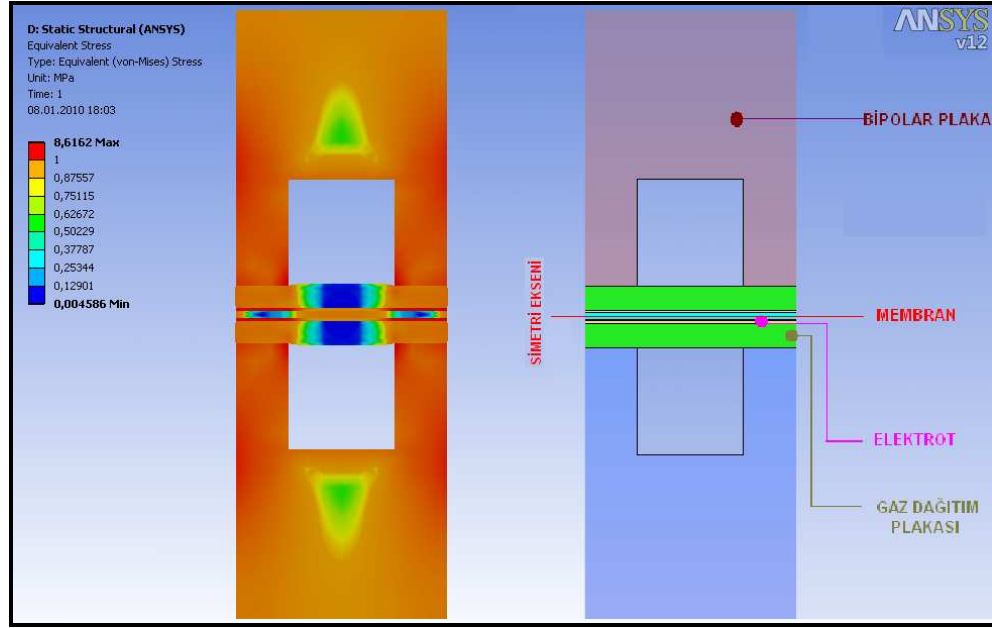
Şekil 4.9 Oksijen Stiyometrik Oranının Yakıt Hücresi Performansına Etkisi

$$(S_{h_2} = 1.1, S_{o_2} = 1.2 - 2 - 5, P = 200 \text{ kPa}, T = 333,15 \text{ K,})$$

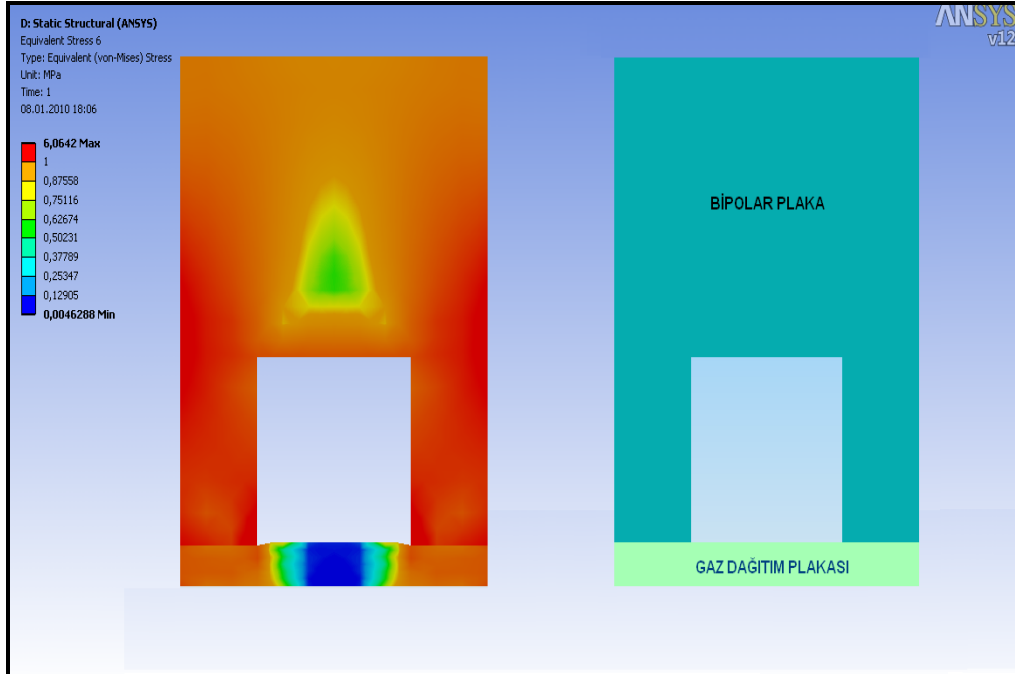
4.5 Yakıt Hücresi Üzerindeki Isıl ve Mekanik Yük Altında Gerilme Dağılımı

Çalışma koşulları $S_{h_2} = 1.1$, $P = 200$ kPa, $T = 333,15$ K, $S_{O_2} = 2$ yapılan analiz sonucu oluşan ısı yükler için statik analizde elemanlardaki birim uzamaları bulabilmek için Ansys Workbench Isı Modülüne aktarılmıştır. Buradaki birim uzamalar Ansys 12 Mekanik modülüne aktarılmış ve $P_{sıkma} = 1.45$ Mpa şiddetindeki basınç sızdırmazlığı sağlamak amacıyla yakıt hücresine uygulanmıştır.

Şekil 4.10 ve 4.11 de yakıt hücresi üzerindeki gerilme dağılımı verilmiştir. Yakıt hücresinde farklı birim uzamaların olması sıcaklık farklarından kaynaklanır. Bu durum lokal eğilme gerilmelerini oluşturur. Özellikle membran bölgesinde oluşan bu gerilmeler tabakalar arasında ayrılmaya sebebiyet verir. Şekillerden de görüleceği üzere sıkma etkisi ile gaz dağıtım plakaları ve membranın elastisitesi düşük olduğu için en fazla şekil değişimi bu elemanlar üzerinde olmuştur. Şekil 4.11’ de verilen şekildeki yer değiştirmelerin bire bir olduğu göz önüne alınırsa, gaz dağıtım plakasının akış kanalı arasında yaptığı bombe gözle görünecek kadar büyüktür. Gaz dağıtım plakasının orta bölgesinde baskı olmadığı ve geometrik yapı itibarıyla sıcaklık artışı etkisi ile gaz akış kanalının içine doğru şekil değiştirdiğinden bu bölgelerde gerilme yığılması iki yan taraftan daha azdır. Bipolar plakada yer alan kanal açıklıklarının tam ortası kuvvet aktarımında ölü bölge olduğu için buralarda gerilme yığılması görülmemektedir. Membran ortasındaki gerilme yığılması iki yan tarafındaki gerilme yığılmasından daha fazladır. Bunun nedeni reaksiyonların daha çok orta bölgeye yakın kısımlarda gerçekleşmesi neticesinde oluşan sıcaklık gradyanının fazla olması, elektrot ile membran arasındaki ısı genleşme katsayısının farklı olmasıdır.



Şekil 4.10 Yakıt Hücresine Ait Bir Dik Kesitteki Von-Misses Gerilme Dağılımı-1
 ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $P = 200$ kPa, $T = 333,15$ K, $P_{sıkım} = 145 N / cm^2$)



Şekil 4.11 Yakıt Hücresine Ait Bir Dik Kesitteki Von-Misses Gerilme Dağılımı-2
 ($S_{h_2} = 1.1$, $S_{O_2} = 2$, $P = 200$ kPa, $T = 333,15$ K, $P_{sıkım} = 145 N / cm^2$)

5. SONUÇ

Matematiksel modelleme ve simülasyon çalışma parametrelerinin yakıt hücresi performansına etkisinin bulunması ve yakıt hücresi elemanlarının optimum tasarımı için önemli bir araçtır. Bu tez çalışmasında matematiksel modelleme ve simülasyon kullanılarak değişik çalışma parametrelerinin hücre performansına etkileri ile yakıt hücresi içerisindeki gerilme dağılımı incelenmiştir. Bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Basınç arttıkça reaktant gazların kısmi basınçları ve konsantrasyonları arttığı için yakıt hücresi performansı artar. Fakat bununla beraber parazitik güç, çalışma maliyeti ve sistemin kapladığı hacim yüksek basınçlarda çalışıldığı durumlarda göz önüne alınmalıdır.
- Sıcaklığın artması su dengesini artırdığı ve elektro-kimyasal reaksiyonları artırdığı için hücre performansını artırır. Fakat burada göz önünde bulundurulması gereken şey anot ve katodun iyi nemlendirilmesidir. Aksi halde yakıt hücresi elemanlarında su kaybına sebebiyet verir.
- Hava stiyometrik oranının artması sisteme giren oksijen miktarını artırdığı ve sistemdeki fazla suyu hücre dışına çıkardığı için hücre performansını artırır. Yine sıcaklıkta olduğu gibi nemlendirmenin iyi yapılmaması yakıt hücresi elemanları içerisinde su kaybına sebebiyet verir.
- Yakıt hücresinin içerisindeki gerilmelerin eşit dağılmamasının nedeni sıcaklık gradyanı, sıkma kuvveti ve hücre elemanlarının farklı ısıl genleşme katsayılarına sahip olmalarıdır. Membran ile katalizör, gaz dağıtım plakası bipolar plaka arasında oluşan eğilme gerilmeleri eleman yapı tabakalarında ayrılmaya sebebiyet verebilir. Bu hücre elemanlarında görülen çatlakları oluşturan en önemli nedenlerdir.

6. ÖNERİLER

Bu sonuçların ışığında ileri çalışma olarak analizin çift fazlı yapılması, modellemede basitleştirilmiş tek kanal yerine kıvrımlı kanalların kullanılması, gerilme analizinde ısı yüklerinin yanında nemlilikten gelen (hygrothermal) yüklerinde hesaba katılarak yapılabilir. Analizlerin bu şekilde yapılması durumunda deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar arasındaki uyum daha da artacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Dresselhaus, M. S. and Thomas, Nov 15, Nature, 414, 332-337 (2001).
- [2] Ata, A., “21. Yüzyılın Enerjisi Hidrojen Enerji Sistemi”, 24. Enerji Verimliliği Konferans, Ankara, 299-320 (2005).
- [3] Thomas, S. and Zalbowitz, M., “Fuel cells-green power” , Los Alamos National Laboratory, ., 12 (2006)
- [4] Dawes J.E, Hanspal, N.S, Family, O.A, and Turan, A, “Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells: An investigation into the effects of water flooding”, Chemical Engineering Science, 64: 2781-2794 (2009)
- [5] Guvelioglu, G.H., and Stenger H. G., “Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells”, Journal of Power Sources, 147: 95–106 (2005)
- [6] Baschuk, J.J., and Li, X., “Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding”, Journal of Power Sources, 86: 181–196 (2000)
- [7] Siegel, N.P., Ellis, M.W., Nelson, D.J., and von Spakovsky, M.R., “A two-dimensional computational model of a PEMFC with liquid water transport”, Journal of Power Sources, 128: 173–184 (2004)
- [8] Gevorkian, P., “Sustainable energy systems engineering”, Mc Graw Hill, USA, 233-234 (2007)
- [9] Hoogers, G., “Fuel cell technology handbook”, CRC, USA, 2-3 (2003)
- [10] Barbir, F., “PEM fuel cells: theory and practice”, Elseiver, USA, 1-427 (2005)
- [11] Stambouli, A. B., “Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 6: 433–455 (2002)
- [12] Dünder F., ‘PEM tipi yakıt hücrelerinde kullanılan katalizörlerde farklı karbon desteği kullanılarak yüzey alanının artırılması ve kinetik özelliklerinin geliştirilmesi’, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, (2006)
- [13] Şenol, R., Üçgül, İ., ve ACAR, M., “Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve taşıtlarda uygulanabilirliğinin incelenmesi”, Mühendis ve Makina, 563 (47): 1 (2007)

- [14]Dinçer, İ., Rosen, M.A., “Exergy: energy, environment, and sustainable development”, Elsevier, USA, 304 (2007)
- [15]CHOI, W., ‘New approaches to improve the performance of the pem based fuel cell power systems’, Doctor of philosophy, (2004)
- [16]Akyalçın, L., ‘Polimer elektrolit membran yakıt hücresindeki membran elektrolit bileşkesinin platin buharı püskürtme yöntemiyle ve en iyileştirilmesi’, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007)
- [17]Dundar F., Barbir, F., Görgün, H., Ata, A.,“ Designing PEM Fuel Cell for Portable Applications”, IHEC 2005, İstanbul, (2005)
- [18]Badrinarayanan, P., ‘PEM Fuel Cell Water And Thermal Management: A Methodology to Understand Water and Thermal Management in an Automotive Fuel Cell System’, Master of science, (2001)
- [19]Kandlikar , S.G., Lu, Z., Satish G.,“ Thermal management issues in a PEMFC stack – A brief review of current status”, Applied Thermal Engineering 29: 1276–1280 (2009)
- [20]Berning T., ‘Three-Dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell’, Doctor of philosophy, (1997)
- [21] Sammes, N. M., “Fuel cell technology: reaching towards commercialization”, Springer, Germany, 121 (2006)
- [22] Yuan, W., Tang, Y., Pan, M., Li, Z., and Tang, B., “Model prediction of effects of operating parameters on proton exchange membrane fuel cell performance”, Renewable Energy 35: 656–666 (2010)
- [23] Mujumdar , A.S., Joo, P.H., “ME6203 Mass Transport- Mass Transport Considerations in PEM Fuel Cell Modeling”, NUS-IHPC, Singapur, (2009)
- [24] Al-Baghdadi, M.A.R.S., Al-Janabi, H.A.K.S., “Effect of operating parameters on the hygro–thermal stresses in proton exchange membranes of fuel cells”, International Journal of Hydrogen Energy 32: 4510 – 4522 (2007)
- [25] Kandlikar, S.G., Lu, Z., Lin, T.Y., Cooke, D., and Daino, M., “Uneven gas diffusion layer intrusion in gas channel arrays of proton exchange membrane fuel cell and its effects on flow distribution”, Journal of Power Sources 194: 328–337 (2009)
- [26]http://www.schunkgroup.com/sixcms/media.php/1722/2008_MoldedBipolarPlates-for-uelCells.pdf (2009)

- [27] Al-Baghdadi, M.A.R.S., Al-Janabi, H.A.K.S., “Parametric and optimization study of a PEM fuel cell performance using three-dimensional computational fluid dynamics model”, *Renewable Energy* 32: 1077–1101 (2007)

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Samsun’da Mustafa Esmer, 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde başladığı lisans eğitimini 2004 yılında tamamladı. Mezuniyetinden bir sene sonra Gebze Yüksek Teknoloji yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Eğitim hayatının yanında, 2004 yılında ERDEMİR’de başladığı iş hayatına devam etmektedir.