

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

YAKIT PİLLERİNDE KULLANILAN
BİPOLAR PLAKALARIN HESAPLAMALI
AKIŞKAN ANALİZİ

Ebubekir KÜTÜK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM
DALI

GEBZE
2011

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

YAKIT PİLLERİNDE KULLANILAN
BİPOLAR PLAKALARIN HESAPLAMALI
AKIŞKAN ANALİZİ

Ebubekir KÜTÜK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM
DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ali ATA

GEBZE
2011

ÖZET

**TEZİN BAŞLIĞI : YAKIT PİLLERİNDE KULLANILAN BİPOLAR
PLAKALARIN HESAPLAMALI AKIŞKAN ANALİZİ**
YAZAR ADI : EBUBEKİR KÜTÜK

Son yıllarda fosil enerji kaynaklarının yol açtığı problemler nedeniyle dünyada yenilenebilir enerji konusu üzerine gittikçe artan bir ilgi vardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, rüzgar gibi sürekliliği olmayan alternatif enerji kaynaklarının kullanımında enerjinin depolanması ihtiyacı hidrojen enerjisinin kullanımını gündeme getirmiştir. Hidrojen enerjisi, yeryüzünde varolan bir enerji kaynağı olmamakla birlikte mevcut birçok enerji kaynağından yararlanarak üretilip depolanabilen ve tekrar enerjiye dönüştürülmesi sürecinde atık olarak su üreten ve böylece çevre kirliliği açısından neredeyse rakipsiz olan bir ara enerji formudur.

Hidrojen enerjisi konusundaki araştırmaların en ağırlıklı kısmını yakıt pilleri oluşturmaktadır. Yakıt pilleri yüksek verim, yan ürün olarak su çıkarması ve sessiz çalışması gibi avantajlara sahiptir. Yakıt pilleri; güç santralleri, otomobiller, dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları gibi farklı ölçekte güç gerektiren yerlerde kullanılabilir. Yakıt pilleri içerisinde düşük sıcaklıklarda çalışmaları ve yüksek verimleri sebebiyle en çok ilgiyi çekenlerden biri Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt pilleridir.

Yapılan bu çalışmada sonlu hacim metodu kullanılarak üç boyutlu, kararlı halde çalışan bir Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt pili modeli kurulmuştur. Model kurulduktan sonra süreklilik, sınır bölge atamaları oluşturulmuş ve daha sonra paket programa gönderilerek hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) analizi yapılmıştır. Deneysel ve teorik I-V eğri sonuçları matematiksel modelin doğruluğu açısından karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen reaktant kütle akışı ve akım yoğunluğu dağılımının irdelemesi yapılmış, akım ve kütle korunumunun sağlandığı görülmüştür

SUMMARY

**TITLE : COMPUTATIONAL FLUID ANALYSIS OF BIPOLAR PLATES
USED IN FUEL CELLS**

AUTHOR : EBUBEKİR KÜTÜK

In recent years, there is an increasing interest in topic of renewable energies because of the problems caused by usage of fossil energy resources. Energy storage becomes a necessity when the discontinuous renewable energy resources, like solar and wind energy, are used. At this point, hydrogen serves as an energy store. Although the hydrogen source does not exist in the earth, it can be produced from different energy resources and it can be stored and used again to produce electricity with a side product of water. Therefore it is almost a perfect energy form from the environmental point of view.

The subject of fuel cells is one of the main research topics in hydrogen energy. Fuel cells have some advantages like high efficiency, water production as a waste, and noiseless operation. Fuel cells have different applications for different magnitude of powers like automobiles, laptops and cell phones. One of the most popular fuel cells is polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells because of their high efficiency and running at low temperatures.

In this study 3D steady state mathematical model is developed for a PEM fuel cell by using finite volume method. After a model, continuum and boundary zone assignments are made and the model is sent to a software package to analyse of the (CFD) computational fluid dynamics. Theoretical I-V curve results obtained from the mathematical model are verified with the real time performance measurements. After the results of analysis, reactant mass flow and current density distribution are examined, conservation of current and mass are obtained.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana yardımlarının yanında yüksek lisans eğitimimde yol gösterici olarak beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Ali ATA'ya, büyük bir sabırla tezimin bitmesini bekleyen ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim çok kıymetli aileme, değerli katkılarından dolayı Dr. Işıl KUTBAY'a ve bu tezi hazırlamamda emeği geçen herkese teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	ii
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar	xi
1. GİRİŞ	1
2. YAKIT PİLLERİ	5
2.1. Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi	6
2.2. Yakıt Pili Karakteristikleri	8
2.3. Yakıt Pillerinin Türleri	9
2.3.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)	11
2.3.2. Doğrudan Metanollu Yakıt Pilleri (DMYP)	12
2.3.3. Alkali Yakıt Pilleri (AYP)	12
2.3.4. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)	13
2.3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)	14
2.3.6. Katı Oksitli Yakıt Pilleri (KOYP)	15
2.4. Yakıt Pili Hesaplamaları	18
2.4.1 Yakıt Pili Açık Devre Voltajı (ADV)	18
2.4.2. Yakıt Pillerinde Kayıplar	20
2.4.3. Yakıt Pili Verimliliği	22
2.4.3.1 Kojenerasyon sistemi	23
2.5. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)	23
2.5.1. PEMYP Bileşenleri	25
2.5.1.1. Polimer Elektrolit Membran	26
2.5.1.2. Gaz Difüzyon Katmanı	26
2.5.1.3. Elektrotlar	27
2.5.1.4. Bipolar Plakalar	28

3. MODELLEME ÇALIŞMASI	36
3.1. Modellemenin Amacı	36
3.2. Model Varsayımları	36
3.3. Kullanılan Sabitler	36
3.4. Modellemede Kullanılan Denklemler	38
3.4.1. Elektrokimyasal Modelleme	38
3.4.2. Akım ve Kütlenin Korunumu	41
3.4.3. Suyun Oluşumu ve Etkileri	43
3.4.4. Bazı Katsayılar ve Özellikler	45
3.4.4.1. Membran Elektrik İletkenliği	45
3.4.4.2. Ozmotik Sürüklenme Katsayısı	45
3.4.4.3. Tersine Difüzyon Akısı	46
3.4.4.4. Membran Su Difüzyon Özelliği	46
3.4.4.5. Su İçeriği	46
3.4.4.6. Su Buhar Basıncı	47
3.4.4.7. Doyma Basıncı	47
3.5. Model Geometrisi	48
3.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Modellemesi	49
3.6.1. Model Geometrisinin ve Ağ Yapısının Oluşturulması	49
3.6.2. Modelin Çözdürülmesi	52
3.6.3. Modelin Sonuçları	55
3.6.3.1. Akım Yoğunluğu	55
3.6.3.2. Reaktant Kütle Oranları	57
3.6.3.3. Modelin Elektrokimyasal Olarak Balanslanması	58
4. SONUÇLAR	62
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

ΔG	: Gibbs serbest enerji değişimi
ΔH	: Entalpi değişimi
E	: İdeal hücre gerilimi
n	: Elektron sayısı
R	: Genel gaz sabiti
T_0	: Referans sıcaklık
p_0	: Referans basınç
F	: Faraday sabiti
N	: Avogadro sayısı
R	: İdeal gaz sabiti
V_{OC}	: Açık devre gerilimi
R_{an}	: Anot hacimsel transfer akım
$c_{H_2}^{ref}$	: Anot referans konsantrasyonu
γ_{an}	: Anot konstantrasyon üsteli
α_{an}	: Anot transfer katsayısı
R_{cat}	: Katot hacimsel transfer akım
$c_{O_2}^{ref}$	: Katot referans konsantrasyonu
γ_{cat}	: Katot konsantrasyon üsteli
α_{cat}	: Katot transfer katsayısı
R_c	: Temas direnci
T	: Sıcaklık
P	: Basınç
ε	: Gözeneklilik
κ	: Geçirgenlik
S	: Elektrik iletkenliği
k	: Isıl iletkenlik
h	: Yüzey hacim oranı
ρ_m	: Membranın kuru yoğunluğu

- M_m : Membranın kuru ağırlığı
 β : Protonik iletkenlik katsayısı
 ω : Protonik iletkenlik üsteli
 σ : Elektriksel iletkenlik
 ϕ : Elektrik potansiyel
 ϕ_{sol} : Katı fazdaki hücre elemanlarına ait elektrik potansiyeli
 ϕ_{mem} : Membran elektrik potansiyeli
 R_{sol} : Katı fazdaki hücre elemanlarına ait hacimsel transfer akım
 R_{mem} : Membran hacimsel transfer akım
 j^{ref} : Hacimsel referans akım yoğunluğu(A/m³)
 $[], []_{ref}$: Lokal türün konsantrasyonu, referans değeri(kgmol/m³)
 γ : Konsantrasyona bağlılık
 η : Aktivasyon kaybı
 S_{H_2} : Hidrojen stiyometrik oranı
 M_{w,H_2} : Hidrojen içindeki su miktarı
 S_{H_2O} : Su stiyometrik oranı
 M_{w,H_2O} : Suyun içindeki su buharı miktarı
 S_{O_2} : Oksijen stiyometrik oranı
 M_{w,O_2} : Oksijen içindeki su miktarı
 R_{ohm} : Ohmik direnç
 I : Akım
 h_l : Suyun buharlaşması ile oluşan entalpi değişimi
 D_i : Gaz difüzyon özelliği
 D_i^0 : Referans alınan sıcaklık ve basınçta, i'ninci terime ait gaz difüzyon özelliği
 r : Katalizör tabakasının spesifik reaksiyon yüzey alanı (1/m)
 $y_{i,surf}$: Reaksiyon yüzeyindeki bileşenin kütle kesri
 $y_{i,cent}$: Hücre merkezindeki bileşenin kütle kesri
 δ : Reaksiyon yüzeyi ile hücre merkezi arasındaki ortalama uzaklık

- r_w : Su yoğunlaşma oranı
 K : Mutlak geçirgenlik
 σ_{mem} : Membrana ait elektriksel iletkenlik
 λ : Su oranı
 α_d : Osmotik sürüklenme katsayısı
 j_w^{diff} : Tersine difüzyon akısı
 a : Su aktivitesi
 P_{wv} : Su buhar basıncı
 P_{sat} : Doyma basıncı
 x_{H_2O} : Su buharının molar oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Dünya genelinde 2003 yılı enerji arzı dağılımı [2].	2
2.1. Yakıt Pili Hücresinin Şematik Gösterimi [3].	5
2.2. 1839 yılında William Grove tarafından geliştirilen yakıt pili [24].	7
2.4. Alkali yakıt pili [3].	13
2.6. Erimiş karbonat yakıt pili [3].	14
2.7. Katı oksitli yakıt pili [3].	16
2.7. Yakıt pili ideal ve gerçek voltaj akım karakteristiği [22].	21
2.8. Şematize edilen bir PEM yakıt hücresi [24].	24
2.9. Gaz difüzyon katmanının yapısı [3].	27
2.10. Tipik bir elektrotun içyapısı [30].	28
2.11. Akış alanı konfigürasyonları [22].	31
3.1. ϕ_{sol} ve ϕ_{mem} için sınır şartları	39
3.3. Yüzey-kenar ağ yapısı	49
3.4. Ağ sayısı	50
3.5. Hacim ağ yapısı	51
3.6. Modelin HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) Çözümünde Uygulanan Adımlar	54
3.8. Elektriksel Akım Yoğunluğu	56
3.9. MET(Membran Elektrot Topluluğu) Ayrıntılı Gösterilen Akım Yoğunluğu	56
3.10. Yakıt hücresinin boydan kesitine ait oksijen kütle oranları	57
3.11. Yakıt hücresinin boydan kesitine ait hidrojen kütle oranları	58
3.12. Reaktant gazlarının net kütle akışları	59
3.13. FLUENT ara yüzünde iterasyonlar sonucu oluşan akım yoğunluğu	60
3.14. Fluent modülünü kullanarak toplam akımı bulma	61

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yakıt Pillerinin Bazı Karakteristik Özellikleri	10
2.2. Yakıt Pili Türüne Göre Anot ve Katotta Meydana Gelen Reaksiyonlar	10
2.4. Çeşitli ısılardaki $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2 O$ tepkimesi Gibbs serbest enerjisi [12].	20
3.2. Sınır Bölgesi Ataması	51
3.3. Süretililik Bölge Ataması	52

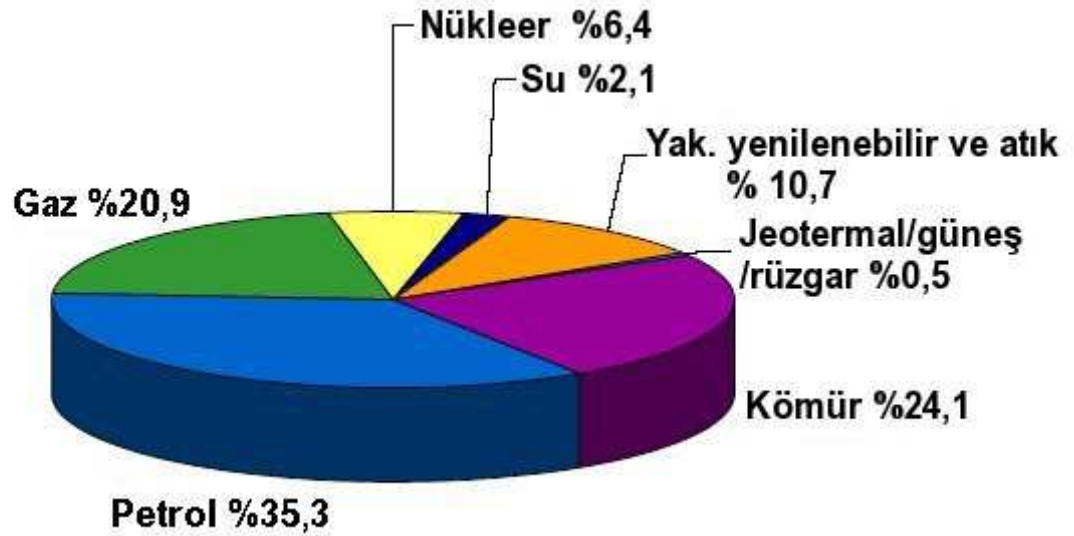
1. GİRİŞ

Sanayinin gelişmesiyle birlikte insanlığın enerjiye duyduğu ihtiyaç da artmaya devam etmiştir. Geçtiğimiz yüzyılın başlarında kullanılmaya başlayan fosil kaynaklı ürünler bugün hala sanayinin vazgeçilmezi durumundadır. Birçok jeolog, petrol ve gaz üretiminin önümüzdeki 20 yıl içerisinde en yüksek seviyeye ulaşacağını ve daha sonra arzda düşmenin başlayacağını öngörmektedir.

Ayrıca günümüzde etkileri oldukça belirgin bir şekilde hissedilen küresel ısınmanın nedeninin baş sorumlusu fosil yakıtların kullanılması sonucu ortaya çıkan zehirli gazlardır. Fosil yakıtların aynı şekilde, önlem alınmadan kullanılmaya devam edilmesi halinde enerji kaynakları ve çevre ile ilgili sıkıntılar önümüzdeki yıllarda daha büyük sorunlar meydana getirebilecek durumdadır. Bu sebeple ülkeler ve büyük enerji kuruluşları fosil yakıtların kullanımının azaltılması için alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye başlamışlardır.

Alternatif enerji kaynakları arasındaki en büyük adaylardan biri yenilenebilir enerjidir. Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi çevrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanır [1]. Ayrıca çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunmamaktadır. Fakat şekil 1.1'de görülebileceği gibi kullanımı oldukça azdır.

Dünya üzerinde yenilenebilir enerjinin insan hayatına girmesi, fosil kaynakların rezervlerinin yakın bir gelecekte tükeneceğinden dolayı %100 olarak görülmektedir. Sera etkisinde güneş enerjisi yakalanır ve toprak örtüsünün üst tabakasında ve atmosferde tutulur. İnsanlar tarafından görülen yenilenebilir enerji sistemi sera etkisiyle çevresel ısının sağlanmasıdır. Dünya üzerine ulaşan enerjinin yalnız %0,02 si insanlık tarafından yönetilir. Bu değer yenilenebilir enerjiler olarak enerji arzı içinde %25'lik bir yer tutar [1].



Şekil 1.1. Dünya genelinde 2003 yılı enerji arzı dağılımı [2].

Yenilenebilir enerjinin büyük bir bölümü biokütle olarak kullanılmaktadır. Bu kategori içerisinde yiyecek ürünleri, endüstriyel amaçlar için yapılan ormancılık, yakma için kullanılan odun girmektedir. Diğer kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları su, rüzgar ve güneştir. Su gücü önemli bir kaynaktır fakat kullanımı birçok bölgede potansiyel su kaynaklarının çevresel sınırlamalarından dolayı büyümemektedir. Jeotermal enerji, şu an gelişme aşamasında olan gelgit, dalga ve deniz akıntı enerjileri diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Doğada serbest bulunmamasına rağmen yenilenebilir enerjiler arasında ileride kullanımını artacağı düşünülen ve üzerinde en çok çalışma yapılan aday hidrojen enerjisidir. Hidrojen enerjisi, doğrudan yakıt olarak kullanıldığı gibi, yakıt pili olarak en verimli şekilde elektrik enerjisine dönüşümü sağlanarak kullanılır [3].

Yakıt pillerinin enerji kaynağı olan hidrojen, doğada serbest halde bulunmamasına rağmen, dünyada ve tüm evrende en çok bulunan elementlerden biridir. Hidrojen, çeşitli bileşiklerinden farklı üretim yöntemleriyle elde edilerek hidrojen molekülü (H_2) haline getirilebilir. Hidrojenden elektrik enerjisi elde edebilmek için yakıt pili tipine göre çeşitli bileşikler halinde sisteme verilebileceği gibi, saf olarak da verilebilir [4,5].

Yakıt pili, hidrojen ve hidrojen zengin yakıtların kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu dönüştürme sonucunda yanma ürünü olarak sadece su ve ısı ortaya çıkmaktadır. Yakıt pilleri çevreci olması, sessiz olması, hareketli parçanın az oluşu ve bakım maliyeti gerektirmemesi gibi avantajlara sahiptir.

Yakıt pilleri tasarımında değişiklik yapılmaksızın cep telefonlarında kullanılabilecek kadar az ve bir kente yetebilecek kadar fazla güç üretebilir. Yakıt pilleri otomobil, otobüs, uzay aracı, lokomotif, deniz altı gibi ulaşım araçlarında, cep telefonu, diz üstü bilgisayar gibi taşınabilir cihazlar, ev, ofis, hastane, otel, endüstri ve güç üretim tesisleri gibi sabit uygulamalar olmak üzere geniş bir kullanım potansiyeline sahiptirler [6].

Otomotiv üreticileri, teknolojiye paralel olarak ideal tasarıma sahip taşıtları günümüzde piyasaya sürmektedirler. Ancak, bugün üretilen taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorların en üstün teknoloji ve çalışma performanslarına ulaştıkları halde bir takım olumsuz faktörleri halen giderilememiştir. Özellikle, içten yanmalı motorlarda elde edilen enerjinin büyük bir kısmının kullanılmadan dışarı atılması nedeniyle, termik verimin düşük olması önemli bir problemdir. Yine bu motorlarda kullanılan yakıtların yanması sonucu dışarıya atılan egzoz gazları, çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bunun yanında, yakıtların hammadde olan petrol rezervlerinin tükenmesi ile giderek artan enerji talebine cevap veremeyecek olması ulaşım endüstrisini alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Günümüz taşıtlarında, alternatif güç üretim sistemi olarak, yüksek verime ve temiz enerjiye sahip olmasından dolayı yakıt pilleri tercih edilmektedir ve yakıt pillerinin içten yanmalı motorların yerini alması için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [7].

Yakıt pilleri arasında en çok dikkat çeken, düşük sıcaklıklarda çalışma, yüksek verim ve katı bir elektrolit gibi özelliklere sahip olan Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) yakıt pilleridir. PEM yakıt pilleri bu özellikleri sebebiyle bugünkü otomobillerde, dizüstü bilgisayarlarda ve yeni nesil cep telefonlarında kullanılması düşünülmektedir. Bugün bazı kuruluşlar tarafından bir çok prototip geliştirilmiştir ve PEM yakıt pili kullanan cihazlar az da olsa pazara girmiş

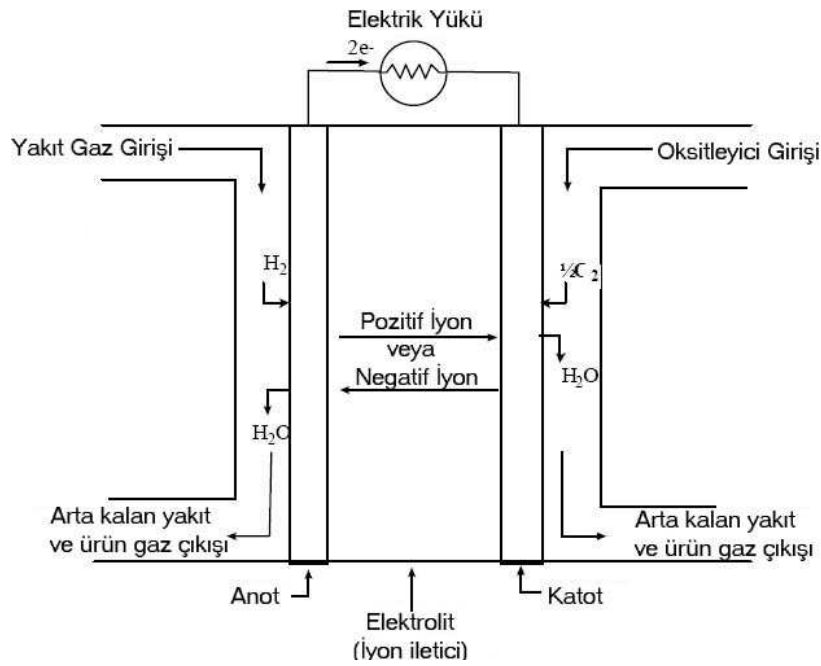
bulunmaktadır. PEM yakıt pili içerisinde Platin kullanılmaktadır. Bu sistemde birbirine bağımlı birçok fiziksel, kimyasal ve elektronik işlem birlikte çalışmaktadır. Bunların optimizasyonun sağlanması, yeni tasarımların oluşturulması ve farklı malzemelerin performansa etkilerinin incelenmesi için modelleme çalışmaları yapılmaktadır. Yakıt pilleri genel olarak sıcaklık, basınç ve gaz bileşimi gibi birçok değişkenden etkilenir. Bir model kullanarak bu değişkenlerin yakıt pilleri üzerinde oluşturduğu etkiler rahatlıkla görülebilir. Son yıllarda yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmaların çoğu modelleme şeklinde gerçekleşmektedir. Bu modellemelerde yakıt pili alt bölümlere ayrılır ve bu bölümlerde geçerli diferansiyel denklemler ve sınır şartları verilir. Bu model üzerinde, değişkenlerin ne gibi etkileri olduğu görülebilir. Pil içerisinde gerçekleşen olaylar gerçeğe yakın bir şekilde izlenebilir. Pil üzerindeki kayıplar ve bu kayıplara neden olan olaylar rahatlıkla görülebilir. Farklı çalışma koşulları ve malzemeler model üzerinde denenebilir [3].

Bu tezin amacı, taşınabilir özelliği olan PEM yakıt pilinin hesaplamalı akışkan dinamiği analizinin yapılmasını ve yapılan analiz sonucunda deneysel çalışmaya gerek duyulmadan oluşan parametreleri sanal ortamda incelenmesini sağlamaktır. Bu amaçla, FLUENT ve GAMBIT software paket programları kullanılarak kütle akışı, akım yoğunluğu gibi parametrelerin belirlenmesi çalışılmıştır.

2. YAKIT PİLLERİ

Yakıt pilleri, reaksiyonun kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal cihazlardır. Bir yakıt pilinin temel fiziksel yapısı, iki yüzünde gözenekli anot ve katotla temas halindeki elektrolit tabakasını içermektedir.

Yakıt pilinin reaksiyon girdisi ve ürün gazlarıyla birlikte görüldüğü bir şeması şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Yakıt Pili Hücresinin Şematik Gösterimi [3].

Tipik bir yakıt pilinde gaz yakıt anoda, oksitleyici yani oksijen katoda sürekli olarak beslenmektedir. Yakıt pilinde yakıt ile oksijen arasında indirgenme - yükseltgenme reaksiyonu olurken elektrik akımı ve ısı oluşmaktadır. Katotta protonlar oksijenle birleşip, kullanılan yakıtın cinsine göre yalnızca su buharı veya su buharı ve CO_2 üretilir.

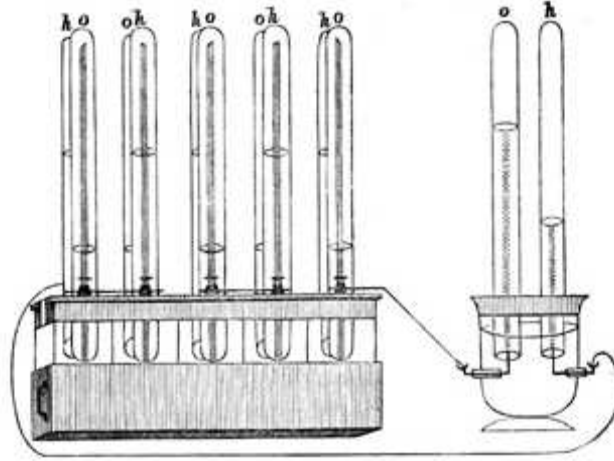
Bir yakıt pili tipik bir pildekine benzer bileşenlere ve karakteristiğe sahip olduğu halde, birçok bakımdan ayrı özelliklere sahiptir. Bilinen piller bir enerji depolama aracıdır, verebilecekleri maksimum enerji içlerindeki kimyasal madde

miktarıyla belirlenmektedir ve kimyasal madde dönüşümü bittiğinde pilinde ömrü bitmektedir. İkincil pillerde ise kimyasallar tekrar yükleme suretiyle reaksiyon geri döndürülmektedir. Bu da pilin içine dış bir kaynaktan enerji yüklemek anlamına gelmektedir. Yakıt pilleri ise teorik olarak yakıt ve enerji beslendiği sürece elektrik üretme kapasitesine sahip enerji dönüşüm cihazlarıdır. Gerçekte, performansta zamanla azalma, korozyon, bileşenlerin ömrü gibi nedenlerle yakıt pillerinin de işletim ömürleri sınırlı olsa da uzundur.

Sistemin en dikkati çeken noktalarından biri suyun üretildiği ve uzaklaştırıldığı yere bağlı olarak, transfer edilen iyonun cinsi ve taşıma yönünün farklı olmasıdır. İyon pozitif ya da negatif olabilir. Bu da iyonun hem pozitif hem negatif yük taşıyabileceği manasına gelir. Yakıt veya oksitleyici gazlar anot ya da katottan karşılıklı olarak elektrolitten geçerler ve yakıtın elektrokimyasal olarak oksitlenmesi ve oksitleyicinin elektrokimyasal indirgenmesi ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Hidrojen gazı uygun katalizörler kullanıldığında çok çabuk reaksiyona girdiğinden uygulamaların birçoğunda yakıt olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Yine kolay ve ekonomik olarak havadan elde edilebilmesi nedeniyle en çok kullanılan oksitleyici oksijendir.

2.1. Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi

Hidrojen yakıt pilinin temel çalışma prensibi son derece basittir. Yakıt pilinin ilk gösterimi 1839 yılında avukat ve bilim adamı William Grove tarafından yapılmıştır. Şekil 2.2.'de Grove tarafından geliştirilen yakıt pili şematik olarak gösterilmiştir. Uzun yıllardır bilinen suyun elektrolizi yöntemiyle elde edilen hidrojen ve oksijeni birleştirerek elektrik akımı elde edilebileceğini görmüş, elektroliz sürecini tersine işleterek üreteç yerine bir akım ölçer koymuştur. Bu süreçte hidrojen ve oksijenin tekrar birleştiğini ve bir akım ürettiğini görmüştür [12].



Şekil 2.2. 1839 yılında William Grove tarafından geliştirilen yakıt pili [24].

Yakıt pili terimi ilk olarak 1889'da Ludwig Mond ve Charles Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak ortaya konmuştur. Mond ve Langer oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 watt güç üreten ve % 50 çalışma verimine sahip bir yakıt pili geliştirmişlerdir. 1894'de Wilhelm Ostwald kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektro-kimyasal hücre yapmıştır [13].

1920'lerin başında Lawaczek hidrojen ile çalışan motor, araba ve tren kavramının ana hatlarını ortaya koymuştur. Bu kavrama göre elektroliz yardımıyla hidrojen elde edilecek ve böylece enerji doğalgazlar gibi hidrojen boru hatları ile taşınabilecektir. 1920-1930 döneminde konu üzerine çalışmalar devam etmiştir. Aynı dönemde Eren ve ekibindeki mühendisler pek çok araç motorunu multi-fuel sistem, yani hem benzin hem de hidrojen kullanabilir hale getirmiştir [14, 15].

1923 yılında Haldane rüzgar enerjisi ve elektroliz yöntemiyle hidrojen elde edilerek sıvı hidrojen olarak depolanabileceğini ve yakıt olarak kullanılabileceğini öngörmüştür. Bu öngörü 15 yıl sonra (1938 yılında) Sikorsky tarafından teknik detayları ile ortaya konmuş ve hidrojenin havacılıkta potansiyel yakıt olacağını da belirtmiştir [16].

İlk başarılı yakıt pili 1932 yılında Francis Bacon'un çalışmaları sonucu ortaya çıkmıştır. Bacon, Mond ve Langer 1959 yılında bir kaynak makinesine güç sağlayan

5 kilowattlık pratik bir sistem kurmayı başarmışlardır. Bacon'un pili daha sonra modifiye edilerek Amerikan uzay programında kullanılmıştır [17].

Aynı yılın sonlarında Harry Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt piliyle çalışan traktör dizayn etmiştir. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt piliyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur [13].

Güneş enerjisi kaynaklı hidrojen ekonomisi kavramı ilk olarak 1962 yılında Bockris tarafından ortaya konmuş, 1965 yılında Justi tarafından geliştirilerek şematize edilmiş, 1970 yılında Bockris ve Triner tarafından hidrojen ekonomisi olarak isimlendirilmiş, 1971 yılında Bockris ve 1972 yılında Bockris ve Appleby tarafından formülize edilmiş, 1972 yılında Gregory tarafından ölçülmüştür [18].

1972 yılında Marchetti Nükleer Hidrojen sistemini ortaya attı. Bu sistemde izole edilmiş bir adada nükleer enerji kullanılarak üretilen hidrojen sıvılaştırılmış olarak gemilerle taşınacak ve kullanılacaktır [19].

Bockris 1962 yılında Amerikan şehirlerinin Güneş enerjisi kaynaklı hidrojen ile desteklenmesi için plan hazırlamıştır. Bu plana göre yüzer fotovoltaik paneller oluşturulacak, elektroliz ile deniz suyundan hidrojen üretilerek boru hatları ile şehirlere nakledilecektir. Japonlar tarafından PORSHE (Planned Ocean Raft System 19 for the Hydrogen Economy) adlandırılan benzer bir kavram 1979 yılında Escher ve Ohta tarafından ortaya konmuştur [20].

1974 yılında Veziroğlu ilk uluslararası hidrojen enerji konferansını düzenlemiştir. THEME (The Hydrogen Economy Miami Energy Conference) konferansında herhangi bir ana enerji kaynağı ile hidrojen üretimi ve fosil yakıtlar yerine kullanılabilirliği tartışılmış, fosil yakıtların tükenmesi ve bu yakıtların kullanılması ile oluşan çevre kirliliği ile ilgili soruların cevaplanmasına çalışılmıştır [21].

2.2. Yakıt Pili Karakteristikleri

Yakıt pilleri kendilerini uygun bir enerji dönüşüm cihazı yapan birçok karakteristiğe sahiptir. Yakıt pilleri temiz ve yüksek verimli olduğundan çevresel problemlerin çözülmesi ve enerji güvenliğinin sağlanmasında bir çözüm sunabilir.

Başlıca avantajları;

- Sabit bir sıcaklıkta çalışırlar ve yüksek sıcaklıkta çalışanları kojenerasyon uygulamaları için uygundur,
- Boyuttan bağımsız olduğundan dolayı küçük yakıt pili santralleri büyükleri ile aynı verimlerde çalışırlar,
- Hareketli parçanın az olması sebebiyle servis süresi azdır sürekli bir gözetleme gerekmez,
- Sessiz çalışır,
- Diğer sistemlere göre yüksek verime sahiptir,
- Fosil yakıtlarla kullanıldığında dahi çok düşük emisyon özellikleri verir,
- Doğrudan enerji dönüşümü sağlar,
- Yerleştirme kolaylığı vardır,
- Hızlı çalışma avantajına sahiptir.

Başlıca dezavantajları ise;

- Enerji endüstrisi için tanınmayan bir teknolojidir,
- Yeni bir teknoloji olması sebebiyle maliyetler yüksektir,
- Altyapı eksik durumdadır.

2.3. Yakıt Pillerinin Türleri

Yakıt pilleri kullandığı yakıt ve oksitleyici türü, yakıtın yakıt pilinin içinde veya dışında işlenişi, elektrolit tipi, işletim sıcaklığı, yakıtın beslenme biçimi vb. gibi birçok şekilde sınıflandırılabilir ancak en yaygın sınıflandırma şekli kullanılan elektrolit tipine göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre 6 tip yakıt pili bulunmaktadır.

1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt pili (PEMYP)
2. Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMYP)
3. Alkali Yakıt Pili (AYP)
4. Fosforik Asit Yakıt Pili (FAYP)
5. Erimiş Karbonat Yakıt Pili (EKYP)
6. Katı Oksitli Yakıt Pili (KOYP)

Tablo 2.1. Yakıt Pillerinin Bazı Karakteristik Özellikleri

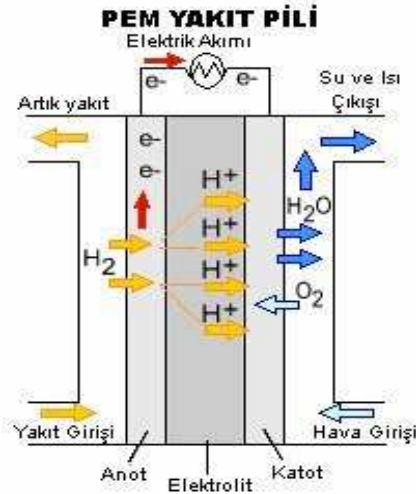
YAKIT PİLİ	Elektrolit	İşletim Sıcaklığı (°C)	Güç Verimi (%)	Sistem Verimi (%)	Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)
AYP	Potasyum hidroksit	50–100	40–50	26–31	100–200
PEMYP	Katı polimer	50–125	40–50	32–40	350
FAYP	Ortofosforik asit	180–210	40–45	36–45	100
EKYP	Lityum-Potasyum karbonat	630–650	50–60	43–55	100
KOYP	Kararlı zirkonat	900–1000	50–60	43–55	240
DMPY	Sülfirik asit veya polimer	50–120	30–40	~40	40

Tablo 2.2. Yakıt Pili Türüne Göre Anot ve Katotta Meydana Gelen Reaksiyonlar

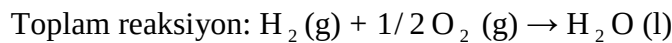
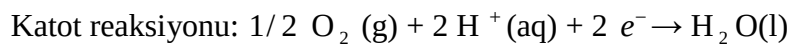
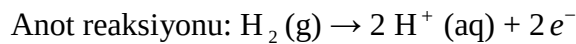
YAKIT PİLİ	Anot Reaksiyonu	Katot Reaksiyonu
PEMYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
DMYP	$C_2H_5OH \rightarrow 5H^+ + CO_2 + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
AYP	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e$	$1/2O_2 + H_2O + 2e \rightarrow 2(OH)^-$
FAYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O$
EKYP	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e \rightarrow CO_3^{2-}$
KOYP	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e$	$1/2O_2 + 2e \rightarrow O^{2-}$

2.3.1. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit iyon değişim membranıdır (florlanmış sulfonik asit polimer veya diğer benzer bir polimer). Bu membran su ile ıslatıldığında çok iyi bir proton iletici haline gelir. Düşük sıcaklıklarda çalışır (yaklaşık 90 °C), yüksek güç yoğunluğuna sahiptir ve otomobiller gibi hızlı ilk çalışma gerektiren yerlerde kullanılabilir. Membran, anot ve katotta kimyasal reaksiyonlar için katalizörlerle irtibatlıdır. Düşük sıcaklıkta çalışması sebebiyle pahalı katalizörler (genelde Platin) gereklidir. CO, katalizörü zehirleyebilir ve kalıcı bir zarar verebilir olmasından dolayı kullanılacak hidrojen CO içermemelidir. Hidrojen anot kısmına verilir ve burada katalizörün yardımıyla hidrojen iyonlarına (protonlara) ayrılır ve elektronlar serbest bırakılır. Elektronlar dış çevrim vasıtasıyla katot tarafına geçerken elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Daha sonra protonlar membran üzerinden katot tarafına geçerler, burada hidrojen atomları ile birleşerek su oluşur ve çevrim tamamlanır (şekil 2.3.). Membranın sulandırılması gerektiğinden buharlaşma ile kaybolan suyun üretilen sudan fazla olmayacağı bir sıcaklıkta çalıştırılmalıdır.

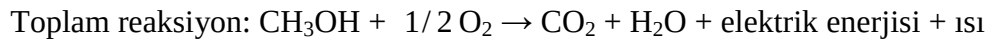
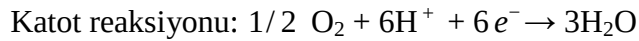
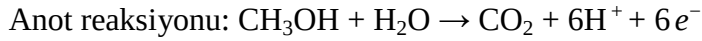


Şekil 2.3. PEM yakıt pili [3].



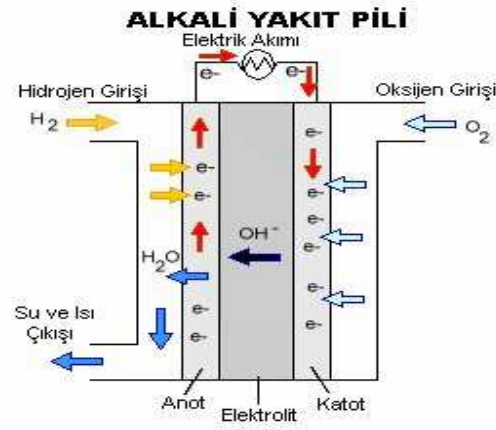
2.3.2. Doğrudan Metanollu Yakıt Pilleri (DMYP)

Son yıllarda büyük bir geliştirme gösteren bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak PEM yakıt pilinde olduğu gibi polimer membran kullanılır. Yakıt pili sisteminde fazla yardımcı elemana ihtiyaç duyulmaz ve PEM yakıt piline göre daha basit bir yapıdadır. Anoda metanol ve su bileşimi verilir. Anot katalizörü, hidrojeni bu eriyikten direkt olarak alır. Bir yakıt ıslah ediciye gerek duyulmaz. Yüksek çözünürlüklü yakıtın düşük basınç altında tutulabilmesi sebebiyle hidrojen depolamada karşılaşılan problemler yoktur. 50 – 90°C aralığında çalışır. % 40'lara ulasan verimlere sahiptir. Anottan katoda elektrik üretmeden yakıtın geçmesi ve metanolün zehirli, korozif bir yapıda olması bu tip yakıt pillerindeki en büyük problemlerdir. Metanol yerine diğer alkoller de yakıt olarak kullanılabilir.



2.3.3. Alkali Yakıt Pilleri (AYP)

En eski ve en basit yakıt pilidir. NASA tarafından uzay uygulamalarında kullanılmıştır. % 70'e varan verimlere ulaşabilirler. Bu tip yakıt pilinde elektrolit olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılır. İçerdiği KOH miktarına göre çalışması sıcaklığı değişir. % 85 KOH içerenleri yüksek sıcaklıklarda (~250°C), % 35–50 KOH içerenleri ise daha düşük (<120°C) sıcaklıklarda çalışır. Elektrolit bir kalıp (genelde amiyant) içerisinde tutulur. Anotta hidrojen hidroksit iyonları ile birleşerek su buharı oluşturur. Bu reaksiyon elektron üretir. Katotta, oksijen, su ve elektronlar hidroksit iyonları üreterek bu iyonlar tekrar anoda gönderilir (Şekil 3.3). Geniş ölçekte materyal katalizör olarak kullanılabilir. Çok az miktarda bile olsa CO₂ elektrolit için çok zararlıdır. CO₂, KOH ile reaksiyona girerek K₂CO₃ oluşturur ve elektrolitin yapısını değiştirir.



Şekil 2.4. Alkali yakıt pili [3].

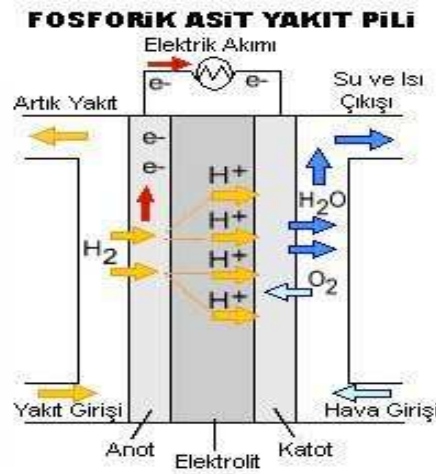
Anot reaksiyonu: $\text{H}_2 + 2 (\text{OH})^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 e^-$

Katot reaksiyonu: $1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 e^- \rightarrow 2 (\text{OH})^-$

Toplam reaksiyon: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{elektrik enerjisi} + \text{ısı}$

2.3.4. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (FAYP)

Elektrolit olarak sıvı fosforik asit kullanılır. 150 – 220 °C gibi orta düzeydeki sıcaklıklarda çalışır. Su anda % 41 verimle elektrik üretimi için çalışan sistemleri mevcuttur. Anotta hidrojen gazı, hidrojen iyonları ve elektronları üretmek için iyonize olur. Elektronlar anottan katoda bir dış çevrim vasıtasıyla iletilir. Hidrojen iyonları katoda elektrolit ile iletilir. Katotta ise oksijen, hidrojen iyonları ve elektron ile reaksiyona girerek su oluşturur (şekil 2.5.). Düşük sıcaklıklara inildikçe fosforik asitin iyon ileticiliği azalır. Fakat dayanıklılığı diğer asitlere göre yüksektir. Anotta ve katotta katalizör olarak platin (Pt) kullanılır. Kullanılan yakıtın CO içermesi performansı kötü etkiler. FAYP fazla ağır olduğundan araçlar için uygun değildir.



Şekil 2.5. Fosforik asit yakıt pili [3].

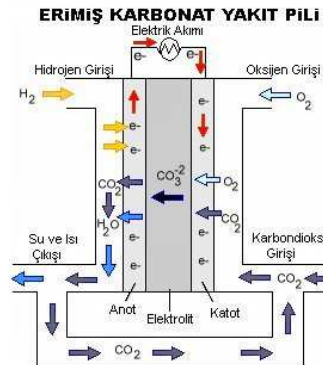
Anot reaksiyonu: $\text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+ + 2e^-$

Katot reaksiyonu: $1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Toplam reaksiyon: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

2.3.5. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (EKYP)

Bu tip yakıt pilinde elektrolit, lityum alüminyum oksit (LiAlO_2) ve seramik kalıp içerisinde tutulan erimiş alkali karbonatlardan oluşur. 600 – 700 °C sıcaklıkları arasında çalışır.



Şekil 2.6. Erimiş karbonat yakıt pili [3].

Anot reaksiyonu: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2e^-$

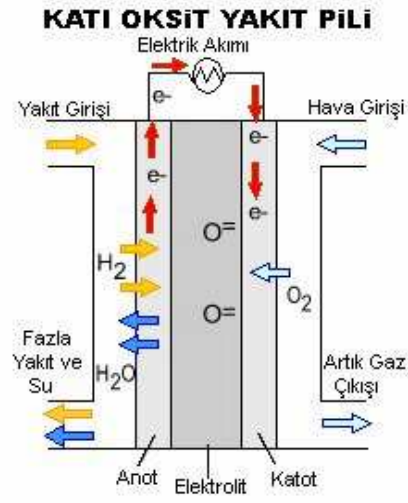
Katot reaksiyonu: $1/2 \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2e^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$

Toplam reaksiyon: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Bu sıcaklıklarda alkali karbonatlar yüksek derecede iletken erimiş tuzlara dönüşür. Yüksek sıcaklıklarda çalıştığından dolayı katalizör olarak pahalı materyallere gerek yoktur. Anotta nikel ve katotta Nikel oksit kullanılır. Ayrıca bir dış yakıt ıslah ediciye gerek yoktur. Metan ve buhar, yakıt pili yığını içerisinde hidrojen zengin bir gaza dönüştürülerek kullanılabilir. Katotta CO_2 kullanılır. CO_2 , O_2 ile karbonat (CO_3^{-2}) iyonlarını oluşturur. Elektrolit üzerinden anoda geçen karbonat iyonları burada hidrojen iyonları ile birleşerek su ve CO_2 oluşturur ve iki elektron serbest bırakılır (şekil 2.6.). EKYP'ler % 50'lere varan verimlere ulaşabilirler.

2.3.6. Katı Oksitli Yakıt Pilleri (KOYP)

Bu tip yakıt pilinde elektrolit, katı, gözeneksiz ve Y_2O_3 içeren zirkonya'dan oluşmaktadır. Saf zirkonya yalıtkan olduğu halde Y_2O_3 ilavesi ile iletkenlik özelliği gösterir. Atmosfer basıncında yaklaşık 1000 °C sıcaklıklarda çalışır. İnce zar teknolojisine sahip daha düşük sıcaklıklarda çalışan modelleri de mevcuttur. Atık gazların yüksek sıcaklıklarda olması sebebiyle kojenerasyon uygulamaları için uygundur. Yüksek sıcaklık sebebiyle pahalı katalizörlerin kullanılması gerekmez ve yakıt, pil yığını içerisinde ıslah edilebilir. O^{-2} iyonları katı bir elektrolit üzerinden katottan anoda aktarılır. Bu iyonlar anotta CO ve H_2 içeren yakıt ile birleşerek elektron oluştururlar (şekil 2.7.). Anotta CO kullanılması sebebiyle doğalgaz, benzin, dizel ve kömür gazı gibi birçok yakıt kullanılabilir. Sıvı bir elektrolit bulunmaması sebebiyle bir karıştırıcıya gerek duyulmaz ve elektrotların yüzmesi, elektrolitin buharlaşması ve katalizörlerin ıslanması gibi problemler yoktur. Elektrik verimleri %50 ye kadar çıkabilir.



Şekil 2.7. Katı oksitli yakıt pili [3].

Anot reaksiyonu: $H_2 + O_2^- \rightarrow H_2O + 2e^-$

Katot reaksiyonu: $1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow O_2^-$

Toplam reaksiyon: $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$

Tablo 2.3. Yakıt pilleri arasındaki farklar.

	PEMYP	DMYP	AYP	FAYP	EKYP	KOYP
Elektrolit	Katı polimer membran	Katı polimer veya sıvı alkalın	KOH	Sıvı fosforik asit	Sıvı erimiş Karbonatlar	Y ₂ O ₃ içeren zirkonya
Çalışma sıcaklığı	80°C	50°C-90°C	65°C-220°C	150°C-220°C	600°C-700°C	600°C-1000°C
Katalizör	Platinyum	Pt veya Pt/Ru	Platinyum	Platinyum	Nikel	Zirkonyum
Transfer edilen iyon	H ⁺	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Yakıt Islahı	Pil Dışı	Gerekmez	Pil Dışı	Pil Dışı	Pil İçi	Pil İçi
Anot Gazı	Hidrojen	Su içinde metanol	Hidrojen	Hidrojen	Hidrojen, Metan	Hidrojen, Metan
Katot Gazı	Saf oksijen veya hava	Havadan Oksijen	Saf Oksijen	Havadan Oksijen	Havadan Oksijen	Havadan Oksijen
Isı Yönetimi	Soğutucu	Soğutucu	Soğutucu-Kojenerasyon	Kojenerasyon	Kojenerasyon	Kojenerasyon
Verim	%35-60	%35-40	%50-70	%35-50	%40-55	%45-60
Uygulama Alanları	Araçlar ve Mobil Uygulamalar	Alçak güçle çalışan taşınabilir elektronik araçlar	Apollo Uzay Mekiğinde Kullanılmıştır	Yüksek Güçle Çalışan Sistemler	MW düzeyindeki büyük ölçekli güç sistemleri	Bütün Güç Sistemleri

2.4. Yakıt Pili Hesaplamaları

2.4.1 Yakıt Pili Açık Devre Voltajı (ADV)

Elektriksel güç oluşturan bazı aygıtların, enerjinin formunu elektriğe dönüştürdüğü açıktır. Yakıt pillerinde enerji hususunda bunu hayal etmek çok daha zordur. Yakıt piline giren hidrojen ve oksijen yakıt pilinden çıktığında elektrik enerjisi ile ısı ve suya dönüşür. Elektriksel güç ve enerji aşağıdaki formülle hesaplanır [12].

$$\text{Güç} = V.I \quad (2.1)$$

$$\text{Enerji} = V.I.t \quad (2.2)$$

Fakat kimyasal giriş ve çıkışlarda enerji kolayca hesaplanamaz. Basit olarak H_2 , O_2 ve H_2O söz konusu olduğunda kimyasal bir enerjiden söz edilebilir. Problem kimyasal enerjinin entalpi, Gibbs serbest enerjisi ve Helmholtz serbest enerjisi gibi koşullar altında tanımlanmasıdır [12].

Sabit sıcaklık ve basınçta çalışan bir yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum elektrik enerjisi elektro-kimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim ile belirlenir. Gibbs serbest enerjisi, sistemin iş yapabilmek için kullanılabilir enerjisine verilen addır. Gibbs serbest enerjisindeki değişim aşağıdaki formülle hesaplanır

$$\Delta G = \Delta H - \Delta TS \quad (2.3)$$

Formülde G, Gibbs serbest enerjisini, H entalpiyi, T mutlak sıcaklığı ve S entropiyi ifade etmektedir. Burada bahsedilen entropi, bir sistemin mekanik işe çevrilemeyecek enerjisini temsil eder. Çoğunlukla bir sistemdeki rasgelelik veya düzensizlik olarak tanımlanır. Entalpi ise, maddenin yapısında depoladığı her tür enerjinin toplamı olarak tanımlanır. Gibbs serbest enerjisinde meydana gelen

değişim, ürünün Gibbs serbest enerjisinden reaksiyona giren maddelerin Gibbs serbest enerjisinin çıkarılmasıyla bulunur. Buda aşağıdaki formülle hesaplanır [12].

$$\Delta G = G_{\text{ürün}} - \Delta G_{\text{reaktant}} \quad (2.4)$$

Tepkimeye girerek suyu oluşturan hidrojen ve oksijen miktarları, 1 mol oksijene karşılık 2 mol hidrojenidir. Hidrojenin 1 molündeki atom sayısı $6,022 \times 10^{23}$ ve bir elektronun yükünün büyüklüğü $1,602 \times 10^{-19}$ dur. Bu durumda 1 mol elektronun sahip olduğu elektrik yükü (buda Faraday sabiti olarak adlandırılmaktadır) aşağıdaki gibidir [12].

$$F = N.e = 96485 \text{ C/mol} \quad (2.5)$$

Tepkimeye giren 2 mol hidrojenin sahip olduğu elektrik yükü ise;

$$2F = 2N.e \quad (2.6)$$

Yapılan elektriksel iş;

$$\text{Elektriksel iş} = \text{Yük} \cdot \text{Voltaj} = 2F \cdot E \text{ Joule} \quad (2.7)$$

Eğer sistem tersine çevrilebilir veya sistemde hiç kayıp olmazsa, yapılan elektriksel iş Gibbs serbest enerjisine eşittir [12].

$$\Delta G = 2F \cdot E \quad (2.8)$$

$$E = \frac{\Delta G}{2F} \quad (2.9)$$

Hidrojenin bazı sıcaklık aralıklarındaki Gibbs serbest enerjisi tablo 2.4 de verilmiştir.

Tablo 2.4. Çeşitli ısılardaki $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2 O$ tepkimesi Gibbs serbest enerjisi [12].

Su ürününün formu	Sıcaklık, °C	ΔG , kJ/mol
Sıvı	25	-237,2
Sıvı	80	-228,2
Sıvı	80	-226,1
Gaz	100	-225,2
Gaz	200	-220,4
Gaz	400	-210,3
Gaz	600	-199,6
Gaz	800	-188,6
Gaz	1000	-177,4

Tablo 2.4.'de enerji değerlerini negatif olması enerjini serbest bırakıldığı anlamına gelmektedir. Tablo 2.4. ve formüllerden hareketle 100 °C operasyon sıcaklığında çalışan yakıt pilinin teorik açık devre voltajı aşağıdaki gibi olur.

$$E = \frac{225.2}{2 \times 96.485} = 1.16 \text{ V} \quad (2.10)$$

100 °C operasyon sıcaklığında çalışan tek hücreli proton değişim zarlı yakıt pili, reaktant olarak hidrojen ve oksijen kullanılması durumunda, 1,16 voltluk bir gerilim üretmektedir. Fakat gerçek yakıt pili uygulamasında üretilen gerilim, sistemde meydana gelen kayıplar nedeniyle teorik değerden daha az çıkacaktır.

2.4.2. Yakıt Pillerinde Kayıplar

Teorik veriler 100 °C sıcaklığın altında çalışan bir yakıt pili için 1,16 voltluk bir değeri verir. Fakat bir yakıt pili yapıp çalıştırıldığında çoğunlukla bundan daha düşük bir voltaj ürettiği görülür [12].

Bir yakıt hücresi oluşturulup çalıştırıldığında yapılabilecek gözlemler;

- Açık devre voltajı, teorik değerlerde daha azdır.

• Voltajda başlangıçta hızlı bir düşüş vardır. Bu durumdan sonra voltaj daha az hızda düşer ve daha doğrusaldır.

• Voltajın hızlı düştüğü durumlarda bazen yoğunluk yükselir.

Teorik yakıt pili voltajı ile gerçek yakıt pili voltajı arasındaki fark 3 başlık altında sıralanabilir [12].

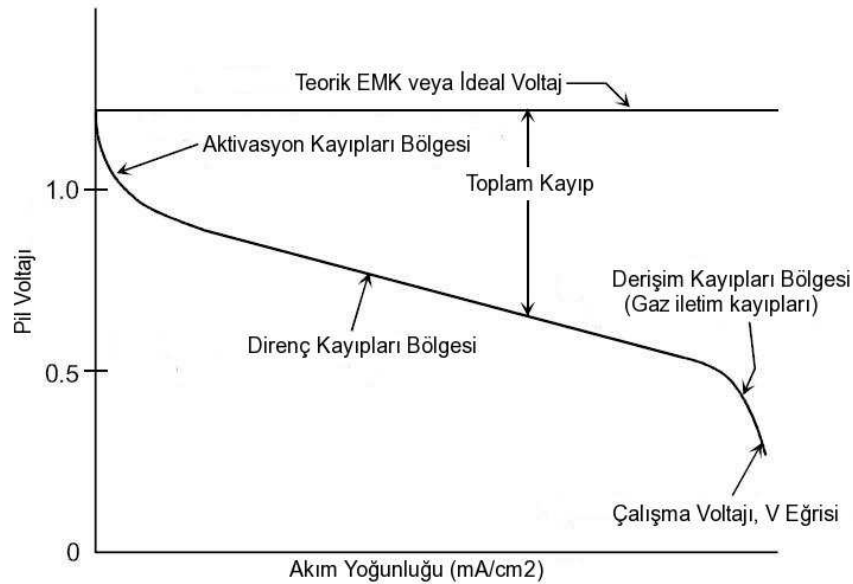
Bunlar;

• Aktivasyon kayıpları: Elektrotların yüzeyinde meydana gelen reaksiyonların yavaşlamasından kaynaklı kayıplardır.

• Direnç kayıpları: Voltaj düşüklüğü, iyonların elektrolitten ve elektronların elektrot maddesinden geçişi sırasında oluşan dirençten kaynaklanır.

• Kütle transferi ve konsantrasyon kayıpları: Elektrot yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu reaktantlarda meydana gelen konsantrasyon değişikliği buna neden olur. Konsantrasyondaki azalma nedeni, elektrot yüzeyine yeterli reaktant taşınamamasından kaynaklanır.

Yakıt pilindeki gerçek performans belirtilen kayıplar nedeniyle şekil 2.7.'deki gibi ideal performanstan farklı bir eğri çizer.



Şekil 2.7. Yakıt pili ideal ve gerçek voltaj akım karakteristiği [22].

2.4.3. Yakıt Pili Verimliliği

Yakıt pilleri, enerji dönüşüm cihazı olarak kullanılmalarını avantajlı kılan birçok özelliğe sahiptir. Bu özelliklerin en önemli iki tanesi yüksek verime sahip olmaları ve çevreye olan olumlu etkileridir. Yakıt pilleri, Carnot çevriminin sınırlamasına bağlı olmaksızın, yakıtlardan doğrudan elektrik elde etmeye yarar. Klasik çevrim teknolojisinde, yakıtta kimyasal biçimde depolanan enerji yanma reaksiyonu ile ısıya ve ısı Rankin çevrimi ile mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu dönüşüm sırasında hem Carnot çevrimi sınırı aşılammakta, hem de mekanik enerji jeneratörle elektriğe dönüştürülürken yeni kayıplar oluşmaktadır. Böylece, verim düşmekte, kalabalık bir makine topluluğu gerekmekte ve çevre kirletilmektedir [23].

Sabit sıcaklık ve basınç altında ideal yakıt pili Gibbs serbest enerjisine eşit miktarda elektrik üretir [12].

Yakıt pilinde verim tersinmez (geri dönüştürülemez) elektrot reaksiyonu, kütle aktarım kısıtlaması ve modülün iç direnci gibi birçok nedenlerle düşmektedir. Yakıt pilleri elektrolit türüne bağlı olarak yaklaşık %40-60 verime sahiptir. Yüksek verime ek olarak, yakıt pilleri sabit sıcaklıkta işletilmektedirler ve elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucu çıkan ısı kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilir. Bu durumda toplam verim %80'e kadar artırılabilir. Buna karşın günümüzdeki fosil yakıtlı termik elektrik santrallerinin ortalama verimi %30 düzeyinde kaldığından, yakıt pili santrale göre çok küçük boyutu ve yüksek verimi ile önem kazanmaktadır [23].

Maksimum teorik yakıt pili voltajı hidrojenin entalpisindeki değişikliğe bağlıdır. Entalpisindeki değişim gaz hidrojen için -241,83 kJ/mol ve sıvı hidrojen için -285,84 kJ/mol dür entalpideki değişim üzerinden teorik yakıt pili voltajı hesabı aşağıdaki formülle elde edilir [12].

$$E = \frac{\Delta H}{2 \times F} = 1.48 \text{ V} \quad (2.11)$$

Yakıt pili verimi, gerçek yakıt pili voltajının maksimum teorik yakıt pili voltajına bölünmesiyle elde edilir.

$$\text{Yakıt pili verimi} = \frac{ADV}{1,48} = 100 \quad (2.12)$$

2.4.3.1 Kojenerasyon sistemi

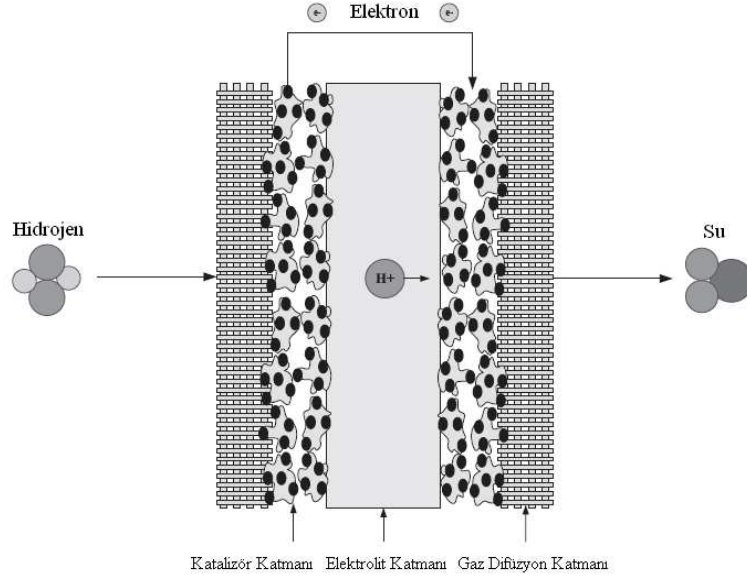
Yakıt pili verimini maksimum seviyelere çıkarmak için, elde edilen bütün ürünleri maksimum seviyede kullanmak gerekmektedir. Yakıt pillerinde elektrik haricinde açığa çıkan en önemli ürün ısıdır. Elde edilen ısı enerjisini de kullanabilmek yakıt pili verimini artıracaktır ve bu da kojenerasyon sistemiyle mümkündür [24].

Kojenerasyon kısaca, enerjinin hem elektrik hem de ısı formlarında aynı sistemden üretilmesidir. Bu birliktelik, iki enerji formunun da tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik sonuçlar oluşturmaktadır. Birincil yakıt rezervlerinin azaldığı ve küresel rekabetin arttığı günümüz ortamında enerji girdilerinde süreklilik, kalite ve asgari maliyetleri sağlamak, kaçınılmaz olmuştur. Bu anlamda kojenerasyon günümüz çağdaş enerji yönetimi teknikleri içinde ön sıralarda yer almaktadır [24].

2.5. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)

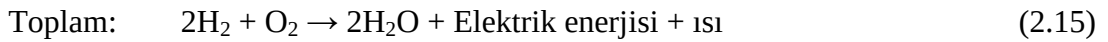
PEM (polimer elektrolit membranlı) yakıt pili anot, katot ve ince bir polimer elektrolit zardan meydana gelir. Anoda gelen hidrojenin kopan elektronlar katot da tekrar birleşir. Protonlar anottan katoda elektrolit membran boyunca taşınır ve elektronlar harici devre üzerinden katoda taşınır. Hidrojen molekülü doğada saf halde bulunmaz, bu nedenle doğal hale gelmesi için başka moleküllerle yeniden birleşir. Bu nedenle yakıt pili çıkışında reaksiyona girecek bir moleküle ihtiyaç vardır, bu da saf oksijen yada serbest havadan sağlanan oksijendir. Yakıt pilinde meydana gelen

elektro-kimyasal reaksiyon sonucunda elektrik, ısı ve su açığa çıkar. Şekil 2.8’de şematize edilen bir yakıt hücresi görülmektedir.



Şekil 2.8. Şematize edilen bir PEM yakıt hücresi [24].

PEM yakıt pilinde hidrojen anot gaz kanalında nemlendirilerek gaz difüzörüne, difüzörden de katalizör katmanına gönderilir. Burada karbon üzerine platin tutturulmuş katalizör yardımıyla hidrojenin yükseltgenmesi yapılır. Ortaya proton iyonları H^+ ve elektronlar çıkar. Protonlar PEM üzerinden, elektronlar ise dış çevrim ile katot tarafına gönderilir. Katotta oksijenin indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. PEM üzerinden gelen protonlar havadan alınan oksijen ve dış çevrim vasıtasıyla gelen elektronlar reaksiyona girerek su ve ısı oluşturulur (şekil 3.8). Anotta ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar ise aşağıdaki şekildedir:



Her bir elektrotun potansiyel değeri farklı olacağından elektrotlar arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bu potansiyel fark oluşan kayıplar sonucu 1V altında çıkar. Daha geniş bir sistem oluşturmak için pilin alanı arttırılmalı veya yakıt pilleri peş peşe dizilerek bir yığın oluşturacak şekilde bağlanmalıdır.

Yakıt pili içerisinde elektrokimyasal reaksiyonların yanında sıvı / gaz akışı, ısı ve kütle taşınım işlemleri de gerçekleşir. Bu işlemlerin gerçekleşmesi ile iki önemli problem ortaya çıkar: i) ısı ve su yönetimi, ii) kütle iletim sınırlamaları. Su yönetiminde PEM'in iyonik iletkenliğini devam ettirmesi için sulandırılması gerekir. Membranın su içeriği, su üretimi ve üç tip su taşınım işlemi arasındaki denge ile belirlenir. Bu üç tip taşınım işlemi; anottan katoda membran üzerinden proton göçmesiyle bağlantılı olarak suyun sürüklenmesi, katotta geri difüzyon ve suyun oksitleyici/yakıt gaz akımlarına veya akımlarından ters tarafa difüzyonudur. İyi bir yönetim olmadığı durumda akım oranları arasında bir dengesizlik oluşur. Sonuçta membranın kuruması veya elektrotların su içinde yüzmesi meydana gelebilir.

Isı yönetimi ise membranın çatlamasına veya kırılmasına sebep olabilecek fazla ısı gerilmelerin önlenmesi için elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ısının atılmasıyla ilgilenir. Ayrıca yakıt pili yığını ve çevreleyen materyaller arasında küçük sıcaklık farklılıkları ısı yönetimini PEMYP'nde önemli bir problem haline getirir.

2.5.1. Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)

Bileşenleri

PEM yakıt pili, prensipte dört ana bileşenden meydana gelirler. Bunlar içten dışa doğru sırasıyla polimer elektrolit membran katmanı, membran ve difüzyon katmanı arasında bulunan katalizör katmanı, gaz difüzyon katmanı ve akış kanalı (Bipolar Plaka) plakasıdır. Ancak günümüz teknolojik uygulamalarında yakıt pilinin fiziki yapısını güçlendirmek, verimliliğini ve ömrünü artırmak için ilave bileşenler kullanılmaktadır. Aynı zamanda polimer elektrolit, katalizör katmanı ve gaz difüzyon tabakası (anot ve katot) birleşik olarak üretilip kullanılmakta ve membran elektrot topluluğu olarak adlandırılmaktadır. Yakıt pilinin temel bileşenleri verimliliği doğrudan etkileyeceğinden çok dikkatli seçilmeli ve özellikleri çok iyi bilinmelidir. Özellikle membran elektrot topluluğu bünyesinde bulunan platin katalizör nedeniyle dış ortamdan etkilenebilmekte ve bu nedenle yakıt pili verimini düşürebilmektedir.

PEM yakıt pili bileşenlerini bir arada tutan önemli bir bileşen de son plakadır. Son plakalar, plastik veya metal maddeden olurlar ve gazların kolay giriş çıkışı için bağlantı noktaları oluşturmak gerekir [25].

2.5.1.1. Polimer Elektrolit Membran

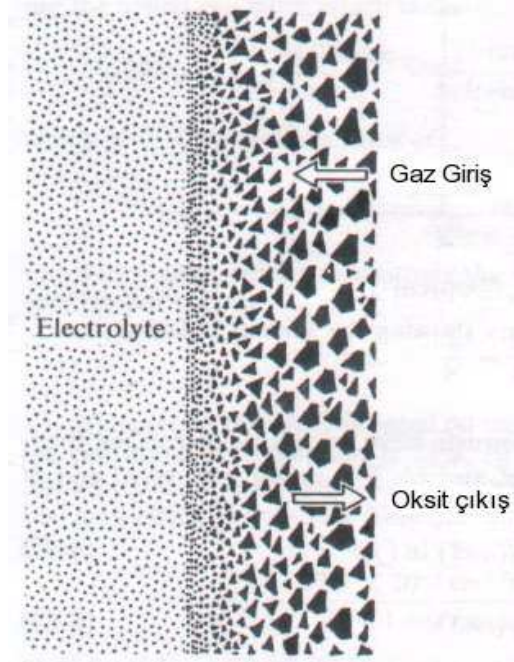
Membran, proton iletimine izin vererek çevrimin tamamlanmasını ve elektron iletimini engelleyerek elektronların dış çevrim vasıtasıyla iletilmesini sağlar. Bu sebeple membran proton iletimine karşı iyi iletken, elektriğe karşı yalıtkandır. Ayrıca yakıt pilinde hidrojen ve oksijenin doğrudan birbirine karışmasını engeller. Membran, bir polimer kalıp içerisinde negatif iyonların tutulduğu bir asidik elektrolit olarak karakterize edilebilir. En geniş kullanılan membran materyali DuPont üretimi olan Nafion® dur. Bu materyalin polimer yapısı politetrafluoroetilen bir omurga içerir. Bu omurga, uçları sülfonik asit gruplarla biten yan zincirlere sahiptir. Kalınlıkları 51µm - 254 µm arasında değişir [22].

Proton değişim membranlı yakıt hücrelerinin en önemli elemanı proton iletim özelliğine sahip polimerik membrandır. Yakıt hücreleriyle ilgili yapılan çalışmaların başında polimerik membranların geliştirilmesi ile ilgili olan çalışmalar yer almaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan membranların çeşitliliğinin az ve maliyetinin yüksek olmasından dolayı alternatif membranların geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar oldukça hızlanmıştır [13].

2.5.1.2. Gaz Difüzyon Katmanı

Bir yakıt pilinde polimer membran-katalizör ile bunlarla iki taraftan temas halinde bulunan gözenekli gaz difüzyon katmanları sandviç görünümünde bir yapı oluşturur. Gaz difüzyon katmanlarının görevleri, tepkimeye girecek gazların, suyun iletiminin sağlanması ve elektrotlar-akış alanı plakaları arasında elektronik ve ısıl temasın sağlanmasından oluşmaktadır. Ayrıca pil için mekanik destek sağlar. Bir gaz difüzyon katmanından istenilen özellikler ise, yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik, yüksek gözeneklilik, iyi kimyasal, mekanik uyum ve düşük maliyettir. Gaz difüzyon katmanında materyal olarak karbon esaslı kâğıtlar, keçeler ve kumaşlar kullanılabilir.

Makro gözenekten mikro gözeneğe doğru değişen bir birleşim iyi performans sağlar (şekil 2.9) [27].



Şekil 2.9. Gaz difüzyon katmanının yapısı [3].

Bu katman, gaz difüzyon katmanının gözenekleri arasında su birikintilerinin oluşmasını önlemek için genel olarak su sevmez (hydrophobic) bir materyalden oluşur. Böylece gazlar, katalizör alanları ile serbestçe temas kurabilirler. Genelde kalınlıkları 0.017 ile 0.04 cm, yoğunlukları 0.21 ile 0.73 g/cm² ve gözeneklilik %70 ile % 80 arasında değişmektedir [26].

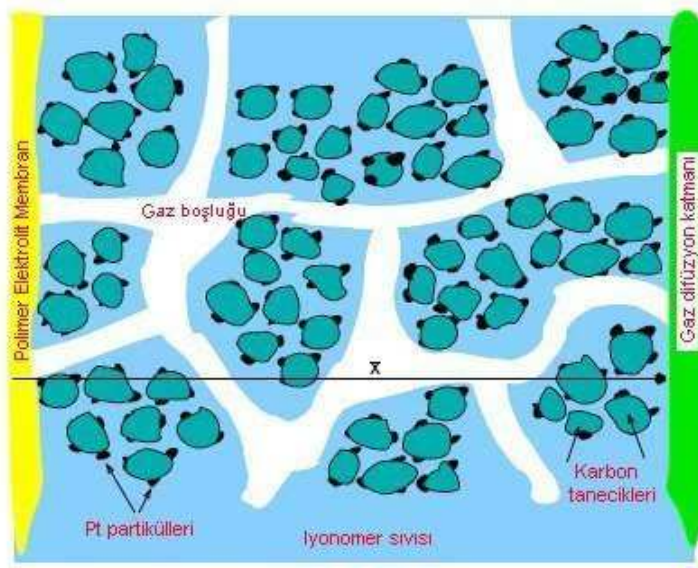
2.5.1.3. Elektrotlar

Gaz difüzyon katmanı, katalizör katmanı ve bağlayıcı ile beraber elektrotları oluştururlar. Elektrokimyasal reaksiyonlar anot ve katottaki katalizör yüzeyleri üzerinde gerçekleşir. Katalizör ve bağlayıcı yapısı membrana veya difüzyon katmanına tutturulabilir. Her iki durumda da membran ve katalizör parçacıklarının temas derecesi uygun proton hareketi için önemlidir.

PEM yakıt pili düşük sıcaklıklarda çalıştığı için yeterli reaksiyon derecesine ulaşmak ve aktivasyon kayıplarını azaltmak için elektrotlar değerli materyaller içerir. Saf hidrojen kullanılması durumunda platinyum çok iyi performans gösterir. Farklı

gazlar içermesi durumunda bu gazlara karşı toleransın artması için diğer önemli materyallerin kullanılması gerekir. Bunlar arasında en çok kullanılanı Rutenyum'dur.

Elektrotların değerli materyal içermeleri sebebiyle elektrot tasarımında ana amaç düşük metal içeriğine ulaşmaktır. Bu sebeple ince film elektrotları iyi bir çözüm sunar. İnce film elektrotu Nafion bağlı olarak çok iyi proton iletici olduğu için iyi performans gösterir.



Şekil 2.10. Tipik bir elektrotun içyapısı [30].

İnce film elektrotu, Şekil 3.11’de görüldüğü gibi büyük karbon tanecikleri üzerine tutturulmuş küçük platinyum parçacıklarının oluşturduğu yüzey alanı ve proton iletimi için bir gözenekli katmandan oluşmaktadır. Tipik elektrot kalınlıkları mikrometreler seviyesindedir. Platinyum içerikleri ise $0,1\text{--}0,4\text{ mg/cm}^2$ arasında değişmektedir.

2.5.1.4. Bipolar Plakalar

Bipolar plakalar çeşitli fonksiyonlarıyla yakıt hücreleri için önemli anahtar bir elemandır. Bu doğrultuda dünya çapında yakıt hücresi uygulaması için hafif-ağırlık ve maliyet etkili bipolar plaka yapmak için yoğun çaba sarf edilmiştir. Bipolar plakalar yakıt pili yığınının yaklaşık %38’ini oluşturur ve yakıt pili yığınının membran elektrot topluluğundan sonra en önemli bileşendir [28].

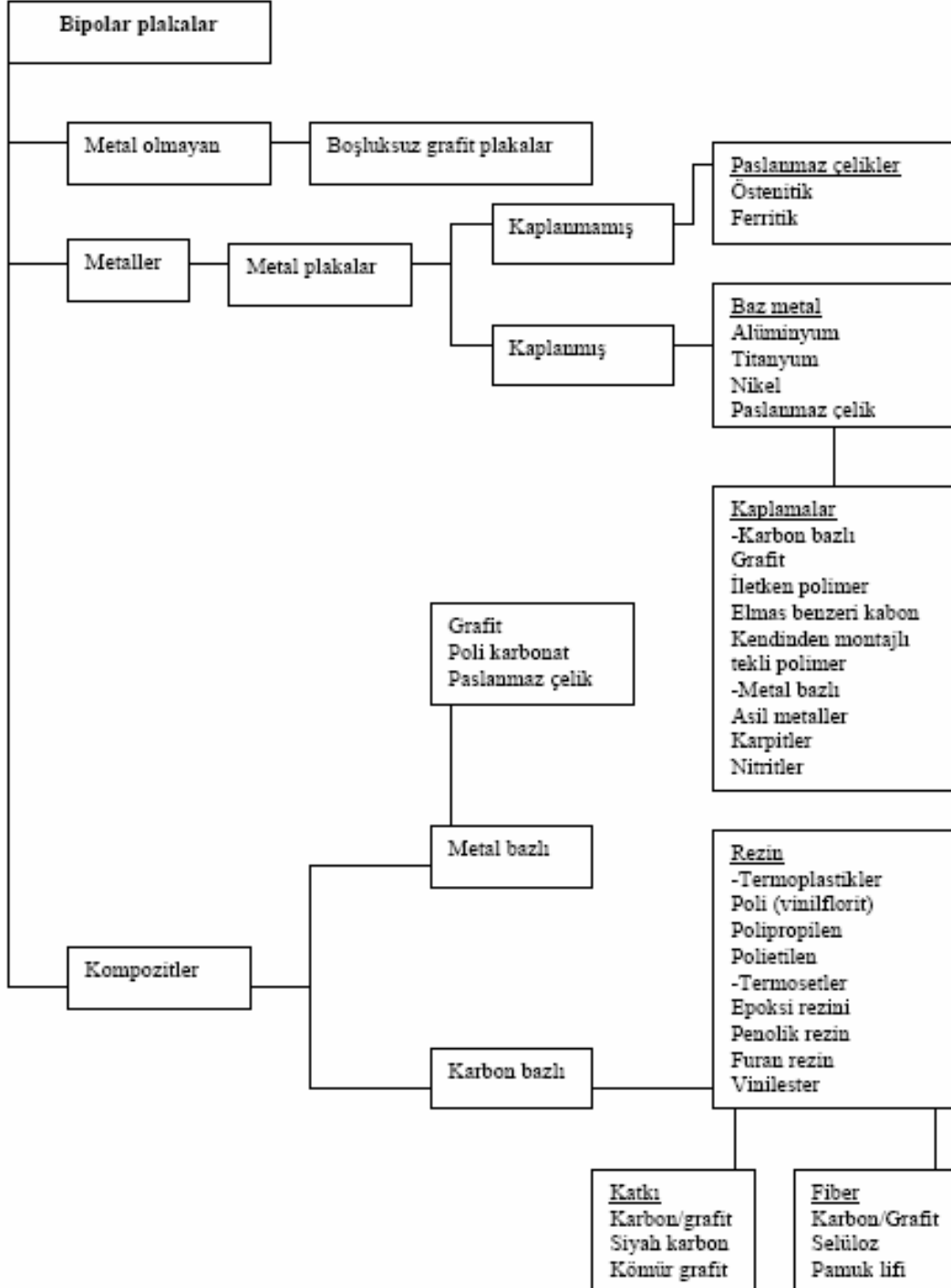
Bipolar plakaların tasarımı mühendislik açısından çok önemli bir yer almaktadır. Bipolar plakalar; hem elektrik direncini azaltmak için hem de reaksiyon gazlarının akış kanallarından etkili bir şekilde taşınması için ince ve iyi bir kontak yüzey alanına sahip olmaları gerekir. Akış kanalları içerisindeki sıvı akışı, kütle ve ısı transferi yakıt pilinin performansında önemli bir rol oynamaktadır [29].

Bipolar plakalar bir yakıt hücresi yığınının şu özelliklere sahip olmalıdır:

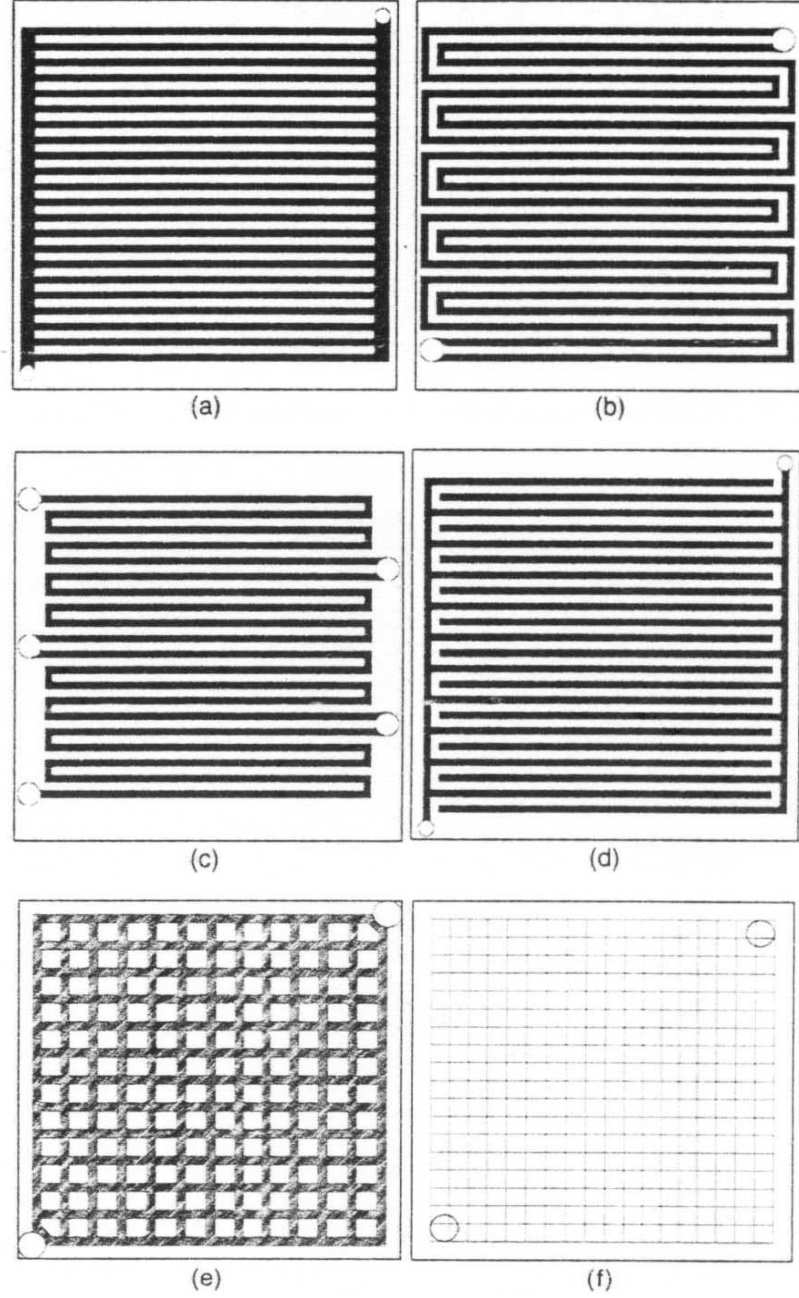
- İstenen voltajda yakıt hücresi yığını oluşturmak için geçerli yakıt hücresine seri halde bağlanır.
- Elektronları toplar ve anottan katoda taşır.
- Anodu H_2 ve katodu O_2 ile besler.
- Bir yandan O_2 'nin, diğer yandan H_2 'nin ayrışmasına yardımcı olur.
- Oluşturulan yığındaki membranı ve elektrotları sıkıştırıcı bir güçle destekler [40].

Bipolar plakalar yakıt hücresi yığınının ağırlıkça %80 ve maliyet olarak %45'ini oluşturmaktadır. Reaktanların aktif yüzey alanlarına dağıtılması, yığın içinde birim hücreleri birbirinden ayrılması, ısıнын ve oluşan suyun aktif alanlardan uzaklaştırılması, akımın hücreden hücreye taşınması ve reaktanlar ile soğutucuların (sıvı veya hava) sızıntısının önlenmesi, reaktant gazların nemlendirilmesi gibi birçok önemli göreve sahiptirler. Bunun yanında plaka malzemelerin de kimyasal uyumluluk, korozyona karşı direnç, düşük maliyet, düşük yoğunluk, göreceli yüksek elektronik iletkenlik, gaz iletkenliği/sızdırmazlığı, işlenebilirlik, göreceli yüksek dayanım ve ısı iletkenliği özelliklerinin olması istenmektedir. Bipolar plaka malzemesi olarak, elektro-grafit, karbon-karbon kompozit, metal levha, grafit-polimer kompozitler kullanılmaktadır. Grafit-polimer kompozit bipolar plakalar (GPKBP) PEM yakıt hücresi ortamında yüksek korozyon direnci göstermektedirler. Üretim maliyetinin düşük olması ve seri üretime uygun olması bipolar plaka üretiminde grafit-polimer kompozitlerinin kullanımını cazip göstermektedir. GPKBP üretiminde PVDF, LCP, PPS gibi termoplastik reçineler ve fenolikler; epoksiler ve vinil esterler gibi termosetler kullanılmaktadır [31].

Tablo 2.5. PEM yakıt pilinde kullanılan bipolar plakaların hammadde özellikleri [41].



Akış alanı plakaların gaz difüzyon bölgelerine bakan kısımlarında akış kanalları bulunur. Bunların kanal geometrisi kütle transferi için oldukça önemlidir



Şekil 2.11. Akış alanı konfigürasyonları [22].

Şekil 2.11.'de genel kanal konfigürasyonları verilmiştir: a)Paralel gaz kanalları, b)Serpantin tipi akış kanalı, c)Mirrored akış alanı, d)Parçalı akış alanı, e)Akış kanalsız gaz difüzyon katmanı, f)Metal ağ akış alanı [22].

Paralel akış alanı tasarımında en çok karşılaşılan problem bitişik kanallar ve gaz blokajları arasında basınç eşitsizliklerinin ortaya çıkmasıdır. Serpantin tipi akış kanalları ise Ballard Power Systems tarafından patenti alınan bir akış alanı yapılandırmasıdır [3].

Serpantin tipi akış kanalı başlangıçtan sona kadar süreklidir. Serpantin plakanın bir avantajı, yol üzerinde su zerresi gibi bir engelin akışı engellememesidir. Tıkanık bir serpantin kanalında tepken gazlar, akım toplayıcı plakaların altındaki akışla kanalı geçmeye zorlanır ve gözenekli alana doğru geçer ve yan kanal ile birleşir. Bu yan geçiş ile gazlar tıkanıklığın olduğu bölgeye doğru difüze olabilir. Bu tıkanıklığın net etkisi ile artan bir basınç düşümü olacak fakat aktif alan kaybı olmayacaktır. Serpantin akış kanalının aksine paralel akış kanalı durumunda bir kanaldaki engel, tıkanıklığın alt bölgesinde bir ölü bölge oluşturacaktır. Bu ölü bölge içerisinde tepken gazlar bulunmayacak ve aktif olmayacaktır [3].

Mirrored tipin patenti General Motors tarafından alınmıştır. Paralel tip kanallar ve tek serpantin akış kanalının iyi bir uyumu ile ortaya çıkmıştır [3].

Parçalı tipi Ledjef [1993] ve Wilson [1995] tarafından geliştirilmiştir. Parçalı tasarım tipinde kanalların uçları kapalıdır. Akış gözenekli alan üzerinden akım toplama plakaları altından yan kanal içerisine gönderilir [32].

Yakıt pillerinin verimliliğini artırmak ve maliyetini düşürmek amacıyla bipolar plakalar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak;

Herman, A., Chaudhuri, T. ve Spagnol, P. yaptıkları “Proton değişim zarlı yakıt pilleri için bipolar plakaların gözden geçirilmesi” isimli çalışmada; yakıt pillerinde kullanılan bipolar plaka malzemelerini araştırmışlardır. Metallerin levha olarak mekanik kararlılık, elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik ve kolay işlenebilme özelliklerinden dolayı potansiyel bipolar plaka adayları olduğunu tespit

etmişlerdir. Bipolar plaka olarak kullanılan metaller 80 °C ve 2–3 Ph, operasyon değerlerine sahiptirler ve bu nedenle korozyon ve bozunmaya karşı dayanıklıdırlar. Paslanmaz çelikler yüksek dayanım, yüksek kimyasal kararlılık, düşük gaz geçirgenliği, geniş alaşım seçenekleri, kolay üretim ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilebilir. Korozyondan kaçınmak için metalik bipolar plakalar koruyucu kaplama filmleriyle kaplanırlar. Kaplamalar iletken olmalı ve ana metale tamamen yapışmalıdır. İlave olarak ana metalle kaplama malzemesinin termal genleşme katsayısı, mikro çatlakları ve mikro delikleri ortadan kaldırmak için olabildiğince birbirine yakın olmalıdır [41].

Joshep, S., McCalure, J.C., Chianelli, R., Pich, P. ve Sebastian, P.J. yaptıkları “İletken polimer kaplanmış paslanmaz çelik bipolar plakalar” isimli çalışmada; paslanmaz 304 çeliğe iletken polimer kaplayarak sonuçları incelemişlerdir. Çalışmada paslanmaz çelik üzerine PANI (iletken polimer polianilin) ve PPY (iletken polimer poliprol) olmak üzere iki çeşit kaplama kullanılmıştır. Polimerleşme ve polimerlerin paslanmaz çelik üzerindeki ölçümleri için periyodik voltametri (metallerin iletken polimer kaplanmasında kullanılan ölçüm ve analiz cihazı) kullanılmıştır. Paslanmaz çelik numuneleri 300-800 mikron kumlu zımpara kağıdı ile silinmiş ve aseton içinde yüzeyleri temizlendikten sonra sıcak havada kurutulmuştur. İletken polimerle kaplanan paslanmaz çelik numunelerinin elektrik iletkenlikleri test edildikten sonra asitli ortamda ve yakıt pili üzerinde korozyon testleri yapılmış ve sonuçta kaplanmış çeliğin korozyon potansiyeli, kaplanmamış olana göre daha fazla pozitif değere sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kaplama altında ince bir oksit tabakanın oluşudur. Bu oksit filmi, yapının korozyonunu yavaşlatmaktadır [42].

Dhakte, S.R., Mathur, R.B., Kakati, B.K. ve Dhami, T.L. yaptıkları “PEM yakıt hücreleri için basınçlı kalıp tekniğince hazırlanan grafit-kompozit bipolar plakanın özelliği” isimli çalışmada; farklı dolgu elemanlarıyla grafit-kompozit bipolar plakalar üretmiş ve sonuçlarını incelemişlerdir. Dolgu elemanı olarak birkaç mikron boyutunda sentetik karbon, birkaç mikron boyutunda karbon siyahı partikülleri ve boyu 1 mm den daha az çapı 7 mikron karbon-fiberler, 50-150 mikron zerre boyutundan daha büyük doğal grafit kullanılmıştır. Fenolik reçinenin (polimer

yapımında kullanılan hidrokarbon yapılı bir reçine) iki türü, öncü polimer matris olarak kullanılmıştır. Bu katkı maddeleriyle elde edilen bipolar plakaların mukavemeti artırılmış ve PEM yakıt pillerinde kullanılabileceği görülmüştür [43].

Wang, H. ve Turner, J.A. yaptıkları “Proton değişim zarlı yakıt pili için bipolar plaka malzemesi olarak ferritik paslanmaz çelikler” isimli çalışmada; AISI 400 serisi ferritik paslanmaz çeliklerin özellikleri PEM yakıt pili için incelenmiştir. Polimer elektrolit zarlı yakıt hücresindeki bipolar plakanın doğasına benzetmek için çözüm oluşturması amacıyla, ferritik paslanmaz çeliklere hem ara yüzeysel temas rezistansı (ICR) hem de elektrokimyasal korozyon teknikleri uygulanmıştır. AISI434, AISI436, AISI44 ve AISI446 paslanmaz çelik numuneleri üzerinde çalışılmış ve çıkan sonuçlara göre AISI446 iki kutuplu plaka malzemesi olarak kullanılabileceği tavsiye edilmiştir [44].

Wang, H., Turner, J.A., Li. ve X., Teeter, G. yaptıkları “PEM yakıt hücresinde bipolar plakalar için paslanmaz çeliklere modifikasyon yöntemiyle $\text{SnO}_2\text{:F}$ kaplama” isimli çalışmada; paslanmaz çeliklerin yüzeyi ön-yontma tekniği ile $\text{SnO}_2\text{:F}$ film ile kaplanmış ve sonuçlar incelenmiştir. Polimer elektrolit zarlı yakıt hücrelerde bipolar plaka yerine paslanmaz çelik kullanımı üzerine ana tartışmaların içeriği anot ve katot ortamdaki yakıt hücrelerin korozyon direnci, ısıl iletkenlik ve elektriksel iletkenliktir. Ön-yontma baskılı ve kaplanmış AISI444 ve AISI446 için hem enerjik hem de potentiostatik polarizasyon meydana getirilmiş ama kaplanmış çeliklerin korozyon direnci orijinal kaplama metoduyla elde edilen kadar iyi olmamıştır. Polimer elektrolit zarlı yakıt hücre anot ortamında ön-yontma baskılı ve kaplanmış AISI444 daha önce kaplanmış (orijinal) AISI444 sonuçlarıyla mukayese edildiğinde daha yüksek akım göstermiştir. Burgu elektron spektroskopisi (AES) araştırması göstermiştir ki ön-yontma baskılı ve kaplanmış AISI444 PEMFC katot ortamında daha ağır çözünmüştür, bu uygulamanın PEMFC anot ortam üstünde korozyonu artırdığı teyit edilmiştir. Hem kaplanmış AISI444 hem de kaplanmış AISI446 modifiye kaplamalarında polarizasyon sonrasında kırılma ve dökülmeler görülmüştür. Orijinal çelik kaplama uygulamaları ile karşılaştırıldığında bunlar polarizasyon kıvrımlarındaki yüksek anotik akımların görünürdeki kaynaklarıdır.

Sonuç olarak hem PEMFC ortamlarındaki korozyon rezistansı hem de modifiye $\text{SnO}_2\text{:F}$ kaplamanın yapışması daha fazla geliştirmeye ihtiyaç duymaktadır [45].

Du, L. ve Jana, S.C. yaptıkları “Proton değişim zarlı yakıt pillerinde bipolar plakalar için son derece iletken epoksi-grafit alaşımları” isimli çalışmada; karbona epoksi reçinesi ilave ederek epoksi alaşımlı grafit bipolar plaka elde etmişlerdir. Epoksi alaşımın termal, mekaniksel ve elektriksel özellikleri bipolar plakada da görülmüş ve bu bipolar plakanın proton değişim zarlı yakıt pilinde çok uygun olduğu tespit edilmiştir [46].

Ralph, T.R., Hards, G.A., Keating, J.E., Campbell, S.A., Wilkinson, D.P., Davis, M., St-Pierre, J. ve Johnson, M.C. yaptıkları “Proton değişim zarlı yakıt pilleri için düşük maliyetli elektrotlar” isimli çalışmada; düşük maliyetli, yüksek hacimli elektrot geliştirmişlerdir. Düşük oranda platin ($\leq 0,6 \text{ mg Pt cm}^{-2}$ katot ve $\leq 0,25 \text{ mg Pt cm}^{-2}$ anot) yüklenen elektrotlar gerçek yakıt pili koşullarında çalıştırılmıştır. Çalışma sonucunda 0,7 V gerilim ve 0,4 W güç elde edilmiştir ve kullanılan platin miktarının 1 kW güç için 1,5 g dan daha az miktara karşılık geldiği görülmüştür [47].

3. MODELLEME ÇALIŞMASI

3.1. Modellemenin Amacı

Modellemenin amacı, üç boyutlu kararlı halde çalışan sayısal bir yakıt pili modeli kurarak sanal ortamda deneysel incelemeler yapmak, çalışma koşullarını belirleyerek hesaplamalı akışkan dinamiği analizi yapmak, elde edilen sonuçlarından kütle akışı ve akım yoğunluğunu incelemek, kütlenin ve akımın korunduğunu gözlemlemektir.

3.2. Model Varsayımları

- Sistem kararlı halde çalıştırılmıştır.
- Gazlar için ideal gaz kanunları uygulanmıştır.
- Üç boyutlu inceleme yapılmıştır.
- Membrandaki su oranı, dolayısıyla iletkenlik sabit kabul edilmiştir.
- Membranın gaz geçirmez olduğu ve hiçbir şekilde reaktantların diğer gaz kanalına geçmediği varsayılmıştır.
- Akışın laminar olduğu varsayılmıştır.
- Elektrotlar, gözenekliliğin ve geçirgenliğin homojen olarak dağıldığı bölgeler olarak kabul edilmiştir.
- İzotermal durum varsayılmıştır.
- Elektrokimyasal reaksiyonlar için Butler-Volmer kinetik formülasyonu kullanılmıştır

3.3. Kullanılan Sabitler

Modelleme çalışmasında kullanılan sabitler tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Modellemede kullanılan sabitler.

Parametre	Sembol	Birim	Değer	Referans
Genel Sabitler				
Faraday Sabiti	F	C/kmol	9.6485×10^7	
Genel Gaz Sabiti	R	J/mol K	8.314	
Sıcaklık	T_0	K	353	
Atmosferik Basınç	p_0	Pa	1.013×10^5	
Elektrokimyasal Parametreler				
Açık devre voltajı	V_{oc}	Volt	0.95	
Anot hacimsel transfer akım	R_{an}	A/m ³	1.5×10^9	[10]
Anot referans konsantrasyon	$c_{H_2}^{ref}$	kmol/m ³	1	[10]
Anot konsantrasyon üsteli	γ_{an}	-	0.5	[10]
Anot transfer katsayısı	α_{an}	-	1	[10]
Katot hacimsel transfer akım	R_{cat}	A/m ³	4×10^6	[10]
Katot referans konsantrasyon	$c_{O_2}^{ref}$	-	1	[9]
Katot konsantrasyon üsteli	γ_{cat}	-	1	[10]
Katot transfer katsayısı	α_{cat}	-	1.25	[9]
Temas direnci	R_c	ohm-m ²	2.5×10^{-6}	
Hücre çalışma sıcaklığı	T	K	353	
Hücre çalışma basıncı	P	Pa	2×10^5	
Katot bipolar tabaka elektrik potansiyeli	V	Volt	0.75	
Anot gaz kanalı giriş kütle akış oranı	nemli H ₂	kg/s	6.0×10^{-7}	
Anot gaz kanalı giriş kütle yüzdeleri	H ₂ , O ₂ , H ₂ O	-	0.8, 0.0, 0.2	
Katot gaz kanalı giriş kütle akış oranı	nemli hava	kg/s	5.0×10^{-6}	
Katot gaz kanalı giriş kütle yüzdeleri	H ₂ , O ₂ , H ₂ O	-	0.0, 0.2, 0.1	
Gaz Difüzyon Tabakası				
Gözeneklilik	ϵ	-	0.5	[10]
Geçirgenlik	κ	m ²	1×10^{-12}	[10]
Elektrik iletkenliği	S	1/ohm-m	1000	[10]
Isıl iletkenlik	k	W/m-k	2.08	[10]
Katalizör Tabakası				
Gözeneklilik	ϵ	-	0.5	[10]
Geçirgenlik	κ	m ²	1×10^{-12}	[10]
Elektrik iletkenliği	S	1/ohm-m	1000	[10]
Isıl iletkenlik	k	W/m-k	2.08	[10]
Yüzey hacim oranı	h	1/m	2×10^5	[10]

Membran				
Gözeneklilik	ε	-	0.5	[10]
Geçirgenlik	κ	m^2	1×10^{-8}	[10]
Kuru yoğunluk	ρ_m	kg/m^3	1980	[10]
Kuru ağırlık	M_m	kg/kmol	1100	[10]
Isıl iletkenlik	k	$\text{W}/\text{m-k}$	2	[10]
Protonik iletkenlik katsayısı	β	-	1	[39]
Protonik iletkenlik üsteli	ω	-	1	[39]
Bipolar Plakalar				
Elektrik iletkenliği	S	$1/\text{ohm-m}$	1000	[11]
Isıl iletkenlik	k	$\text{W}/\text{m-k}$	55	[33]

3.4. Modellemede Kullanılan Denklemler

3.4.1. Elektrokimyasal Modelleme

PEM yakıt pillerinin modellemesinde, elektrokimyanın merkezinde hidrojenin yükseltgenmesi ve oksijenin indirgenmesi reaksiyonlarının hesaplanması oluşturmaktadır. FLUENT'in PEM modülünde, bu elektrokimyasal işlemler katalizör yüzeylerde (iki kataliz tabakanın içerisinde ve membranın her iki tarafı) heterojen reaksiyon olarak ele alındı.

Bu reaksiyonların arkasındaki itici kuvvet (katı faz potansiyeli ve elektrolit/membran faz potansiyeli arasındaki fark) yüzey aşırı potansiyeli kabul edilir. İki potansiyel denklem FLUENT PEM modülünde çözülmüştür. Denklem 3.1 katı iletken malzemelerdeki (akım toplayıcı kolektörler ve katı gözenekli geçirgen) elektron transferi durumundaki potansiyeli, denklem 3.2 ise proton transferi sırasındaki potansiyeli ifade eder.

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

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

Bu denklemlerdeki sembollerin ifadesi şöyledir:

σ : Elektriksel iletkenlik (1/ohm-m)

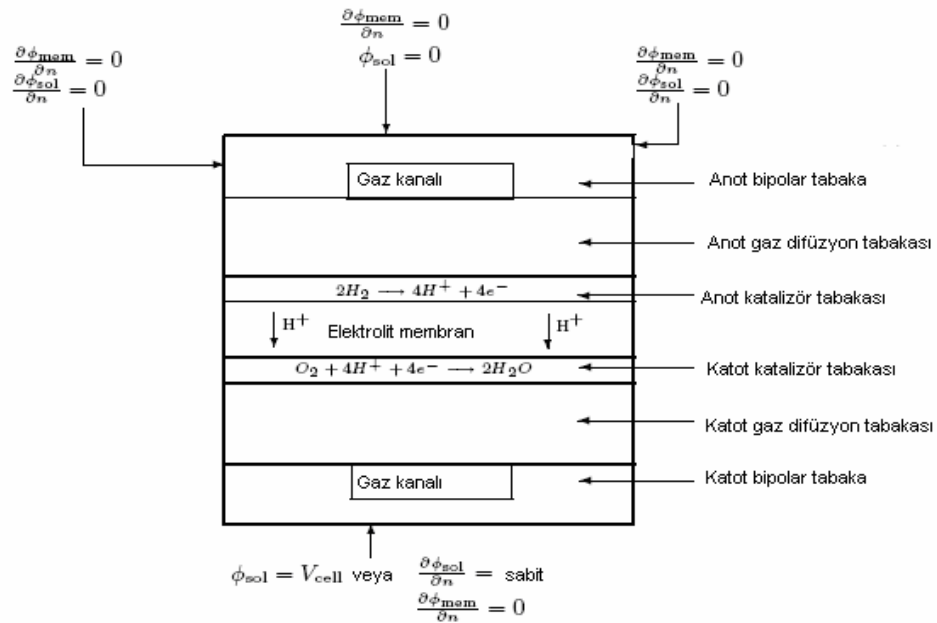
ϕ : Elektrik potansiyeli (volts)

R : Hacimsel transfer akım (A/m^3)

Şekil 3.1. katı ve membran (ϕ_{sol} ve ϕ_{mem}) elektrik potansiyeli çözmek için uygulanan sınır şartlarını göstermektedir.

Elektriksel akımın meydana geldiği ve elektriksel akımın oluşmadığı iki tip dış sınır vardır. Dış sınırdaki protonik geçiş olmadığından dolayı, membran faz potansiyeli (ϕ_{mem}) için dış sınırlarda sıfır akı sınır şartı uygulanmıştır.

PEM yakıt hücresinin içerisinde (katı faz potansiyeli için) anot ve katot tarafında dış elektrik devresi ile bağlantılı ve sadece bu sınırların geçtiği bölgelerde elektriksel akımın olduğu dış sınır bölgeleri vardır. Katı faz potansiyelinde diğer bütün dış sınırlar için sıfır akı sınır şartı uygulanmıştır.



Şekil 3.1. ϕ_{sol} ve ϕ_{mem} için sınır şartları

Denklem 3.1 ve 3.2.'deki hacimsel transfer akımlar yalnızca katalizör tabakaların içerisinde sıfırdan farklı bir değerdedir ve şu şekilde hesaplanmıştır;

Katı fazı için;

$$\text{Anot tarafında } R_{\text{sol}} = -R_{\text{an}} (<0)$$

$$\text{Katot tarafında } R_{\text{sol}} = +R_{\text{cat}} (>0)$$

Membran fazı için;

$$\text{Anot tarafında } R_{\text{mem}} = +R_{\text{an}} (>0)$$

$$\text{Katot tarafında } R_{\text{mem}} = -R_{\text{cat}} (<0)$$

Denklem 3.1. ve 3.2.'deki ifadeler aşağıdaki formülasyonlarla ifade edilebilir.

$$R_{\text{an}} = j_{\text{an}}^{\text{ref}} \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{an}}} \left(e^{\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{an}} / RT} - e^{-\alpha_{\text{cat}} F \eta_{\text{an}} / RT} \right) \quad (3.3)$$

$$R_{\text{cat}} = j_{\text{cat}}^{\text{ref}} \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{\text{ref}}} \right)^{\gamma_{\text{cat}}} \left(-e^{+\alpha_{\text{an}} F \eta_{\text{cat}} / RT} + e^{-\alpha_{\text{cat}} F \eta_{\text{cat}} / RT} \right) \quad (3.4)$$

Burada semboller;

j^{ref} : Hacimsel referans akım yoğunluğu (A/m³)

$[], []_{\text{ref}}$: Lokal türün konsantrasyonu, referans değer (kgmol/m³)

γ : Bağımlı konsantrasyon (birimsiz)

α : Transfer katsayısı (birimsiz)

F : Faraday sabiti (9.6485×10⁷ C/kmol)

Yukarıda belirtilen denklem Butler-Volmer fonksiyonunun genel formülasyonudur. Bu denklemin basitleştirilmiş hali bize Tafel denklemini verir ve bu da aşağıda gösterildiği gibidir.

$$R_{an} = j_{an}^{ref} \left(\frac{[H_2]}{[H_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left(e^{\alpha_{an} F \eta_{an} / RT} \right) \quad (3.5)$$

$$R_{cat} = j_{cat}^{ref} \left(\frac{[O_2]}{[O_2]_{ref}} \right)^{\gamma_{cat}} \left(e^{-\alpha_{cat} F \eta_{cat} / RT} \right) \quad (3.6)$$

Butler-Volmer fonksiyonu varsayılan değerleri FLUENT PEM modülünde katalizör tabakaların içerisindeki transfer akımların hesaplanmasında kullanılmıştır.

Burada kinetik için itici güç lokal yüzey aşırı potansiyeli (katı ve membran faz arasındaki fark) kabul edilir ve η ayrıca aktivasyon kaybı olarak bilinir.

Katot tarafına anottan geçerek elde edilen elektrik potansiyel kazanç, katot tarafındaki açık devre voltajı (V_{oc}) çıkarılarak hesaba katıldı.

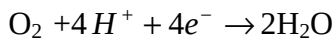
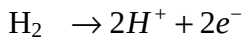
$$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem} \quad (3.7)$$

$$\eta_{cat} = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{oc} \quad (3.8)$$

Denklem (3.1.)'den (3.8.)'e kadar iki potansiyel alanı elde edilmiştir.

3.4.2. Akım ve Kütlenin Korunumu

Anotta ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar sırasıyla aşağıdaki şekildedir:



Kütle korunumu ile ilgili eşitlikler denklem 3.9, 3.10, 3.11’de verilmiştir.

$$S_{H_2} = -\frac{M_{w,H_2}}{2F} R_{an} \quad (3.9)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{w,O_2}}{4F} R_{cat} \quad (3.10)$$

$$S_{H_2O} = \frac{M_{w,H_2O}}{2F} R_{cat} \quad (3.11)$$

Toplam elektrik akımının anot ve katotta üretildiğinden, anot ve katotta üretilen akım değerlerinin aynı olması gerekir. Dolayısıyla akımın korunumu için 3.12 numaralı eşitlik yazılabilir.

$$\int_{an} R_{an} \cdot dV = \int_{cat} R_{cat} \cdot dV \quad (3.12)$$

Bazı tersinmez olayların etkisi ile yakıt hücre proseslerinde reaktantların kimyasal enerjisinin tamamı elektrik enerjine aktarılamaz. Toplam enerji denklemi aşağıdaki gibi ifade edildi.

$$S_h = \Delta H - R_{an,cat} \cdot \eta_{an,cat} + I^2 R_{ohm} + h_L \quad (3.13)$$

Burada ΔH elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda net entalpi değişimini, $R_{an,cat} \eta_{an,cat}$ anottaki ve katottaki gerilim kayıpları ve transfer akımın sonucunu, $I^2 R_{ohm}$ ise ohmik direnç sonrası oluşan ısıyı, h_L ise suyun yoğuşma/buharlaştırma sonucu entalpi değişimini ifade eder.

Reaksiyonlar iki kataliz tabakada yüzey reaksiyonları olarak ele alınmıştır ve reaksiyona giren bileşenlerinin yayılma akıları reaksiyon sonucu oluşan ürün oranı tarafından balanslandığı varsayılmıştır.

$$\frac{\rho D_i}{\delta} (y_{i,surf} - y_{i,cent}) r = \frac{M_{w,i}}{nF} R_{an,cat} \quad (3.14)$$

Burada semboller;

D_i : Reaksiyon bileşenlerinin kütle yayılma gücü, gaz difüzyon özelliği (m^2/s)

r : Katalizör tabakasının spesifik reaksiyon yüzey alanı ($1/m$)

$y_{i,surf}$: Reaksiyon yüzeyindeki bileşenin kütle kesri

$y_{i,cent}$: Hücre merkezindeki bileşenin kütle kesri

δ : Reaksiyon yüzeyi ile hücre merkezi arasındaki ortalama uzaklık (m)

Yukarıdaki 3.14 denkleminin sol tarafındaki ifade reaksiyon yüzeyindeki yayılma akısını sağ tarafındaki ifade ise oluşan kütle oranını gösterir. Reaksiyon yüzeyi ile hücre merkezi arasındaki ortalama uzaklık $\delta=1/r$ olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.14, reaksiyon yüzeyindeki H_2 ve O_2 konsantrasyonlarını elde etmek için Newtonian çözüm prosedürünü uygulayarak kullanılmıştır.

3.4.3. Suyun Oluşumu ve Etkileri

PEM yakıt pilleri düşük sıcaklık değerlerinde ($<100^\circ C$) çalıştıklarından dolayı, su buharı genellikle yüksek akım yoğunluğunda yoğunlaşarak sıvı su fazına geçer. Bu geçiş yaşandıktan sonra membran sulu halde olur, ayrıca oluşan su gaz difüzyonunu engeller, difüzyon oranını ve etkili reaksiyon yüzey alanını düşürür. Böylece hücre performansı etkilenmiş olur. FLUENT PEM modülünde sıvı fazda suyun oluşumu ve taşınması işlemi sistemde doymuş model olarak Nguyen [36] ve Nam at al. [37] makalelerine dayanarak sıvı fazda suyun oluşumu ve taşınması işlemleri şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \vec{V}_l s) = r_w \quad (3.15)$$

Eşitlikte alt indis olarak gösterilen , l , sıvı fazdaki su, r_w ise yoğunlaşma oranını gösterir ve ifadesi şu şekildedir;

$$r_w = c_r \max \left(\left[(1-s) \frac{P_{wv} - P_{sat}}{RT} M_{w,H_2O} \right], [-s \rho_l] \right) \quad (3.16)$$

Burada $-r_w$ hem su buharı denkleminde hem de kütle kaynağı denkleminde eklenir. Membran içerisinde bu terim uygulanmaz. Yoğunlaşma oranı sabiti $c_r = 100 \text{ s}^{-1}$ dir. Gaz kanalı içerisindeki sıvı hızı, V_l , gaz hızına eşit olarak varsayıldı. Yüksek dirençli gözenekli bölgelerin içinde, kapiler difüzyon teriminin kullanımı bize denklem 3.15'deki konvektif terimini değiştirmemizi sağlar.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_l s)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_l \frac{K s^3}{\mu_l} \frac{dp_c}{ds} \nabla s \right] = r_w \quad (3.17)$$

Yaş faza bağlı olarak, kapiler basıncı aşağıda gösterildiği gibi s 'nin bir fonksiyonu (Leverett fonksiyonu) olarak hesaplanmıştır.

$$p_c = \begin{cases} \frac{\sigma \cos \theta_c}{\left(\frac{K}{\varepsilon}\right)^{0.5}} (1.417(1-s) - 2.12(1-s)^2 + 1.263(1-s)^3) & \theta_c < 90^\circ \\ \frac{\sigma \cos \theta_c}{\left(\frac{K}{\varepsilon}\right)^{0.5}} (1.417s - 2.12s^2 + 1.263s^3) & \theta_c > 90^\circ \end{cases} \quad (3.18)$$

Yukardaki eşitlikte ε gözeneklilik, σ yüzey gerilimi (N/m^2), θ_c temas açısı ve K mutlak geçirgenliği ifade eder.

3.4.4. Bazı Katsayılar ve Özellikler

Gaz fazındaki türlerin difüzyon denklemi şu şekilde ifade edilmiştir;

$$D_i = \varepsilon^{1.5} (1-s)^{r_s} D_i^0 \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\gamma_p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\gamma_t} \quad (3.19)$$

D_i^0 referans alınan sıcaklık ve basınçta, i'ninci terime ait gaz difüzyon özelliğini gösterir [38].

Referans katsayılar FLUENT PEM modülünde şu şekilde belirtilmiştir;

$$p_0 = 101325 \text{ N/m}^2$$

$$T_0 = 300 \text{ K}$$

$$\gamma_p = 1.0$$

$$\gamma_t = 1.5$$

$$r_s = 2.5$$

Yakıt hücresinde elektrolit membran gözenekli akışkan bölge olarak modellenmiştir. Membran faz elektrik iletkenliği, su difüzyonu, ozmotik sürtünme katsayısı gibi özellikler su içeriğinin bir fonksiyonu olarak FLUENT PEM modülünde varsayılan değerler esas alınarak ve aşağıdaki denklemler kullanılarak oluşturulmuştur.

3.4.4.1. Membran Elektrik İletkenliği

Membran elektrik iletkenliği 3.20 denklemi ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_{mem} = \beta \varepsilon (0.514\lambda - 0.326)^w e^{1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.20)$$

λ su oranını ifade eder [39].

3.4.4.2. Ozmotik Sürüklenme Katsayısı

Ozmotik sürüklenme katsayısı denklem 3.212'de verilmiştir.

$$\alpha_d = 2.5 \frac{\lambda}{22} \quad (3.21)$$

3.4.4.3. Tersine Difüzyon Akısı

Tersine difüzyon akısı 3.22 nolu denklem ile ifade edilmektedir.

$$J_w^{diff} = -\frac{\rho_m}{M_m} M_{h20} D_l \nabla \lambda \quad (3.22)$$

Burada ρ_m kuru (nem içermeyen) membranın yoğunluğu, M_m ise kuru (nem içermeyen) membranın ağırlığıdır.

3.4.4.4. Membran Su Difüzyon Özelliği

Membran su difüzyon özelliği 3.23 nolu denklem ile ifade edilmektedir.

$$D_l = f(\lambda) e^{2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.23)$$

3.4.4.5. Su İçeriği

Su içeriği, λ , Springer et al. [39] makalesindeki hesaplamalardan elde edilmiştir ve 3.24 nolu denklem ile ifade edilmektedir.

$$\lambda = 0.043 + 17.18a - 39.85a^2 + 36a^3 \quad (a < 1) \quad (3.24)$$

$$\lambda = 14 + 1.4(a - 1) \quad (a > 1)$$

Buradaki a su aktivitesi olarak verilmiş olup denklem 3.25 ile tanımlanmıştır.

$$a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (3.25)$$

3.4.4.6. Su Buhar Basıncı

Su buhar basıncı, su buharının molar oranı ile lokal basıncın çarpımından elde edilmiştir.

$$P_{wv} = x_{H_2O} P \quad (3.26)$$

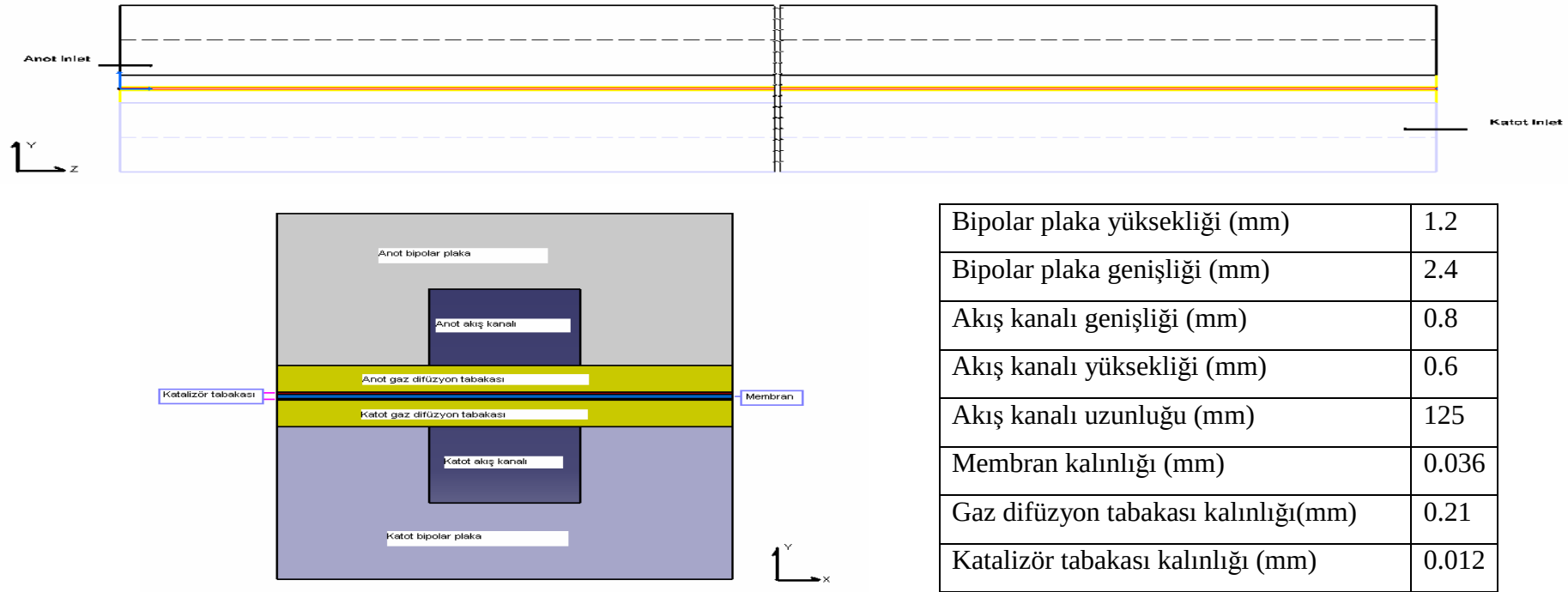
3.4.4.7. Doyma Basıncı

Doyma basıncı 3.27 nolu denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} \log_{10} P_{sat} = & -2.1794 + 0.02953(T - 273.17) - \\ & 9.18 \times 10^{-5} (T - 273.17)^2 + \\ & 1.4454 \times 10^{-7} (T - 273.17)^3 \end{aligned} \quad (3.27)$$

3.5. Model Geometrisi

Aşağıdaki şekilde yakıt hücresi modelinin şekli ve ölçüleri verilmiştir.



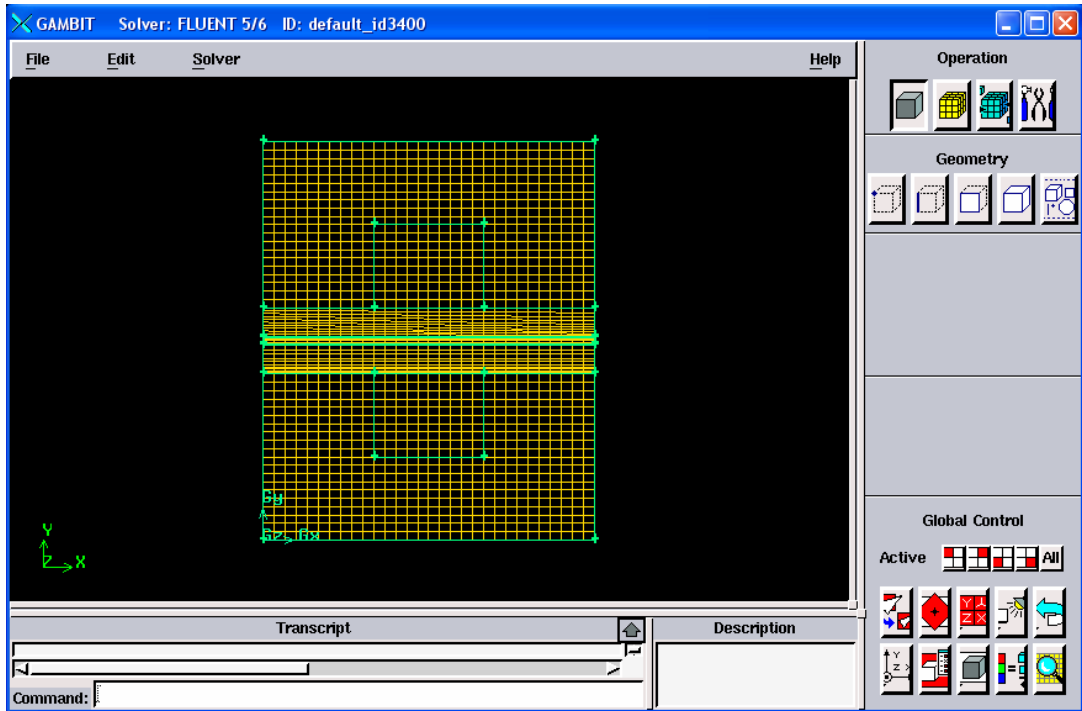
Şekil 3.2. Model geometrisi ve ölçüsünün gösterimi

3.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Modellemesi

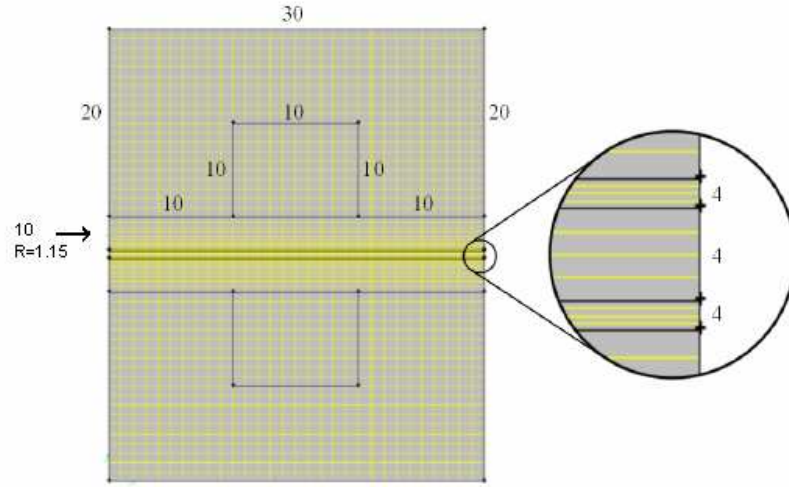
3.6.1. Model Geometrisinin ve Ağ Yapısının Oluşturulması

Matematiksel modellemede PEM yakıt pili sisteminin matematiksel olarak çözümü ve sonuçta elde edilen kütle transferi ve bipolar plakalarda akımın dağılımını şekilsel olarak incelemeye FLUENT V6.3 software programı kullanılmıştır. Modellemeyi üç boyutlu oluşturma ve ağ yapısı operasyonlarını yapmak için GAMBIT geometri modelleme ve ağ yapısı oluşturma software programı kullanılmıştır.

GAMBIT’de modelin üç boyutlu şekli oluşturulduktan sonra kenar-yüzey ve hacimsel olarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 3.3’de kenar-yüzey ağ yapısı ve şekil 3.4’de hücre kenarları için kullanılan ağ sayıları gösterilmiştir.

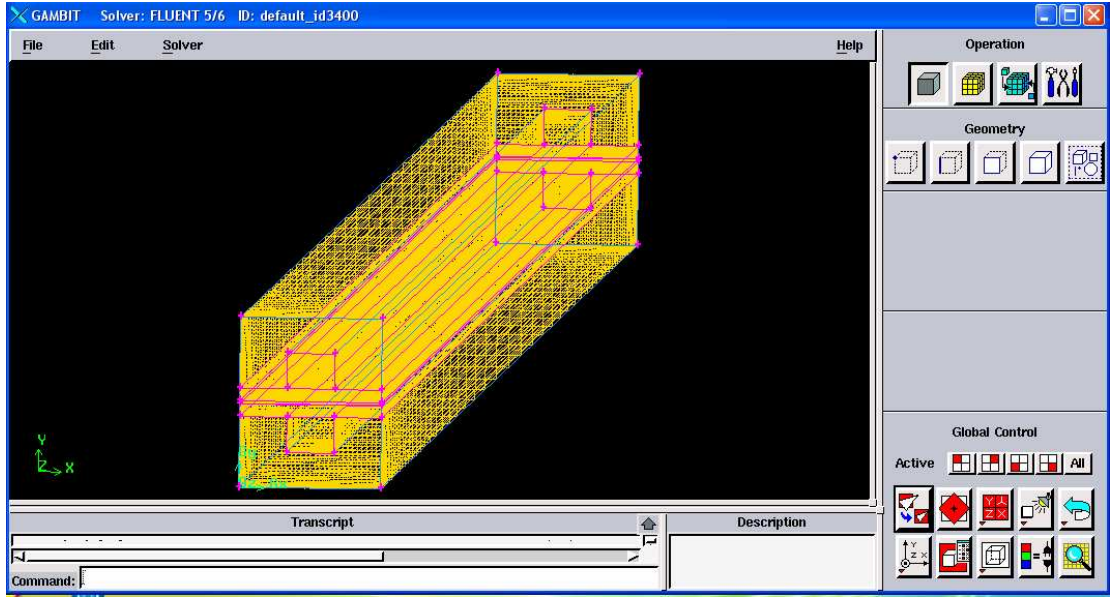


Şekil 3.3. Yüzey-kenar ağ yapısı



Şekil 3.4. Ağ sayısı

Bipolar plaka yüzeyleri için 20 ve 30 düğüm, elektrot ve membran için 4, gaz difüzyon tabakası için 10 adet (katalizör sınır tabakasına yakalaştıkça daha sık düğüm kullanılarak) kenar ağ yapısı oluşturulmuştur (şekil 3.3.). Daha sonra sistemin hacimsel olarak ağ yapısı Şekil 3.5’ de görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Bu ağ yapısındaki sistemde de sınır bölgelerine yakın yerlerde daha iyi sonuçlar almak için eleman sayıları arttırılarak hacim ağ yapısı son haline getirilmiştir.



Şekil 3.5. Hacim ağ yapısı

- Hacim ağ yapısı için GAMBIT’de kullanılan element TET/HYBRID ve tipi TGrid şeklinde seçilmiştir.
- Modelin hesaplamalı akışkan analizinin yapılabilmesi için sürerlilik ve sınır bölgesi ataması yapılmıştır. Sınır bölgesi ataması GAMBIT’de sınır bölge tipi kullanılarak tablo 3.2.’de verilmiştir. Modelde akışkan girişleri sınır şart tipi olarak MASS FLOW INLET, akışkan çıkışı PRESSURE OUTLET ve diğer bölge yüzeylerindeki tüm katı ve katı/sıvı bölgeler WALL olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.2. Sınır Bölgesi Ataması

Sınır Bölgesi Uygulanan Yer	Sınır Bölgesi Adı	Sınır Bölgesi Tipi
Anode-side inlet (z=125, upper)	inlet-a	MASS FLOW INLET
Cathode-side inlet (z=0, lower)	inlet-c	MASS FLOW INLET
Anode side outlet (z=0, upper)	outlet-a	PRESSURE OUTLET
Cathode side outlet (z=125, lower)	outlet-c	PRESSURE OUTLET
Anode terminal (y=2.88)	wall-terminal-a	WALL
Cathode terminal(y=0)	wall-terminal-c	WALL

Anode-side flow channel walls	wall-ch-a	WALL
Cathode side flow channel walls	wall-ch-c	WALL
Fuel cell ends	wall-ends	WALL
Anode-side diffusion layer walls	wall-gdl-a	WALL
Cathode-side diffusion layer boundaries	wall-gdl-c	WALL
Lateral boundaries of the fuel cell	wall-sides	WALL

- Hazırlanan model dokuz ayrı parça halinde modellenmiştir. Bu parçalar bipolar plakalar, anot-katot katalizör tabakaları, akış kanalları, membran, anot-katot gaz difüzyon tabakaları şeklindedir. Bu parçaların sürerliliği açısından incelenmesi için GAMBIT’de bulunan continuum zone modülü kullanılarak parçaların sıvı veya katı bölge olduğunun saptaması yapılmıştır.

Tablo 3.3. Sürerlilik Bölge Ataması

Sürerlilik Bölgesi	Bölgeye Verilen Ad	Sürerlilik Tipi
Anode-side catalyst layer	catalyst-a	FLUID
Cathode-side catalyst layer	catalyst-a	FLUID
Anode-side flow channel	channel-a	FLUID
Cathode-side flow channel	channel-c	FLUID
Anode-side gas diffusion layer	gdl-a	FLUID
Cathode-side gas diffusion layer	gdl-c	FLUID
Electrolyte membrane	membrane	FLUID
Anode current collector	current-a	SOLID
Cathode current collector	current-c	SOLID

3.6.2. Modelin Çözdürülmesi

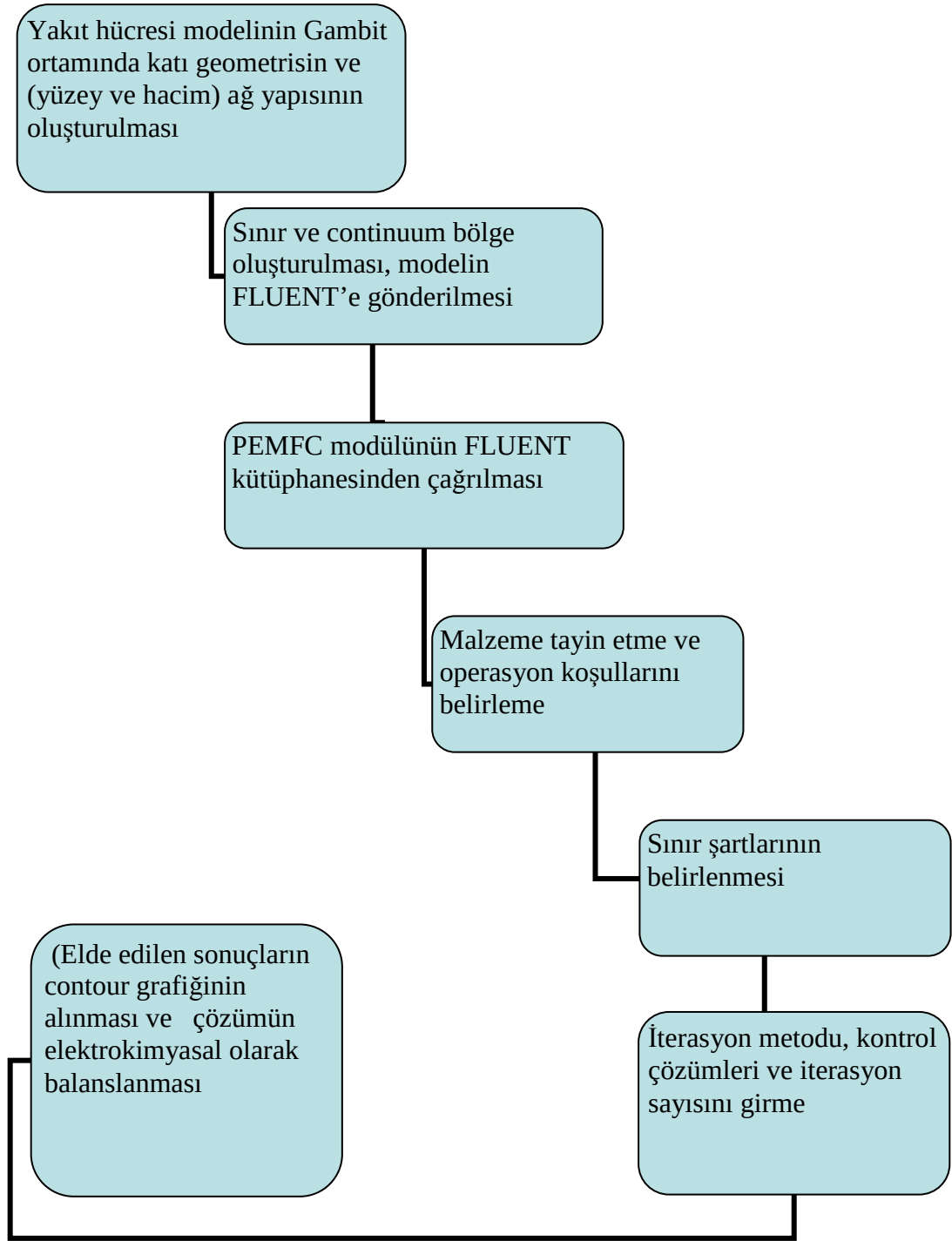
Geometrisi ve mesh modellemesi yapılan model daha sonra GAMBIT ile uyumlu olan FLUENT software paket programına gönderilmiştir. Yakıt hücresi

modeli sonlu hacim metoduyla çözülmüştür ve hesaplamalı akışkan analizi yapılmıştır.

Modelin FLUENT’de çözümlenmesinde kullanılmak üzere aşağıdaki seçimler yapılmıştır:

- Gauss-Seidel iterasyon metodu uygulanmıştır.
- Model çözümlemesinde tablo 3.1.’deki değerler ve bölüm 3.4’de belirtilen denklemler kullanılmıştır.
- Yakınsama için maksimum iterasyon sayısı 200 olarak seçilmiştir.
- Stabilizasyon metodu olarak BCGSTAB (bi conjugate gradient stabilized method) modelin analizinde düzensiz yakınsamadan kaçınmak için uygulanmıştır.

Modellemenin çözümünde uygulanan adımlar şekil 3.6.’da gösterilen diyagramla özetlenmiştir.

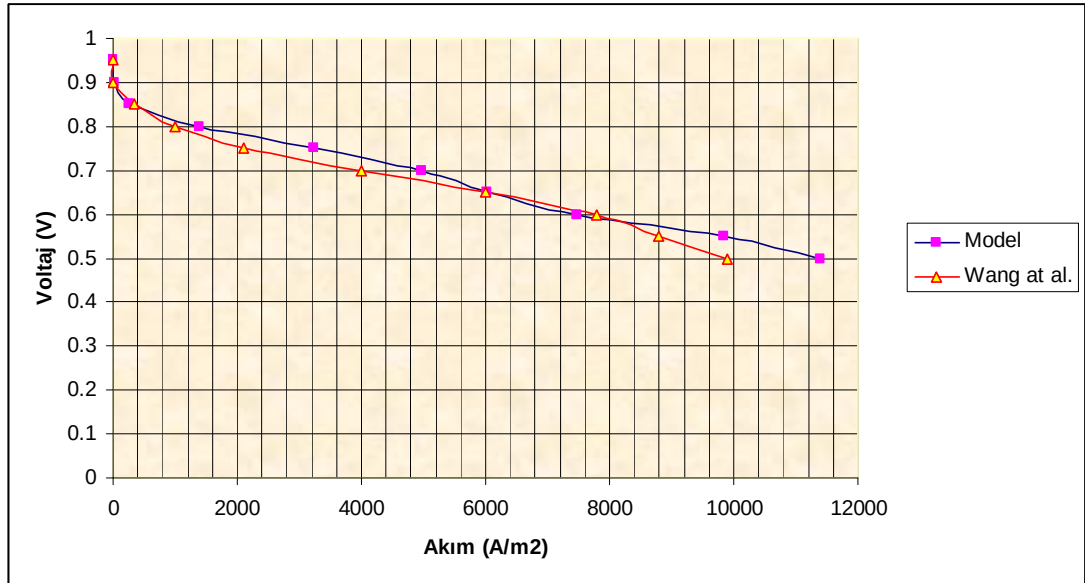


Şekil 3.6. Modelin HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) Çözümünde Uygulanan Adımlar

3.6.3. Modelin Sonuçları

3.6.3.1. Model Doğrulama

Bu bölümde oluşturulan modelden elde edilen sonuçlar ile aynı çalışma koşulları altında Wang at al. makalesindeki sonuçlara göre I-V polarizasyon eğrisi karşılaştırılmıştır.



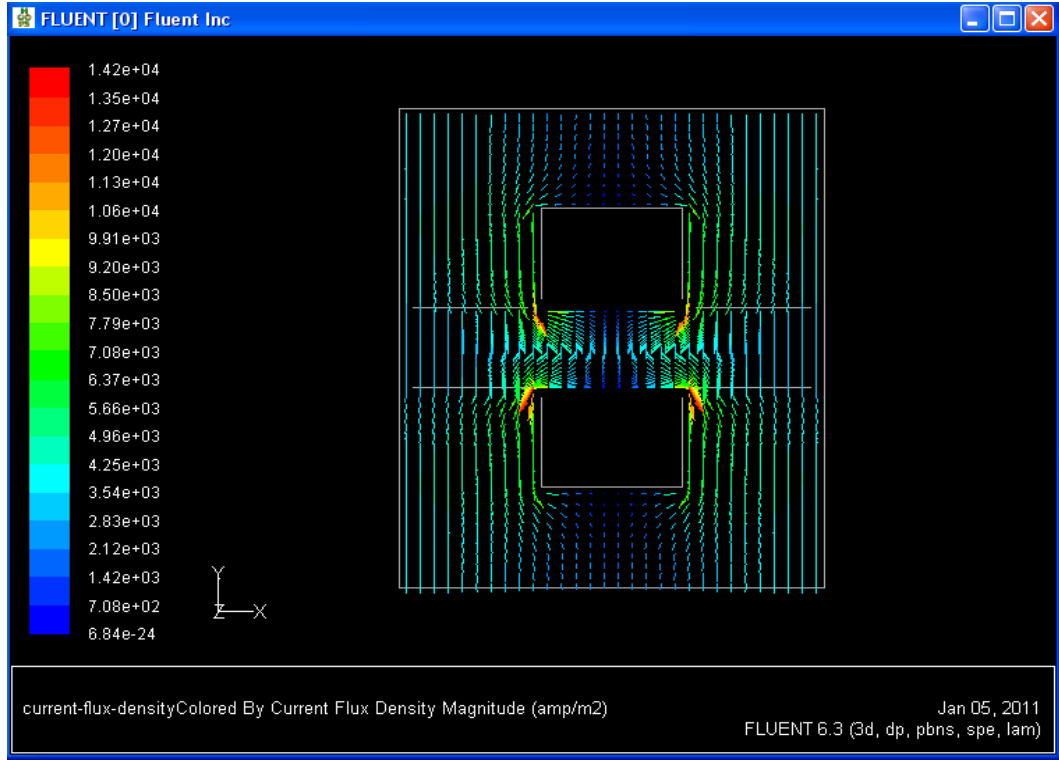
Şekil 3.7. Model ile Wang at al. polarizasyon eğrilerinin karşılaştırması

Modeldeki polarizasyon eğrisi ile [8] makalesindeki deneysel sonuçlar benzeşim göstermektedir. Yüksek akım yoğunluklarında değerlerin tam olarak örtüşmemesi, modellemede kullanılan katsayılar, gaz difüzyon ve kataliz tabakasında meydana gelen yoğunlaşmanın hesaba katılmaması gibi nedenlerden kaynaklanmıştır.

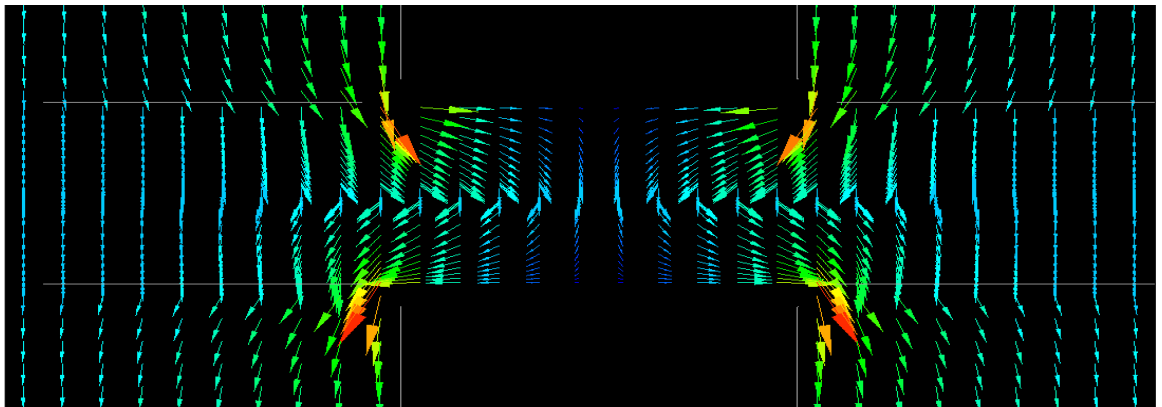
3.6.3.2. Akım Yoğunluğu

Şekil 3.7., 0,75V'da modelin enine kesitinde elektriksel akım yoğunluğunun dağılımını vektörel olarak gösterir. Şekilden de görülebileceği gibi akımın yönü anottan katoda doğrudur. Şekil 3.8'de daha ayrıntılı gösterilmiştir. İki kutuplu plakaların temas ettiği anodun solunda ve katodun sağındaki sınırlarda akım yoğunluklarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca şekilde membran potansiyelinin dağılımı görülmektedir. Beklenildiği gibi potansiyel membranın anot

tarafında düşük katot tarafında yüksektir [34]. Katot giriş tarafındaki akım yoğunluğunun yüksek olmasının sebebi bu bölge oksijen bakımından en zengin bölge olmasıdır.



Şekil 3.8. Elektriksel Akım Yoğunluğu



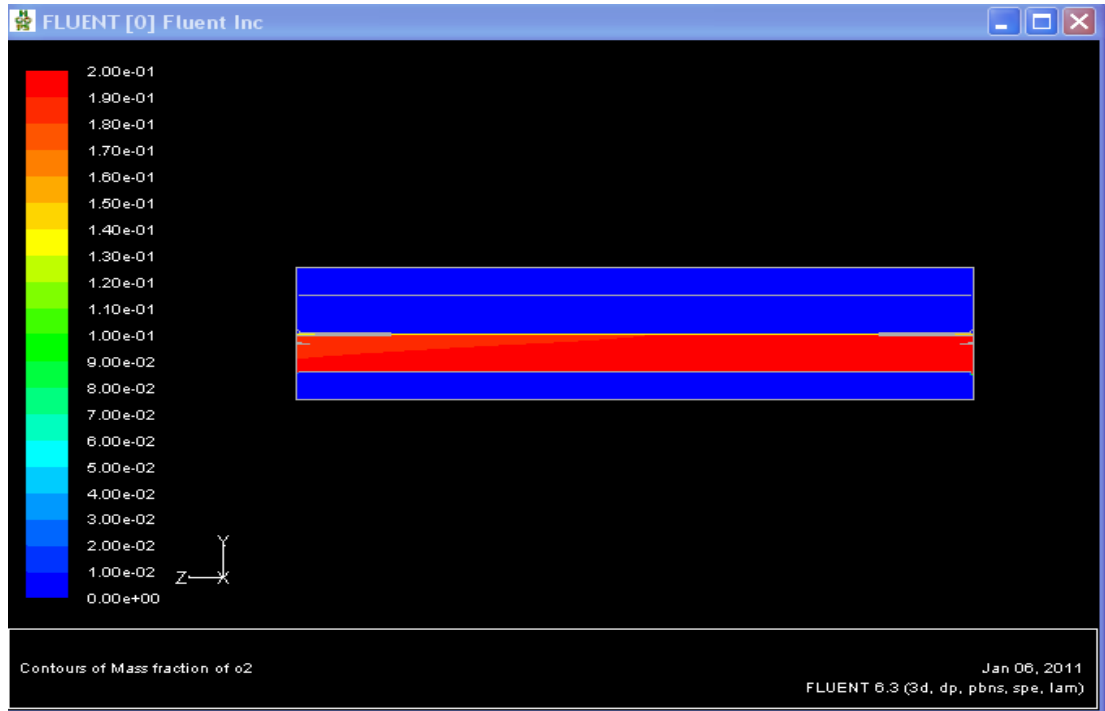
Şekil 3.9. MET(Membran Elektrot Topluluğu) Ayrıntılı Gösterilen Akım Yoğunluğu

Şekilden de görüleceği üzere anottan ayrılan elektronların yoğunluğu bipolar plaka kanal açıklıklarının köşelerinde fazladır. Çünkü elektronlar en yakın yoldan devreyi tamamlamak istemektedir. En yakın yol bipolar plakanın kanal açıklıklarının

köşeleridir. 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 [35].

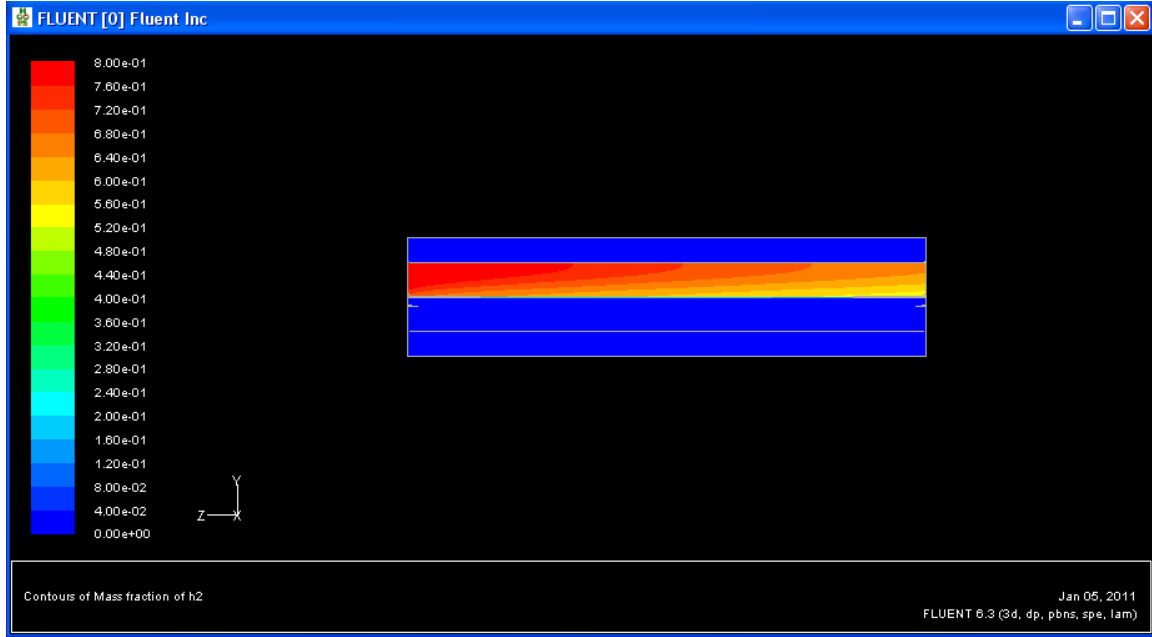
3.6.3.3 Reaktant Kütle Oranları

Şekil 3.9'da modelin boydan kesitinde, oksijene ait kütle oranları gösterilmiştir. Oksijen akış yönü +Z yönündedir. Şekilden de görüleceği gibi katot çıkışına doğru reaksiyonlarda oksijenin harcanması neticesinde oksijene ait kütle oranı azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.10. Yakıt hücresinin boydan kesitine ait oksijen kütle oranları

Şekil 3.10.'da modelin boydan kesitinde, hidrojene ait kütle oranları gösterilmiştir. Hidrojenin akış yönü -Z yönündedir. Şekilden de görüleceği gibi anot çıkışına doğru hidrojenin kütle akış oranının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi membran boyunca suyun hidrojenle birlikte çekilmesi neticesinde anot çıkışına doğru kütle akış oranı azalma gösterir.



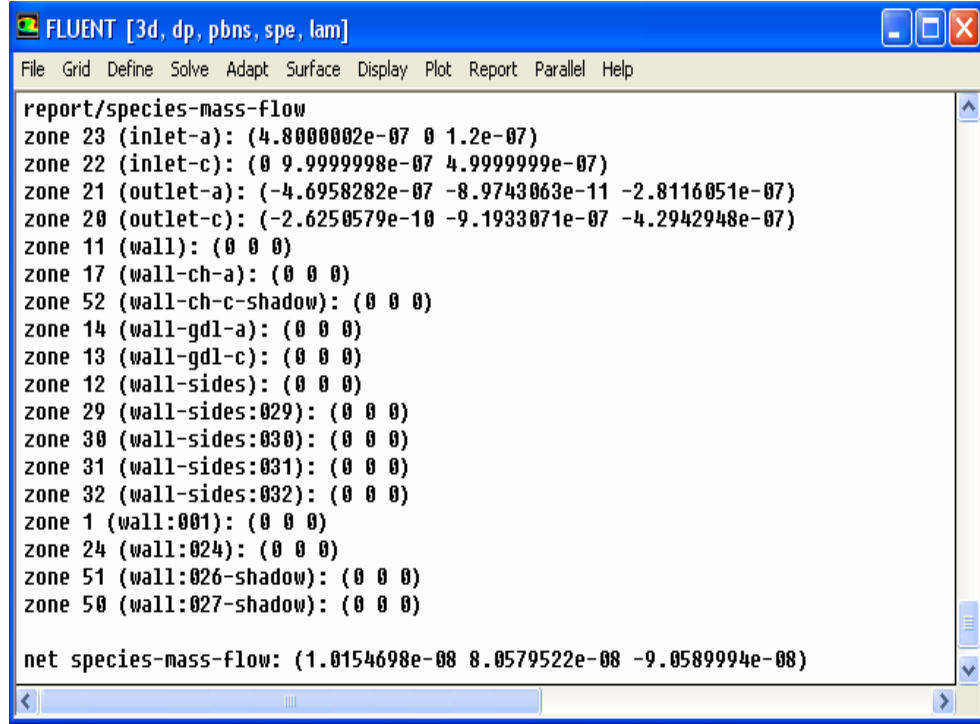
Şekil 3.11. Yakıt hücresinin boydan kesitine ait hidrojen kütle oranları

3.6.3.4. Modelin Elektrokimyasal Olarak Balanslanması

FLUENT kullanıcı arayüzüne komut girilerek veya temel elektrokimyasal kavramları uygulayarak kütle korunumunu sağlanır. Net kütle akışını bulmak için FLUENT'in kullanıcı arayüz ekranına şu komut yazı yazılır;

report/species-mass-flow

Elde edilen sonuç şu şekildedir;



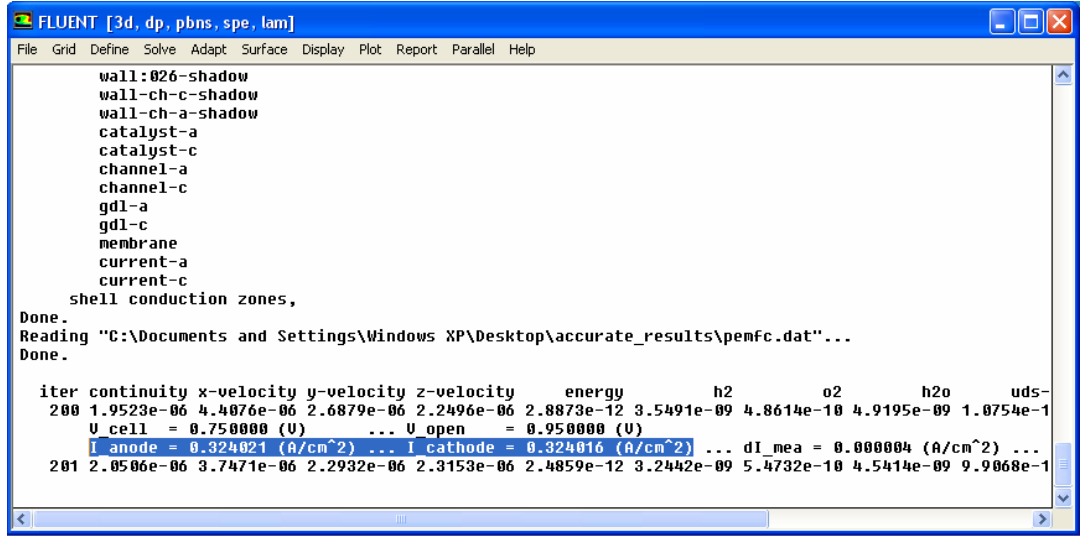
Şekil 3.12. Reaktant gazlarının net kütle akışları

Şekil 3.11.'de bölge numarası ve ismi verilmiştir. Sayılarla verilen ifade her bir reaktantın net kütle akışının hesaplandığını gösterir. $(\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3 \dots \dot{m}_n)$ burada 1, 2, 3, ..., n ile gösterilen sayılar her bir satırda H_2 , O_2 ve H_2O 'nun net kütle akışlarının hesaplandığını gösterir. Bundan dolayı ikinci değer bize oksijenin net kütle akışını kg/s cinsinden verir. Pozitif değerler sınırdan alana giren, negatif değerler alandan dışarı çıkan ürünü ifade eder. Şekil 4.11.'de son dizide oksijenin net kütle akışı 8.057×10^{-8} kg/s olarak hesaplanmıştır. Oksijenin moleküler ağırlığı 31.9988 kg/kmol'dur. Diatomik oksijenin valensi 4, yani 1 kmol oksijen başına 4 kmol elektron serbest kalır. Faraday sabiti 9.6485×10^7 C/kmol ise toplam serbest kalan elektron amper cinsinden akıma eşittir.

$$I = \frac{\dot{m}vF}{M} = \frac{(8.057 \times 10^{-8})(4.0)(9.6485 \times 10^7)}{31.9988} = 0.972 \text{ A} \quad (4.28)$$

İkinci olarak, elde edilen akımı terminal yüzeyine cm^2 başına düşen akım yoğunluğundan bulunur. Membran alanı bipolar plaka genişliği ($x=2.4 \text{ mm}$) ve akış kanalı uzunluğu ($z=125 \text{ mm}$), buradan $\text{Alan}=2.4 \times 125= 300 \text{ mm}^2=0.0003 \text{ m}^2$ 'dir.

200 iterasyon sonucunda FLUENT ekranında cm^2 başına düşen akım yoğunluğu Şekil 3.12.'deki gibi 0.324 A/cm^2 olarak bulunmuştur.

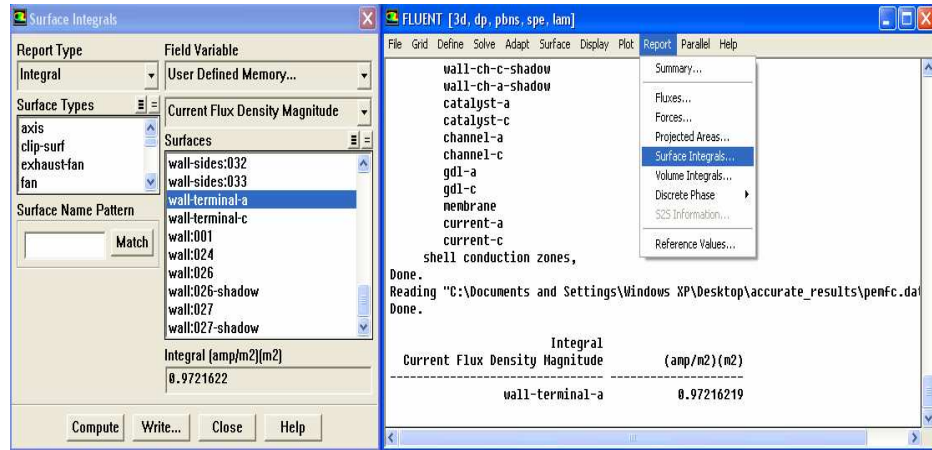


Şekil 3.13. FLUENT ara yüzünde iterasyonlar sonucu oluşan akım yoğunluğu

Membran alanı ile elde edilen akım yoğunluğu çarpılırsa şu sonuç çıkar:

$$I = (0.0003)(0.324)(100)^2 = 0.972 \text{ A} \quad (4.29)$$

Buna alternatif olarak yine **Surface Integrals** modülü kullanılarak terminal yüzeyindeki akım yoğunluğunu bulunur. Fluent kullanıcı arayüzünde **Report** menüsünden **Surface Integral** seçeneğinde şekil 3.13'deki gibi **Report Type** ve **Field Variable** seçeneklerindeki değerleri kullanıldığında akım yine 0.972 A olarak bulunmuştur.



Şekil 3.14. Fluent modülünü kullanarak toplam akımı bulma

4. SONUÇLAR

Yapılan bu tez çalışmasında tek kanallı, üç boyutlu, zıt akış yönlü, kararlı PEM yakıt hücresinin FLUENT’de, sonlu hacim metodu tekniğine dayanarak hesaplamalı akışkan dinamiği analizi yapılmıştır. Bu modellemede PEM yakıt hücresi modelinde meydana gelen reaktant gaz akışı ve elektriksel potansiyel dağılımının nasıl meydana geldiği sanal ortamda incelenmiştir. Modellemede hidrojen ve oksijenin kütle oranının akış kanalı boyunca azaldığı gözlemlenmiştir. Membrandaki potansiyel dağılım incelenmiş, beklendiği gibi potansiyelin membranın anot tarafında düşük katot tarafında yüksek çıktığı görülmüştür. Ayrıca FLUENT’de baz alınan sonuçlar ve denklemler kullanılarak akım ve kütle korunumunun sağlandığı görülmüştür.

Birebir modelleme çalışmasının ilk ayağı olabilecek bu tez çalışması sırasında geliştirilen model, bir sonraki aşamada bipolar plakalardaki akış kanallarını bir bütün halinde ve daha gelişmiş bir modele dönüştürebilecektir. Gerçek koşullara daha yakın olabilecek böyle bir model, PEM yakıt pillerinin prototiplerinin üretiminde yol gösterici olarak kullanılabilecek ve her türlü inceleme, değerlendirme bu sanal ortamda kolaylıkla yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Sorensen B., “Renewable Energy Its physics engineering, environmental impacts, economics & planning”, Elsevier Academic Press, Burlington, (2004)
- [2] <http://www.iea.org/>
- [3] Aydın, M., “Pem Yakıt Pilinin 2 Boyutlu Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, (2007)
- [4] http://www.emo.org.tr/ekler/0ee22c27013613e_ek.doc, “Hidrojen enerjisi ve yakıt hücreleri teknolojisi”, (2009)
- [5] Veziroğlu, T.V, “Hydrogen energy and transportation”, University of Miami Clean Energy Research Institute, (2009)
- [6] Gurau, V., Liu, H. And Kakaç, S., “Two-Dimensional Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, AIChE Journal, 44: 2410-2422, (1998)
- [7] Um, S., Wang, C.Y. and Chen, K.S., “Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, Journal of The Electrochemical Society, 147: 4485-4493 (2000)
- [8] Wang, L., Husar, A., Zhou, T., Liu, H., “A parametric study of PEM fuel cell performances”, International Journal of Hydrogen Energy 28: 1263-1272 (2003)
- [9] 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)
- [10] Mujumdar , A.S., Joo, P.H., “ME6203 Mass Transport- Mass Transport Considerations in PEM Fuel Cell Modeling”, NUS-IHPC, Singapur, (2009)
- [11] 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)
- [12] “Fuel Cell Systems explained”, Oxford Brookes University, University of Queensland, (2003)
- [13] <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~yilser/>, “Yakıt Hücreleri”, (2008)
- [14] Lawaczek,F., “Technick”, Eher Varlag, Munich, 21-45 (1932)
- [15] Eren,R.A. and W.H.Compell, “Hydrogen: A Commercial Fuel for Internal Combustion Engines and Other Purposes”, Journal of Institute of Fuels, 6(29):7-18 . (1933)

- [16] Haldane, J.B.S, “Daedalus or Science and the Future”, Truber and Company Ltd., London, 72-110 (1923)
- [17] Eren, R.A. and W.H.Compell, “Hydrogen: A Commercial Fuel for Internal Combustion Engines and Other Purposes”, Journal of Institute of Fuels, 6(29): 7-18 (1933)
- [18] Bockris, J.O’M., “Energy: The Solar-Hydrogen Alternative, Australia and New Zealand Book Co.”, Sydney, 125-218 (1975)
- [19] Marchetti, C., “Proteus vs. Procrustes, Lecture at Cornell University”, Ithaca, New York, 318-357 (1970)
- [20] Ohta,T., “Solar-Hydrogen Energy Systems, Pergamon Pres”, Oxford, 225-248. (1979)
- [21] Veziroğlu,T.N., “Proceedings of the Hydrogen Economy Miami Energy Conference(THEME)”, Clean Energy Research Institute, University of Miami, 2: 90-124 (1974)
- [22] EG&G Technical Services, Inc. Science Applications International Corporation, Fuel Cell Handbook (Sixth Edition), U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, West Virginia, (2002)
- [23] Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, “Hidrojen yakıt pilleri: Otomotiv endüstrisindeki uygulamalar ve geleceği”, (2001)
- [24] Karadeniz, S., “Yakıt Pillerinde (PEMFC) Bipolar Yüzeyli Metal Malzemelerin Farklı Sıcaklık Aralıklarında Kullanımının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, (2009)
- [25] Lin, C., Park, B., Y. and Madou, M., J., “Development and characterization of aminiature PEM fuel cell stack with carbon bipolar plates”, Journal of Power Sources, 176: 207-214 (2007)
- [26] Barbir, F., “PEM fuel cells: theory and practice”, Elseiver, USA, 1-427 (2005)
- [27] Tuomas M., “Mass transport in polymer electrolyte membrane fuel cells using natural convection for air supply”, PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland. (2004)
- [28] Dhakte, S.R., Mathur, R.B., Kakati, B.K. and Dhami, T.L., “Properties of graphite composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell”, International Journal of Hydrogen Energy, 32: 4537-4543 (2007)
- [29] Boddu, R., Majumdar P., “Computational Flow Analysis of Bipolar Plate for Fuel Cells”, Journal of Fuel Cell Science and Technology, (2008)
- [30] Berg, P., Novruzzi, A., Promislow, K., “Analysis of a cathode catalyst layer model for a polymer electrolyte fuel cell”, Chemical Engineering Science, 61: 4316–4331 (2006)

- [31]<http://www.gyte.edu.tr/materials/default.aspx?pg=2e4e29f8-689c-4126-b05d-e6a9b225cc4d>
- [32] Mench, M.M., Wang, C.Y. and Thynell, S., “An Introduction to Fuel Cells and Related Transport Phenomena”, Accepted for publication in Journal of Transport Phenomena, (2001)
- [33]http://www.schunkgroup.com/sixcms/media.php/1722/2008_MoldedBipolarPlates-for-uelCells.pdf, (2009)
- [34] Singh, D., Lu, D.M. and Djilali, N., “A two-dimensional analysis of mass transport in proton exchange membrane fuel cells”, International Journal of engineering Science, 37: 431-452 (1999)
- [35] Esmer, M., “Pem Tipi Yakıt Hücresinin Isıl, Mekanik, Elektro-Kimyasal ve Akış Davranışlarının Modellenmesi”,Gebze, (2010)
- [36] Nguyen, T. V., “Electrochemical Soc. Proceedings”, 99(14): 222-241.
- [37] Nam, J.H, Karviany, M., “Effective Diffusivity and Water-Saturation Distribution in Single- and Two-layer PEMFC Diffusion Medium”, Int. J. Heat Mass Transfer, (2003)
- [38] Wang, C.Y., Chen, J., “Electrochemical Society”, 147(12):4485-4493, (2000)
- [39] Zawodzinski, T.A., Springer, T.E., Gottesfeld, S., “J. Electrochemical Soc.”, 138
- [40] Dhakte, S.R., Mathur, R.B., Kakati, B.K., Dhami, T.L., “Properties of graphite composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell”, International Journal of Hydrogen Energy, 32: 4537-4543 (2007)
- [41] Hermann, A., Chaudhuri, T., Spagnol, P., “Bipolar plates for PEM fuel cells: A review”, International Journal of Hydrogen Energy 30:1297-1302 (2005)
- [42] Joseph, S., McClure, J.C., Chianelli, R., Pich, P. and Sebastian, P.J., “Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton Exchange membrane fuel cells (PEMFC)”, International Journal of Hydrogen Energy 30: 1339-1344. (2005)
- [43] Dhakte, S.R., Mathur, R.B., Kakati, B.K. and Dhami, T.L., “Properties of graphite composite bipolar plate prepared by compression molding technique for PEM fuel cell”, International Journal of Hydrogen Energy, 32: 4537-4543 (2007)
- [44] Wang, H. and Turner, J.A., “Ferritic stainless steels as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane fuel cells”, Journal of Power Sources, 128: 193-200 (2004)
- [45] Wang, H., Turner, J.A., Li. and X., Teeter, G., Process modification for coating SnO₂:F on stainless steels for PEM fuel cell bipolar plates, Journal of Power Sources, 178: 238-247 (2007)

[46] Du, L. and Jana, S.C., "Highly conductive epoxy/graphite composites for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, 172: 734-741 (2007)

[47] Ralph, T.R., Hards, G.A., Keating, J.E., Campbell, S.A., Wilkinson, D.P., Davis, M., St- Pierre, J. ve Johnson, M.C., "Low Cost Electrodes for Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *J. Electrochem. Soc.*, 144: 3845-3857 (1997)

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Osmaniye’de doğan Ebubekir KÜTÜK, ilk ve orta öğrenimini Osmaniye’de tamamladı. 2002 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği’nde başlayan lisans eğitimini 2007 yılında bitirdi.

2009 yılında Kırıkkale Silah Fabrikası’nda bir süre Ar-Ge mühendisi olarak çalıştıktan sonra bu görevinden ayrılıp Aralık 2009’da Botaş LNG İşletme Müdürlüğü’nde bakım onarım mühendisi olarak göreve başlamıştır ve halen bu görevine devam etmektedir.