



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PEM YAKIT PİLLERİ İÇİN DÜŞÜK AĞIRLIKLIL AKIŞ PLAKASI
GELİŞTİRİLMESİ

KIVANÇ KARACAN

Haziran 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

PEM YAKIT PİLLERİ İÇİN DÜŞÜK AĞIRLIKLI AKIŞ PLAKASI
GELİŞTİRİLMESİ

KIVANÇ KARACAN

Yüksek Lisans Tezi

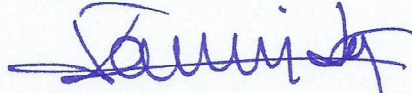
Danışman

Doç. Dr. Selahattin ÇELİK

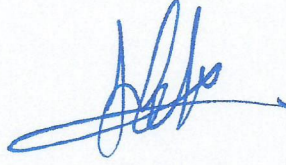
Haziran 2019

Kıvanç KARACAN tarafından **Doç. Dr. Selahattin ÇELİK** danışmanlığında hazırlanan “**PEM Yakıt Pilleri için Düşük Ağırlıklı Akış Plakası Geliştirilmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

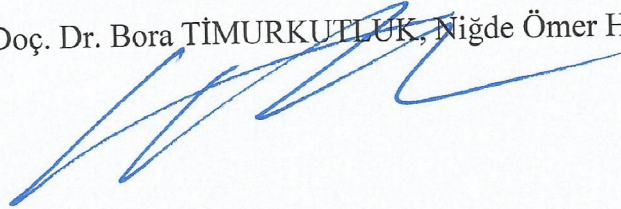
Başkan : Prof. Dr. Kemal ALDAŞ, Aksaray Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Selahattin ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



ONAY:

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

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

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

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


Kıvanç KARACAN

ÖZET

PEM YAKIT PİLLERİ İÇİN DÜŞÜK AĞIRLIKLIL AKIŞ PLAKASI GELİŞTİRİLMESİ

KARACAN, Kıvanç

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Selahattin ÇELİK

Haziran 2019, 67 sayfa

Yakıt pilleri, yüksek enerji yoğunlukları, sessiz ve çevreci olmaları nedeniyle son yılların önde gelen enerji dönüşüm teknolojilerindedir. Dünyada her geçen yıl artan yakıt pili pazarında, düşük sıcaklıklarda yüksek verimle çalışması ve hızlı devreye girebilmesi gibi üstünlükleri sayesinde Proton Değişimli Membran (PEM) yakıt pili (YP) daha yaygın bir kullanım alanına sahip olmuştur.

Yüksek enerji yoğunluğu ihtiyacının olduğu insansız hava araçlarının (İHA), son dönemlerde sivil ve askeri alanlarda kullanımları oldukça yaygınlaşmıştır. 10 kg'ye kadar olan mini İHA'lar genellikle batarya ile çalıştırılmakta olup görev süreleri bu nedenle kısıtlıdır. Eğer çok hafif bir yakıt pili yığını geliştirilebilir ise İHA'larda batarya yerine PEM-YH sistemi ile havada kalma süresinde 3 kata kadar artış sağlanabilecektir. Tez çalışması kapsamında, bu amaca yönelik, yenilikçi bir akış alanı tasarlanarak bu akış alanına ait elektrokimyasal ve akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu akış alanı tasarımının, pres ile formlanarak, 0,1 mm kalınlıklı farklı metalik (paslanmaz çelik, titanyum, alüminyum) akış plakalarının yakıt pilinde kullanılabilmesi için analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, piyasadaki ürünlere göre ağırlık ve hacimde kayda değer bir azalma sağlandığını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: PEM yakıt pili, Metalik Akış Plakası, Sayısal Simülasyon

SUMMARY

DEVELOPMENT OF LIGHT WEIGHT FLOW PLATE FOR PEM FUEL CELLS

KARACAN, Kıvanç

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Selahattin ÇELİK

June 2019, 67 pages

Fuel cells are one of the leading energy conversion technologies of recent years due to their high energy densities, silent operation and environmental aspects. Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell (FC) has been used more widely in the fuel cell market, which has been increasing every year in the world, thanks to its high efficiency at low temperatures and fast start up.

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have recently become widespread in civil and military areas. Mini UAVs up to 10 kg are usually operated with battery therefore have limited duty times. If a light weight fuel cell stack can be developed, PEM-FC system can possibly increase the endurance to 3 times. In this respect within the scope of the thesis study, an innovative flow field was designed and electrochemical and flow analyzes of this flow field were performed. Then, the suitability of this flow field design was numerically studied, considering the transfer of this design to 0.1 mm thick metal (stainless steel, titanium, aluminum) flow plates via stamping. According to the results obtained, a significant decrease in weight and volume was achieved compared to the commercial products in the market.

Keywords: PEM fuel cell, Metallic Flow Plate, Numeric Simulation

ÖN SÖZ

Dünyamız dijital bir ağ üzerinden herkesin her an iletişim halinde olduğu büyük bir teknolojik devrim geçirmektedir. Cep telefonu, akıllı saatler, tabletler vb. dijital cihazlar bundan 20 yıl öncesine kadar hayatımızda yokken şimdilerde hayatın vazgeçilmezleri haline gelmiş durumdadır. Otomobiller elektrikli olan versiyonlarına dönüşürken bu araçlarda otonom sürüş artık uygulanmaya başlamıştır. Robotlar imalat sektöründe insan gücünün yerini alırken, insansız robotlar hem sivil hem de askeri amaçlı geliştirilmeye devam etmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte her alanda enerjiye duyulan ihtiyaçlar katlanarak artmaktadır. Örneğin cep telefonu ekran boyutları büyüdükçe tüketilen enerji artmakta fakat telefonun hafifliği ve inceliğinden ödün verilmememektedir. Dolayısıyla ile batarya teknolojisinin de Wh/kg ve Wh/L cinsinden enerji yoğunluklarının geliştirilmesi gerekmektedir. Gelişimin yetersiz olduğu durumda zamandan ödün verilmektedir. Eski nesil cep telefonları 10 güne varan batarya kullanım sürelerine sahipken batarya teknolojisinin gelişmesine rağmen yeni nesil cep telefonları 1-2 gün kullanılabilir.

Sivil alanda olduğu gibi askeri alanda kullanılan teçhizatlarında enerji gereksinimleri her geçen gün artmaktadır. Batarya ile çalışan mini elden atmalı insansız hava aracı (İHA) enerji ihtiyacı yüksek kritik öneme sahip olan sistemlerdendir. Batarya teknolojisinin gelişmesine rağmen elden atmalı İHA sistemlerinin havada kalma süreleri oldukça yetersizdir. Piyasada bulunan yeni nesil İHA sistemlerinde operasyon zamanını iki katından fazla bir süreye çıkarmak için yakıt pili sistemlerinin kullanıldığı rapor edilmiştir. Geliştirilecek yakıt pilinin ağırlığı havada kalma süresini doğrudan etkilemektedir, bu nedenle yakıt pili üretiminde hafifliği sağlamak için geleneksel yöntemlerin dışına çıkılması gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında başta insansız hava araçları olmak üzere enerji ihtiyacının olduğu askeri ve sivil uygulamalarda yakıt pilinin kullanılabilmesi tüm alanlarda yüksek enerji yoğunluğu sağlayacak bir yakıt pili geliştirilmiştir.

Yüksek Lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Doç. Dr. Selahattin ÇELİK'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle analiz ve modelleme çalışmalarımda sunduğu katkı ve yardımlarından dolayı Doç. Dr. Serkan TOROS'a; bu tezin hazırlanması aşamasında idari işlerimdeki yükümü hafifleten, bilimsel anlamda görüş ve eleştirileriyle destek veren, akademik kariyerimin her aşamasıyla özenle ilgilenen, bölüm başkanım, kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi İlyas KACAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında incelenen üretim ve testlerinin gerçekleştirilmesi konusunda sağladığı olanaklardan dolayı VESTEL Savunma Sanayi A.Ş.'ye ve ERMAKSAN Makina Sanayi Ve Ticaret A.Ş teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGE DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	1
1.2 Literatür Taraması	4
1.2.1 İnsansız hava araçları	4
1.2.2 İnsansız hava araçlarında kullanılan yakıt pilleri	6
1.2.3 PEM yakıt pilleri üzerine yapılmış sayısal modelleme çalışmaları	12
2 YAKIT PİLLERİ	14
2.1 Yakıt Pilleri Genel Yapısı	14
2.2 Yakıt Pili Çeşitleri	15
2.2.1 Alkalın yakıt pilleri	17
2.2.2 Doğrudan metanol yakıt pilleri	17
2.2.3 Fosforik asit yakıt pilleri	17
2.2.4 Erimiş karbonat yakıt pilleri	17
2.2.5 Katı oksit yakıt pilleri	18
2.2.6 Polimer elektrolit membran yakıt pilleri	18
2.3 PEM Yakıt Pili Bileşenleri	19

2.3.1	Polimer elektrolit membran	20
2.3.2	Katalist tabaka.....	21
2.3.3	Gaz difüzyon tabakası.....	21
2.3.4	Akım toplama plakası	22
2.3.5	Sıkıştırma plakası.....	22
2.3.6	Bipolar plakalar.....	23
3	YAKIT PİLİ TERMODİNAMİĞİ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
3.1	Elektriksel İş ve Hücre Potansiyeli	25
3.2	Hücre Verimi	27
3.3	Polarizasyon ve Voltaj Kayıpları	27
3.3.1	Termodinamik kayıplar.....	28
3.3.2	Elektriksel kayıplar	29
4	TASARIM VE MODELLEME.....	31
4.1	Geometrik Model Tasarımı	31
4.2	Yakıt Pili Performans Deneyi ve Sonuçları	38
4.3	Akış ve Elektrokimyasal Süreçlerin Modellenmesi	40
4.4	Akış ve Elektrokimya Sayısal Model Sonuçları.....	48
4.5	Deney ile Sayısal Modelin Karşılaştırılması	51
4.6	Sac Şekillendirme Sürecinin Modellenmesi.....	53
4.7	Sac Şekillendirme Modeli Sonuçları	54
4.8	Sac Şekillendirme Deney Sonuçları	57
5	SONUÇLAR.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
	KAYNAKLAR	62
	ÖZ GEÇMİŞ	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. NATO İnsansız Hava Sistemleri Sınıflandırması.....	7
Çizelge 1.2. Li-ion bataryalar ile yakıt pillerinin karşılaştırması	10
Çizelge 2.1. Yakıt pili çeşitlerinin kıyaslanması	15
Çizelge 4.1. PEM yakıt pili tasarım parametreleri.....	31
Çizelge 4.2. İHA yakıt pili sistemi için ağırlık dağılımı.....	33
Çizelge 4.3. Comsol model parametreleri	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Enerji dönüşüm sistemlerinde güç ve enerji yoğunluğu karşılaştırması	2
Şekil 1.2. Enerji dönüşüm sistemlerinde özgül güç ve enerji karşılaştırması.....	3
Şekil 1.3. Yakıt pili ile bataryanın karşılaştırılması.....	7
Şekil 1.4. İHA'da yakıt pili ile batarya sisteminin toplam maliyet dağılımı	10
Şekil 1.5. İHA'lar için enerji verimi karşılaştırması.....	11
Şekil 2.1. Yakıt pili yığınının bileşenleri	14
Şekil 2.2. Membran elektrot grubu'nun yapısı	17
Şekil 2.3. PEM Yakıt pili bileşenleri	19
Şekil 2.4. Yakıt pili sistem-batarya hibrit çalışma şeması	19
Şekil 2.5. Katalist tabaka	20
Şekil 2.6. Bazı temel akış kanalı tasarımları.....	22
Şekil 2.7. Bipolar plakalarda kullanılan malzemeler	23
Şekil 3.1. Polarizasyon eğrisi ve voltaj kayıpları.....	26
Şekil 4.1. Üç yollu serpantin akış kanalı	31
Şekil 4.2. Dört farklı akış kanalı profili	32
Şekil 4.3. Metal plaka üzerinde akış kanalları ve tasarımın genel yapısı	32
Şekil 4.4. Gaz ve su girişleri, engel tümsekleri	33
Şekil 4.5. Gaz ve su geçiş bölgeleri	33
Şekil 4.6. Grafit bipolar plaka genel görünüşü	34
Şekil 4.7. Grafit BP detay görünüşü ve soğutma suyu girişleri	34
Şekil 4.8. Tek hücreli yakıt pili yığını	35

Şekil 4.9. Tek hücreli yakıt pili yığına bileşenleri.....	36
Şekil 4.10. Beş farklı plaka malzemesi için kütle hacim karşılaştırması	36
Şekil 4.11. Güç-Polarizasyon eğrisi – deney sonucu.....	38
Şekil 4.12. Analizde kullanılan tek kanal geometrik modelleri ve mesh yapısı.....	40
Şekil 4.13. Anot konsantrasyon dağılımı.....	41
Şekil 4.14. Katot konsantrasyon dağılımı	42
Şekil 4.15. Analizde kullanılan geometrik model.....	43
Şekil 4.16. Modelin genel mesh yapısı	44
Şekil 4.17. Modelin mesh yapısı detayı.....	44
Şekil 4.18. Hidrojen molar konsantrasyon dağılımı	47
Şekil 4.19. Hidrojen basınç dağılımı	47
Şekil 4.20. Oksijen molar konsantrasyonu	48
Şekil 4.21. Oksijen Basınç Dağılımı.....	48
Şekil 4.22. Suyun molar konsantrasyonu.....	49
Şekil 4.23. Güç-Polarizasyon eğrisi – analiz sonucu.....	50
Şekil 4.24. Güç-Polarizasyon eğrisi – karşılaştırma	50
Şekil 4.25. Zımbalama araçları	51
Şekil 4.26. Kesme ve delme hattı	52
Şekil 4.27. 1,2 mm genişlik ve 0,36 mm derinlik için şekillendirme sonuçları	53
Şekil 4.28. 1,2 mm genişlik ve 0,55 mm derinlik için şekillendirme sonuçları	53
Şekil 4.29. 1,8 mm genişlik ve 0,54 mm derinlik için şekillendirme sonuçları	54
Şekil 4.30. 1,8 mm genişlik ve 0,82 mm derinlik için şekillendirme sonuçları	54
Şekil 4.31. 16 durum için FLD diyagramları.....	55

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1. Yakıt pili ile çalışan Sınıf III kapasitesinde uçak sistemi, Antares DLR....	8
Fotoğraf 1.2. Antares DLR üzerinde bulunan kompozit hidrojen tüpü	9
Fotoğraf 2.1. Polimer membran ve gaz difüzyon tabakasından oluşan MEG	21
Fotoğraf 4.1. Test edilen yakıt pili ve bağlantıları.....	37
Fotoğraf 4.2. Yakıt pili test düzeneği	38
Fotoğraf 4.3. Çelik ve alüminyum bipolar plakalar	56
Fotoğraf 4.4. Lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiş bipolar plaka.....	56
Fotoğraf 4.5. Titanyum, kompozit grafit, çelik ve alüminyum bipolar plakalar	57

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
H	Entalpi
A	Hücrenin aktif alanı
I	Akım
i	Akım yoğunluğu
a	Anot
c	Katot
G	Gibbs serbest enerjisi
μ	Yakıt kullanım katsayısı
T	Sıcaklık
R	Evrensel gaz sabiti
F	Faraday sabiti
α	Şarj transfer sabiti
VDC	Doğru akım voltajı
σ_m	Membranın iletkenliği
E	Nernst voltajı
P	Basınç
p	Kısmi basınç
H_2O	Su molekül formülasyonu
H_2	Hidrojen molekül formülasyonu
O_2	Oksijen molekül formülasyonu
λ	Membranın su içeriği
ΔV_{akt}	Aktivasyon potansiyel kaybı
ΔV_{ohm}	Ohmik potansiyel kaybı
ΔV_{kon}	Konsantrasyon potansiyel kaybı
V_{adp}	Açık devre potansiyeli
η	Verim

Kısaltmalar**Açıklama**

İHA	İnsansız Hava Aracı
PEM	Polimer Elektrolit Membran
BP	Bipolar Plaka
YP	Yakıt Pili
GDT	Gaz Difüzyon Tabakası
MEG	Membran Elektrot Grubu
CAD	Computer Aided Design



BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Gelişen teknoloji dönüşümünde, dünyamızın enerjiye olan ihtiyacı, her geçen yıl artmaktadır. Fosil kökenli kaynaklar, büyük sistemlerin (otomobil, şehir enerjisi, vb.) enerjisini karşılarırken, daha çevreci sistemlere dönüş için birçok ülkede kararlar alınmakta ve teşvikler arttırılmaktadır. Bunların yanında, enerjinin depolanması ihtiyacı ise her zamankinden daha önemli hale gelmiştir.

Cep telefonları, tablet bilgisayarlar, akıllı saatler, oyuncaklar gibi günlük hayatın içindeki pek çok uygulama batarya ile çalışmaktadır. Batarya teknolojileri de her geçen yıl artmakta ve gelişen teknolojiye ayak uydurmak için batarya güç yoğunlukları geliştirilmektedir. Fakat bazı alanlarda bataryalar yetersiz kalabilmektedir. Kullanım sürelerinin önemli olduğu askeri teçhizatlarda, bataryaya alternatif olabilecek, bataryadan hafif enerji sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

İnsansız Hava Aracı (İHA); pilot ve yolcu taşımayan, üzerinde sadece göreve uygun teçhizatı bulunduran, uzaktan kontrol edilen veya otonom uçaklar olarak tanımlanmaktadır (Can ve Kahveci, 2017). İHA teknolojisi, günlük hayatımızı etkileyen birçok teknoloji gibi, ilk adımlarını askeri ihtiyaçlar doğrultusunda atmıştır. Pilotsuz oluşu nedeniyle insani risk faktörlerini ve hata oranını en aza indiren İHA'lar, askeri operasyonların vazgeçilmez unsuru haline gelmiştir. Sivil alanda da giderek yaygınlaşan ve genişleyen kullanım alanları arasında; mikro-lojistik uygulamalar, tarım faaliyetleri, haritalandırma ve yer belirleme faaliyetleri ile arama-kurtarma faaliyetleri sayılabilir.

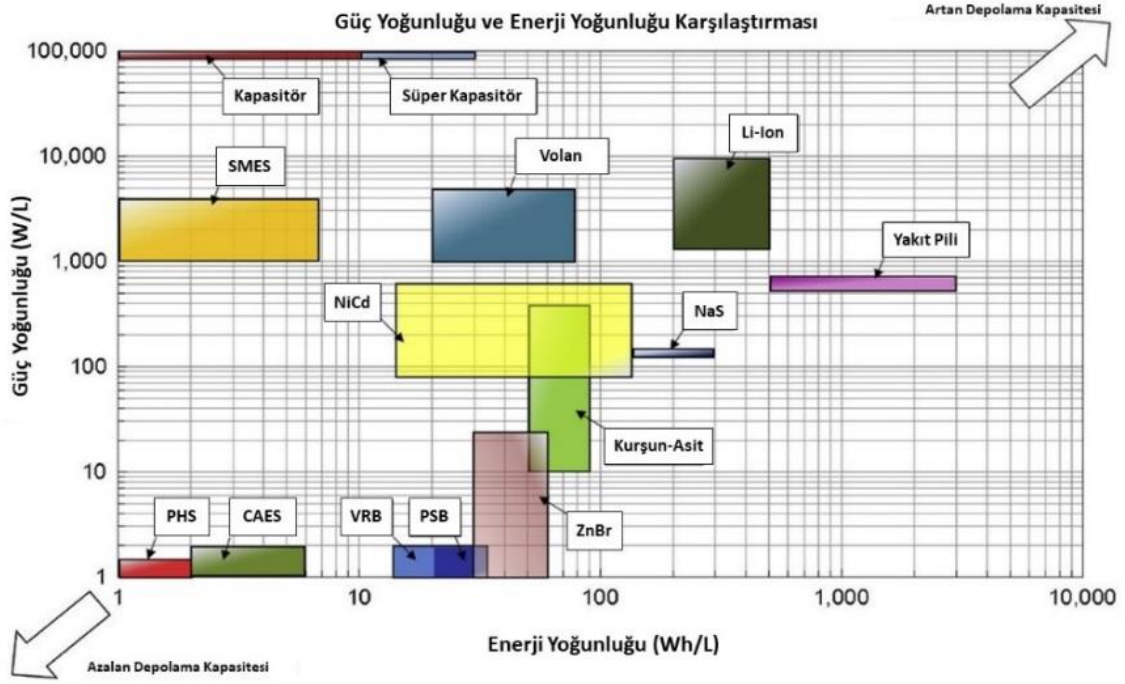
Son yıllarda, ülkemizin giderek ivmelenen, savunma sanayinde öz kaynaklara yönelim politikaları, İHA'lara olan araştırma geliştirme faaliyetlerinin artmasına, bu faaliyetlere ayrılan bütçelerin büyümesine neden olmuştur.

İHA'lar hakkında yürütülen başlıca çalışmalar uçuş dinamiği, uçuş elektroniği ve enerji gereksinimi konularına odaklanmaktadır. Geleneksel uçaklara göre daha hafif ve küçük

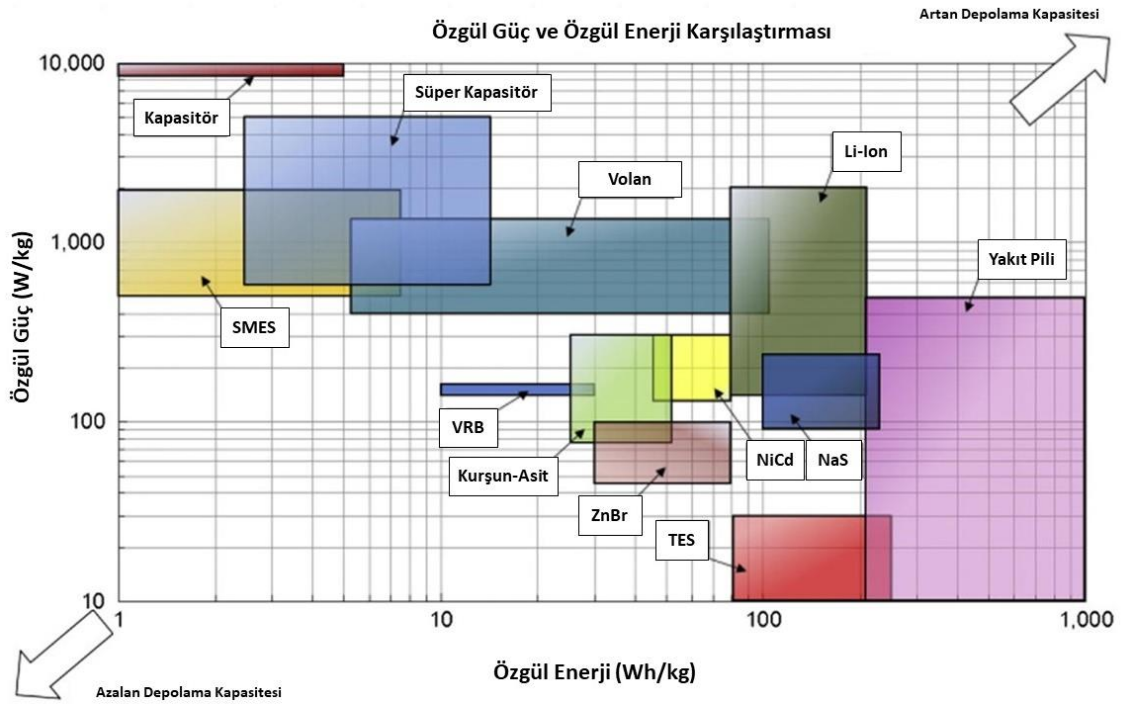
boyutta olan İHA'lar için enerji ihtiyacı ile bu enerjinin İHA üzerinde depolanma şekli, büyük sistemlere göre farklılık göstermektedir. Askeri ve sivil uçaklarda yaygın kullanılan mevcut teknoloji; fosil yakıtların enerji sağladığı içten yanmalı veya jet motorların güç sağladığı sistemler olarak görülmektedir. İHA'larda ise, içten yanmalı motorların kullanımına devam edilmekle birlikte, elektrik motorları ve bunlara enerji sağlayacak depolama sistemleri ile ilgili çalışmalar gelişim eğilimindedir.

İHA enerji ve güç sistemleri için alternatif kaynakların arayışı, küresel olarak yenilenebilir enerjiye yönelim konusundaki eğilimlerin dışında değildir. Fosil kaynakların hızla tükeniyor oluşu ve bunların meydana getirdiği emisyonların çevresel etkileri, tüm dünyanın enerji kaynaklarıyla ilgili bakış açısını değiştirmesine neden olmuştur. Güneş ve rüzgar gibi başlıca temiz kaynaklara yönelimin yanı sıra elektrikli araçların kullanımında tüketici tercihleri ve devletlerin teşvik politikaları her geçen gün artmaktadır.

Özellikle askeri İHA'lar için; temiz enerjiye yönelimin dışında, güç ihtiyacının en verimli şekilde karşılanması da önemli bir husustur. Yüksek verimlilikleri nedeniyle, içten yanmalı motorlara göre, İHA'ların güç ihtiyacı için en yaygın tercih şarj/deşarj edilebilen bataryalardır. Seri ve paralel bağlantılarla birleştirilen bu bataryalar ile gereken voltaj ve akım değerlerine ulaşılabilir. Mevcut İHA'ların %90'ında enerji sağlayıcı olarak bu bataryalar kullanılmaktadır (Krawczyk vd., 2014). Fakat bu bataryaların birim ağırlıktaki güç yoğunlukları İHA'nın havada kalma süresini doğrudan etkilemektedir. Her hava aracı için ağırlık ve hacim önemli tasarım parametrelerindedir. Havada kalma süresinin artırılması için eklenmesi gereken batarya İHA'nın tüm hesap parametrelerini etkilemektedir. Aynı ağırlıkta havada kalma süresinin uzatılması askeri operasyonlarda önemli stratejik üstünlükler sağlayacaktır. Bahsedilen bataryalara göre daha yüksek özgül ve hacimsel güç değerine sahip olan hidrojen tabanlı yakıt pilleri ise ağırlığın ve boyutun azaltılmasında, diğer bataryalara önemli bir rakip olarak öne çıkmaktadır (Şekil 1.1.-1.2.). Ayrıca yakıt pilleri bataryalara göre daha uzun ömürlü olup, şarj etme süresinden bağımsızdır. Yakıt pillerinde enerji üretimi, üzerindeki yakıt deposunun kapasitesine bağlı olup şarj süresi bu deponun doldurulması/değiştirilmesi süresi (dakikalar) kadardır.



Şekil 1.1. Enerji sistemlerinde güç ve enerji yoğunluğu karşılaştırması (Luo vd., 2015)



Şekil 1.2. Enerji sistemlerinde özgül güç ve enerji karşılaştırması (Luo vd., 2015)

Yakıt pili sistemlerinin hafifletilerek güç yoğunluklarında iyileştirmeler yapılması mümkündür. Yakıt pili sistemini oluşturan bipolar plakaların inceltilmesi, farklı malzemeler ve üretim teknikleri ile hafifletilmesi mümkün olarak görülmektedir. Bu tez kapsamında mini elden atmalı tip insansız hava araçlarına yeterli güç sağlayabilecek düşük ağırlıklı bir yakıt pili için akış plakası tasarlanmış, farklı malzemeler ile mekanik

ve elektrokimyasal olarak sayısal modellemesi yapılmış ve imal edilebilirliği deneysel olarak incelenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

1.2.1. İnsansız hava araçları

İnsansız Hava Araçları ilk kullanımına başladığı andan bu zamana çok gelişme göstermiş olup artık İHA sistemleri daha hızlı, yapay zeka yazılımları ile daha akıllı ve gelişmiş kamera sistemleri ile daha iyi görüntü çözünürlüğüne sahiptirler. Öncesinde, hava balonları gibi, bazı insansız hava sistemleri savaş amaçlı kullanılmışsa da bilinen anlamda ilk insansız hava aracı; 1916 yılında A.M. Low tarafından tasarlanan “Aerial Target” isimli araçtır. İngiliz ordusunda pilot eğitiminde kullanılan “Queen Bee”, ABD’nin Vietnam’da, İsrail’in ise 1973 Arap-İsrail savaşında kullandığı “Firebee” adlı araçlar askeri İHA’ların öncüleri olarak sayılabilir (Colomina ve Molina, 2014). Birinci ve ikinci dünya savaşlarında hızla gelişen İHA teknolojileri 2000’li yılların başından itibaren, enerji gereksinimini yakıt pili ile sağlayan, değişik versiyonlar ile gelişimine devam etmektedir. Bunun örneği olarak hayata geçirilmiş bazı İHA projeleri şöyle sıralanabilir (Dudek vd., 2013; Krawczyk vd., 2014);

- Helios (Aerovironment, NaSa, Quantum Technologies, 2003) – Fotovoltaik+Yakıt Pili Hibrit İHA
- Hornet Fc MaV (darPa – Defense Advanced Research Projects Agency, 2003) – Yakıt Pili, Mikro İHA
- Global Observer (Aerovironment, 2005) – Sıvı Hidrojen Depolamalı yakıt pili;
- Spider-Lion (U.S. Naval Research Laboratory, Protonex, 2005) – 15 g hidrojenle 3 saat 19 dakika test uçuşu gerçekleştirmiştir.
- Fuel cell Puma (Protonex, US Air Force Laboratory, Naval Research Laboratory, Millennium cell, 2007) – Metal hidrit hidrojen depolama sistemi ile önce 7 sonra 9 saatlik iki uçuş gerçekleştirmiştir.
- Pterosoar (cal State MFdc lab, oklahoma State university, horizon Fuel cell Technologies,2007) – Sıkıştırılmış hidrojen depolama sistem ile 3 saat (128 km) uçuş gerçekleştirmiş Mini-İHA,
- HyFish Yakıt Pili Jet Kanatlı İHA (DLR German Aerospace Agency, Horizon Fuel cell Technologies, 2007) – Sıkıştırılmış Hidrojen Yakıtlı;

- Endurance İHA (University of Michigan, Adaptive Materials, Inc., 2008) – 10 saatten fazla (159 km) uçuş gerçekleştirmiştir.
- Ion Tiger (U.S. Naval Research Laboratory, The University of Hawaii, Hypercomp eng., Protonex, 2009);
- Mako UAS (U.S. Naval research laboratory, Pennsylvania State Univesrity, Kuchera eng., 13 communications/baI, Jadoo Power, 2009) – Yakıt pili sistemi 1 saatlik uçuş süresince hava elektronik sistemlerine, burun kamerasına ve video aktarıcıya 63 W güç sağlamıştır.
- Raven UAV (Protonex, aeroVironment, 2009) – 3 saatlik havada kalma süresine erişerek konvansiyonel bataryalı sistemin iki katı süreye erişmiştir.
- Boomerang (Israel-Based Bluebird Aero Systems, Horizon Fuel Cell Technologies, 2009)– Dünyanın ilk ticari yakıt piliyle 9 saat havada kalmış, 9 kg'lık insansız hava aracıdır.
- Mini-Helicopter (UTRC – United Technologies Research Center, 2009) – 2,3 kg ağırlığındaki yüküyle 20 dakika havada kalma süresine erişen yakıt pili destekli helikopter.
- HALE Global Observer (Joint Capability Technology Demonstration Program, 2010)–Sıvı hidrojen yakıt depolama sistemli, içten yanmalı “yüksek irtifa, yüksek uçuş süreli” İHA.
- Bird Eye 650 Mini İHA (Israel Aerospace Industries, Horizon Fuel Cell Technologies, 2010) – 6 saatlik havada kalma süresine erişerek muadili konvansiyonel batarya sisteminin performansının iki katına çıkmıştır.
- EAV-1 UAV (Korean Aerospace Research Institute KarI, South Korea's Uconsystem, Horizon Fuel Cell Technologies, 2010) – 5 saatlik havada kalma süresiyle muadili konvansiyonel bataryalı sisteme 3 saat üstünlük sağlamıştır.
- Skylark UAV (Elbit Systems, Horizon Fuel Cell Technologies, 2010) – Sıkıştırılmış Hidrojen depolama sistemi.
- CIAM-80 mini İHA (CIAM Baranov Central Institute of Aviation Motors, Horizon Energy Systems, 2010) – Sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemi ile birkaç dakikalık uçuş gerçekleştirmiştir.
- Stalker Xe UAS (Boeing, Lockheed Martin, Adaptive Materials Incorporated, 2011) Propan yakıtlı katı oksit yakıt pili ve LiPo batarya hibrit sistemi ile 8 saat havada kalmıştır.
- Faucon H2 (Energyor, 2011) – 10 saatten fazla havada kalabilmiştir.

- Thunderbird (bluebird aero Systems, 2012);
- Phantom Eye Hale UAV (Boeing, NASA, 2012) – Sıvı hidrojen yakıt depolama sistemli, içten yanmalı “yüksek irtifa, yüksek uçuş süreli” İHA.
- Ion Tiger (U.S. Naval Research Laboratory, The University of Hawaii, Hypercomp eng., Protonex, 2009) – Önce 2,3 kg’lık yük ile 23 saat 17 dakika havada kalmıştır. Daha sonra bu rekoru geliştirerek 26 saat 2 dakika havada kalabilmiştir. 350 bar’da sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemiyle çalışmıştır.
- Ion Tiger (2013) – Kriyojenik hidrojen depolama sistemiyle 48 saat havada kalma süresine erişmiştir. Sistemin tank ve yakıt pili ağırlığı 1 kg ve nominal gücü 550 W’tır.

İHA’lar dışında, büyük yolcu ve kargo uçaklarını da içeren sivil havacılık sektöründe de yakıt pillerinin kullanımına artan bir ilgi söz konusudur. Fosil yakıt tüketiminin yüksek maliyet ve çevre kirliliğine sebep olması gibi nedenlerle havacılık sektörü, elektrikli araçlara veya elektrikli uçuş bileşenlerine yönelim konusunda önemli hedefler ortaya koymuştur. “More Electric Aircraft” ve “Full Electric Aircraft” denilen bu konseptlere, sektörün önemli firmaları (Airbus, Boeing, Rolls-Royce vd.) destek vermiştir (Romeo vd., 2013). İnsanlı hava araçlarında yakıt pili teknolojisinin kullanımı için pek çok çalışma yapılmıştır. 2005 yılında yakıt pili-konvansiyonel batarya hibrit sistemli ilk uçuş E-Plane adlı araçla gerçekleştirilmiştir. 2008 yılında Boeing firması yine yakıt pili ve hafif konvansiyonel sistemlerle çalışan bir araçla, İspanya üzerinde deneysel bir uçuş gerçekleştirmiştir. Bu uçuşta kalkış için her iki sistem birlikte kullanılırken, seyir sırasında sadece yakıt pili güç ihtiyacını karşılamıştır. 2011 yılında Airbus ve Lufthansa firmaları tarafından, sadece yakıt pili gücünü kullanan iniş takımı burun tekerleğine sahip A320 ATRA aracını tanıtımı yapılmıştır. Avrupa’da ise ENFICA-FC şirketi yakıt pilli hibrit uçağın ilk uçuşunu 2010 yılında gerçekleştirmiştir (Dyanty vd., 2017).

1.2.2. İnsansız hava araçlarında kullanılan yakıt pilleri

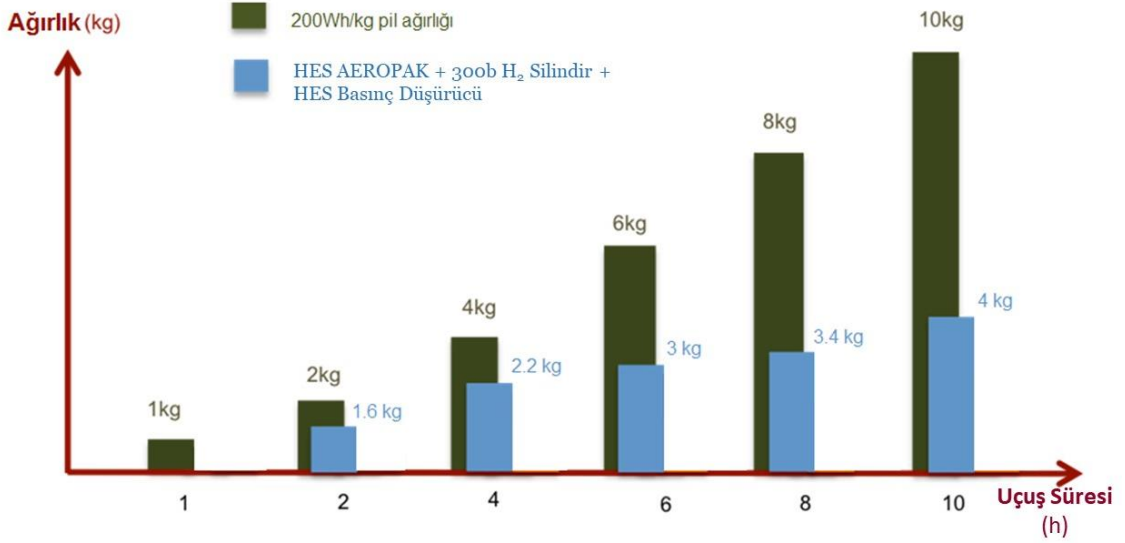
İHA sistemleri kullanım amacı ve çalışma yüksekliklerine göre kategorilere ayrılmaktadır. Bu kategorilere göre sistemin ihtiyaç duyacağı güç gereksinimi dikkate alınarak enerji kaynağı seçimi yapılmaktadır. Yani bir İHA’nın batarya veya içten yanmalı motor tercihini bu sınıflar belirlemektedir. Çizelge 1.1’de askeri standartlara göre üretilen uçakların NATO sınıflandırması gösterilmektedir (Szabolcsi, 2016). Bu

sınıflandırmada Sınıf I, yakıt pili sistemine en uygun olan grup olup bu sınıfta ise en uygun kategori mini taktik insansız hava aracı sistemleridir. Zaten Sınıf I’de genellikle elden atmalı mikro ve mini sistemlerde batarya ile tahrik kullanılmaktadır. Bu araçların düşük irtifada sessiz uçabilmesi için en doğru tercih batarya ve elektrik motorudur. Yakıt pilinin Sınıf I’de kullanılabilir olmasının en önemli nedeni bataryanın yerini alarak veya daha küçük bir batarya ile hibrit çalışarak havada kalma süresini aynı ağırlıkta azaltabilmesidir.

Çizelge 1.1. NATO İnsansız Hava Sistemleri Sınıflandırması

NATO İNSANSIZ HAVA SİSTEMLERİ SINIFLANDIRMASI					
<i>Sınıf</i>	<i>Kategori</i>	<i>Standart Kullanım</i>	<i>Standart Çalışma İrtifası</i>	<i>Standart Menzil Yarıçapı</i>	<i>Örnek Platform</i>
Sınıf III (>600 kg)	Saldırı ve Muharebe	Stratejik/Ulusal	65000 ft’e kadar	-	Reaper
	HALE	Stratejik/Ulusal	65000 ft’e kadar	-	Global Hawk
	MALE	Operasyonel/Askeri	45000 ft’e kadar	-	Heron
Sınıf II (150 kg-600 kg)	Taktik	Taktiksel	18000 ft’e kadar	200 km	Hermes 459
Sınıf I (<150 kg)	Küçük (>15 kg)	Taktiksel Birim	5000 ft’e kadar	50 km	Scan Eagle
	Mini (<15 kg)	Taktiksel Alt Birim	3000 ft’e kadar	25 km’ye kadar	Skylark
	Mikro (<66 J)	Taktiksel Alt Birim	200 ft’e kadar	5 km’ye kadar	Black Widow

Şekil 1.3’de Horizon Energy Systems firması tarafından ticari amaçla geliştirilen 200 Watt güç değerinde olan Aeropak isimli yakıt pilinin İHA sisteminde kullanılması durumunda uçuş sürelerinin batarya ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Buna göre uçuş süresi arttıkça yakıt pili bataryaya göre daha avantajlı hale gelmektedir.



Şekil 1.3. Yakıt pili ile bataryanın karşılaştırılması (Krawczyk vd. 2014)

Buna göre mikro kategorideki İHA sistemleri için en uygun çözüm bataryadır. Çünkü yakıt pili bileşenleri çok fazla olup bazı fiziksel sistemleri (hidrojenin depolanması ve yakıt piline gönderilmesi) mikro boyutta yapmak, mevcut teknolojiyle, batarya ile yarışmaya yetmemektedir. Şekil 1.3'te gösterilen karşılaştırma Sınıf I-Mini İHA kategorisi için geçerli olup Sınıf II ve III'de de yakıt pilinin kullanımı mümkündür. Fakat Sınıf II ve III daha yüksek irtifalarda uçan İHA'lar olup bunlar üzerinde yüksek güç sağlayabilen içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. Ayrıca bu İHA'ların havada kalma süreleri 24 saatin de üzerindedir. Bu İHA'ları aynı sürelerde hidrojen gazı ile havada tutmak için çok büyük hidrojen depolarına ihtiyaç duyulmaktadır. Fotoğraf 1.1'de Avrupa Birliği FP7, Clean SKY projesi kapsamında birçok ortak ile birlikte geliştirilen "Antares DLR" isimli yakıt pili ile çalışan, Sınıf III kategorisinde olan insanlı uçağın prototipi gösterilmektedir. Fotoğraf 1.2'de görüleceği üzere uçağın bir kanadında yaklaşık 200 litre kapasitede 350 bar basınca sahip çok büyük kompozit hidrojen tüpü kullanılmıştır. Diğer kanat üzerindeki hacimde ise 30 kW güç değerinde PEM tipi yakıt pili bulunmaktadır. Uçağın yük kapasitesinin artırılması için kanatları planör tip yapılmıştır. Büyük bir hidrojen tankına sahip olmasına rağmen uçağın havada kalma süresi 5 saati geçmemektedir (Kallo vd., 2013). Günümüzdeki askeri operasyonlarda kullanılan İHA sistemleri ile karşılaştırıldığında hareket kabiliyetinin kısıtlayan büyük yakıt pili bileşenlerinin olduğu ve havada kalma süresinin içten yanmalılara göre daha az olduğu görülmektedir. Yakıt pilinin havada kalma süresini, içten yanmalılara göre uzatma amacı Sınıf III için mevcut teknoloji ile zor olduğu görülmektedir. Hidrojenin sıvı formda daha

yoğun enerji yoğunluğuna sahip olacak şekilde depolanmasının geliştirilmesi ile bu durumun da ilerleyen yıllarda aşılabileceği ön görölmektedir.



Fotoğraf 1.1. Yakıt pili ile alışan Sınıf III kapasitesinde uçak sistemi, Antares DLR



Fotoğraf 1.2. Antares DLR üzerinde bulunan kompozit hidrojen tüpü

İHA'lar için enerji kaynağı seçiminde; ağırlık, hız, havada kalış süresi gibi temel etkenlerin yanı sıra sisteme has bazı parametreler de dikkate alınmalıdır. Örneğin uçağın geometrik ölçüleri; toplam ağırlıkla ilişkili olduğu kadar, uçağın hava direncinden ne ölçüde etkileneceği konusunda da belirleyicidir. Erişilmesi planlanan maksimum uçuş yüksekliği ise değerlendirilmesi gereken başka bir özelliktir. Yanma reaksiyonu için gereken oksijenin atmosferdeki kısmi basıncının yükseklikle değişimi, içten yanmalı

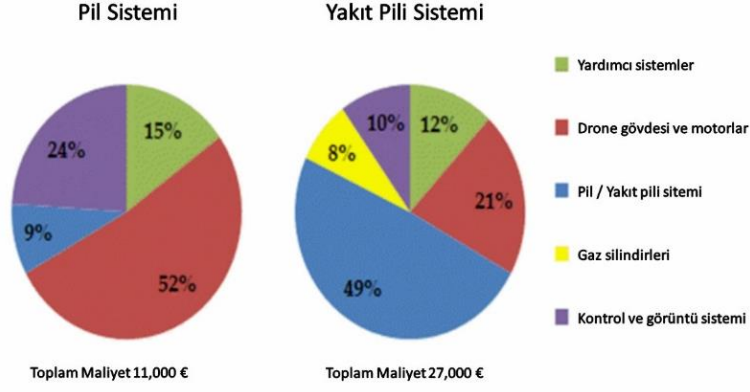
motor gibi, oksijene ihtiyaç duyan enerji sistemlerinin kullanımında sınırlayıcı rol oynamaktadır. Planlanan uçuş süresi ise araç üzerinde depolanacak yakıt ağırlığını, dolayısıyla tüm sistem ağırlığını belirleyen etkidir. İHA'nın misyonu da, kullanılacak uçuş kontrol sistemlerinin karmaşıklığı ve eklenecek yardımcı sistemlerin büyüklüğü nedeniyle, hem ağırlık artımı hususunda hem de fazladan enerji gereksiniminde belirleyicidir.

İHA'lar, görece küçük sistemler oldukları için, elektriksel güç üniteleri ve enerji sağlayıcılar, bu sistemlerin ihtiyacını karşılayabilecek yeterliliktedir. Mevcut İHA sistemlerinin %90'ı enerji kaynağı olarak batarya kullanmaktadır. Bu kapsamda lityum tabanlı bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle, Nikel tabanlı NiCd ve NiMH bataryalara göre öne çıkmaktadır. Yüksek enerji ve güç yoğunluğu yakıt pillerinin de en önemli tercih nedenidir. Lityum bataryalar alanında araştırmalar ve geliştirme faaliyetleri; özgül ve hacimsel enerji yoğunluğunun artırılması, batarya ömrünün uzatılması, geri dönüşüm ve maliyetlerin düşürülmesi üzerine yoğunlaşmaktadır (Krawczyk vd., 2014). Sözü edilen konularda yakıt pillerinin, geleneksel bataryalara oranla bariz üstünlükleri söz konusudur. Bazı parametreler üzerinden karşılaştırmalar Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 Li-ion bataryalar ile yakıt pillerinin karşılaştırması (Krawczyk vd., 2014)

	Enerji Yoğunluğu [Wh/L]	Güç Yoğunluğu [W/L]	Özgül Enerji [Wh/kg]	Özgül Güç [W/kg]	Birim Enerji Maliyeti [\$/kWh]	Birim Güç Maliyeti [\$/kW]
Li-ion	200-500	1500-10000	75-200	150-315	600-2500	1200-4000
Yakıt Pili	500-3000	500+	800-10000	500+	15	1500-3000

Bununla birlikte Belmonte vd., (2017) yaptığı bir çalışmada 120 dakika uçuş gerçekleştiren bir insansız hava aracının, enerji kaynağı olarak yakıt pili ve Li-ion batarya kullandığı iki senaryo incelenmiştir. Yakıt pilinin, kendisine hidrojen sağlayan elektrolizör sistemi, depolama ve yardımcı sistemlerle birlikte, Li-ion batarya sistemine göre daha pahalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aynı görevi icra etmek üzere tasarlanan iki sistem için toplam maliyet ve dağılımı Şekil 1. 4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. İHA'da yakıt pili ile batarya sisteminin toplam maliyet dağılımı (Belmonte vd., 2017)

Hepperle (2013)'e ait bir çalışmada; farklı yakıt kaynaklı enerji sistemleri için verimlilik karşılaştırmasına yer verilmiştir. Bu çalışmada kapsamlı bir değerlendirmenin yapılabilmesi için yakıtların elde ediliş sürecinin de incelenmesi gerektiği belirtilse de karşılaştırma; İHA üzerinde yapılmıştır. Yakıt deposundan pervaneye kadarki bileşenlerin verim değerleri çarpılarak, toplam verimlilik Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. İHA'lar için enerji verimi karşılaştırması (Hepperle, 2013)

Yakıt pili sistemlerinin bataryaya göre daha pahalı ve veriminin daha düşük görünmesine rağmen, Wh/L cinsinden enerji yoğunluğunun fazla olması nedeniyle, havada kalma süresinin uzatılması yoluyla askeri operasyonel üstünlük sağlamak amacıyla İHA sistemlerinde kullanılması kaçınılmazdır.

1.2.3. PEM yakıt pilleri üzerine yapılmış sayısal modelleme çalışmaları

PEM yakıt pillerinin yüksek güç ve enerji yoğunluğu, diğer enerji sağlayıcılar arasında öne çıkmasına neden olmaktadır. PEM yakıt pilleri üzerine yapılan geliştirme çalışmaları ve kullanımın yaygınlaşmasının maliyetleri düşüreceği öngörülse de mevcut durumda kullandığı platin katalizöründen dolayı pahalı sistemler olduğu söylenebilir. Yakıt pillerinin test ve üretim maliyetleri, araştırmacıları yaygın bir şekilde, bilgisayar destekli modelleme ve simülasyon süreçlerinin kullanımına yöneltmiştir (Kone vd., 2017).

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirildiği üzere, üç boyutlu akış ve elektrokimya modellemelerinin literatürdeki yerine odaklanılmıştır. Bu çalışmalar arasında; Jang vd. (2008) temel akış kanalı tasarımlarının yakıt kullanımı, suyun uzaklaştırılması ve pil performansı üzerindeki etkisini incelemiş, serpantin akış kanalı tasarımının en iyi sonuçları verdiğini bildirmişlerdir. Schwarz ve Beale (2009), PEM yakıt pilini çok fazlı akış olarak modellemiş, ohmik kayıpların ve kütle transfer sınırlamalarının akım yoğunluğunun dağılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Katot katalist tabakasındaki akım yoğunluğunun gaz giriş kanalları etrafında yoğunlaştığı ve bunun giriş bölgelerde kütle transfer zorluğu ile direnç kayıplarının daha düşük olmasına bağlamışlardır. Kang vd. (2011), geçişken kanallı bir PEM yakıt pilinin poroz (gözenekli) katot tarafını modelleyerek, bu tür bir katot modelinde, “suyun heyelanı fenomeni” (liquid water avalanche phenomenon) olarak adlandırdıkları durumun varlığını ortaya koymuşlardır. Choopanya ve Yang (2015) tek kanal ve serpantin akış kanalı geometrilerinin su yönetimini ve dolayısıyla pil performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Oluşturdukları çok fazlı, üç boyutlu model, zamana bağlı ve durağan durum için ayrı ayrı analiz edilmiş, her iki kanal geometrisinin avantaj ve dezavantajları ortaya koyulmuştur. Çağlayan vd. (2016), 25 cm² aktif alan sahip, üçlü serpantin kanallı bir yüksek sıcaklık PEM yakıt pili modeli üzerinden tek fazlı ve izotermal bir model oluşturup, 100-180 °C arasında değişik sıcaklıklarda pil performansını incelemişlerdir. Sıcaklık artışının hücre performansına olumlu etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Khazae ve Sabadban, (2016) 24,8 cm² akış alanına sahip bir PEM yakıt pilini, tekli serpantin ve dörtlü serpantin geometrilerinde, iki fazlı akış olarak modellemiştir. Her iki kanal geometrisinde, hidrojen ve oksijenin karşıt akışlı ve birlikte akışlı durumları incelenmiş, nem oranının, su yönetimi ve pil performansına etkileri irdelenmiştir. Aynı koşullar için, dörtlü serpantin yapısının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Sezgin vd.

(2016), yüksek sıcaklık PEM yakıt pili için yaptıkları üç boyutlu tek kanal modellemede; hidrojen ve havanın akış hızlarının pil performansı üzerindeki etkilerini deneysel sonuçlarla kıyaslayarak incelemiştir. Yapılan modellemede, hem hidrojen hem de oksijen için düşük akış hızları, ohmik bölgede ve aktivasyon bölgesinde deneysel sonuçlara iyi uyum sağlamış, kütle transfer bölgesinde ise deneysel ölçümlerden uzaklaşmıştır.



BÖLÜM II

YAKIT PİLLERİ

2.1. Yakıt Pilleri Genel Yapısı

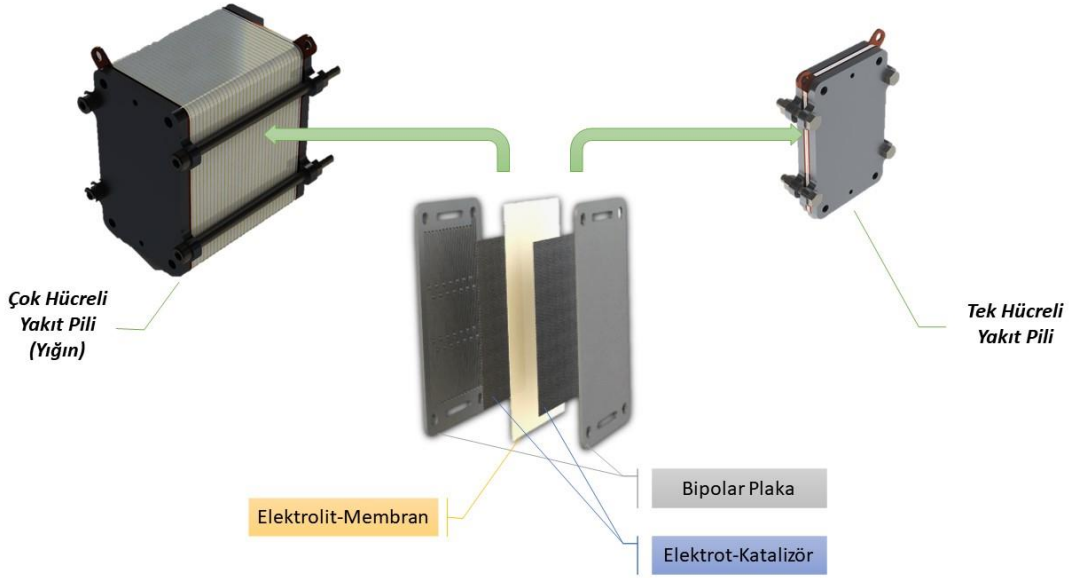
Piller (bataryalar), elektrokimyasal süreçlerle anlık elektrik enerjisi sağlayan yapılardır. Anot ve katot taraflarında bulunan yakıtın kimyasal enerjisi bir elektrolitik yapı üzerinde elektrik enerjisine dönüşmektedir. Yakıt pillerini, geleneksel bataryalardan ayıran özellik, sürekli yakıt beslemesi yapılmasıdır. Bataryalarla karşılaştırıldığında, tek kullanımlık ya da döngüsel olarak değil, yakıt beslemesi yapıldığı sürece sürekli olarak enerji sağlamaları mümkün olmaktadır.

Christian Friedrich Schönbein adlı bilim adamı, 1838 de yaptığı çalışmada suyun elektrolizini tersine çevirerek elektrik elde etmiş, William Robert Grove ise 1843 yılında ilk yakıt pilini hayata geçirmiştir. Yakıt pilinin ilk kullanımı 1960 yılında NASA'nın Gemini adlı uzay projesinde olmuştur (Andújar ve Segura, 2009).

Yakıt pilleri, birim elemanı olan yakıt hücrelerinin seri ve paralel bağlanmasıyla bir araya getirilmiş yığınlardır. Bir yakıt hücresi temel olarak; anot, elektrolit ve katot bölümlerinden oluşan membran elektrot grubu (MEG) ile akım toplayıcı plakalar ve sızdırmazlık elemanlarından meydana gelmektedir. Hücrenin anot veya katot kısmında, yakıt, elektron ve iyonlarına ayrışır. İyonik iletkenliğe sahip elektrolit üzerinden hücrenin karşı tarafına geçen iyonlar burada oksitlenme reaksiyonuna katılırlar. Geçişine izin verilmeyen elektronlar ise, bir elektriksel yük üzerinden geçerek, membranın karşı tarafına taşınmış olur. Hücre içerisinde taşınan iyonlar ile hücre dışından iletilen elektronlar, oksitlenme sırasında birleşerek atık ısıyı ve reaksiyon ürünlerini meydana getirir. Yakıt olarak saf hidrojen ya da içeriğinde hidrojen bulunan hidrokarbon veya alkoller kullanılmaktadır. Oksitleyici olarak, yine, saf oksijen ya da hava gibi içeriğinde oksijen bulduran maddeler kullanılmaktadır (Hirschenhofer vd., 1998).

Yakıt hücrelerinde yakıt ve oksitleyici gazlarının dağıtımı, üzerine akış kanalları açılmış, yüksek elektriksel iletkenliğe sahip plakalar üzerinden yapılmaktadır. Bu plakalar, yakıt hücrelerinin ardışık dizilimiyle meydana getirilen yakıt pili yığnında, bir hücre için anot

kutbunu teşkil ederken, komşu hücre için katot kutbunu oluşturmaktadır. Bu nedenle “çift kutuplu” anlamına gelen bipolar plaka (BP) olarak isimlendirilirler. Bir yakıt pilini oluşturan bileşenler Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yakıt pili yığınının bileşenleri

2.2. Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri; genellikle hücrelerinde kullanılan elektrolit tipine ve çalışma sıcaklığına göre isimlendirilmektedir. Temel olarak 6 farklı yakıt pilinden söz etmek mümkündür. Bunlar;

- Düşük Sıcaklık Yakıt Pilleri (50-150 °C): Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pili (PEMFC), Alkalın Yakıt Pili (AFC), Doğrudan Metanol Yakıt Pilleri (DMFC)
- Orta Sıcaklık Yakıt Pilleri (~200 °C): Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)
- Yüksek Sıcaklık Yakıt Pilleri (600-1000 °C): Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC), Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

Bunlara ek olarak, çok yaygın kullanım alanı bulunmayan ve literatürde araştırma-geliştirme çalışmaları devam eden Doğrudan Bor-Hidrit Yakıt Pili ve Doğrudan Karbon Yakıt Pilini de saymak mümkündür (Dicks ve Rand, 2018). Temel yakıt pillerinin karşılaştırmalı özellikleri Çizelge 2.1.’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yakıt pili çeşitlerinin kıyaslanması (Energy.gov. 2018)

Yakıt pili tipi	Elektrolit	Çalışma sıcaklığı	Yığın boyutu	Elektrik verimliliği (LHV)	Uygulamalar
Polimer Elektrolit Membranı (PEM)	Perflorosülfonik asit	<120 ° C	<1 kW-100 kW	% 60, doğrudan, H ₂ ; % 40 reforme yakıt	Yedek güç Taşınabilir güç Dağıtım Üretim Taşımacılık Özel araçlar
	Avantajları	Katı elektrolit, korozyonu ve elektrolit yönetim problemlerini azaltır, Düşük sıcaklık, Hızlı başlatma ve yüklemeyi takip etme			
	Zorluklar	Pahalı katalizörler Yakıt kirliliklerine duyarlı			
Alkali (AFC)	Gözenekli bir matrisle batırılmış sulu potasyum hidroksit veya alkalın polimer membran	<100 ° C	1-100 kW	% 60	Askeri Uzay Yedek güç Taşımacılık
	Avantajları	Daha geniş stabil malzeme çeşitliliği, düşük maliyetli bileşenleri sağlar, Düşük sıcaklık, Hızlı başlatma			
	Zorluklar	Yakıt ve havadaki CO ₂ ye karşı hassastır. Elektrolit yönetimi (sulu) Elektrolit iletkenliği (polimer)			
Fosforik Asit (PAFC)	Gözenekli bir matrisle batırılmış fosforik asit veya bir polimer zarında emdirilmiş	150°-200°C	5-400 kW, 100 kW modül (sıvı PAFC) <10 kW (polimer membran)	% 40	Dağıtım Üretim
	Avantajları	Kojenerasyon için uygundur. Yakıt kirliliğine artan tolerans			
	Zorluklar	Pahalı katalizörler. Uzun devreye alma süresi Kükürt duyarlılığı			
Erimiş Karbonat (MCFC)	Erimiş lityum, sodyum ve / veya potasyum karbonatlar, gözenekli bir matrisle batırılmış	600°-700°C	300 kW-3 MW, 300 kW modül	% 50	Elektrik hizmeti Dağıtım Üretim
	Avantajları	Yüksek verim, Yakıtın esnekliği, kojenerasyon için uygundur, Hibrit/gaz türbini döngüsü			
	Zorluklar	Yüksek sıcaklık korozyonu ve hücre bileşenlerinin parçalanması, Uzun devreye alma süresi, Düşük güç yoğunluğu			
Katı Oksit (SOFC)	Yttria stabilize zirkonya	500°1,000°C	1 kW-2 MW	% 60	Yardımcı güç Elektrik hizmeti Dağıtım Üretim
	Avantajları	Yüksek verim. Yakıtın esnekliği. Katı elektrolit. Kojenerasyon için uygundur. Hibrit / gaz türbini döngüsü			
	Zorluklar	Yüksek sıcaklık korozyonu ve hücre bileşenlerinin parçalanması, Uzun devreye alma süresi, Sınırlı sayıda kapatma			

2.2.1. Alkalin Yakıt Pilleri

Alkalin yakıt pillerinde elektrolit olarak kullanılan potasyum hidroksit çözeltisi (KOH) pilin soğutulmasını da sağlamaktadır. Hareketli iyonlar hidroksil (OH^-) iyonlarıdır ve katottan anota doğru hareket etmektedir. Çalışma sıcaklıkları ortalama $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. Yakıt olarak saf hidrojen, oksitleyici olarak saf oksijen kullanılır. Elektrolitin CO_2 ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan elektrolit zehirlenmesi pil performansını önemli ölçüde etkilemektedir (EG&G Technical Services, Inc., 2004).

2.2.2. Doğrudan Metanol Yakıt Pilleri

Elektrolit olarak polimer membran kullanılan bu yakıt pillerinde yakıt olarak metanol (metil alkol), oksitleyici olarak ise hava kullanılmaktadır. $50\text{-}120\text{ }^\circ\text{C}$ aralıkta, görece düşük sıcaklıklarda çalışan ve yakıt temini için ek işlem gerekmeyen bu tür yakıt pilleri, günlük hayatta ve taşınabilir uygulamalarda tercih edilmektedir. Hareketli iyonları H^+ 'dır ve anottan katoda doğru hareket etmektedir. Diğer alkol türlerinin de yakıt olarak kullanılması mümkündür (Rashad vd., 2017).

2.2.3. Fosforik Asit Yakıt Pilleri

Fosforik asit yakıt pilleri elektrolit olarak fosforik asit ya da sülfürik asit kullanmaktadır. Çalışma sıcaklığı ortalama $200\text{ }^\circ\text{C}$ olan bu pillerde, yakıt olarak hidrokarbon gazları, oksitleyici olarak da hava kullanılmaktadır. Katalizör olarak platin kullanımı gerekmektedir. Platin $200\text{ }^\circ\text{C}$ civarı sıcaklıklarda CO zehirlenmesine duyarlı hale gelmesi bu tür yakıt pilleri için önemli bir problemdir (Rashad vd., 2017).

2.2.4. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri

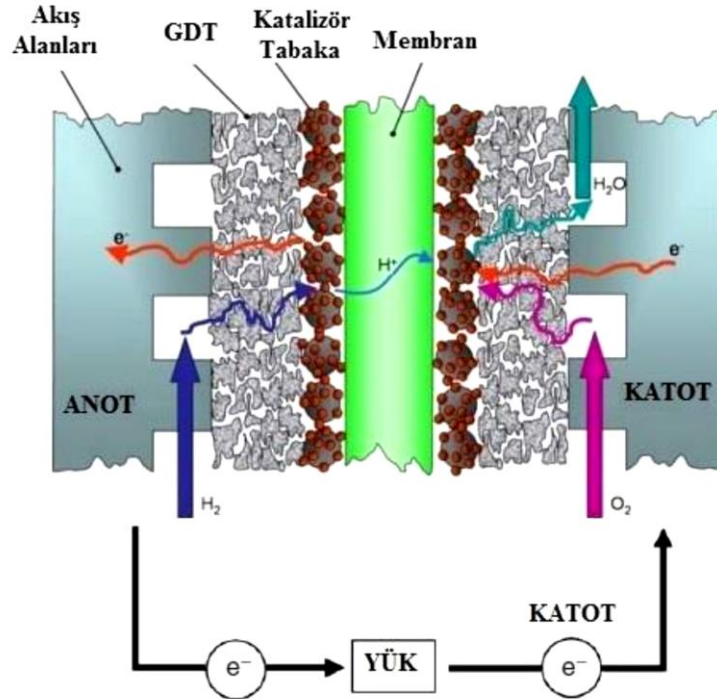
$650\text{ }^\circ\text{C}$ üzeri sıcaklıklarda çalışan erimiş karbonat yakıt pillerinde elektrolit olarak kullanılan karbonat tuz karışımı, gözenekli seramik bir yapının içerisinde bulunmaktadır. Hareketli iyonları CO_3^{2-} 'nin, katottan anota iletimi için gereken CO_2 , anot tarafında ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Sabit güç santrallerinde kullanılmaktadır (Rashad vd., 2017).

2.2.5. Katı Oksit Yakıt Pilleri

Katı oksit yakıt pilleri 600-1000 °C sıcaklık aralığında çalışır ve elektrolit olarak itriyum katkılı zirkonyum oksit kullanılmaktadır. Mobil iyonları O^{2-} , katottan anota hareket eder. Yakıt olarak saf hidrojen ve doğalgaz gibi hidrokarbonları kullanabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çalışması nedeniyle hidrojen ayrıştırmasına gerek kalmaz ve çıkan atık ısının kojenerasyonda kullanılmasına imkan tanır. Yakıt pilleri içerisinde en yüksek verime sahip piller katı oksit yakıt pilleridir (Rashad vd., 2017).

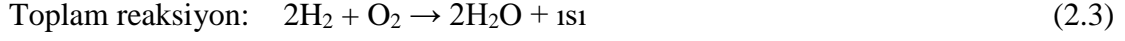
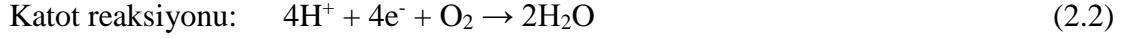
2.2.6. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Pilleri

Nafion olarak ticari adı ile anılan polimer malzemeden üretilen elektrolit membran, Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt pillerine ismini veren ana unsurdur. Membranın her iki yanına kaplanmış olan katalizör tabaka ve karbon kumaş ya da karbon kağıttan yapılan gaz difüzyon tabakası (GDT), birlikte hücrenin çekirdeğini oluşturan membran elektrot grubunu (MEG) oluşturmaktadır. Bu yapı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Membran elektrot grubunun yapısı

Hidrojen beslemesinin anot tarafından, oksijen beslemesinin ise katot tarafından yapıldığı PEM yakıt pillerinde gerçekleşen elektrokimyasal tepkimeler şöyledir:



Hücresinin hem anot hem de katot tarafında, reaksiyonu hızlandırmak üzere katalizör kullanılmaktadır. PEM yakıt pilleri için genellikle tercih edilen platin katalizör yakıt pilinin, hidrojen iyonizasyonundan kaynaklanan asidik ortamına dayanıklıdır.

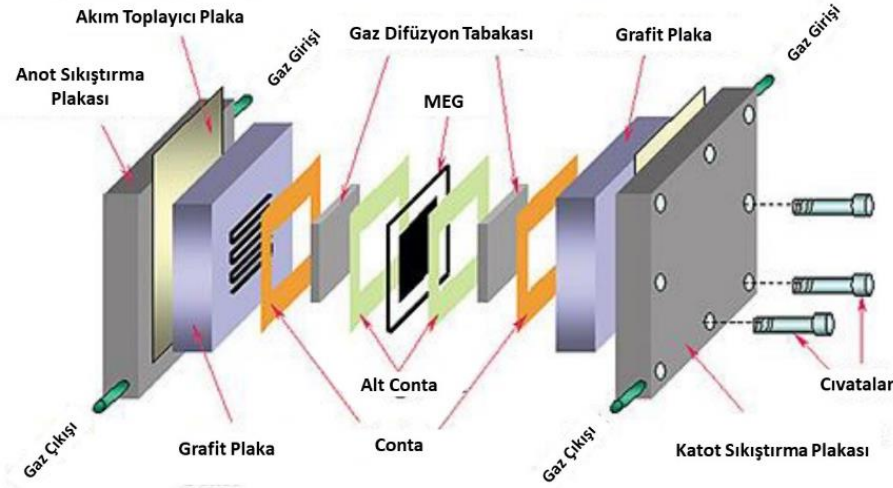
Elektrotlar ile bipolar plakalar arasında bulunan GDT, gözenekli yapısı ile gaz akışının elektrotlara ulaşmasını ve katalist tabakada oluşan suyun uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca özellikle proton iletimi için çok önemli olan nemli ortam, yine GDT'nin gözenekli yapısı sayesinde meydana getirilmektedir. Fakat yakıt pili içerisinde bulunan fazla su katalist tabakanın temas yüzey alanını düşürebilir. Özellikle 60 °C'nin üzeri sıcaklıklarda elektrotların kuruması problemi ortaya çıkmaktadır (Dicks ve Rand, 2018). Bu nedenle PEM yakıt pillerinde su yönetimi oldukça önemlidir.

2.3. PEM Yakıt Pili Bileşenleri

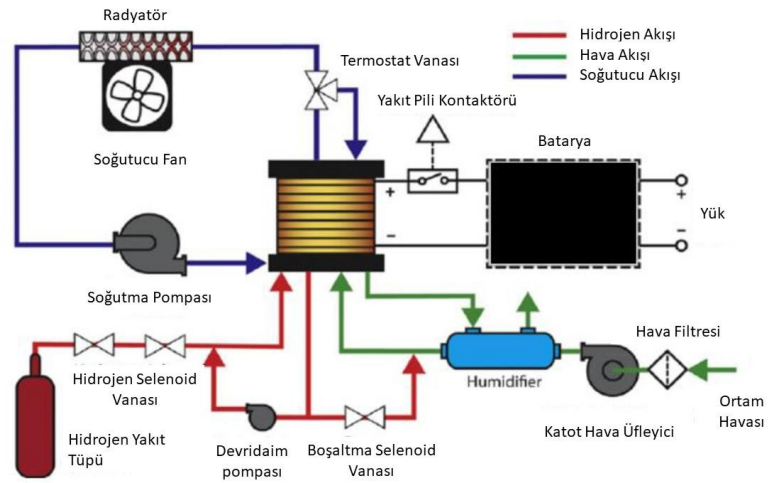
PEM yakıt pilleri Şekil 2.3'te gösterildiği gibi temel yapıtaşı olan polimer membranın iki yanında simetrik olarak konumlanmış bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler sırasıyla katalist tabaka, gaz difüzyon tabakası ve bipolar (çift kutuplu) plakalardır. Bipolar plakaların yüzeyinde gaz ve su transferini sağlayan akış kanalları bulunmaktadır. Soğutma için merkez kesitlerine kapalı soğutma kanalları da açılabilir. Daha dışta ise akım toplama plakaları ve sıkıştırma plakaları bulunmaktadır. Sızdırmazlığın sağlanması için membran ile bipolar plakalar arasına conta yerleştirilir. Bu elemanlar bir araya getirilerek yakıt ve oksitleyici beslemesi yapıldığında, yakıt pili elektrik enerjisi sağlayan bir cihaz olarak çalışmaya başlar.

Bununla birlikte, PEM yakıt pilinin verimli, kararlı ve sürekli çalışmasını sağlamak üzere Şekil 2.4'te gösterilen yardımcı sistem ve bileşenlerin de kullanılması gereklidir. Soğutma plakaları, soğutucu akışkan pompası, basınçlı yakıt tankı veya yakıt pompası,

hava pompası, elektronik kontrollü regülatör ve valfler, sıcaklık-basınç-nem sensörleri ve filtreler yardımcı unsurlar olarak sayılabilir (Chowdhury, 2017).



Şekil 2.3. PEM Yakıt pili bileşenleri



Şekil 2.4. Yakıt pili sistem-batarya hibrit çalışma şeması

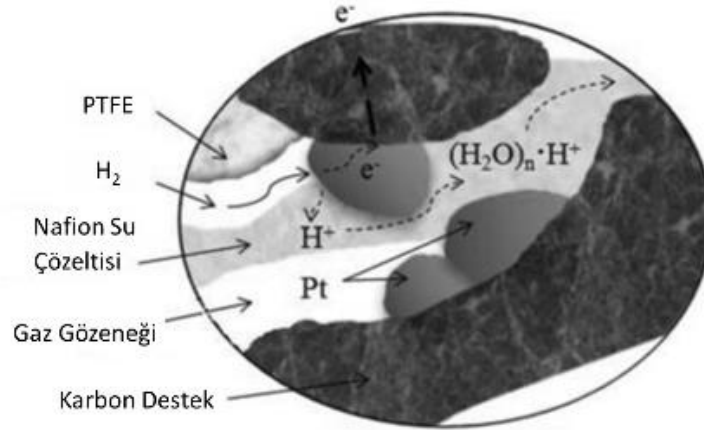
2.3.1. Polimer Elektrolit Membran

PEM yakıt pillerinde proton geçişine izin verirken, elektron geçişine engel olarak iyon yönlendirmelerinin gerçekleştiği eleman elektrolit membrandır. Bu sayede elektronlar hücre dışı bir kanaldan katota ulaşırken, protonlar ise hücre içerisinde geçerek katot reaksiyonuna katılmaktadır. Membranın iyonik iletkenliğinin yüksek, elektriksel

iletkenliğinin ve gaz geçirgenliğinin çok düşük olması beklenir. İyonik iletkenlik membranının nemliliğiyle artmaktadır. Polimer membranlı yakıt pillerinde en çok bilinen ürün DuPont firmasının Nafion adını verdiği, politetrafloroetilen polimer bileşimidir. Kalınlığı 25 µm ile 254 µm arasında değişen bu malzeme istenilen ölçülerde kesilebilmektedir. (Spiegel, 2007) Gelişen teknoloji ile birlikte, polimer membran konusunda, başka ticari firmalar da yeni ürünler ortaya koymuştur. Membranlar, 17 µm kalınlığa kadar üretilmektedir. Bu yeni ürünlerden bazıları; Aciplex (Asahi Chemical Industry), Flemion (Asahi Glass Company), Gore-Select (W.L. Gore and Associates, Inc.), ve Neosepta-F (Tokuyama) olarak sayılabilir. Bu membranlar 90 °C sıcaklığa kadar olan çalışma şartlarında görevini yerine getirebilmektedir (Scipioni, vd., 2017).

2.3.2. Katalist Tabaka

Karbon destekli platin malzemedan oluşan bu tabaka yakıt pilinin en pahalı bölümüdür. Elektrokimyasal reaksiyonlar bu gözenekli tabaka üzerinde gerçekleşmektedir. Katalist tabakanın yapısı ve proton iletimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

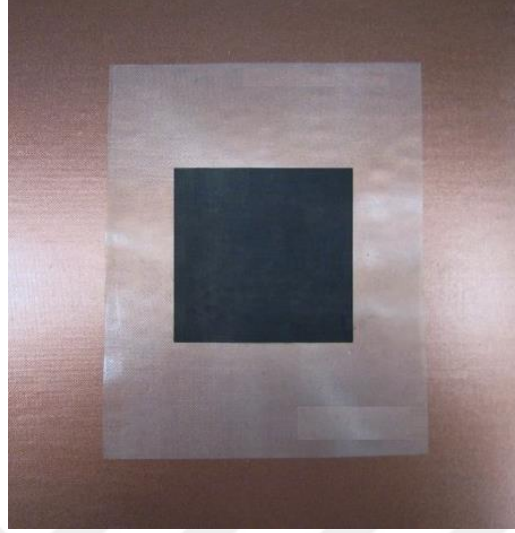


Şekil 2.5. Katalist tabaka (Xiao vd., 2012)

2.3.3. Gaz Difüzyon Tabakası

Reaksiyon sonucu oluşan suyun akış kanallarına iletilmesinden ve yakıt ile havanın tutularak elektrot yüzeyine homojen bir şekilde dağılmasından sorumludur. Elektriksel olarak iletken olduğu için bipolar plakalar ile katalist tabaka arasında elektron geçişini sağlamaktadır. Gözenekli yapıya sahip karbon kumaş ya da karbon kağıttan imal edilir

(Spiegel, 2007). Fotoğraf 2.1.'de polimer membran üzerine birleştirilmiş şekilde, karbon kumaştan imal edilmiş gaz difüzyon tabakası görülmektedir.



Fotoğraf 2.1. Polimer membran ve gaz difüzyon tabakasından oluşan MEG

2.3.4. Akım Toplama Plakası

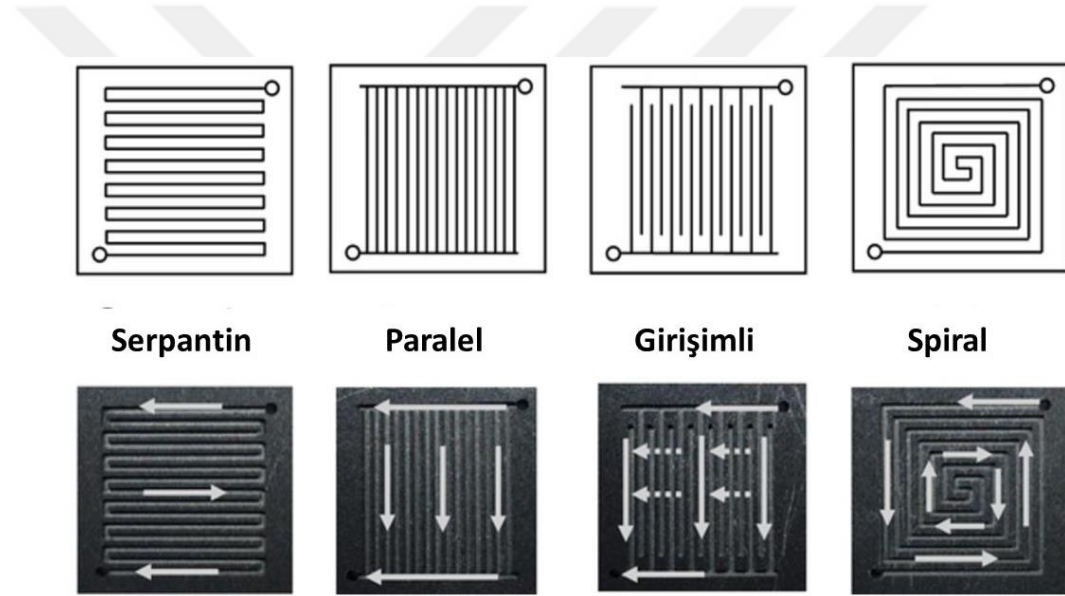
Bakır gibi, yüksek iletkenliğe sahip metallere imal edilmektedir. Korozyonun önlenmesi amacıyla genellikle altınla kaplanır. Yakıt pili yığımında, her iki uçta bir adet akım toplama plakası bulunmaktadır. Yığın içerisindeki elektron iletimi ise bipolar plakalar üzerinden gerçekleşmektedir. Bir hücrenin anot tarafında ayrılan bir elektron, bipolar plaka üzerinden komşu hücrenin katot reaksiyonuna katılır. Bu etki yığımın en ucundaki bipolar plakaya kadar taşınarak, akım toplayıcı plakanın kutuplaşması sağlanmış olmaktadır (Spiegel, 2007).

2.3.5. Sıkıştırma Plakası

Dökme demir ya da çelik gibi sert malzemeden imal edilmektedir. Akım toplama plakaları gibi pil yığımının iki ucunda bulunmaktadır. Uzun cıvatalar vasıtasıyla birbirine monte edilir ve yığını bir arada tutan mekanik bağlantıyı oluştururlar. Yığına yapısal bir zarar vermeyecek ölçüde gevşek, gaz kaçacağını önleyecek ve etkin akım toplanması için yeterli temas sağlayacak ölçüde sıkı monte edilmeleri gerekmektedir. Yakıt ve hava için gaz giriş-çıkış manifoldları sıkıştırma plakaları üzerinde bulunmaktadır (Spiegel, 2007).

2.3.6. Bipolar Plakalar

Bipolar plakalarda akış kanalı tasarımı ve malzeme seçimi önemlidir. Bipolar plakalar öncelikli olarak gazların, hücrenin aktif alanında homojen olarak dağıtılmasından sorumludur (Hermann vd., 2005). Bu nedenle literatürde çok sayıda akış kanalı tasarımı çalışması mevcuttur. Bunlar arasından öne çıkan modeller; paralel akışlı, bio-etkilenimli, geçişken (girişimli) kanallı, iğne yapılı, spiral model ile serpantin tipi akış kanallarıdır. Tek veya çok kanallı serpantin modeli en çok tercih edilen akış kanalı tasarımıdır. Çok fazla dönüş nedeniyle oluşan basınç düşüşü etkisinin çok kanallı serpantin modeliyle üstesinden gelinebilmektedir (Dicks ve Rand, 2018). Bazı akış kanalı tasarımları Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

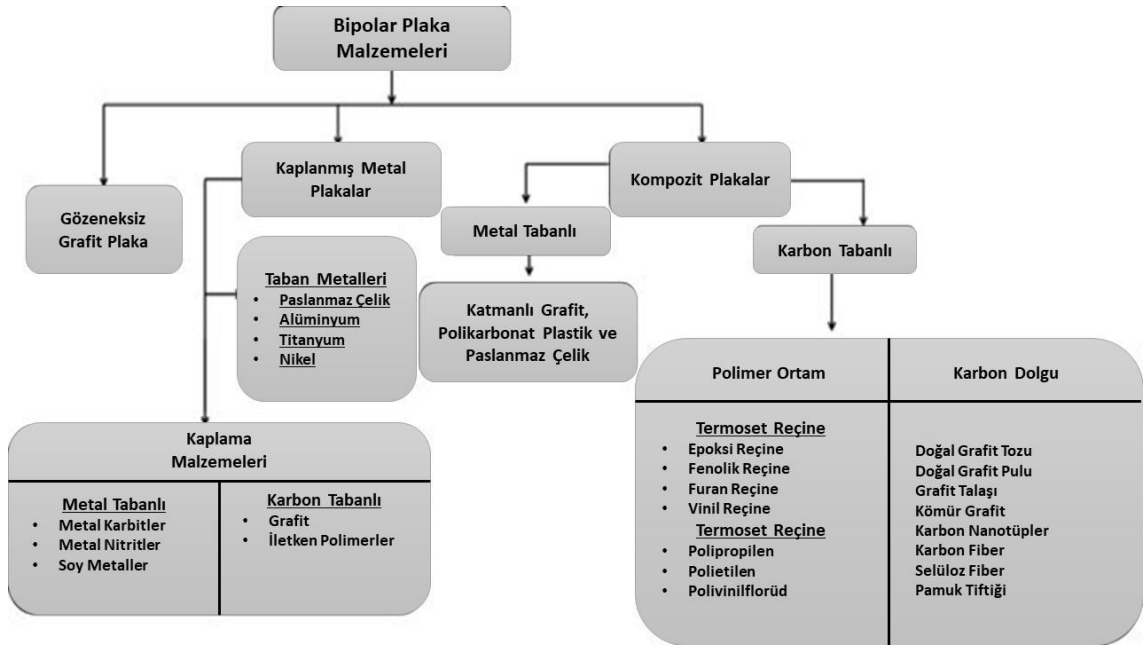


Şekil 2.6. Bazı temel akış kanalı tasarımları (Dennison vd., 2016)

Yakıt pillerinde meydana gelebilecek birçok olumsuzluğun nedeni iyi seçilememiş bir akış kanalı tasarımıdır. Düzensiz bir akış, düzensiz kimyasal tepkimeye; bu da dengesiz su ve ısı oluşumuna neden olmaktadır. Nem dengesinin bozulması nedeniyle reaksiyona yeterli miktarda reaktant katılamaz, yeni su oluşumu daha da düzensizleşir ve akış giderek daha da bozular. Oluşan dengesiz ısı dağılımı, pil üzerinde sıcak noktalar meydana getirerek, malzemelerin dayanım sınırlarının aşılma ihtimalini arttırır. Membran ve GDT'de kurumaya ve pil genelinde termo-mekanik gerilmelere neden olur (Wang, 2015).

Malzeme özellikleri itibariyle; bipolar plakaların, yakıt pilinin yapısal bütünlüğünü destekleyecek mukavemete, iyi elektriksel ve ısıl iletkenliğe sahip ve gaz geçirgenliğinin

düşük olması beklenir. En çok kullanılan bipolar plakalar kimyasal kararlılıkları ve yüksek iletkenlikleri nedeniyle grafit ve karbon tabanlı malzemelerden imal edilmektedir. Ne var ki üretim yöntemleri pahalıdır. Alternatif olarak polimer kompozitlerden ve metal bipolar plakalardan söz edilebilir. Metal bipolar plakalar kolay ve ucuz üretim avantajı sağlarken, bunlar için korozyon en önemli sorundur. Bu nedenle paslanmaz çelik kullanımı veya alüminyum, titanyum gibi malzemelerin yüksek iletkenlikte, kimyasal olarak kararlı başka malzemelerle kaplanması yöntemine gidilmektedir (Hermann vd., 2005). Bipolar plakalarda kullanılan malzemeler ve sınıflandırmaları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Bipolar plakalarda kullanılan malzemeler (K. Gautam vd., 2015)

BÖLÜM III

YAKIT PİLİ TERMODİNAMIĞI

3.1. Elektriksel İş ve Hücre Potansiyeli

Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi, elektrik enerjisi ve ısı enerjisine dönüştüren cihazlardır. Elektrokimyasal reaksiyonlar hücre zarının her iki tarafında yarı-reaksiyonlar olarak gerçekleşmektedir. Hidrojen ve oksijenle gerçekleşen temel tepkimeler 2.1, 2.2 ve 2.3 numaralı denklemlerde verilmiştir. Reaksiyonun entalpi değişimi, giren ve çıkan ürünlerin oluşum entalpilerinin toplamıyla ifade edilmektedir. Hidrojen ve oksijenin birleşmesiyle suyun oluştuğu reaksiyon için entalpi değişimi aşağıda verilmiştir.

$$\Delta H^0 = (H_f^0)_{H_2O} - (H_f^0)_{H_2} - \frac{1}{2}(H_f^0)_{O_2} \quad (3.1)$$

Elementlerin oluşum entalpileri 0 ve sıvı suyun oluşum entalpisi 25°C 'de -286 kJ/mol olarak yerine yazılırsa toplam reaksiyon entalpisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Delta H^0 = -286 \text{ kJ/mol} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ/mol} \quad (3.2)$$

Reaksiyon sonunda oluşan su, buhar fazında ise alt ısı değer kullanılır. Bu durumda toplam entalpi -242 kJ/mol olarak kullanılmalıdır. Aradaki fark suyun buharlaşma entalpisine eşittir. Ortaya çıkan bu enerjinin tamamının elektriksel işe dönüştürülmesi, entropi üretimi nedeniyle mümkün değildir. İşe dönüştürülebilecek enerji Gibbs serbest enerjisi olarak adlandırılır. H entalpi, T sıcaklık ve S entropi olmak üzere, denklem 3.3'teki ilişki söz konusudur:

$$G = H - TS \quad (3.3)$$

Görüldüğü üzere Gibbs serbest enerjisi sıcaklıkla azalır. Normal şartlar dışında, R evrensel gaz sabiti, T sıcaklık, p kısmi basınçlar olmak üzere;

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \quad (3.4)$$

eşitliği geçerlidir. Burada ΔG_f^0 normal şartlar altında Gibbs serbest enerjisi değişimini ifade eder.

Gibbs serbest enerjisinin hücre potansiyeliyle ilişkisi denklem 3.5'te tanımlanmaktadır. Burada n mol başına transfer edilen elektron sayısını, F Faraday sabitini, E ise hücre potansiyelini göstermektedir. Eşitlik 3.4 ve 3.5'te verilen denklemler birleştirilirse Nernst denklemi (3.6) olarak bilinen denklem elde edilir.

$$\Delta G_f = -nFE \quad (3.5)$$

$$E = \frac{-\Delta G_f}{nF} = \frac{-\Delta G_f^0}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right] \quad (3.6)$$

Hücre gerilimini hesaplamak için, reaksiyon enerjisinin tamamının elektrik enerjisine dönüştürüldüğü tersinir bir süreç kabulüyle, normal şartlar altında, 25°C sıcaklık için aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$E = \frac{\Delta H}{nF} = \frac{286,000}{2 \cdot 96,485} = 1.48 \text{ Volt} \quad (3.7)$$

Elde edilen bu değer reaksiyonun üst ısıl değeri kullanılarak bulunmuştur. Bu yaklaşıma göre hidrojen ve oksijen tam stokiyometrik oranlarda reaksiyona katılır ve artan reaktant bulunmaz. Daha gerçekçi bir yaklaşım alt ısıl değerini kullanarak hesaplanan enerji değeridir. İkisi arasındaki fark suyun buharlaşma entalpisine eşittir. Bu değere göre hesaplanan hücre potansiyeli ise aşağıda verilmiştir:

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237,340 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96,485 \text{ A s/mol}} = 1.23 \text{ Volt} \quad (3.8)$$

3.2. Hücre Verimi

Bir yakıt hücresinin verimi, çıkan elektrik enerjisinin, giren yakıtın enerjisine oranıdır. Faydalı işe dönüşebilen enerjinin, reaksiyon entalpisine oranlanmasıyla bulunur. 25°C sıcaklık için yakıt hücresinin teorik verimi;

$$Verim(\eta) = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237 \text{ kJ/mol}}{286 \text{ kJ/mol}} = 83\% \quad (3.9)$$

olarak hesaplanır. Voltaj-Enerji ilişkisi denklem 3.5'te belirtildiği üzere sabit olduğundan yukardaki ifade gerilimler cinsinden şu şekilde yazılabilir.

$$Verim(\eta) = \frac{\Delta G/nF}{\Delta H/nF} = \frac{1.23}{1.48} = 83\% \quad (3.10)$$

Gerçekte, yakıt pilinde, beslemesi yapılan yakıtın tamamı reaksiyona katılamaz. Verimlilik hususu değerlendirilirken, verilen toplam yakıtın ne kadarlık bir kısmının enerjiye dönüştürüldüğü dikkate alınmalıdır. Sisteme verilen yakıtın, reaksiyona giren yakıtla kütle oranı yakıt kullanım katsayısı (μ_f) olarak ifade edilmektedir. Bu durum hesaba katıldığında hücre verimi;

$$Hücre Verimi = \mu_f \frac{V_{hücre}}{1.48} * 100 \text{ (Üst Isıl Değer)} \quad (3.11)$$

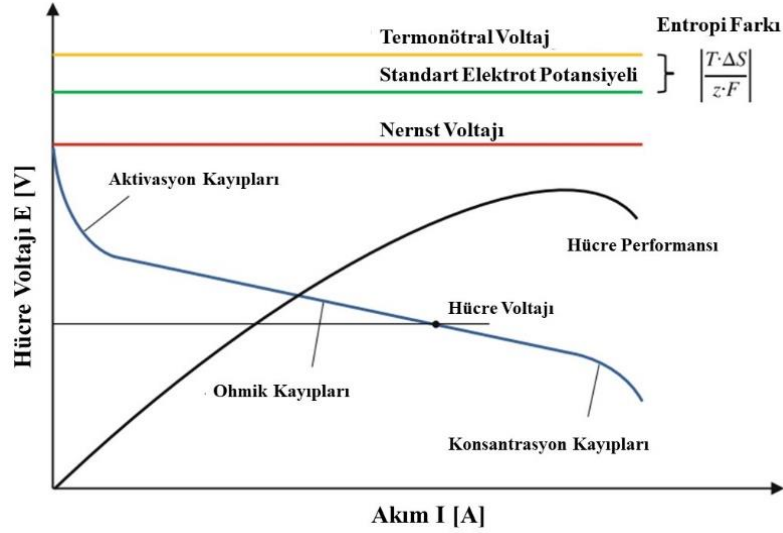
$$Hücre Verimi = \mu_f \frac{V_{hücre}}{1.23} * 100 \text{ (Alt Isıl Değer)} \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3.3. Polarizasyon ve Voltaj Kayıpları

Bir elektrokimyasal pilde, akım çekilmediği durumda, elektrotlar arasındaki potansiyel farkı açık devre voltajı (ADV) olarak ifade edilir. Akım çekilmeye başlandığı andan itibaren oluşan çeşitli voltaj kayıpları nedeniyle hücrenin elektron sürme kabiliyeti düşer. Elektrotların bu denge durumundan uzaklaşmasına polarizasyon denir. Birim yüzey

alanından çekilen akım miktarı arttıkça polarizasyon artar, hücre potansiyeli düşer. Bu duruma etki eden nedenler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Polarizasyon eğrisi ve voltaj kayıpları (Watzenig ve Brandstätter, 2018)

3.3.1. Termodinamik Kayıplar

Yakıt pilinde, normal şartlar altında gerçekleşen hidrojen oksidasyonu (Denklem 2.3) reaksiyonunun entalpisi ΔH olarak ifade edilir. Elektrokimyasal bir reaksiyon için bu enerjinin karşılığı denklem 3.7’ye göre voltaj olarak hesaplanabilir. Reaksiyondan açığa çıkan enerjinin tamamının elektrik enerjisine dönüştüğü varsayılan bu gerilim değerine “Termonötral Voltaj” denir.

Sürecin tersinmezliği dikkate alındığında, sıcaklık etkisiyle daha da artan bir enerji kaybı söz konusudur. Denklem 3.8’e göre faydalanılabilir enerji dikkate alınarak hesaplanan gerilim değeri ise “Standart Elektrot Potansiyeli” olarak adlandırılır.

Yakıt pilini çalışma sıcaklığı ve reaktantların kısmi basınçları da elde edilebilecek enerji miktarında etkilidir. Denklem 3.6’da verilen Nernst ifadesine göre, yakıt pilinin maksimum teorik potansiyeli, “Nernst Voltajı” olarak adlandırılır. Bu değer açık devre voltajıdır ve akım çekilmeye başladığı andan itibaren başka kayıplar meydana gelmektedir (Watzenig ve Brandstätter, 2018).

3.3.2. Elektriksel Kayıplar

Elektrotlarda kimyasal reaksiyonun sürdürülebilmesi için enerjiye ihtiyaç duyulur. Akım çekilmeye başlandığı andan itibaren, yük transferi nedeniyle her iki elektrotta da “aktivasyon kayıpları” meydana gelir. Akım-gerilim arasındaki ilişki Butler-Volmer denklemiyle ifade edilir:

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[\frac{\alpha_a \cdot z \cdot F \cdot (E - E_r)}{RT} \right] - \exp \left[\frac{-\alpha_c \cdot z \cdot F \cdot (E - E_r)}{RT} \right] \right\} \quad (3.13)$$

Burada; α_a ve α_c ; anot ve katot için yük transfer katsayısını, z ; reaksiyona katılan elektron sayısını, F ; Faraday Sabitini, R ; İdeal Gaz Sabitini, T ; sıcaklığı, E ve E_r ; elektrot potansiyelini ve denge potansiyelini, i ve i_0 ; lokal akım yoğunluğu ve değişim akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

Tafel denklemi, Butler-Volmer ifadesinin basitleştirilmiş bir versiyonudur ve aktivasyon kaybı olarak anılan voltaj düşümü aşağıdaki şekilde yazılabilir (Barbir, 2013):

$$\Delta V_{akt} = a + b \log(i), \quad a = -2.3 \frac{RT}{\alpha F} \log(i_0), \quad b = 2.3 \frac{RT}{\alpha F} \quad (3.14)$$

Yakıt pilinde, elektronların, hücre içerisinde iletken elemanlar üzerinden geçişi ile iyonların membran üzerinden geçişinden kaynaklanan voltaj kayıpları “ohmik kayıplar” olarak adlandırılır. İletken elemanların dirençleri ve kontak dirençleri sabit kabul edilirse, toplam ohmik dirençteki değişim sadece membranın nemliliği ve sıcaklığıyla ilgilidir. Bu kayıplar nedeniyle meydana gelen voltaj düşümü Ohm kanunuyla ifade edilir (Husar vd., 2012).

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot R_{ohm} \quad (3.15)$$

Devreden akım çekilmeye başlandığında, yakıt tüketimi meydana gelir. Yüksek akım değerlerinde, tüketilen yakıtın harcanma hızı artar ve kısmi basınçlarda değişim meydana gelir. Yakıtın molar konsantrasyonundaki düşüş voltaj düşüşüne neden olur ve bu kayıplar “konsantrasyon kayıpları” olarak adlandırılır:

$$\Delta V_{kon} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (3.16)$$

Bütün bu kayıplar nedeniyle hidrojenin enerjisinin bir kısmı termodinamik kayıplar, bir kısmı ise elektriksel kayıplar nedeniyle kullanılamaz. Yakıt pilinden elde edilebilecek en büyük teorik gerilim olan Nernst Voltajından, bütün elektriksel kayıplar düştüğünde, yakıt pilinin gerçek potansiyeli aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{hücre} = V_{adp} - V_{kayıp} \quad (3.17)$$

$$V_{kayıp} = (\Delta V_{akt} + \Delta V_{kon})_a + (\Delta V_{akt} + \Delta V_{kon})_c + \Delta V_{ohm} \quad (3.18)$$

BÖLÜM IV

TASARIM VE MODELLEME

4.1. Geometrik Model Tasarımı

Yakıt pili tasarım aşamasında; akış ve elektrokimya analizi, şekillendirilebilirlik analizi gibi simülasyon çalışmalarının yürütüleceği bilgisayar programlarında kullanılmak üzere geometrik modellerin oluşturulması gerekmektedir. Bu tür analizler bir boyutlu (1B), iki boyutlu (2B) ya da üç boyutlu (3B) olarak yapılmaktadır. 3B modellerle çalışmak, bilgisayarlar için yüksek performans gereksinimlerine ve uzun hesaplama süreçlerine neden olsa da, daha ayrıntılı ve gerçekçi analizler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Birçok analiz programının geometri oluşturmak için kendi grafik ara yüzleri bulunmaktadır. Ne var ki karmaşık modellerin bu ara yüzlerde oluşturulması, bilgisayar destekli tasarım (CAD-Computer Aided Design) programlarına göre daha zahmetli olmaktadır. CAD programlarında oluşturulan modeller farklı dosya formatlarında kaydedilebilir. Hatta geometrik optimizasyon ya da topoloji analizi gibi çalışmalarda sayısal çözümleri gerçekleştiren analiz programlarıyla eşzamanlı olarak çalışabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, tasarlanacak yakıt pilinin geometrik modelinin oluşturulması için Dassault Systemes® firmasının SolidWorks adlı CAD programı kullanılmıştır.

Oluşturulan modelde, geometrik parametrelerin belirlenmesi için, yakıt pilinin kullanılacağı sistemin güç ve enerji ihtiyacı, çalışma koşulları, müsaade edilen ağırlık, enerji kaynağı için ayrılan boşluk gibi unsurlar dikkate alınmıştır. Yakıt pili hesaplamalarında kullanılmak üzere Vestel Savunma Sanayi A.Ş. tarafından geliştirilen EFE isimli mini taktik İHA'nın güç gereksinimleri referans olarak alınmıştır. Referans seçilen İHA sistemindeki itki sistemi, 17-22 Voltaj ve 10 Amper akım aralığında çalışmaktadır. Buna göre hesaplamamızda birim hücre için aktif alan ve akış alanı tasarımı buna göre belirlenmiştir. Hücre voltajı 0,6-0,7 V aralığında çalıştığı kabul edilerek yaklaşık 22 Volt potansiyel için 32 hücreli seri bağlı bir yığın oluşturulması gerekmektedir. Ticari MEG katalogları incelendiğinde, akım yoğunlukları 250-1000 mA/cm² aralığında olduğu göz önünde bulundurularak gereken güç ihtiyacını karşılayabilecek 20-30 cm² aktif alana sahip bir membran elektrot grubunun temin

edilebileceği görülmüştür. Belirlenen güç ihtiyacına göre oluşan tasarım parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PEM yakıt pili tasarım parametreleri

Elektrolit/Elektrot Tipi	Polimer Membran/ Pt katalizör
Yığın Nominal Güç	200 W
Nominal Akım	9 Amper
Nominal Voltaj (0,7 volt/hücre)	22 VDC
Hücre Sayısı	32 Adet
Verim (Nominal Güçte Beklenen)	%50
Çalışma Sıcaklığı	50 °C
Tüketilen Hidrojen miktarı (Nominal Güçte)	2,1 Litre/dk
Tüketilen Hava miktarı (Nominal Güçte)	5,3 Litre/dk
MEG Aktif Alan	27 cm ²
Soğutma Sistem	Sıvı soğutma

Tasarım aşamasında ağırlık ve hacim hedeflerinin belirlenmiş olması çok önemlidir. EFE isimli mini taktik İHA'nın mekanik kısmı (gövde, kanatlar, vb.), toplam 3,5 kg olup, elden atma için müsaade edilen ağırlık 6,5 kg'dir. Dolayısıyla 3 kg'lık kalan ağırlık, yakıt pili sisteminin maksimum toplam ağırlığı olacak şekilde tasarım yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.2.'de örnek İHA sistemi için, sistemlerin ağırlık dağılımı gerçekleştirilmiştir. Buna göre yakıt pili yığınının ağırlığı yaklaşık 400 gr olmalıdır. Dolayısıyla yakıt pili sistemi için güç yoğunluğu hedefi 500 W/kg olarak belirlenmiştir. 32 hücreli bir yığın için her bir bipolar plakanın ağırlığının 10 gr \pm %10 olacak şekilde tasarım kriterleri belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. İHA yakıt pili sistemi için ağırlık dağılımı

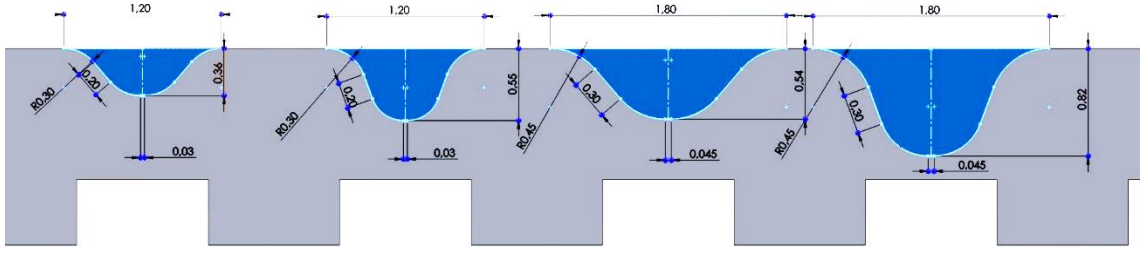
Bileşenler	Ağırlık
İHA Gövdesi	3500 gr
Hidrojen Tankı	1900 gr
Titanyum Regülatör	200 gr
Balangiç Bataryası	300 gr
Boru, Kablo vb. Donanımlar	200 gr
Yakıt Pili Yığını	400 gr
TOPLAM	6500 gr

Literatürde en iyi sonuçların serpantin tip akış kanallarından elde edildiği not edilmiştir. Tez çalışması kapsamında metalik sacların da kullanımı söz konusu olduğu ve basma derinliğindeki azalmadan kaynaklı akış direncini tolare etmek için 3'lü serpantin akış alanı kullanılmıştır. Kanalların aktif alan üzerine yayılımı Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



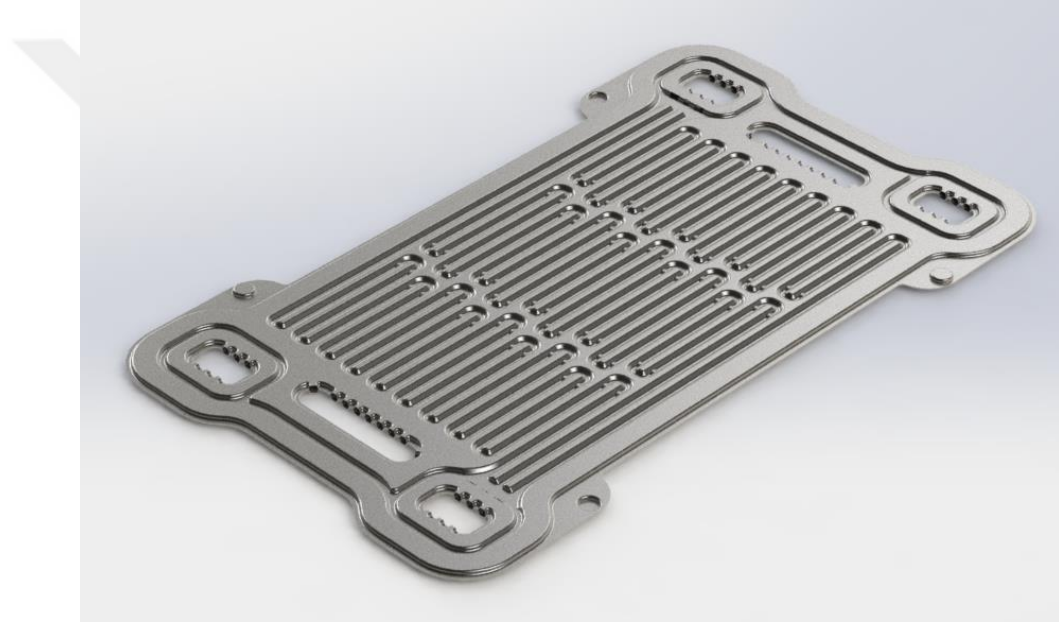
Şekil 4.1. Üç yollu serpantin akış kanalı

Kanal profili belirlenirken, metal plaka üzerine uygulandığında, diğer yüzde soğutma kanallarını oluşturacak şekilde simetrik, kubbesel bir profil tercih edilmiştir. Genellikle grafit plakalar için, uygulama kolaylığı açısından tercih edilen sivri köşeli dikdörtgen profillerden, pres ile metal şekillendirme sürecinde yaratacağı zorluklar nedeniyle kaçınılmıştır. Metal şekillendirme sürecinde, performansları incelenmek üzere, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi 1,20 mm taban genişliğine sahip 0,36 mm ve 0,55 mm derinliğinde iki profil, 1,80 mm taban genişliğine sahip 0,54 mm ve 0,82 mm derinliğinde iki profil olarak toplam dört farklı boyutta profil oluşturulmuştur.



Şekil 4.2. Dört farklı akış kanalı profili

Kanal profilinin metal plaka üzerine uygulanmasıyla oluşturulan CAD çizimi Şekil 4.3.'te verilmiştir.

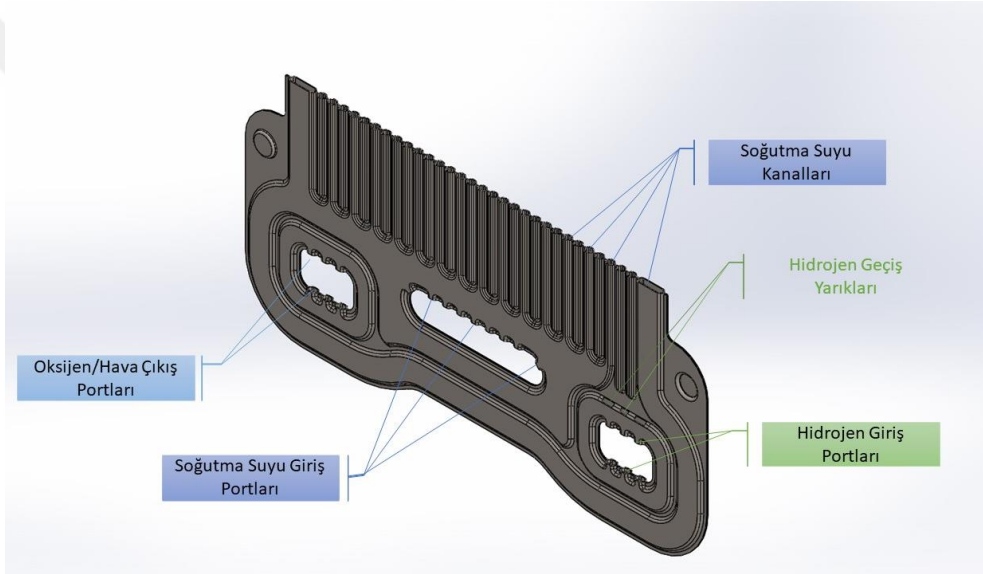


Şekil 4.3. Metal plaka üzerinde akış kanalları ve tasarımın genel yapısı

İki plakanın bir araya getirilerek gaz ve soğutma suyu giriş portlarının gösterildiği detay resmi Şekil 4.4.'te verilmiştir. Bu resimde, kanallar üzerinde görülen engel tümsekleri ile BP-GDT ara yüzeyinde gaz akışını gaz difüzyon tabakasına doğru baskılanması, aynı zamanda soğutma suyu boşluğunda, suyun homojen dağılımının sağlanması hedeflenmiştir. Akışkan geçiş bölgeleri Şekil 4.5.'te verilmiştir.

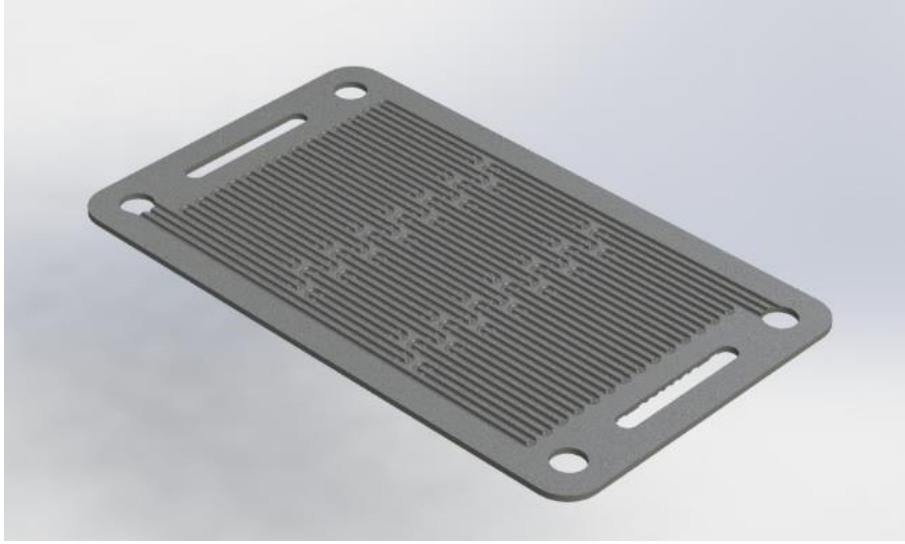


Şekil 4.4. Gaz ve su girişleri, engel tümsekleri



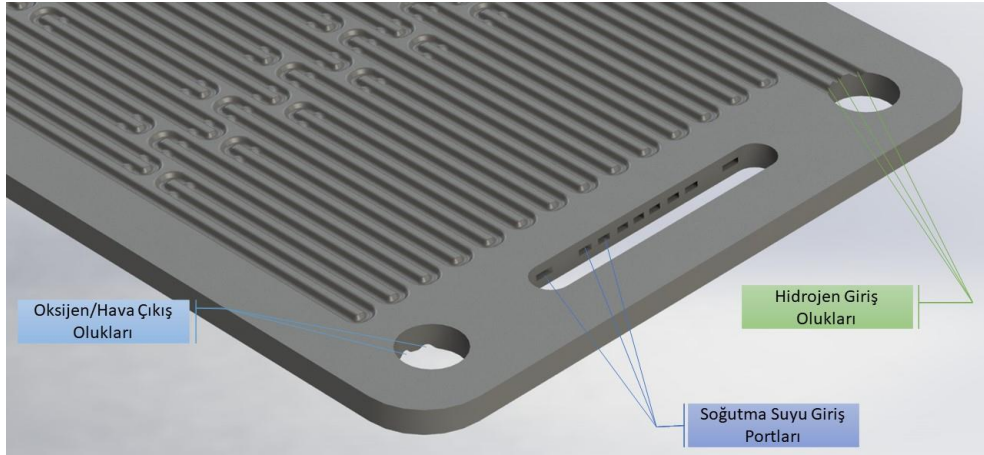
Şekil 4.5. Gaz ve su geçiş bölgeleri

Ağırlık ve performans değerlendirmesi yapılabilmesi adına, aynı profil yapısı grafit plaka üzerine de uygulanmıştır. Oluşturulan geometri Şekil 4.6.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Grafit bipolar plaka genel görünüşü

Grafit yarı plakanın kalınlığı 1,5 mm olarak tasarlanmıştır. Arka yüzeye 0,5 mm derinliğinde soğutma kanalı profili oluşturulmuştur. Bir araya getirilmiş iki yarı plaka ve soğutma suyu girişleri Şekil 4.7.'de gösterilmiştir. Grafit plaka üzerinde akış kanallarının tekrarlanma periyodu ile soğutma kanallarının tekrarlanma periyodu aynı değildir. Yine de, özellikle 0,82 mm'lik profil için, bu iki kanalın karşılıklı denk geldiği yerlerde, grafitin aşırı incilmesi nedeniyle oluşabilecek kırılma riski dikkate alınmıştır.



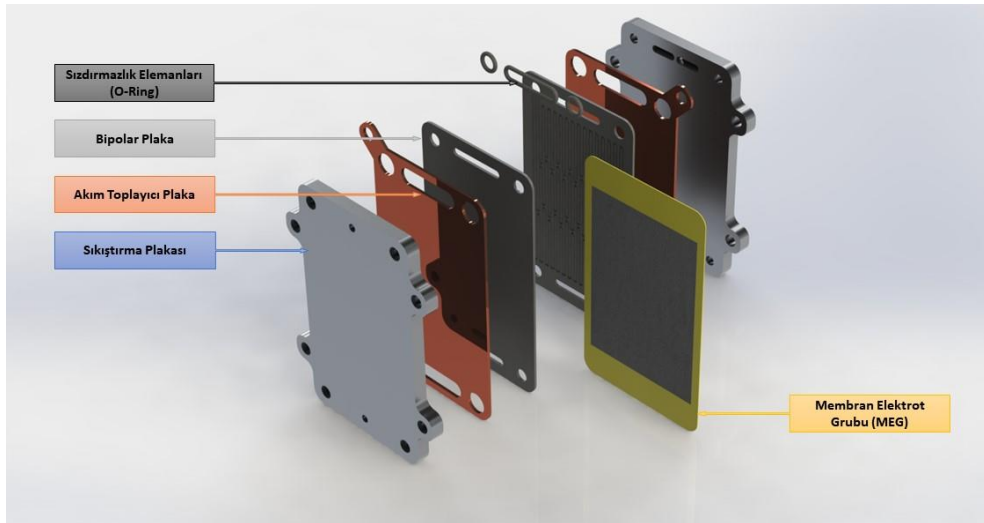
Şekil 4.7. Grafit BP detay görünüşü ve soğutma suyu girişleri

Bipolar plakalar dışında yakıt pili yığını oluşturarak diğer unsurlar membran elektrot grubu, sızdırmazlık elemanları, akım toplayıcı plakalar ve sıkıştırma plakalarıdır. Sıkıştırma plakaları için yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğu nedeni ile Alüminyum 6061 T6 (Çekme Mukavemeti 260-310 MPa) seçilmiş, gaz giriş-çıkış portları için M5, soğutma suyu giriş- çıkış portları için M3 dişli delik oluşturulmuştur. Kalınlığı 5 mm

olarak tasarlanmıştır. Akım toplama plakaları saf bakır malzemeden, 1,2 mm kalınlığında tasarlanmıştır. Sızdırmazlık elemanları olarak gaz giriş-çıkışlarında 8 adet, soğutma suyu giriş-çıkışında 4 adet olmak üzere, Kastaş marka o-ring ürün gurubunun, 5x1,5 ve 16x1,5 boyutlu o-ringleri kullanılmıştır. Tasarlanan parçaların bir yakıt pili yığını oluşturmak üzere birleştirilmiş hali şekil 4.8. ve şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



şekil 4.8. Tek hücreli yakıt pili yığını



şekil 4.9. Tek hücreli yakıt pili yığını bileşenleri

İnsansız hava araçlarında kullanılmak üzere tasarlanan yakıt pilinin ağırlığı, kalkış ve seyir sırasında aracın enerji ihtiyacını etkileyen önemli bir parametredir. Benzer şekilde yakıt pili yığınının hacmi de İHA'nın boyut ve yapısal özellikleri açısından önemlidir. Elektrokimyasal açıdan kararlı ve iletkenliği yüksek bir malzeme olan grafit metallere göre düşük yoğunluğu sebebiyle tercih edilebilecek en uygun malzeme gibi görünse de uygulamada kalınlığı nedeniyle, hacimsel olarak metallere göre dezavantajlı duruma düşmektedir. Şekil 4.10.'da, bu tez kapsamında yapılan tasarımlarda kullanılan malzemelerden grafit, alüminyum ve titanyum için kütle-hacim değerleri kıyaslaması gösterilmiştir.

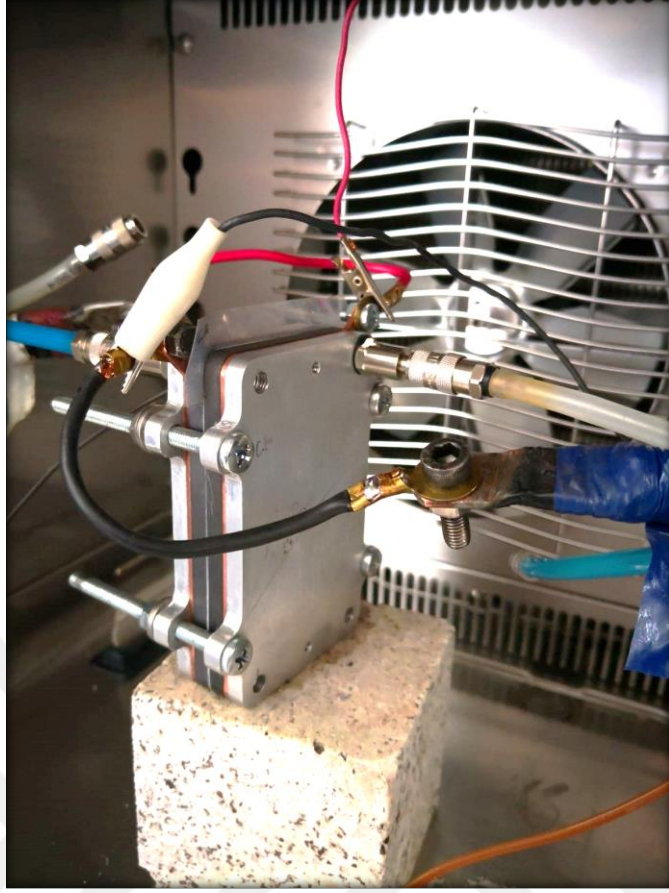
GRAFİT	SS 304	CP-Ti	Al 6016	Al 3104
				
Malzeme Yoğunluğu: 1800 kg/m ³	Malzeme Yoğunluğu: 8000 kg/m ³	Malzeme Yoğunluğu: 4510 kg/m ³	Malzeme Yoğunluğu: 2700 kg/m ³	Malzeme Yoğunluğu: 2720 kg/m ³
Kütle: 13,9 gr	Kütle: 10,58 gr	Kütle: 5,96 gr	Kütle: 3,58 gr	Kütle: 3,60 gr
Hacim: 10,12 cm ³	Hacim: 5,692 cm ³	Hacim: 5,692 cm ³	Hacim: 5,692 cm ³	Hacim: 5,692 cm ³

Şekil 4.10. Beş farklı plaka malzemesi için kütle hacim karşılaştırması

4.2. Yakıt Pili Performans Deneyi ve Sonuçları

Performans ölçümleri için kullanılan deneysel düzenek; akım-voltaj ölçümleri için Arbin Instruments FCTS-800 model yakıt pili test istasyonu, iklim kontrollü fırın, hava kompresörü, hidrojen tüpü ve bir bilgisayardan oluşmaktadır. Testi yapılacak yakıt pilinde üzerinde akış kanalları bulunan iki grafit bipolar plaka, teflon sızdırmazlık elemanları, altın kaplanmış akım toplama plakaları ve bunları bir arada tutmak için kullanılan Alüminyum 6061-T6 malzemeli sıkıştırma plakaları kullanılmaktadır.

Deneysel çalışma 60°C sıcaklıkta, %80 anot ve katot nemliliğinde, hidrojen stokiyometrisi: 2, oksijen stokiyometrisi: 3 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Fotoğraf 4.1. ve Fotoğraf 4.2.'de deneysel düzeneğe ait görseller verilmiştir.

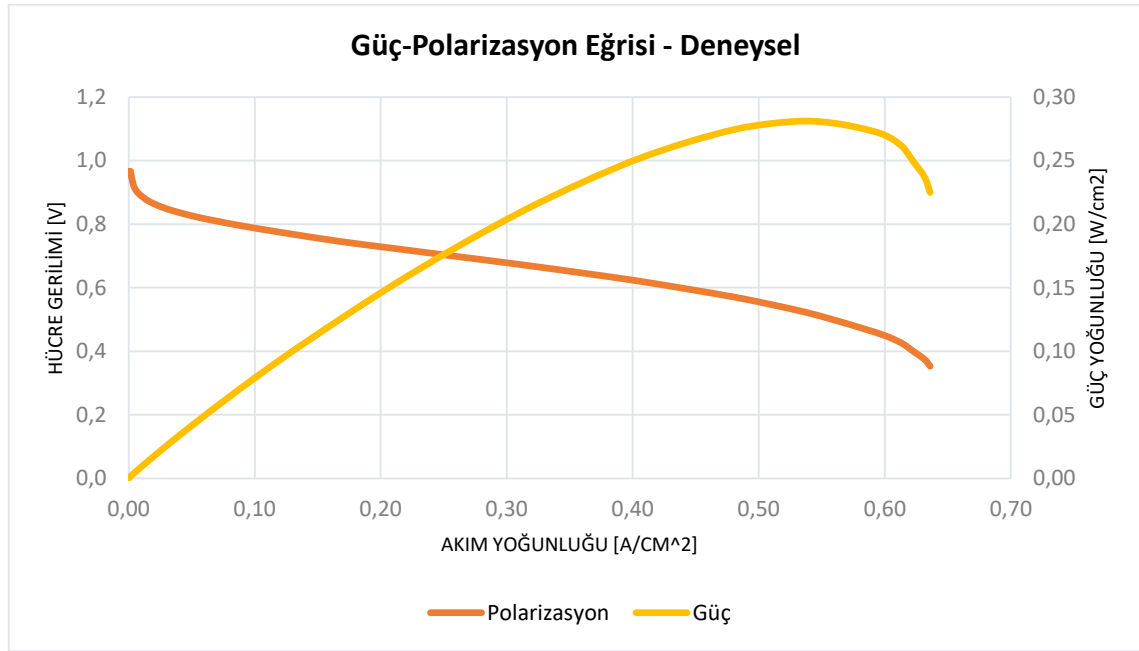


Fotoğraf 4.1. Test edilen yakıt pili ve bağlantıları



Fotoğraf 4.2. Yakıt pili test düzeneği

Şekil 4.11.'de performans ölçümüne ait Akım-Voltaj-Güç grafiği bir arada gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Güç-Polarizasyon eğrisi – deney sonucu

Pilden 280 mW/cm^2 güç yoğunluğu elde edilmiş olup, literatürde daha yüksek sonuçlar da bulunmaktadır. Fakat akış alanı tasarımı, İHA'larda kullanılmak üzere metal plaka tercihinden dolayı, metal formlama limitlerine göre tasarlanmıştır. Yani akış alanı derinliği 1 mm olması gerekirken, formlama gereksinimi nedeniyle 0,36 mm'ye düşürülmüştür. Bunun sonucunda performansın literatüre göre düşük çıkması beklenen bir sonuç olup hedeflenen W/kg güç yoğunluğu, bu güç değeri referans alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen güç değeri makul aralıkta olup, bu değer artan sıcaklık ve basınç ile yükseltilebilir.

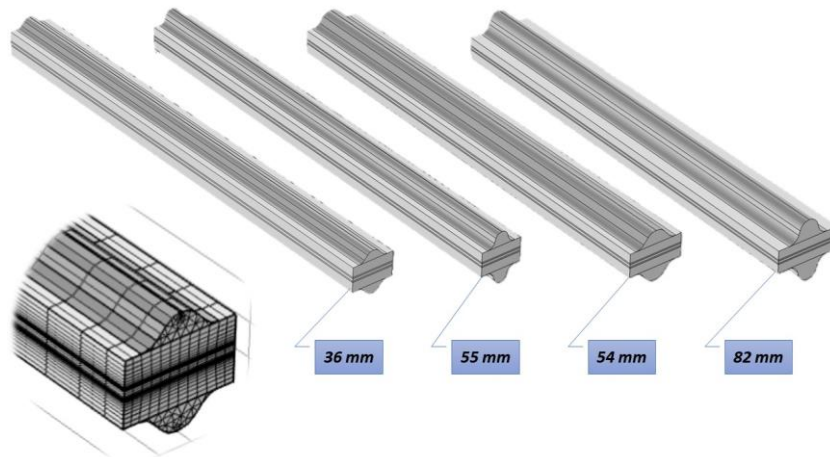
4.3. Akış ve Elektrokimyasal Süreçlerin Modellenmesi

Sayısal analizler Comsol Group firmasına ait COMSOL Multiphysics programıyla yapılmıştır. Comsol aynı anda birden fazla fiziksel süreci, birbiriyle ilişkili şekilde çözümleyebilen, sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir programdır. Mesh oluşturma gibi ön hazırlık işlemlerini program dışında gerçekleştirip sonradan analiz kurulumunuza eklemenize izin verildiği gibi geometri oluşturma, mesh oluşturma vs. işlemleri program dahilinde yapılabileceği kullanışlı modülleri bulunmaktadır.

Akış ve elektrokimya analizinin başlangıcında şu kabuller yapılmıştır: Süreç; laminar akış, izotermal ve sürekli durum olarak modellenmiştir. Membranda, gaz ve suyun karşı akışının olmadığı, malzemelerin fiziksel özelliklerinin zamanla değişmediği, porozitelerin homojen ve izotropik olduğu kabul edilmiştir. Tüm gazlar için ideal gaz kabulü yapılmıştır. Tüm sınırlar için süreklilik, tüm duvarlar için kaymazlık tanımlanmıştır.

Tam hücre simülasyonundan önce, farklı kanal profillerinin akış ve elektrokimya süreçlerindeki etkisinin incelenmesi adına, tek kanal geometrileri oluşturularak, kısmi analizler gerçekleştirilmiştir. 20 mm uzunluğundaki akış kanalı kesiti Şekil 4.12.'de belirtilen dört profil yüksekliği için oluşturularak; GDT, katalizör tabaka ve membran dilimleri ile yakıt pili yapısına uygun olarak bir araya getirilmiştir. GDT, katalizör tabaka ve membran kalınlıkları, sırasıyla; $3,8 \times 10^{-4}$ m, 5×10^{-5} m, $1,0 \times 10^{-4}$ m şeklindedir. Bu üç katmanın oluşturduğu MEG'in genişliği 1,7 mm, toplam kalınlığı 0,96 mm'dir.

Membran elektrot grubu, membrana yaklaştıkça sıklaşacak şekilde, yapısal (dikdörtgen) mesh elemanları kullanılarak meshlenmiştir. Kanal kesitleri ise alın yüzeylerine uygulanan üçgen mesh elemanlarının profil boyunca yapısal elemanlarla süpürülmesiyle elde edilen, prizmatik elemanlarla meshlenmiştir. 0,36 mm profil yüksekliğine sahip geometri için toplam mesh elemanı sayısı 10280, en düşük eleman kalitesi 0,204; ortalama kalite 0,9305 şeklindedir. Mesh yapısına dair kısmi görünüm Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



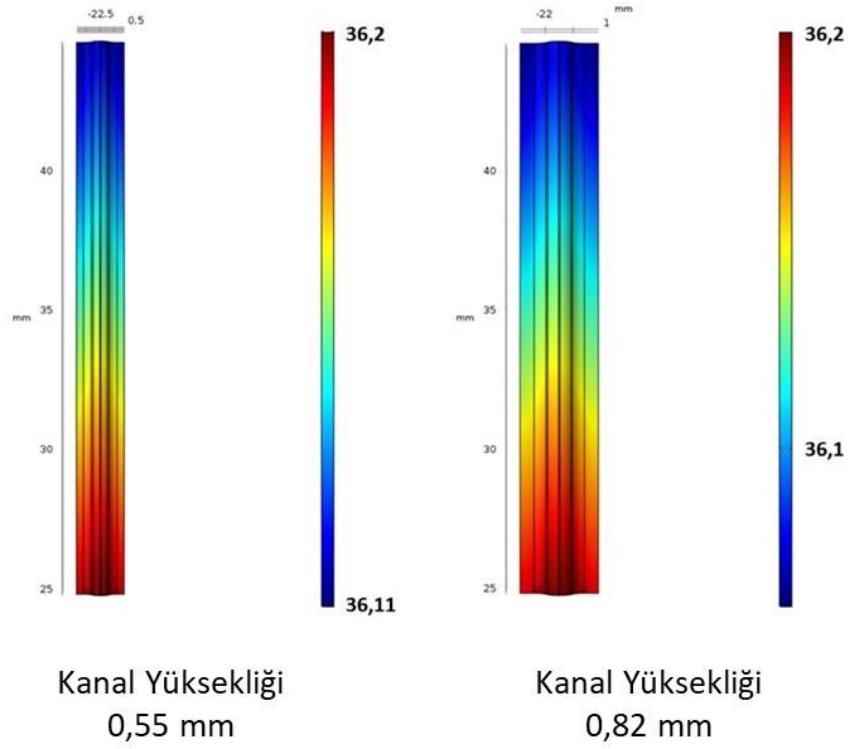
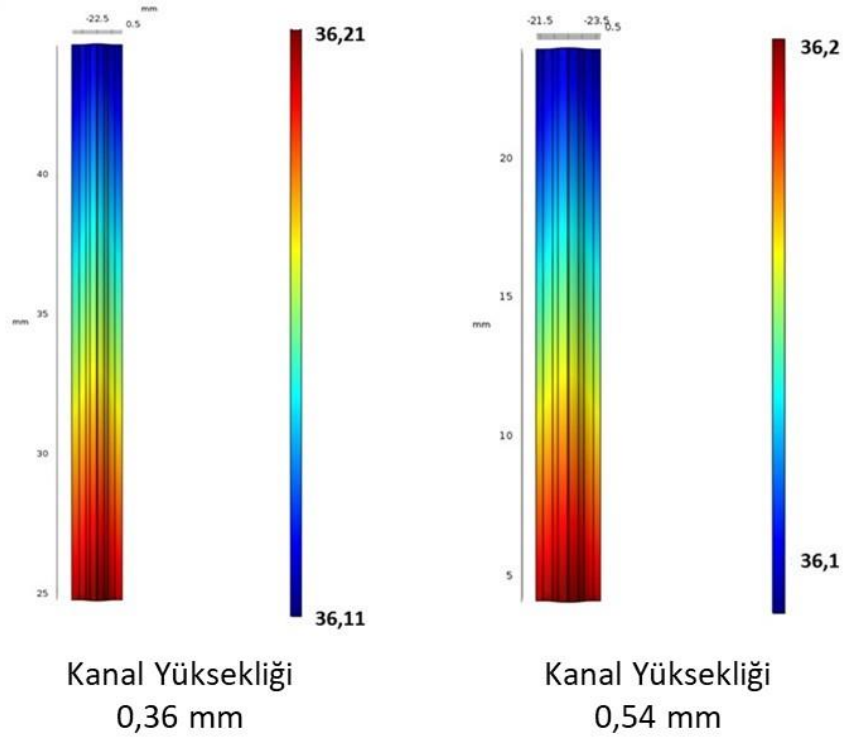
Şekil 4.12. Analizde kullanılan tek kanal geometrik modelleri ve mesh yapısı

Comsol Multiphysics programının yakıt pili modülünde bulunan “Yüksek Sıcaklık PEM Yakıt Pili için Kütle Transfer Analizi örnek uygulaması referans alınarak, bu çalışmanın parametreleri uyarlanarak kullanılmıştır. Sözü edilen örnek uygulama, bir PEM yakıt pilinde, hem anot hem de katot tarafı için, reaktantların ve suyun kararlı halde kütle transferini modellemektedir. Aynı zamanda akış kanallarında, gaz difüzyon tabakalarında ve poroz (gözenekli) elektrotlardaki kütle ve momentum transferi ile membran elektrot grubunun tüm katmanlarında elektrokimyasal yük transferlerini simüle etmektedir.

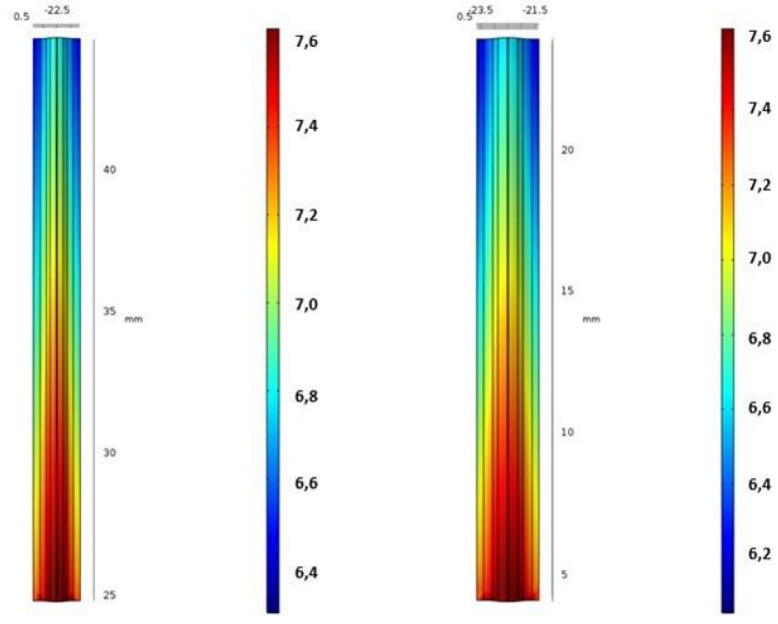
Bu modele eklenen fiziklerden, Brinkman denklemleri arayüzü (br), sürekli ve poroz ortamlardaki akış davranışını, konsantrasyon türlerin taşınımı arayüzü (tcs), kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan türlerin oluşum, tükenim ve geçiş miktarlarını, ikincil yük dağılımı (siec) arayüzü ise redoks reaksiyonları sonucu oluşan elektron ve iyonlar nedeniyle oluşan akım ve gerilim dağılımlarını hesaplamaktadır.

Yürütülen kısmi analizler sonucu, her bir profil için, anot ve katot tarafında oluşan hidrojen konsantrasyon dağılımları Şekil 4.13.’te, oksijen konsantrasyon dağılımları Şekil 4.14.’te gösterilmiştir.

Tüm kanal genişlik ve derinlikleri için yapılan simülasyonda, dağılımın homojen olduğu ve akım yoğunluklarının benzer çıktığı belirlenmiştir. Daha net bir sonuç elde etmek adına, akış alanının tamamı için sayısal simülasyon uygulanmıştır. İlerleyen bölümde sonuçları verilecek olan metal şekillendirme analizi sonuçlarında, en iyi şekillendirme 0,36 mm kanal derinliğinde sağlandığından, tam akış alanı için akış ve elektrokimyasal simülasyon, bu kanal derinliğinde yürütülmüştür.

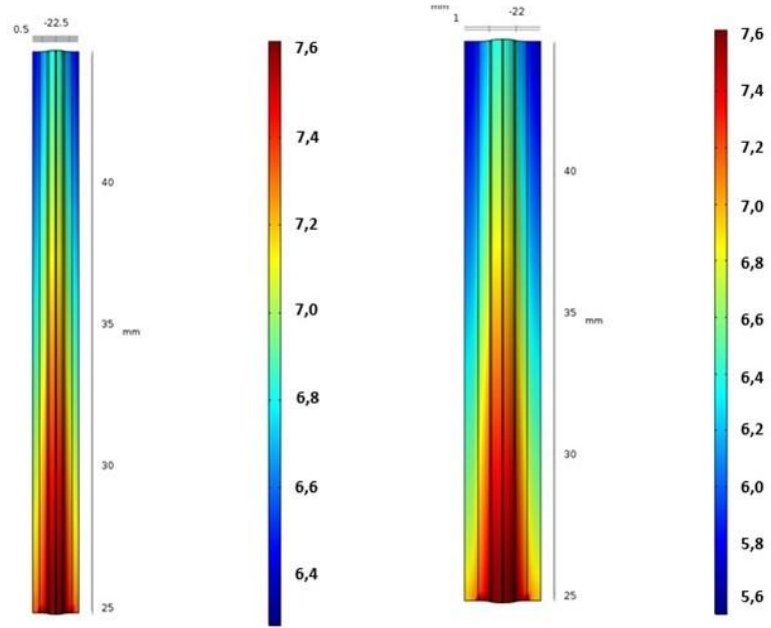


Şekil 4.13. Anot konsantrasyon dağılımı



Kanal Yüksekliği
0,36 mm

Kanal Yüksekliği
0,54 mm



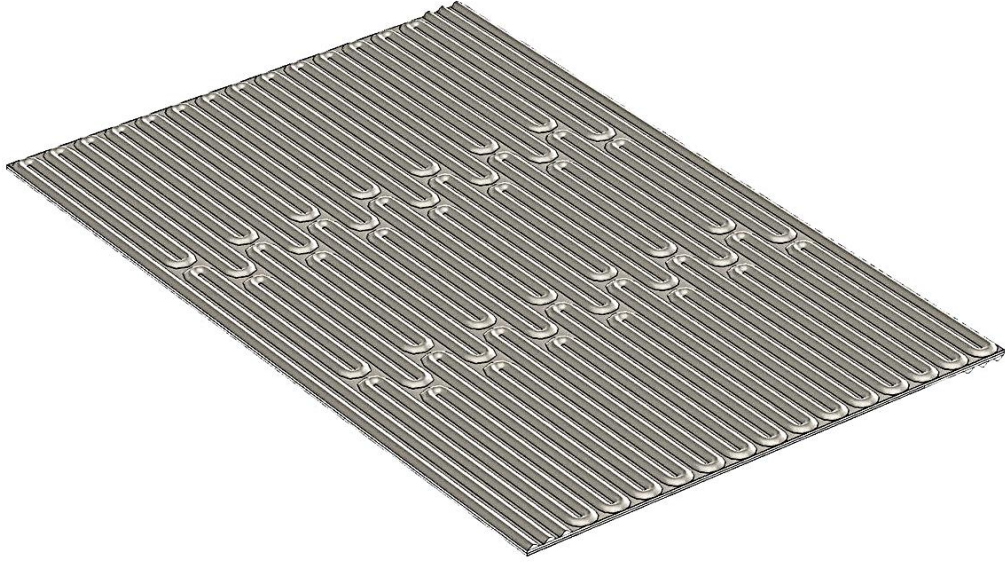
Kanal Yüksekliği
0,55 mm

Kanal Yüksekliği
0,82 mm

Şekil 4.14. Katot konsantrasyon dağılımı

SolidWorks programında üç boyutlu olarak oluşturulan bipolar akış plakasının akış alanı hacmi, gaz difüzyon tabakaları, katalist tabakalar ve polimer membran, akış ve

elektrokimyasal simülasyon için tekrar tasarlanmış ve akış alanı Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

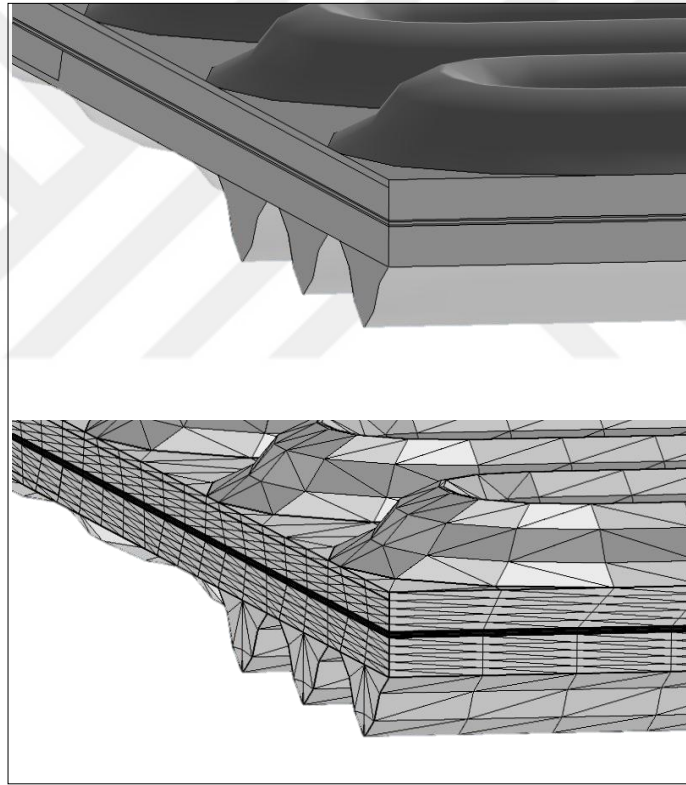


Şekil 4.15. Analizde kullanılan geometrik model

Geometride yüzlerce yuvarlatılmış köşeler olup, bunlar simülasyonu oldukça zor olabilecek parçalardır. Bundan dolayı Comsol programı ağ atma noktasında yetersiz kalmıştır. Bu geometri için ağ oluşturma (meshleme) işlemi Abaqus programında yapıldıktan sonra, NASTRAN (.bdf) dosyası olarak Comsol programına yüklenmiş, burada geometrik alanlar (domain) tanımlanmıştır. Geometri toplamda 674808 mesh elemanından oluşmaktadır. En düşük eleman kalitesi $1,037 \times 10^{-4}$, ortalama kalite 0,2615'tir. Kanalların eğrisel geometrisi nedeniyle, yüzeylerine üçgen yüzey mesh oluşturularak, kanal uzunluğu boyunca yapısal (dikdörtgen) mesh elemanlarıyla süpürme işlemiyle tetrahedral mesh oluşturulmuştur. GDT ve katalizör tabaka ve membran alın yüzeylerinde üçgen mesh elemanları oluşturularak, aynı yöntemle, et kalınlığı boyunca yapısal mesh elemanlarıyla süpürülerek tetrahedral mesh elemanları oluşturulmuştur. GDT ve katalizör tabakaların arayüz sınırı üzerinde mesh yoğunluğu artırılmıştır. Oluşturulan mesh yapısı ise Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.16. Modelin genel mesh yapısı



Şekil 4.17. Modelin mesh yapısı detayı

Sonraki aşamada kullanılacak fiziksel süreçler, ilgili geometrik alanlara (domain) tanımlanmıştır. Malzeme tanımlaması yapılmadığı için tüm gerekli fiziksel büyüklükler, önceden isim ve değeri girilerek parametre olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 4.3. Comsol model parametreleri

	Tanım	Değer	Birim
Geometrik Parametreler	Aktif Alan	27	[cm ²]
	Kanal Uzunluğu	0,02	[m]
	Kanal Yüksekliği	0,001	[m]
	Kanal Genişliği	0,0007874	[m]
	Kaburga Genişliği	0,00090932	[m]
	GDT Kalınlığı	0,00038	[m]
	Elektrot Kalınlığı	0,00005	[m]
	Membran Kalınlığı	0,0001	[m]
Elektro-kimyasal Parametreler	GDT Porozitesi	0,4	
	GDT Geçirgenliği	1,18x10 ⁻¹¹	[m ²]
	GDT Elektrik İletkenliği	222	[S/m]
	Giriş H ₂ Kütle Oranı (anot)	0,743	
	Giriş H ₂ O Kütle Oranı (katot)	0,023	
	Giriş O ₂ Kütle Oranı (katot)	0,228	
	Anot Giriş Hızı	0,2	[m/s]
	Katot Giriş Hızı	0,5	[m/s]
	Anot Viskozitesi	0,0000119	[Pa·s]
	Katot Viskozitesi	0,0000246	[Pa·s]
	Hidrojen Mol Kütlesi	0,002	[kg/mol]
	Azot Mol Kütlesi	0,028	[kg/mol]
	Suyun Mol Kütlesi	0,018	[kg/mol]
	Oksijen Mol Kütlesi	0,032	[kg/mol]
	Hücre Sıcaklığı	323,15	[K]
	Referans Basınç	101000	[Pa]
	Hücre Voltajı	0,7	
	O ₂ Referans Konsantrasyonu	40,88	[mol/m ³]
	H ₂ Referans Konsantrasyonu	40,88	[mol/m ³]
	Membran İletkenliği	9,825	[S/m]

Elektrolit üzerindeki iyon transferini ve elektrotlar üzerindeki yük transferini modellemek için “İkincil Akım Dağılımı” (secondary current distribution) fiziği arayüzü modele eklenmiştir. Bu modelde Ohm Yasası kullanılarak ve yük transferinden kaynaklanan gerilim düşümleri de hesaba katılarak çözüm yapılmaktadır. İkincil akım dağılımı akış kanalları dışında kalan tüm geometrik alanlara uygulanmıştır.

Gaz akışının hız ve basınç dağılımlarının çözülmesi için, anot ve katot tarafına ayrı ayrı olmak üzere, “Brinkman Denklemi” fiziği arayüzü modele eklenmiştir. Bu modelde, tek fazlı laminer akış için Brinkman denklemi ile hem akış kanallarında hem de gözenekli yapıya sahip gaz difüzyon tabakasında akış çözümü yapılmaktadır.

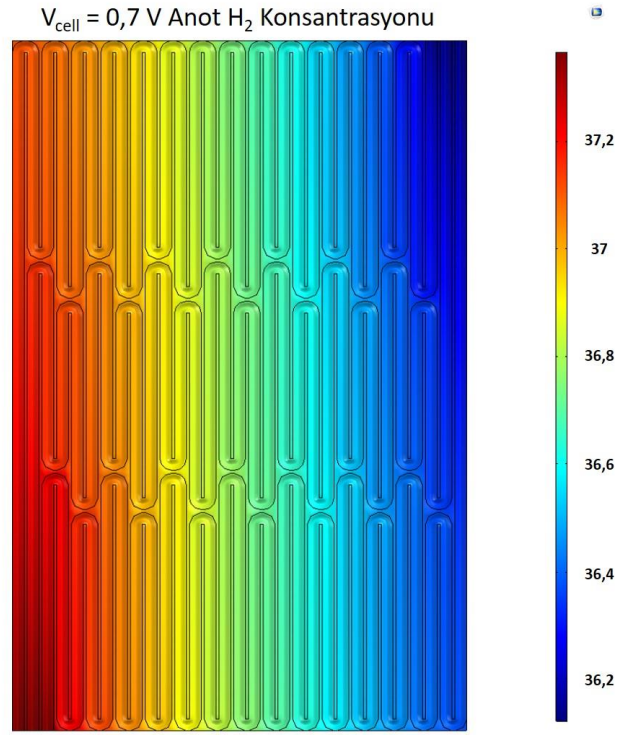
Yakıt, oksidant ve suyun difüzyonunun modellenmesi için “Konsantre Türlerin Taşınımı” (Transport of Concentrated Species) fiziği arayüzü modele eklenmiştir. Gaz ve sıvı karışımlarında, çözelti meydana getirmeyen durumlarda, maddelerin gözenekli ortamlardan difüzyonu Maxwell-Stefan denklemiyle çözülebilmektedir. Fiziğin uygulanacağı geometrik alanlar akış kanalları, gaz difüzyon tabakası ve elektrotlar olarak seçilmiştir. Konsantre türlerin taşınımı arayüzü anot ve katot tarafı için ayrı ayrı eklenmiştir.

4.4. Akış ve Elektrokimya Sayısal Model Sonuçları

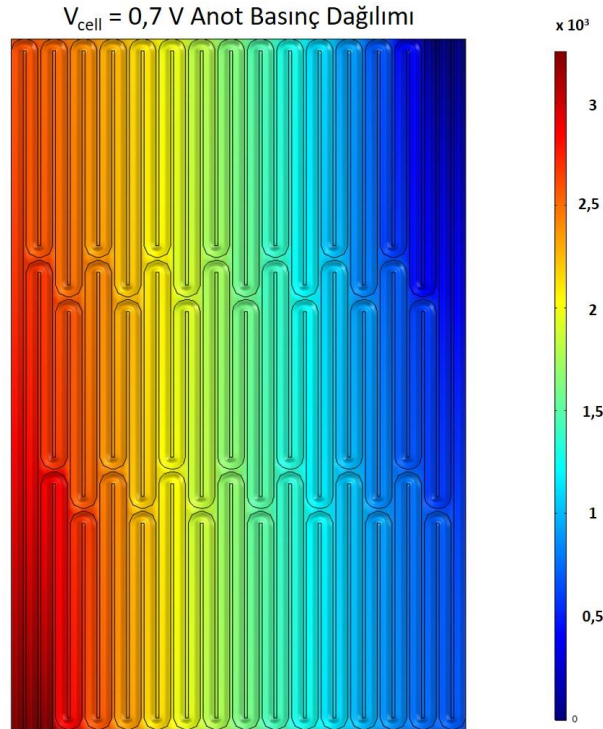
Sayısal simülasyon çözümlemesinde; anot tarafında hidrojen molar konsantrasyon dağılımı ve basınç dağılımı; katot tarafında oksijen molar konsantrasyon dağılımı, su molar konsantrasyon dağılımı ile basınç dağılımı elde edilmiştir. Sonuçlara göre hidrojen ve oksijen dağılımı 0,36 mm’lik kanal kullanılmasına rağmen kabul edilebilir tüketim aralığındadır. Beklenildiği gibi giriş bölgesi hidrojen ve oksijen miktarı noktasında zengin olup çıkışa doğru düzgün bir şekilde azalmaktadır.

Şekil 4.18.’de hidrojen tüketim dağılımı ve Şekil 4.19.’da hidrojen basınç dağılımı verilmiştir. Akış alanının 3’lü serpantin olarak olarak seçilmesinin avantajı, renk dağılımından anlaşılmaktadır. Şekil 4.20.’de verilen oksijen tüketimi ve Şekil 4.21.’de verilen su üretiminin de 0,36 mm’lik derinliği kaldırabilecek seviyede olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar 0,7 V değerine göre verilmiş olup yüksek akım yoğunluklarında, kanal derinliğinin az olması nedeniyle, oluşan suyun tıkanmalara yol açma olasılığı

bulunmaktadır. Bu nedenle, gerçek sistem üzerinde, akım ve suyu kontrol eden akıllı bir yazılım ile otomasyon üzerinden sorunsuz çalıştırılacak bir akış alanı tasarlanmıştır.

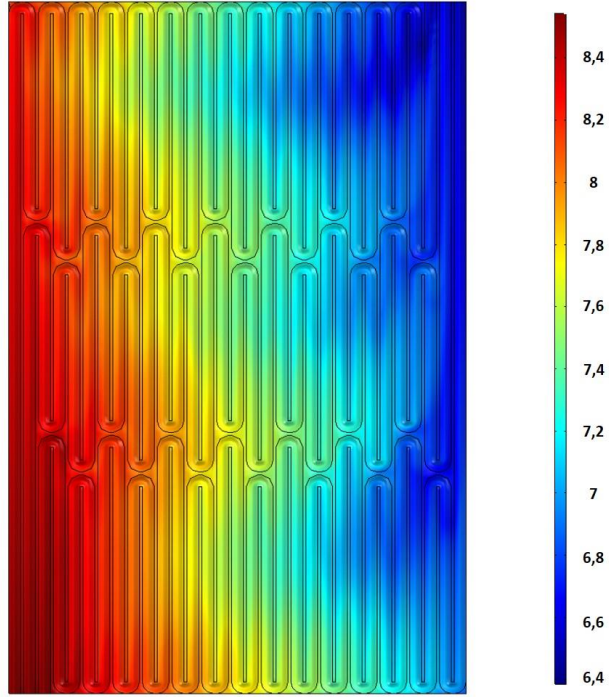


Şekil 4.18. Hidrojen molar konsantrasyon dağılımı



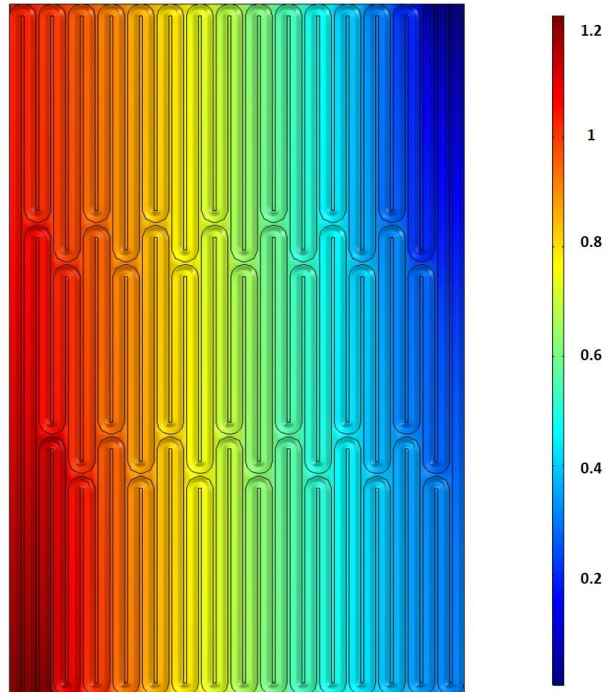
Şekil 4.19. Hidrojen basınç dağılımı

$V_{\text{cell}} = 0,7 \text{ V}$ Katot O_2 Konsantrasyonu

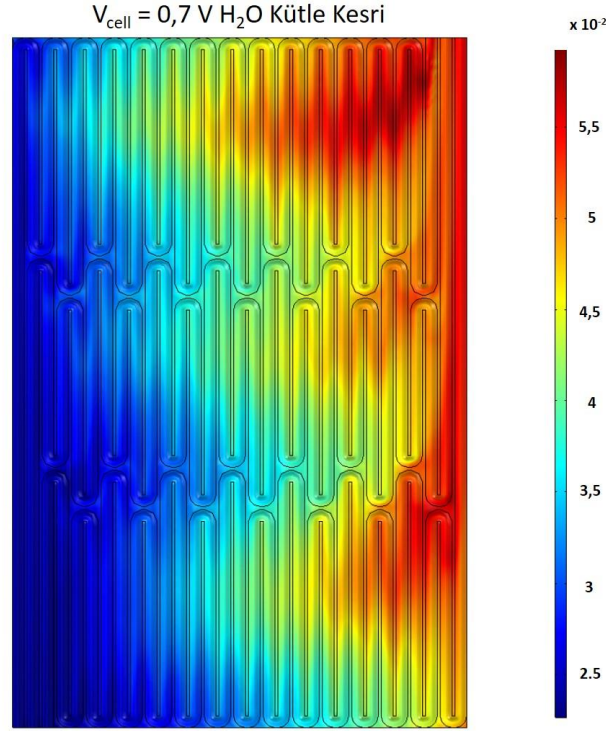


Şekil 4.20. Oksijen molar konsantrasyonu

$V_{\text{cell}} = 0,7 \text{ V}$ Katot Basınç Dağılımı



Şekil 4.21. Oksijen Basınç Dağılımı



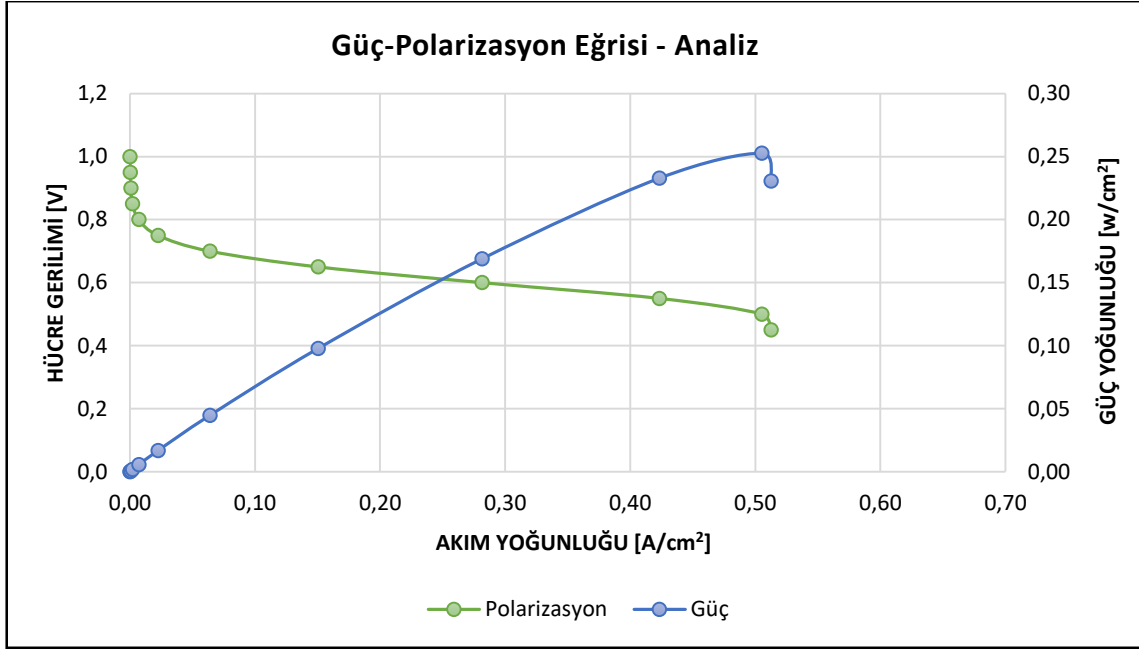
Şekil 4.22. Suyun molar konsantrasyonu

4.5. Deney ile Sayısal Modelin Karşılaştırılması

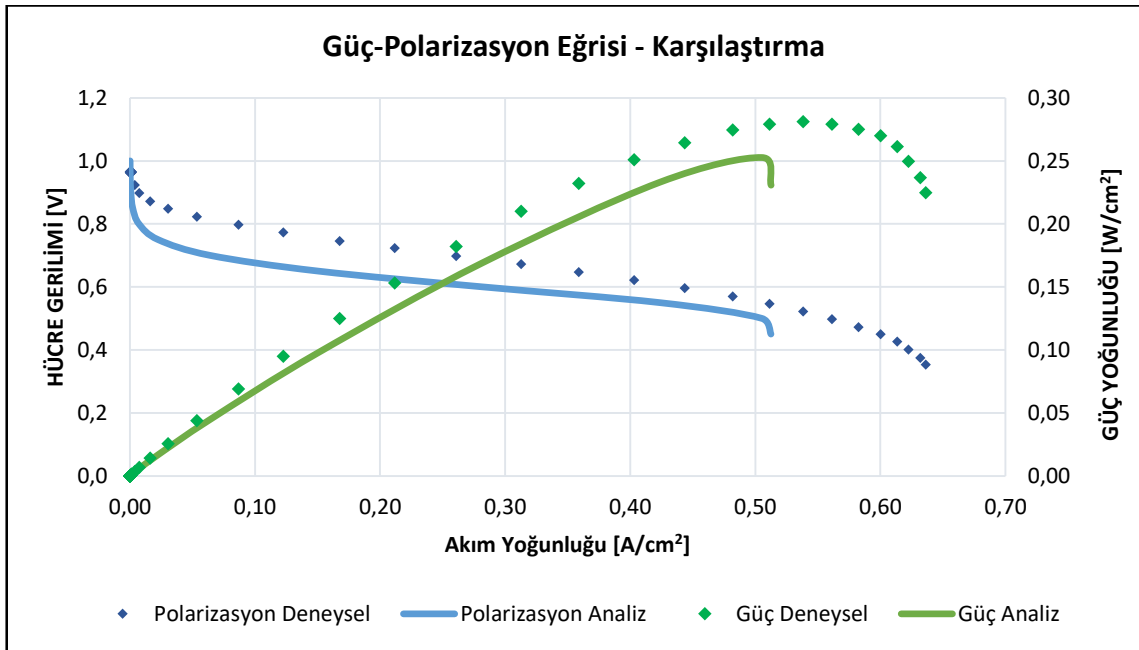
Sayısal simülasyon sonucunda akım yoğunluğu-voltaj ve akım yoğunluğu-güç eğrisi Şekil 4.23.'teki gibi oluşmuştur. Buna göre sayısal çalışma sonucunun deneysel çalışma sonucu elde edilen performans sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yaklaşık olarak birim alandan 250 mW/cm^2 güç yoğunluğu elde edilmiştir. Literatürde bu değer 800 mW/cm^2 'lerinde üzerinde olup bunların çoğu 1 cm^2 aktif alanlı, daha yüksek sıcaklık ve basınçlarda çalıştırılan hücrelerdir. Bizim hedefimiz nem dengesinin bozulmadan ortam basıncında ve $50\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında optimum performansı sağlamaktır. Sayısal sonuca göre yakıt pilimizin 27 cm^2 aktif alanında $6,75 \text{ Watt}$ güç çekilebilecektir. 32 hücreli yığından ise yaklaşık 216 Watt güç elde edilerek hedeflenen güç gereksinimine sayısal program verilerine göre ulaşılmıştır.

Deneysel program kapsamında $0,36 \text{ mm}$ kanal derinliğinde üretilen grafit plakalar laboratuvarında performans testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar, sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.24.'te gösterilmiştir. Deneysel çalışma ile sayısal çalışmanın, genel olarak, uyum içerisinde olduğu ve tasarlanan akış plakasının amacına uygun olduğu görülmüştür. Maksimum güç noktasındaki deneysel

sonuçların daha yüksek çıkması, çekilen akımın etkisi ile lokal ısınmalara ve buna bağlı olarak performansın artmasına neden olduğu öngörülmüştür.



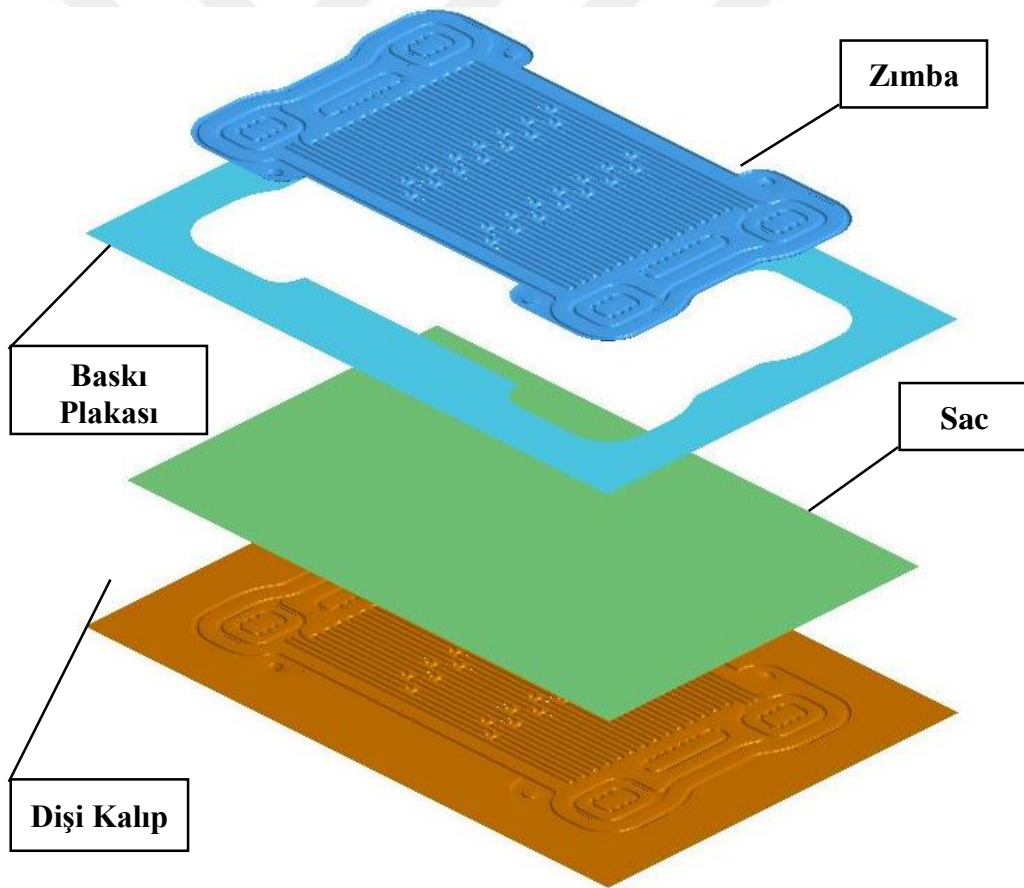
Şekil 4.23. Güç-Polarizasyon eğrisi – analiz sonucu



Şekil 4.24. Güç-Polarizasyon eğrisi – karşılaştırma

4.6. Sac Şekillendirme Sürecinin Modellenmesi

Metal bipolar plakalar, paslanmaz çelik SS304, alüminyum Al6016 ve Al3104 ile titanyum CP-Ti Grade2 malzemeleri için, geometrik modelleme aşamasında sözü edilen 4 farklı profil derinliğinde zımbalama sürecine tabi tutulmuştur. Bu işlemin modellenmesi eta/Dynaform adlı analiz programında gerçekleştirilmiştir. Süreç; şekillendirme (forming), kesme (cutting)-delme (piercing) ve geri esneme (springback) olarak üç aşamada modellenmiştir. SolidWorks programında oluşturulan metal plakadan, yüzey çıkarma işlemiyle zımba geometrisi elde edilmiş ve programa yüklenmiştir. Dişi kalıp ve baskı plakası Dynaform programı içerisinde sıfır kalınlıklı kabuk elemanlar olarak oluşturulup, malzeme kalınlığı parametrik olarak 0,1 mm girilmiştir. Sac levha da dahil olmak üzere oluşturulan araçlar Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Zımbalama araçları

Baskı aşamasında ilk işlem baskı plakasının kapanmasıdır. Bu işlem için hız: 2000 mm/s olarak tanımlanmıştır. Sonraki işlemde baskı plakası kuvveti 200 kN kuvvet, zımba hızı

ise yine 2000 mm/s'de gerçekleştirilmiştir. Malzemeler arasındaki statik sürtünme katsayısı 0,08 olarak girilmiştir.

Kesme ve delme aşamasında birinci işlem kenar kesme, ikinci işlem ise gaz ve su portlarının delme ile boşaltılması olarak tanımlanmıştır. Kesme ve delme hatları, SolidWorks programında oluşturulan yüzey üzerine iki boyutlu olarak çizilmiştir. Bu çizim hatları Dynaform programına yüklenerek araç olarak tanımlanmıştır.

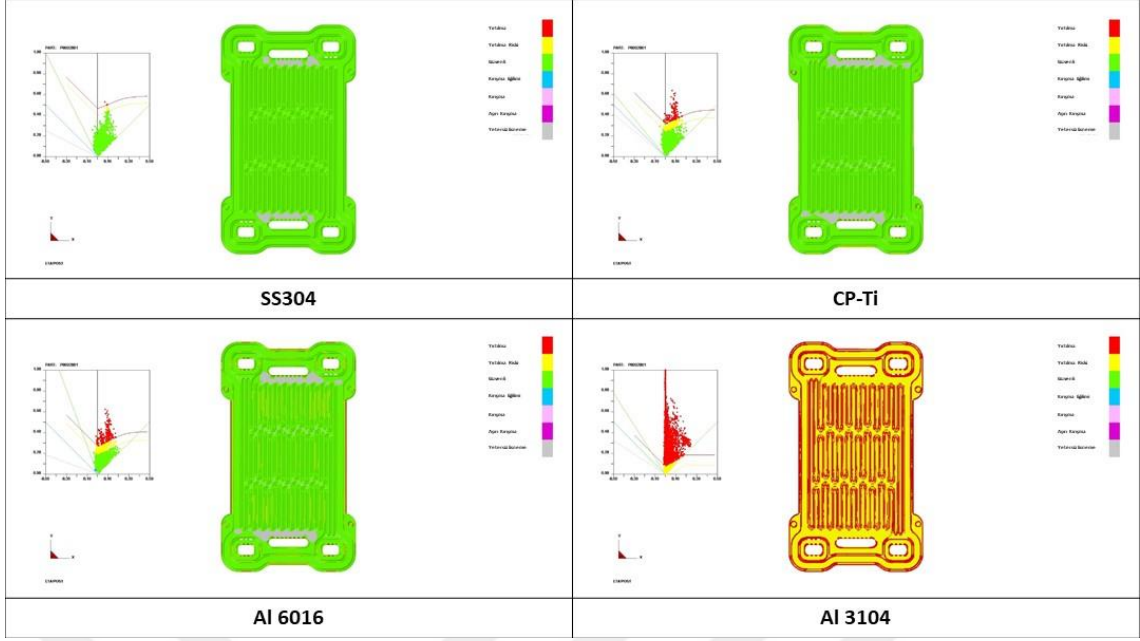


Şekil 4.26. Kesme ve delme hattı

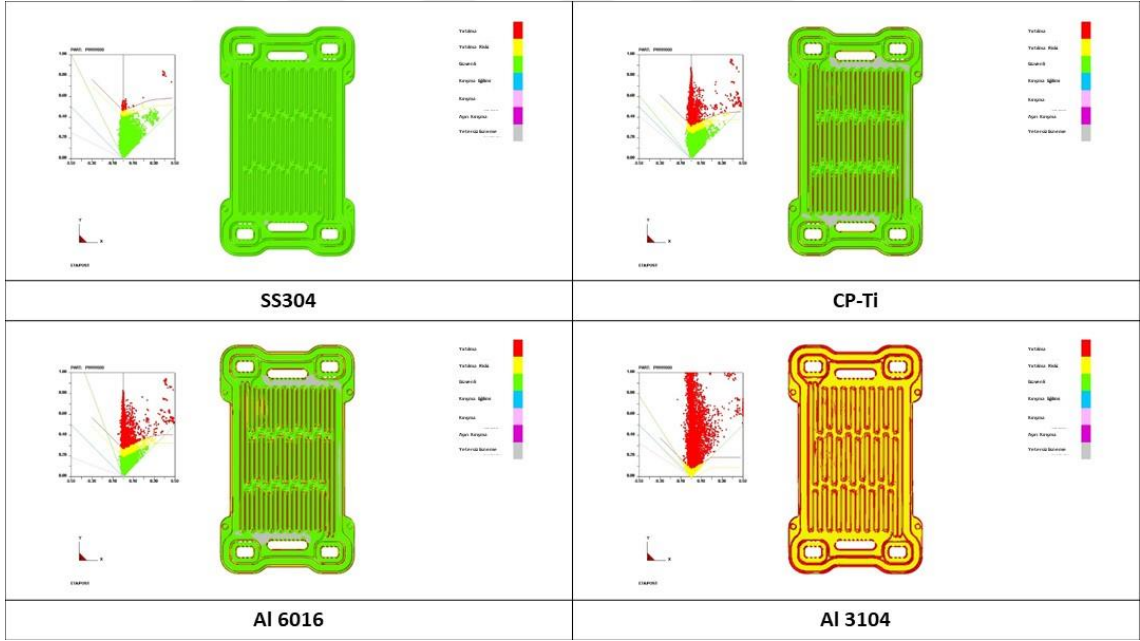
Geri esneme aşamasında, sürece yerçekimi etkisi de dahil edilerek malzemenin zımba kalktıktan sonraki davranışı modellenmiştir.

4.7. Sac Şekillendirme Modeli Sonuçları

Analiz sonucunda, her bir mesh hücresinde meydana gelen birim uzama değerleri, malzemeye ait şekillendirme sınır diyagramı (FLD) ile kıyaslanmıştır. Malzeme üzerinde yırtılma, kıvrılma bölgeleri ve güvenli bölgeler görüntülenmiştir. Dört farklı malzeme ve dört farklı derinlik için toplamda on altı durum oluşturulmuştur. Tüm kanal derinlikleri için dört farklı malzemenin üzerindeki deformasyon renklendirmeleri Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Sonuçlara göre paslanmaz çelik (SS304) malzemeden üretilen bipolar plaka, her dört profil için de formlanmaya en uygun malzeme olarak öne çıkmaktadır. Alüminyum (Al6016) ve Titanyum (CP-Ti) malzemelerinde yırtılma yüzeyleri, beklendiği üzere, kanal profillerinin sivrildiği bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Şekillendirme işlemi olarak hidro şekillendirme, kauçuk kalıba baskı ya da kalıp yağlaması gibi süreç iyileştirmeleriyle bu malzemelerin de formlanabileceği düşünülmektedir. Alüminyum (Al3104) malzemesi için yırtılma ve çarpılmaların aşırı miktarda olduğu, belirlenen geometri için bu malzeme tercihinin formlanmaya uygun olmadığı gözlenmektedir.

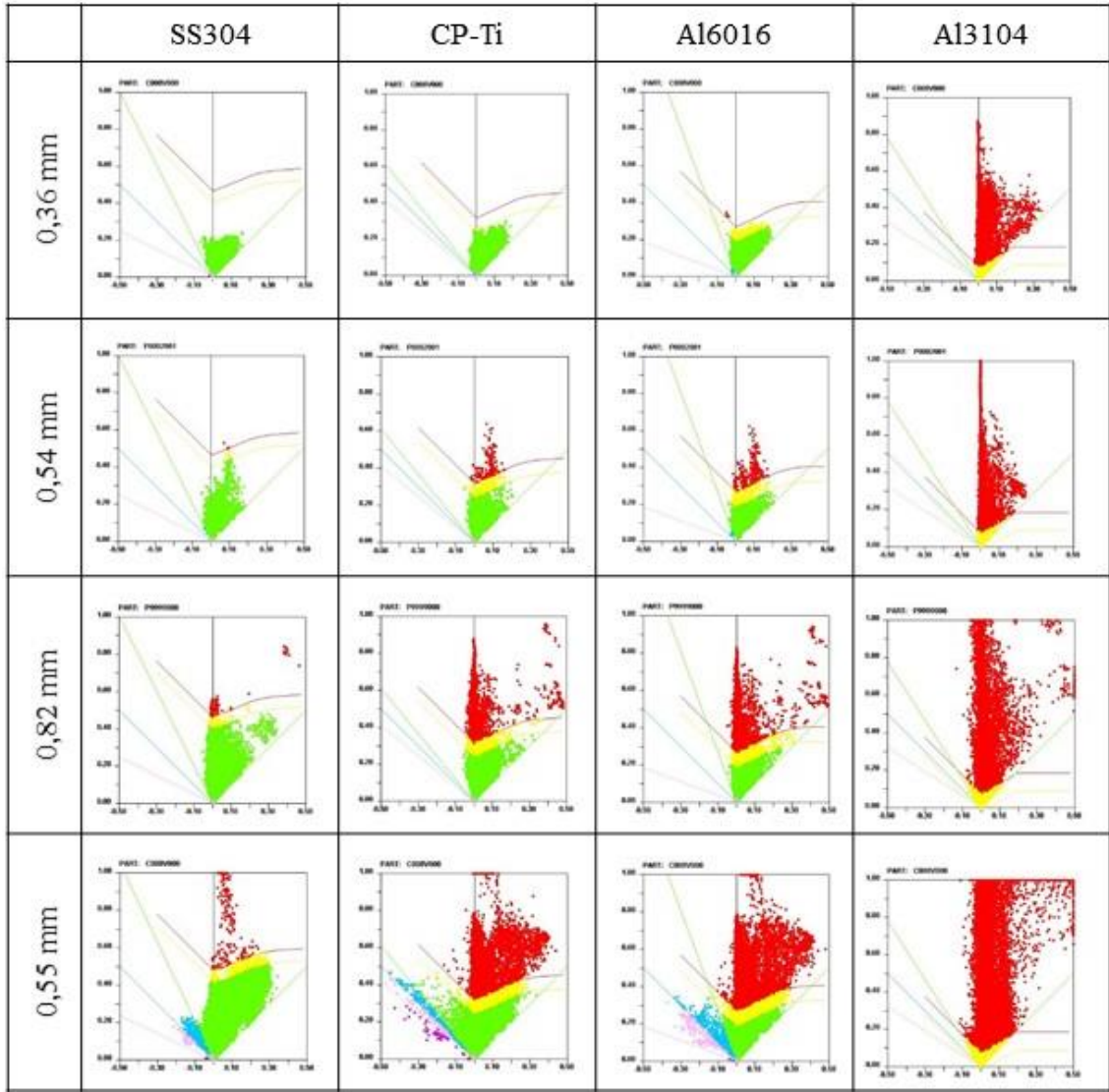


Şekil 4.29. 1,8 mm genişlik ve 0,54 mm derinlik için şekillendirme sonuçları



Şekil 4.30. 1,8 mm genişlik ve 0,82 mm derinlik için şekillendirme sonuçları

Durumlara ait şekillendirme sınır diyagramları, karşılaştırma yapılabilmesi için tablanmış ve Şekil 4.31’de verilmiştir:



Şekil 4.31. 16 durum için FLD diyagramları

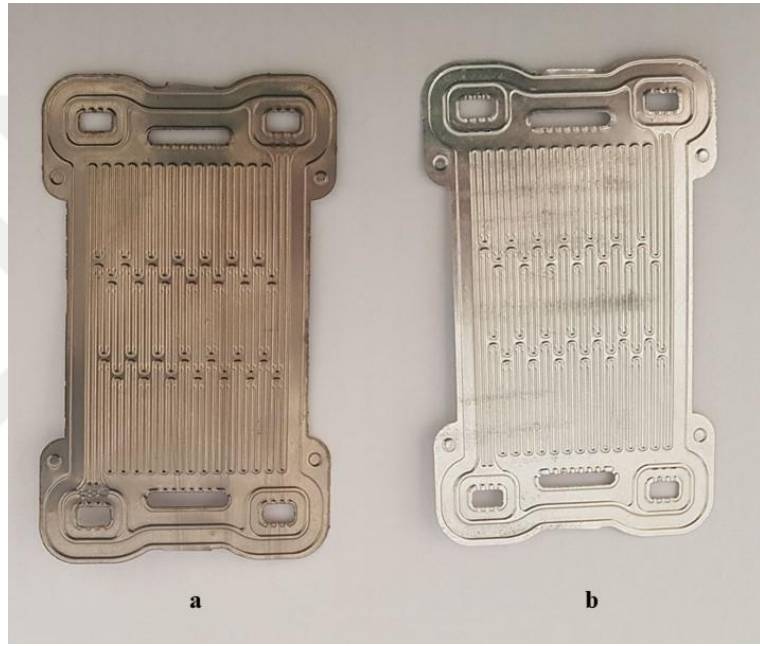
4.8. Sac Şekillendirme Denev Sonuçları

Yapılan sac şekillendirme analizlerine göre; 0,36 mm derinliğe ve 1,2 mm genişliğe sahip paslanmaz elik (SS304) malzemenin, formlama işleme en uygun malzeme olarak öne çıktığı görülmüştür. Bu malzeme için, 0,1 mm kalınlığındaki sac metalden, dişi kalıp üzerine erkek kalıp baskısıyla, istenilen akış profilleri elde edilebilmiştir.

Alüminyum ise düşük yoğunluğu nedeniyle, yakıt pilinin hafifletilmesi amacımıza çok uygun bir malzemedir. Ne var ki Al 6016 ve Al 3104 malzemeleri için elde edilen FLD diyagramlarında, istenilen şartlarda şekillendirilebilirliğin mümkün olmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle 1000 serisi Alüminyum alaşımı malzeme olarak seçilerek,

kauçuk dişi kalıp üzerine baskı yöntemi (rubber forming) tercih edilmiştir. Bu yöntemle alüminyum bipolar plakanın imalatı yapılabilmektedir. Fakat mukavemet yönüyle oldukça zayıf olduğu için, akış plakası olarak bu haliyle kullanılmamıştır.

İmal edilen tüm metalik bipolar plakaların dış çerçeve kesimleri ve gaz giriş boşlukları lazer kesme işlemiyle açılmıştır. Fotoğraf 4.3.'te imal edilmiş çelik ve alüminyum plakalar gösterilmiştir. Soğutma kanallarının teşekkül etmesi için, plakaların bir araya getirilmesi lazer kaynak yöntemiyle yapılmış, ürün Fotoğraf 4.4.'te gösterilmiştir.



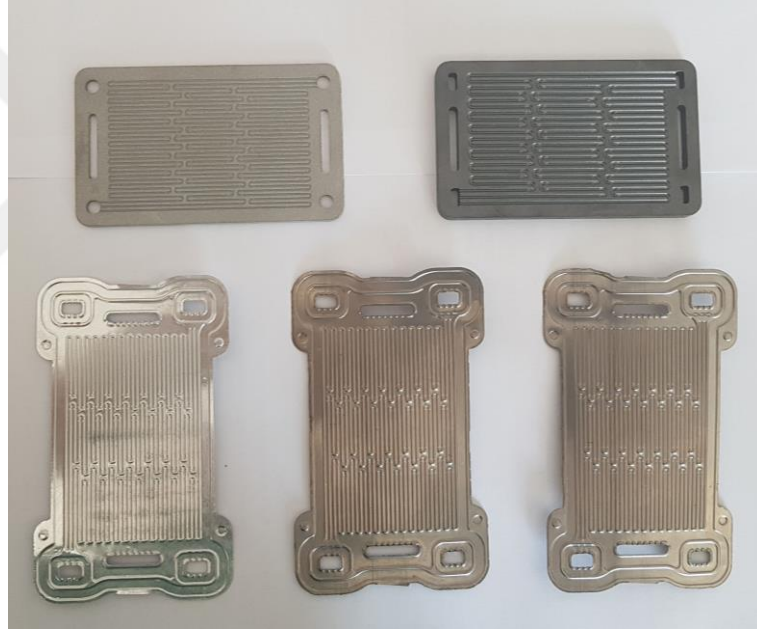
Fotoğraf 4.3. Çelik (a) ve alüminyum (b) bipolar plakalar



Fotoğraf 4.4. Lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiş bipolar plaka

Çelik ve alüminyum plakaların yanı sıra, gerekli test prosedürleri ve gelecek dönem çalışmaları için, aynı geometrik özelliklere sahip kompozit grafit ve titanyum plakaların da üretimi yaptırılmıştır. Titanyum plakanın üretimi için seçimli lazer sinterleme (SLS) olarak bilinen katmanlı üretim yöntemi kullanılmıştır. Tasarımı yapılan akış kanallarının, aynı aktif alan büyüklüğüne sahip olacak şekilde uygulandığı çeşitli malzemelere ait üretim sonuçları Fotoğraf 4.5.'te gösterilmiştir.

Üretilen ürünler içerisinde ağırlık hedefini sağlayan, paslanmaz çelik ve alüminyum malzemeler olmuştur. Alüminyumun, mukavemet nedeniyle kullanılamayacağı anlaşılmış olup, hem seri üretime uygun olması hem de ucuz olması nedeniyle paslanmaz çelik malzemeden başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



Fotoğraf 4.5. Titanyum, kompozit grafit, çelik ve alüminyum bipolar plakalar

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada PEM yakıt pilinde akış plakası olarak kullanılan kompozit grafit plakaya alternatif olarak daha hafif ve seri üretime daha uygun olan 0,1 mm kalınlıklı metalik (paslanmaz, titanyum, alüminyum) akış plakalarının uygulanabilirliği sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır.

Sayısal programda, hem talaşlı imalata hem de kalıpla imalata uygun bir akış alanı tasarlanmıştır. Bu akış alanının performansı sayısal olarak Comsol Multiphysics paket programı ile hem akış hem de elektrokimyasal süreçler çözdürülerek belirlenmiştir. Yakıt pili yığımına ait sınırlar bir mini İHA sisteminin enerji ihtiyaçlarını karşılayacak asgari özelliklerde olacak şekilde hesaplanmıştır. Buna göre yaklaşık 27 cm² aktif alana sahip bir reaksiyon bölgesi öngörülmüştür. Sayısal simülasyona göre birim alandan, 0,7 Volt gerilimde; 250 mW/cm² güç yoğunluğu elde edilmiş olup literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Hidrojen ve oksijen dağılımları ve basınç dağılımları homojen olup kabul edilen limitler arasındadır. Sadece yüksek akım yoğunluklarında konsantrasyon kaybı oluşmuştur. Bunun nedeni, akış derinliğinin metalik sac ile formlanabilir olacak şekilde olması için daha küçük yapılmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmadaki tasarım, nominal akım değerlerinde çalışacağı için bu kayıp kabul edilebilir olarak değerlendirilmiştir.

Sayısal programın ikinci aşamasında DYNFORM paket programı ile farklı metalik malzeme ve farklı kanal derinliklerinde akış alanının kalıp ile formlama kabiliyeti analiz edilmiştir. Buna göre 0,36 mm kanal derinliğinde 304 paslanmaz çelik ve CP-Ti (grade 2) titanyumun formlanabileceği belirlenmiştir.

Deneysel programda, öncelikle performans testi için 0,36 mm'lik akış alanı kompozit grafit bipolar plakadan olan hücrenin akım-voltaj ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Performans sonucuna göre yaklaşık 280 mW/cm² güç yoğunluğuna ulaşılmış olup, sayısal simülasyon ile çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Performans sonuçları beklenen aralıkta çıkan, 0,36 mm'lik akış alanı tasarımı için bir adet kalıp imal ettirilerek metalik malzemelerin formlanabilme yetenekleri deneysel olarak test edilmiştir.

Formlama denemelerinde 0,1 mm'lik paslanmaz çelik (304L) ve Alüminyum 1000 serisi başarılı bir şekilde şekillendirilmiştir. Alüminyum, sayısal çalışmada başarısız olsa da, farklı alaşım seçimiyle ve kalıplama metodunda kauçuk kullanılarak, formlama gerçekleştirilmiştir. Fakat alüminyumun, düşük mukavemeti nedeniyle, akış plakası olması için uygun olmadığı görülmüştür.

Deneysel çalışma kapsamında, 0,1 mm CP-Ti (grade 2) titanyum, yurt içinde bulunamadığı için, kalıp ile denemesi gerçekleştirilememiş olup, sayısal simülasyona göre şekillendirilebilme limitleri içerisinde olduğu görülmüştür. Fakat ağırlık tespiti için üç boyutlu metal yazıcıda üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu üç metal arasından üretilebilirlik ve maliyet açısından en uygun çözüm paslanmaz çelik (304L) olmuştur. İlerleyen çalışmalarda paslanmaz çelik, altın ile kaplanarak performans testleri gerçekleştirilebilir ve alüminyum malzeme için daha kalın plakanın şekillendirilebilirliği incelenebilir. İHA için yapılan bu çalışmalar, otomotiv uygulamalarının gereksinimlerine uygun olarak, daha büyük plakalar için tekrarlanabilir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında, metalik akış plakalarının, yakıt pillerinde kütle ve hacimsel güç yoğunluğunu arttırarak kullanılabilceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

Andújar, J.M. and Segura, F., “Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9), 2309–2322, 2009.

Barbir, F., “PEM Fuel Cells -Theory and Practice”, *Elsevier*, NewYork, 2005.

Belmonte, N., Luetto, C., Staulo, S., Rizzi, P. and Baricco, M., “Case studies of energy storage with fuel cells and batteries for stationary and mobile applications”, *Challenges* 8-9, 1-15, 2017.

Caglayan, D.G., Sezgin, B., Devrim, Y. and Eroglu, I. “Three-dimensional modeling of a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell at different operation temperatures”, *International Journal of Hydrogen Energy* 41(23), 10060–10070, 2016.

Can, N. ve Kahveci, M., “İnsansız hava araçları: tarihçesi, tanımı, dünyada ve Türkiye’deki yasal durumu”, *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology* 5(4), 511–535, 2017.

Choopanya, P. and Yang, Z., “A CFD investigation of effects of flow-field geometry on transient performance of an automotive polymer electrolyte membrane fuel cell”. *Computational Thermal Sciences* 7, 93–104, 2015.

Chowdhury, M. Z., Design and optimization of novel flow fields for pem fuel cells, Yüksek Lisans Tezi, *N.Ö.H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 12, 2017.

Colomina, I. and Molina, P., “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79–97, 2014.

“Comparison of Fuel Cell Technologies”, U.S. Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>, 2019

Dennison, C.R., Agar, E., Akuzum, B. and Kumbur, E.C., “Enhancing mass transport in redox flow batteries by tailoring flow field and electrode design”, *Journal of The Electrochemical Society* 163(1), A5163–A5169, 2016.

Dicks, A. and Rand, D.A.J., Fuel Cell Systems Explained, Third edition, **Wiley**, Hoboken, NJ, USA, 2018.

Dudek, M., Tomczyk, P., Wygonik, P., Korkosz, M., Bogusz, P., and Lis, B., “Hybrid fuel cell – battery system as a main power unit for small unmanned aerial vehicles (UAV)”, *Int. J. Electrochem. Sci.* 8, 23, 2013.

Dyantyi, N., Parsons, A., Sita, C. and Pasupathi, S., “PEMFC for aeronautic applications: A review on the durability aspects”, *Open Engineering* 7(1), 287-302, 2017.

EG&G Technical Services, Inc., Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), **U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory - No. DE-AM26-99FT40575**, Morgantown, West Virginia, 2004.

Gautam, R., Banerjee, S. and Kar, K., “Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application”, *Recent Patents on Materials Science* 8(1), 15–45, 2015.

Hepperle, M., Electric Flight – Potential and Limitations, **German Aerospace Center Institute of Aerodynamics and Flow Technology**, Braunschweig, Germany, 2013.

Hermann, A., Chaudhuri, T., and Spagnol, P., “Bipolar plates for PEM fuel cells: A review”, *International Journal of Hydrogen Energy* 30(12), 1297–1302, 2005.

Hirschenhofer, J.H., Stauffer, D.B., Engleman, R.R. and Klett, M.G., Fuel Cell Handbook, **U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Federal Energy Technology Center - No. DE-AC21-94MC31166**, Morgantown, West Virginia, 1998.

Husar, A., Strahl, S. and Riera, J. “Experimental characterization methodology for the identification of voltage losses of PEMFC: Applied to an open cathode stack”, *International Journal of Hydrogen Energy* 37(8), 7309–7315, 2012.

Jang, J., Yan, W., Li, H. and Tsai, W., “Three-dimensional numerical study on cell performance and transport phenomena of PEM fuel cells with conventional flow fields”, *International Journal of Hydrogen Energy* 33(1), 156–164, 2008.

Kallo, J., Rathke, P., Stephan, T., Thalau, O., Schirmer, J. and Mayer, F. “Fuel Cell Systems for Aircraft Application & Antares DLR-H2 All-Electric Flying Testbed”, *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Grapevine, Texas, USA, 1-8, 7-10 January 2013.

Kang, S., Zhou, B., Cheng, C.H., Shiu, H.R. and Lee, C.I., “Liquid water flooding in a proton exchange membrane fuel cell cathode with an interdigitated design: Water flooding in PEMFC cathode with interdigitated design”, *International Journal of Energy Research* 35(15), 1292–1311, 2011.

Khazaei, I., and Sabadban, H., “Effect of humidity content and direction of the flow of reactant gases on water management in the 4-serpentine and 1-serpentine flow channel in a PEM (proton exchange membrane) fuel cell”, *Energy* 101, 252–265, 2016.

Kone, J.P., Zhang, X., Yan, Y., Hu, G. ve Ahmadi, G., “Three-dimensional multiphase flow computational fluid dynamics models for proton exchange membrane fuel cell: A theoretical development”, *The Journal of Computational Multiphase Flows* 9(1), 3–25, 2017.

Krawczyk, J.M., Mazur, A.M., Sasin, T. and Stoklosa, A.W., “Fuel cells as alternative power for unmanned aircraft systems—Current situation and development trends”, *Transactions of the Institute of Aviation* 4 (237), 2014.

Luo, X., Wang, J., Dooner ,M., ve Clarke, J. “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation”. *Applied Energy* 137, 511-536, 2015.

Rashad, A.A., Rashad ,E.A., Ali, A.A., Akram, E., Al-Rubaye, M.M., Yousif, E., and Hairunisa, N., “Hydrogen in fuel cells: An overview of promotions and demotions”, *Interdisciplinary Journal of Chemistry* 2 (2), 1-6, 2017.

Romeo, G., Borello, F., Correa, G., and Cestino, E., “ENFICA-FC: Design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy* 38(1), 469–479, 2013.

Schwarz, D.H. and Beale, S.B., “Calculations of transport phenomena and reaction distribution in a polymer electrolyte membrane fuel cell”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52(17–18), 4074–4081, 2009.

Scipioni, A., Manzardo, A. and Jingzheng, R., Hydrogen Economy: Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability, *Academic Press*, London ; San Diego, 2017.

Sezgin, B., Caglayan, D.G., Devrim, Y., Steenberg, T. and Eroglu, I., “Modeling and sensitivity analysis of high temperature PEM fuel cells by using Comsol Multiphysics”. *International Journal of Hydrogen Energy* 41(23), 10001–10009, 2016.

Spiegel, C., “Designing and building fuel cells”, *McGraw-Hill*,: New York, 2007.

Szabolcsi, R., “Beyond Training Minimums – A New Concept of the UAV Operator Training Program”, *22nd International Conference Knowledge-Based Organization*, Land Forces Academy of Sibiu, Romania , 560–566, 9-11 June 2016.

Wang, J., “Theory and practice of flow field designs for fuel cell scaling-up: A critical review”, *Applied Energy* 157, 640–663, 2015.

Watzenig, D. and Brandstätter, B.(Ed.). “Comprehensive Energy Management - Safe Adaptation, Predictive Control and Thermal Management”, *Springer International Publishing*,: Cham, 2018.

Xiao, Y., Dou, M., Yuan, J., Hou, M., Song, W. and Sundén,B., “Fabrication Process Simulation of a PEM Fuel Cell Catalyst Layer and Its Microscopic Structure Characteristics”, *Journal of The Electrochemical Society* 159(3), B308–B314, 2012.



ÖZ GEÇMİŞ

Kıvanç KARACAN 19.12.1982 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk ve ortaokulu Niğde’de, liseyi Aksaray Fen Lisesi’nde tamamladı. 2009 yılında Niğde Üniversitesi Otomotiv ön lisans programını tamamlayarak, 2011 yılında Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne dikey geçiş yaptı. Askerlik görevini tamamladıktan sonra, 2016 yılında lisans programından mezun oldu. Aynı yıl Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansına başladı. 2017 Şubat ayında atandığı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünde, halen araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

