



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

DÜŞÜK İRTİFA İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN 150 WATT'LIK PEM YAKIT  
PİLİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

MUSTAFA GÖREN

Haziran 2015



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

DÜŞÜK İRTİFA İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN 150 WATT'LIK PEM YAKIT  
PİLİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

MUSTAFA GÖREN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Selahattin ÇELİK

Haziran 2015

**Mustafa GÖREN** tarafından **Yrd. Doç. Dr. Selahattin ÇELİK** danışmanlığında hazırlanan “**DÜŞÜK İRTİFA İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN 150 WATT’LIK PEM YAKIT PİLİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN, Erciyes Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Yüksel KAPLAN, Niğde Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Selahattin ÇELİK, Niğde 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.

Mustafa GÖREN

## ÖZET

### DÜŞÜK İRTİFA İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN 150 WATT'LIK PEM YAKIT PİLİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

GÖREN, Mustafa

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Selahattin ÇELİK

Haziran 2015, 52 sayfa

Mevcut pillerin şarj-deşarj problemi ve askeri operasyonların batarya kapasitesi ile sınırlı olması farklı enerji kaynaklarının kullanılmasını gerektirmiştir. Bu araçların bataryalarının yerine düşük sıcaklıkta çalışan, sessiz, şarj deşarj problemi olmayan, yüksek enerji yoğunluğuna sahip, operasyon süresi hidrojen gazının miktarı ile orantılı olan PEM yakıt pillerinin kullanılması düşünülmüştür.

Tez kapsamında, yakıt pili performansını etkileyen iki farklı akış alanı tasarımı için hız ve basınç dağılımını gösteren sayısal çalışma yapılmış ve tasarımlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra kompozit grafit plakalar ile tasarımlar imal edilmiş ve deneysel çalışma ile performansları ölçülmüştür. Performans çalışmaları sonunda akış alanı belirlenmiş ve daha sonra ısı iletim katsayısı yüksek olan ve mukavemeti kompozit grafitten daha iyi olan alüminyum plakalar akış plakası olarak test edilmiştir. Alüminyumun korozyona uğramaması için gümüş ile kaplanmıştır. 10 hücreli, 100 cm<sup>2</sup> aktif alanlı PEM yakıt pili yığını imal edilmiş ve performans testleri yapılmıştır. Bu yığına ait kütle dağılımı belirlenerek insansız hava araçları için hafifletilmesi ve çevre elemanlarının belirlenmesi çalışması yapılmıştır.

*Anahtar Kelimeler:* PEM Yakıt Pilleri, akış plakası tasarımı, performans testleri, insansız hava aracı

## SUMMARY

### DEVELOPMENT OF 150 WATT PEM FUEL CELL SYSTEM FOR LOW ALTITUDE UNMANNED AERIAL VEHICLES

GÖREN, Mustafa

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Selahattin ÇELİK

Co-Advisor : June 2015, 52 pages

The current battery charge-discharge problems and the limited battery capacity of military operations has required the use of different energy sources. Alternative to the batteries in these vehicles, PEM fuel cell are under consideration due to low-temperature and quiet operation, no charge or discharge problem with high energy and long service life depending on the amount of hydrogen.

In the thesis, two different flow fields are designed and compared numerically by investigating the velocity and pressure fields. Then these designs are manufactured from a graphite plate and their performances are measured experimentally. After that the final design is decided and the similar studies are performed for aluminum plates which have relatively higher thermal conductivity and mechanical straight. Before the tests, the aluminum plates are coated with a silver paste to avoid corrosion. A 10-cell stack each having 100 cm<sup>2</sup> active area is constructed and the performance measurements are performed. The weight distribution of this stack is determined and the studies are conducted to reduce the weight and to determine the balance of plant elements for the application of unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** PEM Fuel Cells, Flow Field Design, Performance Tests, Unmanned Aerial Vehicle

## ÖNSÖZ

Bu tezin konusunun belirlenmesinde, çalışmalarımın yürütülmesi ve değerlendirilmesinde yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selahattin ÇELİK ile Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezine de imkânlarından dolayı,

Bu tez çalışmasında bana sabır göstererek desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Neşe GÖREN ve canım kızım Begüm GÖREN'e,

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Fehmi GÖREN ve anam Safiyya GÖREN'e

sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2015

Mustafa GÖREN



## İÇİNDEKİLERİ

ÖZET .....	IV
SUMMARY .....	V
ÖNSÖZ .....	VI
İÇİNDEKİLER .....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
FOTOĞRAF DİZİNİ .....	XII
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XIII
BÖLÜM I .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 İnsansız Hava Araçları (İHA) .....	2
1.3 Yakıt Pili İle Çalışan İnsansız Hava Araçları .....	6
BÖLÜM II .....	8
YAKIT PİLLERİ .....	8
2.1 Yakıt Pili Nedir? .....	8
2.2 Yakıt Pilinin Tarihi Süreci .....	9
2.3 Yakıt Pilinin Avantajları .....	10
2.4 Yakıt Pilinin Dezavantajları .....	11
BÖLÜM III .....	12
PEM YAKIT PİLLERİNDE HÜCRE ELEMANLARI VE TASARIMLARI .....	12
3.1 Membran Elektrot Grubu (MEG) .....	12
3.1.1 Polimer Elektrolit .....	13
3.1.2 Elektrotlar (Katalizör Tabakalar) .....	15
3.1.3 Gaz Difüzyon Tabakaları (GDT): .....	17
3.2 Bipolar (Çift Kutuplu) Plakalar .....	19
3.2.1 Fonksiyonları .....	19
3.2.2 Özellikler .....	19
3.2.3 Kanal Kesiti .....	20
3.2.4 Bipolar Plaka Üzerinde Akış Alanı Dizaynı .....	20

3.3 Sıkıştırma ve Akım Toplama Plakaları.....	25
3.4 PEM Yakıt Pillerinde Yığın Elemanları .....	25
BÖLÜM IV .....	27
4.1 Model Oluşturma .....	27
4.2 Ağ Yapısı ve Sınır Şartları.....	28
BÖLÜM V .....	32
5.1 PEM Yakıt Pili Hücre Geliştirilmesi .....	32
5.1.1 Test İstasyonu .....	35
5.1.2 Deneysel Düzenek .....	37
5.1.3 Polarizasyon Eğrileri .....	38
5.1.4 Yakıt Pillerinde Verim.....	41
5.1.5 Akış Plakalarının Gümüş ile Kaplanması.....	42
5.1.6 Deneysel Sonuçlar .....	44
5.1.6.1 Serpantin Akış Kanallı ve Yeni Tasarım Grafit Plakaların Performanslarının Karşılaştırılması.....	44
5.1.6.2 Yeni Tasarım İçin Grafit ve Alüminyum Akış Plakaların Performans Karşılaştırılması.....	45
5.1.6.3. Yeni Tasarım Alüminyum Plakadan Oluşturulmuş 10 Hücreli Yakıt Pilinin Deney Sonuçları.....	46
5.1.6.4. İHA'lar İçin Yakıt Pillerinin Ağırlık Dağılımlarının Karşılaştırılması .....	49
BÖLÜM VI.....	51
SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	51
KAYNAKLAR .....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. İHA'lar da kullanılan yakıt pili türleri ve özellikleri(Georgia Institute of Technology; AeroViroment).....	7
Çizelge 2.1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri (Yıldırım,2011).....	8
Çizelge 4.1 Tasarımların ağ yapısına ait özellikleri .....	29

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. PEM tipi yakıt hücresinin çalışma şeması .....	9
Şekil 3.1. MEG'in hücre içindeki gösterimi.....	12
Şekil 3.2. Polimer elektrolit membranın yapısı .....	13
Şekil 3.3. PTFE zincirine bağlı sülfonik asit grubu .....	14
Şekil 3.4. Katalizör tabakanın mikro yapısı.....	16
Şekil 3.5. Katalizör tabakanın yapısı (Litster ve Mc Lean, 2004) .....	17
Şekil 3. 6. Gaz difüzyon tabakasının yapısı.....	18
Şekil 3.7. Bipolar plaka ile temas halindeki MEG'in kesit görüntüsü .....	21
Şekil 3.8. Bipolar plaka akışalanı tasarımları a) Pin - Tipi (Reiser ve Sawyer, 1988; Reiser, 1989) b) Düz ve Paralel (Pollegri ve Spaziante, 1980; Voss ve Cohw, 1993) c) Serpentine (Wilkinson vd., 1996) d) Cavalca tasarımları (Cavalca vd., 1997) e) Interdigitated (Ernst ve Mittleman, 1999) .....	23
Şekil 3.9. Düzlemsel yakıt pillri için geliştirilmiş bazı akış tasarımları a) Düz Akış (Ashok ve Singaravelu, 1999) b) Dairesel Tip Pin (Li vd., 2006) c) Açılı Baklava (Haltiner ve Mukerjee, 2005) d) Düz Şekilli Rib (Nguyen ve Craig, 1994) e) Küçük Rib (Bedogni vd., 2007) f) Spiral Tip (Bossel, 2003).....	24
Şekil 3.10. Yakıt pili yığın elemanları .....	26
Şekil 4.1. Serpantin (a) ve yeni tasarıma (b) ait akış geometrilerin CAD çizimleri .....	27
Şekil 4.2. Serpantin (a) ve yeni tasarıma (b) ait akış geometrilerin COMSOL tasarımları .....	27
Şekil 4.3. Serpantin tasarım ağ yapısının geometrisi ve ağ yapısı .....	28
Şekil 4.4. Yeni tasarım ağ yapısının geometrisi ve ağ yapısı .....	28
Şekil 4.5. Serpantin akış tasarımına ait hız dağılımı.....	29
Şekil 4.6. Serpantin akış tasarımına ait basınç dağılımı .....	30

Şekil 4.7. Yeni tip akış tasarımına ait hız dağılımı.....	30
Şekil 4.8. Yeni tip akış tasarımına ait basınç dağılımı.....	31
Şekil 5.1. Şematik gösterilmiş yakıt pili hücresi .....	32
Şekil 5.2. Visual basic tabanlı yazılımın görünümü .....	36
Şekil 5.3. Deneysel kurulum diyagramı.....	37
Şekil 5.4. Yakıt pili volaj- akım eğrisi ve kayıplar .....	39
Şekil 5.5. serpantin akış ve yeni tasarım grafit plakalardan oluşan tek hücreli yakıt pilinde I- V ve I - P karşılaştırması .....	44
Şekil 5. 6. Yeni tasarım grafit ve alüminyum plakalardan oluşan tek hücreli yakıt pilinde I - V ve I - P karşılaştırması .....	46
Şekil 5.7. Yeni tip bipolar plakanın akış kanalı görünümü. ....	47
Şekil 5.8. Yeni tasarım alüminyum plakalardan oluşan 10 hücreli yakıt pilinde I - V ve I - P karşılaştırması .....	48
Şekil 5.9. Alüminyum plakalı tek hücreli yakıt pilinin ağırlık dağılımı.....	49
Şekil 5.10. Alüminyum plakalı 10 hücreli yakıt pilinin ağırlık dağılımı.....	49
Şekil 5.11. Alüminyum plakalı 10 hücreli yakıt pilinin azaltılmış ağırlık dağılımı .....	50

## FOTOĞRAF DİZİNİ

Foto 5.1. Montajı yapılmış tek hücreli yakıt pili .....	33
Foto 5.2. Sol tarafta yeni tip, sağ tarafta klasik tip (serpantin tip) bipolar plaka görünümü .....	34
Foto 5.3. Yakıt pili test istasyonu .....	36
Foto 5.4. Çalışmalarda kullanılan 7 tabanlı Membran Elektrot grubu .....	38
Foto 5.5. Gümüş kaplama banyosu.....	43
Foto 5.6. Kaplama yapılmış (solda) ve yapılmamış (sağda) alüminyum plakaların görünümü .....	43
Foto 5.7. Yeni tasarım alüminyum plakalardan oluşan 10 hücreli yakıt pilinin görünümü .....	47

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$\Omega$	Ohm
e	Elektron
$\varepsilon_{gerçek}$	Yakıt pilinin gerçek verimi
$\varepsilon_{ideal}$	İdeal verim
$\varepsilon_{voltaj}$	Voltaj verimi
$\varepsilon_{kullanım}$	Yakıt kullanım verimi
$\Delta G$	Gibbs serbest enerji
$\Delta H$	Entalpi
$V_{hücre}$	Deneylerde ölçülen voltaj değeri
$V_{maks}$	Maksimum voltaj değeri
R	İdeal gaz sabiti
T	Sıcaklık
F	Faraday sabiti
k	Isı iletim katsayısı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
H <sub>2</sub>	Hidrojen
O <sub>2</sub>	Oksijen
SO <sub>3</sub> H	Sülfonik asit grubu
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
Pt	Platinyum
PEM	Proton değişim membran
İHA	İnsansız hava aracı
MALE	Orta irtifa ve uzun menzil
MEG	Membran elektrot grubu
PTFE	Politetraflouroetilen
GDT	Gaz difüzyon tabakası
BPP	Bipolar plaka



# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Günümüzde kullanımı artan petrol türevi yakıtların giderek azalması ve çevreyi kirletmelerinden dolayı, bu yakıtların yerine yeni enerji kaynaklarının bulunması çalışmaları gündeme gelmiştir. Bu enerji kaynakları; su gücü, rüzgâr, güneş, hidrojen ve biyokütle enerji kaynakları olarak sıralanabilir. Bu enerji kaynakları ile ilgili birçok ülkede geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

Petrol kaynaklarının azalması ve çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, enerji dönüşüm verimleri yüksek olan yakıt pillerinin kullanımı büyük önem kazanmıştır. Yakıt pili, hava ve dışarıdan verilen yakıtın elektrokimyasal tepkimesi sonucu yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine çeviren güç üretim elemanıdır. Yakıt pilleri çevreci ve temiz bir teknoloji ürünü olup, atmosfere zehirli gaz yaymamaktadır. Yakıt pillerinin enerji dönüşüm verimleri %50-80'e kadar çıkabilmektedir (Çelik, 2009). Yakıt pilleri; otomobil, otobüs, bisiklet, lokomotif, deniz altı, uzay aracı gibi ulaşım araçlarında, diz üstü bilgisayar, cep telefonu gibi taşınabilir cihazlarda, ofis, otel, ev, hastane gibi sabit uygulamalarda kullanılmaktadır.

Yakıt pili ile çalışan cihazların yakın gelecekte daha da yaygınlaşmasının kaçınılmaz olacağını söylemek mümkündür. Haziran 2015'de yapılan G7 Zirvesi'nin son gününde küresel ekonomi için tarihi bir karar alınmıştır. Liderler bu yüzyılın sonunda fosil yakıt kullanımını sıfırlama kararı almıştır. Alınan karara göre 2020'ye kadar sanayileşmiş ülkeler iklim değişikliği ile mücadele için 100 milyar dolar ayıracaktır (Bloomberght).

### 1.1 Tezin Amacı

Yakıt pillerinin mevcut bataryalara göre yüksek güç yoğunluğuna sahip olması ve bataryalardaki gibi şarj-deşarj problemi olmadan yakıt ve oksitleyici verildiği sürece elektrik üretiyor olması, İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın batarya ile çalışanlarına göre avantajları olacağı görülmüştür. Yakıt pili sisteminin İHA için kullanılması durumunda, havada kalma süresinin seçilen hidrojen tankının hacmi ve basıncı ile doğru orantılı artacaktır. Böylece mevcut bataryalara göre, daha fazla havada kalma süresine sahip olacaktır. Elektrokimyasal tepkime sonucu saf su dışında atık ortaya çıkmaması, sessiz

çalışması ve düşük çalışma sıcaklığında yüksek verim elde edilmesinden dolayı, tez çalışmasında proton değişim membran (PEM) yakıt hücresinin İHA'lar için kullanımı araştırılmıştır.

Mevcut teknoloji ile İHA'ların tümünde yakıt pillerinin kullanılması uygun olmayacaktır. Bunu kısıtlayan iki neden bulunmaktadır. Birincisi yükseklik arttıkça, havadaki oksijen miktarının azalmasıdır. Yakıt pillerinde oksitleyicinin performansa etkisi oldukça fazladır. Bu nedenle yakıt pili sistemleri düşük irtifalı İHA'lar için daha uygun görülmektedir. İkinci kısıt ise yüksek güç gerektiren büyük İHA'lar için, kullanılması çok avantajlı olmayacaktır. Bunun en önemli nedeni ise, artan güç gereksinimi ile yakıt pili çevre elemanlarının ağırlığının da eksponansiyel olarak artmasından kaynaklanmaktadır.

Temel uçuş performans kriterlerine göre, Orta İrtifa ve Uzun Menzil (MALE) İHA sınıfından olan Mini Taktik İHA 20 saat havada uçuş süresine sahiptir. Batarya ile çalıştığı için havada kalma süresi kısalmaktadır. Yeteri kadar irtifaya sahip olan İHA'lar, herhangi bir operasyonda havada kalış süresi bu bağlamda çok önem arz etmektedir. Bu bakımdan, kullanılacak PEM Yakıt Pili, havada kalış süresine doğrudan etki edecek ve operasyonel bağlamda büyük bir avantaj sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, insansız hava araçlarında kullanılması planlanan 150 Watt'lık bir PEM yakıt pili yığınının tasarımı araştırılmıştır. Buna göre yeni bir akış alanı tasarımı ile W/kg cinsinden performansın iyileştirilmesi sağlanmıştır. Çalışmada akış alanı tasarımının performansa etkisi ve yenilikçi malzeme ve akış alanı tasarımı ile yakıt pili yığını imal edilmiştir. Ayrıca akış alanı tasarımlarının sayısal çözümleme ile hız ve basınç dağılımları karşılaştırılmıştır.

## **1.2 İnsansız Hava Araçları (İHA)**

Otonom uçuş kabiliyetine sahip, iki zamanlı motor veya jet motoru tahriki ve hava akımı ile uçabilen hava aracına insansız hava aracı denir. Bu araçlar ilk çıktıklarında uzaktan kumandalı anlamına gelen İngilizce "drone" adıyla adlandırılmıştır. Zamanla, uzaktan kumanda edilmeden belirli bir uçuş planı üzerinde görev yapabilen tipleri de geliştirilmiştir. İnsansız hava araçları çeşitli avantajları ile günümüzde askeri ve sivil uygulamalarda önemi artan bir kavrama dönüşmüştür. Öncelikle keşif ve gözetleme

amaçlı olarak düşmana ait cephe ve arazi bilgilerini toplayarak, canlı biçimde hareket bilgilerini operasyon merkezine iletme görevlerini yerine getirirken, düşman hava savunma sistemleri ya da savaş uçaklarına karşı hedef ve yem olarak yardımcı görev üstlenmişlerdir. İnsan zayıflığını ortadan kaldırma avantajı, İHA'ları askeri uygulamalarda oldukça önemli bir konuma taşımıştır. Askeri alanlarda oldukları kadar sivil uygulamalarda da kendilerine geniş uygulama alanları bulan İHA'lar üzerinde Türkiye'de de nitelikli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

İnsansız hava araçlarının ataları sayılabilecek ilk örnekler, ABD'de geliştirilmeye başlanmıştır. 1800'lü yılların sonlarında Charles Perley, düşman birliklerinin üzerine gönderilerek bomba bırakan zamanlamalı bir balon mekanizması geliştirmiş fakat I. Dünya Savaşı'nda da kullanılan bu balonlardan önemli bir başarı elde edilememiştir. William Eddy, aynı tarihlerde benzer bir mekanizma ile fotoğraf çeken bir uçurtma sistemi tasarlamıştır. Bu uçurtmanın Amerika-İspanya savaşında çok sayıda fotoğraf çekerek önemli bir istihbarat başarısı sağladığı iddia edilse de, yer belirleme sistemlerinden mahrum şartlar altında çekilen bu fotoğraf karelerinin normal bir pilotun gözlemi sonucunda elde ettiği verilere kıyasla çok daha az değerli bilgi içermesi sebebiyle, bu sistemler gelişim süreçlerini ilerletmeden rafa kaldırılmıştır. 1910 yılında General Motors tarafından geliştirilen bir uçak, belirli mesafeye geldiğinde kanatlarından ayrılarak gövdesindeki bombayı füze şeklinde hedefe göndermiştir. 1917 yılında Peter Cooper ve Elmer A. Sperry tarafından geliştirilen ilk radyo kontrollü eğitim uçağı, pilotsuz olarak yaklaşık 135 kg'lık bombayı 80 km menzile başarılı şekilde bırakmış, ancak üretimindeki zorluk nedeniyle yeteri kadar rağbet görememiş ve kullanılamamıştır.

II. Dünya Savaşı'nın alevlenmesiyle birlikte Almanya da insansız hava araçları geliştiren ülkeler arasına katılmıştır. Özellikle İngiltere'nin bombalanmasında kullanılan V-1 tipi zamanlamalı bombardıman araçları, 900 kg'lık bombayı 240 km menzile kadar bırakabilme yeteneğine ulaştırmıştır. V-1'lere karşı ABD tarafından geliştirilen BQ-7 tipi araçlar ise tarihe ilk karşı tedbir İHA'sı olarak geçmiştir. 1951 yılında üretilen ilk jet motorlu insansız hava aracı Teledyne Ryan firmasınınca üretilen Firebee olmuştur. Bu araç Japonya, Vietnam ve Tayland'da 34000 gece ve gündüz görevine çıkmış, keşif, gözlem, mektup ve ilan dağıtımı, karadaki füze rampalarının tespiti gibi operasyonel

görevleri yerine getirerek, İHA'ların öneminin anlaşılmasını sağlamıştır. İsrail 1970'lerde ABD'den aldığı 20 adet Firebee'yi modifiye ederek, Mısır'da yürüttüğü savaşta kullanmış, Mısır hava savunma sistemini bu araçlarla oyalayarak büyük avantaj elde etmiş ve savaşın seyrini kendi lehine değiştirmiştir. İlk başarılı yüksek irtifa İHA'sı olan ABD üretimi Ryan SPA 147, 60 bin fit yükseklikten fotoğraf çekimi yaparak 8 saatlik görev süresini başarıyla tamamlamış ve bugünkü yüksek uçuş yapan İHA'ların öncüsü olmuştur.

1980li yıllardan sonra İHA'ların gelişim süreci ivmelenerak ilerlemiş ve bu araçlar boyut olarak küçülmeye başlamıştır. İsrail, ilk mini İHA olan Scout'u üretmiş, 3,96 m kanat açıklığı olan bu araç radara yakalanmamayı ve vurulmamayı başarmıştır. Scout, üzerine monte edilen döner kamera sistemi ile ilk gerçek zamanlı görüntü aktarımını sağlamıştır. Bu araçlar İsrail tarafından Suriye'ye karşı 1982 yılında kullanılmış ve bunların sağladığı avantajın fark edilmesiyle yine İsrail tarafından Pioneer adlı İHA geliştirilmiştir. Pioneer, uçak gemisine iniş yapmayı başarmış ilk İHA olarak tarihe geçmiştir. 20 adet Pioneer, ABD ordusu tarafından kullanıma alınmış ve Körfez savaşında büyük başarılarla imza atmıştır. Günümüzde Balkan barış gücü tarafından halen kullanılmaya devam etmektedir.

İnsansız Hava Araçları, sağladıkları çeşitli avantajlar ile günümüzde artan sayıda görev ve amaç için kullanılmakta ve hızla yaygınlaşmaktadır. İHA'lar, askeri ve sivil uygulamalardaki kullanımları ile birlikte çok sayıda kolaylık getirmektedir. İHA'lar, yeryüzünde teşekküllü hava alanları haricinde kurulu yer istasyonlarından kontrol edilebilir. Küçük veya orta ölçekli bir İHA'yı göreve hazırlayarak uçurmak, görev takibini yapmak ve görevi sonlandırarak İHA'yı yere indirmek için her zaman bir hava alanına veya piste ihtiyaç yoktur. İnsanlı hava araçlarındaki mürettebat ve gerektirdiği donanımların İHA'da olmaması, uçan bir araç için hafiflik yönünden oldukça önemli avantaj sağlamaktadır. Kokpitteki mürettebat için gereken yaşamsal sistemlere ve bu sistemlerin gerektirdiği çok sayıda elektronik ve mekanik donanıma ihtiyaç duyulmadığı gibi, uçuş süresinin getirdiği yorgunluk ve dikkat kaybı, baygınlık, G kuvvetleri gibi pilotun biyolojik dengesine bağlı olarak sınırlandırılması gereken çalışma koşullarına bağımlı değildir. Keşif ve gözetleme gibi amaçlarla kullanılan küçük boyutlu ve sessiz çalışan bir İHA'nın düşman tarafından fark edilmesi ve

vurulması olasılığı insanlı bir hava aracına kıyasla çok daha düşüktür. Sivil ve askeri uçaklar için pilot yetiştirilmesi yüksek maliyetli ve zaman alıcı bir süreç olup, pilot bu açıdan uçurmakla görevli olduğu araçla birlikte yüksek bir kıymete sahiptir. İHA, pilot kaybını ortadan kaldırması ve pilot ihtiyacını azaltması yönünden belki de en büyük avantajını ortaya koymaktadır. Bu yönüyle İHA'lar normal hava araçlarının yerine getiremedikleri çok riskli ve zor görevleri de yerine getirme kabiliyetine sahiptir.

İnsansız Hava Araçları, büyüklüklerine, gerçekleştirdikleri görevlere, uçuş irtifalarına ve diğer kabiliyetlerine göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır. Kullanım amaçlarına göre İHA'lar, başlıca aşağıdaki görevler altında sınıflandırılabilir:

- Sahte hedef / hedef benzetimi görevi: Bu görevleri yerine getiren, normal bir uçağa kıyasla düşük maliyetli olan İHA'lar, düşman savunma sistemlerinin oyalanmasında kullanılarak avantaj sağlanmaya çalışılır.
- Keşif / gözetleme / istihbarat görevi: Bu tip İHA'lar düşman kuvvetlerinin yer tespiti ve gözlenmesinde kullanılır. Enerji kaynakları, iletişim merkezleri, silah depoları gibi stratejik öneme sahip yerlerin tespiti için de bu İHA'lar kullanılmaktadır.
- Elektronik harp görevi: Bu tip İHA'lar radar yayınlarının dinlenmesi, düşman hava savunma sistemlerinin karıştırılması, küresel konumlandırma (GPS) sistemlerinin karıştırılması, önleyici sistemlerin etkisizleştirilmesi gibi görevleri yerine getirir.
- Muharebat görevi: Bomba, füze gibi hafif veya ağır mühimmat taşıyarak belirlenen hedefleri vurabilen İHA'lar bu sınıftan olup, bu tip İHA'lar konusunda çalışmalar hızlanmakta ve bu konuda uluslararası düzeyde, savaş etiği bağlamında yoğun tartışmalar yapılmaktadır.
- Özel görevler: Yukarıdaki görevler dışında, doğrudan askeri amacı bulunmayan, sivil amaçlı ya da tehdit ortamında askeri görevleri destekleyici nitelikte görevleri yerine getiren İHA'lar vardır. Mayın tespit etme, mayın imha etme, deniz arama- kurtarma, lojistik ve haberleşme desteği, bilimsel araştırmalarda örnek alma, ölçüm yapma, orman alanlarını kontrol etme, yük taşıma gibi görevler bunlara örnek gösterilebilir.

İHA'lar özelliklerine göre aşağıdaki sınıflara ayrılırlar:

- Sadece görüntü ya da ses almak amacıyla kullanılan Çok küçük boyutlardaki İHA'lar, mikro İHA sınıfına girmektedir.
- 3000 m'ye kadar irtifaya, 1 saatlik havada kalış süresine sahip İHA'lar, mini İHA sınıfına girer.
- 3000-9000 m irtifa arasında faaliyet gösteren, yaklaşık 12 saatlik havada kalış süresine sahip İHA'lara taktik İHA'lar denir. 1500 kg'dan hafif ve 50-500 km. arasında operasyon menziline sahiptir.
- 5000-20000 m irtifa arasında çalışabilen, 24 saate kadar havada kalma süresine sahip İHA'lar operatif İHA sınıfına girmektedir.
- 9000 m'den yüksek irtifada çalışabilen, 24 saatten fazla havada kalabilen İHA'lar stratejik İHA olarak sınıflandırılmaktadır (Ata, 2013).

### **1.3 Yakıt Pili İle Çalışan İnsansız Hava Araçları**

Yakıt pillerinin İHA'larda kullanılmasının avantajlı olduğunu gösteren örnek çalışmalar mevcuttur.

Boeing araştırmacıları ve endüstriyel iş ortakları 2008 Şubat ayında tüm Avrupa'da deneysel uçuş testleri gerçekleştirmişlerdir. Test edilen araç bir insanlı uçaktı ve sadece bir yakıt pili ile hafif akülerden güç almaktaydı. Yakıt Pili Gösteri Uçağında, geleneksel bir pervaneye elektrik motorunu tahrik eden bir PEM yakıt pili ile lityum-iyon akü'den oluşan bir hibrit sistem yer alıyordu. 2003 yılında ise tamamen bir yakıt hücresinden güç alan dünyanın ilk pervaneli uçağı uçurulmuştur (Bradley vd., 2006).

Horizon firması tarafından üretilen yakıt hücreli İHA, 2007 yılında küçük bir İHA için uçuş mesafesi rekorunu kırmıştır. Bu İHA, düşük ses, düşük termal iz bırakma ve yüksek irtifalara yükselebilen özelliklerine sahipti (Horizon Fuel Cell Technologies). 2009 yılında, ABD Donanma Araştırma Laboratuvarı'nın (Naval Research Laboratory-NRL) Ion Tiger uçağı, hidrojenle çalışan bir yakıt hücresi kullanarak ve 23 saat 17 dakika havada kalmıştır (Naval Research Laboratory). Boeing firmasının ürettiğı Phantom Eye, bir defada dört güne kadar 20.000 metre yükseklikte uçmuştur. Uçakta yedek yardımcı güç sağlamak için yakıt hücreleri kullanılmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 1.1'de bazı İHA'lara ait özellikler belirtilmiştir.

**Çizelge 1.1.** İHA'lar da kullanılan yakıt pili türleri ve özellikleri(Georgia Institute of Technology; AeroVironment)

İHA	Brüt Kütle (kg)	Kanat Açıklığı (m)	Havada Kalma Süresi (h)	Yakıt Pili Türü	Güç (W)	Yakıt Depolama Türü	Yakıt Pili Üreticisi
Spider Lion	2,54	2,2	3,3	PEM	100	Sıkıştırılmış Hidrojen	Protonex Tech. Corp.
Georgia Tech UAV	16,4	6,6	0,75	PEM	500	Sıkıştırılmış Hidrojen	
Hyfish	6	1	0,25	PEM	1000	Sıkıştırılmış Hidrojen	Horizon Fuel Cell Technologies
Puma	5,7	2,6	9	PEM		Kimyasal Hibrit	Protonex Tech. Corp.
Pterosoar	5	5,5	15,5	PEM	650	Sıkıştırılmış Hidrojen	Horizon Fuel Cell Technologies
Endurance	5,4	2,4	10,25	SOFC		Propan	Adaptive Material, Inc.
Ion Tiger			26	PEM	500	Sıkıştırılmış Hidrojen	Protonex Tech. Corp.

## BÖL ÜM II

### YAKIT PİLLERİ

#### 2.1 Yakıt Pili Nedir?

Yakıt pili, hava ve dışarıdan verilen yakıtın elektrokimyasal tepkimesi sonucu yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine çeviren güç üretim elemanıdır. Yakıt pilleri genellikle kullanıldığı elektrolit tipine göre kullanılmaktadır (Çuhadaroğlu vd., 2011). Bunlardan en sık kullanılanı Proton Değişimli Zar Yakıt Pili (Proton Exchange Membrane), yani kısaca PEM yakıt pildir. PEM yakıt pilleri, anot ve katot elektrotlarını ayıran polimerik zardan oluşmaktadır. Elektrot malzemesi olarak genellikle platin katalizör kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de yakıt pili çeşitleri ve özellikleri gösterilmiştir.

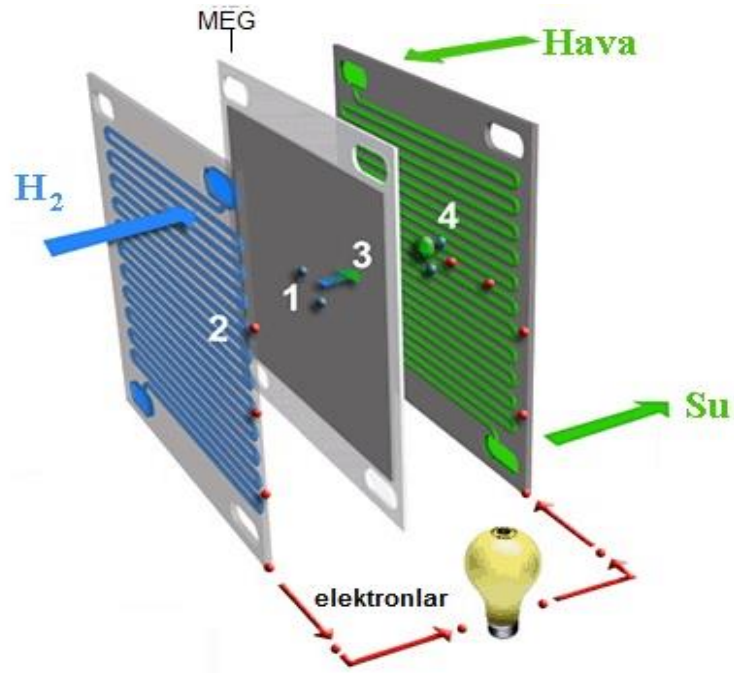
Çizelge 2.1. Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri (Yıldırım,2011)

Yakıt Pili	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı	Elektriksel Verim	Yakıt/Oksitleyici
Alkali	Potasyum Hidroksit çözeltisi	Oda sıcaklığı-250 °C	% 60–70	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>
PEM	Platin katalizör	Oda sıcaklığı-80 °C	% 40	60 % H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , hava
Direkt Metanol	Polimer iletken membran	Oda sıcaklığı-130 °C	% 20–30	CH <sub>3</sub> OH/O <sub>2</sub> , hava
Fosforik Asit	Sıvı fosforik asit	160–220 °C	% 55	Doğalgaz, biyogaz, H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , hava
Erimiş Karbonat	Alkali karbonatlar	620–660 °C	% 65	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , hava
Katı Oksit	Erimiş alkali metal karışımı	800–1000 °C	% 60–65	Doğalgaz, biyogaz, kömür gazı, H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> , hava

PEM yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanılmakta olup, yakıt hücresinin anot kısmından beslenir. Anot kısmında, platin katalizör sayesinde, protonlar ve serbest elektronlar ayrışır. Elektrik akımını meydana getirmek için, serbest elektronlar dış çevrimde kullanılır. Polimer membran elektroliti geçen protonlar, katoda doğru



ilerlerler. Katot kısmında havadaki oksijenin gönderilmesiyle dış çevrimden gelen elektronlar ve proton geçiren zardan gelen protonlar birleşerek su ve ısı oluştururlar (Şekil 2.1). Tek bir yakıt hücresi gerçekte 1-1,2 Volt civarında, teorik olarak da 1,23 Volt potansiyel üretmektedir. Yakıt hücreleri paralel veya seri bağlama yapılarak, talep edilen elektriksel güç miktarı karşılanmaktadır. Paralel veya seri bağlama yapılarak oluşan sistem, “Yakıt Hücresi Grubu” veya “Yakıt Pili Yığılı” olarak isimlendirilmektedir.



**Şekil 2.1.** PEM tipi yakıt hücresinin çalışma şeması

## 2.2 Yakıt Pili Tarihi Süreci

Yakıt pilleri ilk olarak, NASA'nın uzay çalışmalarında Space Shuttle, Gemini ve Apollo uzay araçlarında kullanılmıştır (1958).

- $H_2-O_2$  pili üzerinde yapılan ilk yakıt pili çalışmaları, Sir William Grove tarafından 1838 yılında yapılmıştır. Güç ve sabit akımın, suyun elektrolizinin ters tepkimesi sonucu oluştuğunu bulan Grove, tesadüfi olarak büyük bir buluş yapmıştır.

- Yakıt pili içerisindeki her parçanın, yakıt pili çalışmasındaki etkisini ve görevini Friedrich Wilhelm Ostwald 1893 yılında araştırmıştır.
- Eriyik elektrolitli yakıt pilleri ile ilgili ilk çalışmaları William W. Jacques 1896 yılında yapmıştır. Elektrik üretmek için, kömürün elektrokimyasal enerjisini kullanmıştır.
- Bilim adamı Nerst'in 1900 yılında çalışmalarına başladığı katı oksit elektrolit ile çalışan yakıt hücresi çalışmalarını 1937 yılında Emil Baur, başarıya ulaştırmıştır.
- Thomas Bacon 1939 yılında alkalın yakıt pilleri üzerine önemli çalışmalar yapmıştır.
- Uzay çalışmalarındaki yarış nedeni ile, 1950 yılında yakıt pillerine olan ilgi artmıştır.
- NASA H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> yakıt pilini 1958 yılında uzay gemilerinde kullanmaya başlamıştır.
- Hidrojen ve hidrojenli yakıt pillerinin, ham petroldeki sorunlar nedeni ile 1980 yılında önemi artmıştır.
- Yaygın kullanıma geçilmesi, kullanım alanlarının genişletilmesi, maliyetlerin azaltılması, , teknoloji geliştirme çalışmaları 2000'li yıllardan sonra hızlanmıştır.

### **2.3 Yakıt Pilinin Avantajları**

Diğer enerji sistemlerine göre, yakıt pillerinin avantajları aşağıda belirtilmiştir:

- Termal enerji sistemlerine göre yakıt pilleri daha yüksek verimle çalışır. Yakıt pili sistemlerinde elektrik üretimindeki verim %50 civarında iken, termal enerji sistemlerindeki verim % 35-40'ı geçmemektedir.
- Diğer enerji üretim çeşitlerine bakılacak olursa, yakıt pillerinde meydana gelen emisyon değeri ihmal edilecek kadar düşüktür. Artık olarak sadece su meydana gelmektedir. Yakıt pillerinde yanmamış hidrokarbonlar, NO<sub>x</sub>, CO ve kirlenici diğer ürünler oluşmamaktadır. Oksitleyici olarak hidrokarbonlar kullanıldığında çok düşük miktarda CO<sub>2</sub>, hava kullanıldığında ise ihmal edilecek kadar az miktarda azot oksitler meydana gelir. Diğer teknolojilerde insan sağlığı ve çevre kirliliği gibi nedenler maliyeti çok fazla yükseltmekteyken, yakıt pillerinin çevre dostu bir enerji olması bunları avantajlı bir enerji üretici yapmaktadır.

- Yakıt pili sistemlerinde hareketli parça bulunmadığından gürültü kirliliği meydana gelmemektedir.
- Kullanılabilecek yakıt sayısı, yakıt pillerinde çok fazladır. Çok farklı sektörde, alternatif ve fosil yakıtların kullanımının kolaylığı sebebi ile tercih edilebilmektedir. İstenilen kapasite ve büyüklükte üretilebilen yakıt pilleri, karmaşık yapıya sahip değildir. Boyutlarına göre 1 W'tan 100 kW'a kadar güç üretebilirler. Enerji yoğunlukları yığınlarda 500 W/kg'a kadar çıkmaktadır.
- Taşınmaları kolaydır. İstenilen her yere yerleştirilebilir ve kullanılabilirler.
- Yakıt pillerinde yan ürün olarak meydana gelen atık ısı geri kazanılabilir.
- Yakıt pili sistemleri güvenli ve dayanıklı sistemlerdir.

#### **2.4 Yakıt Pilinin Dezavantajları**

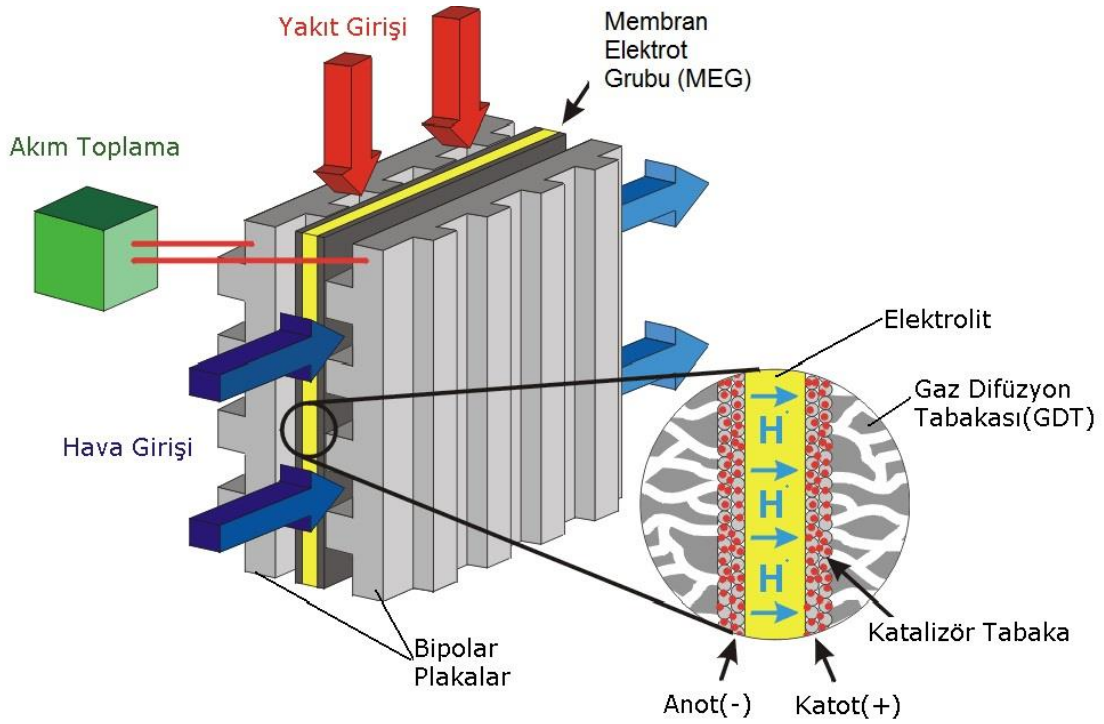
- Diğer enerji sistemlerine göre maliyeti yüksek bir sistemdir. Bunun en önemli nedeni katalizör olarak platinyum kullanılmasıdır. Teknolojinin ilerlemesi ile maliyetlerde de oldukça azalma sağlanmıştır.
- Uzun süreli çalıştırmalarda, içten yanmalı motorların sürelerine tam olarak ulaşamamıştır. Platin katalizörlerin bozulması ile performansların zamanla azalması en önemli aşılması gereken problemlerdendir.

## BÖLÜM III

### PEM YAKIT PİLLERİNDE HÜCRE ELEMANLARI ve TASARIMLARI

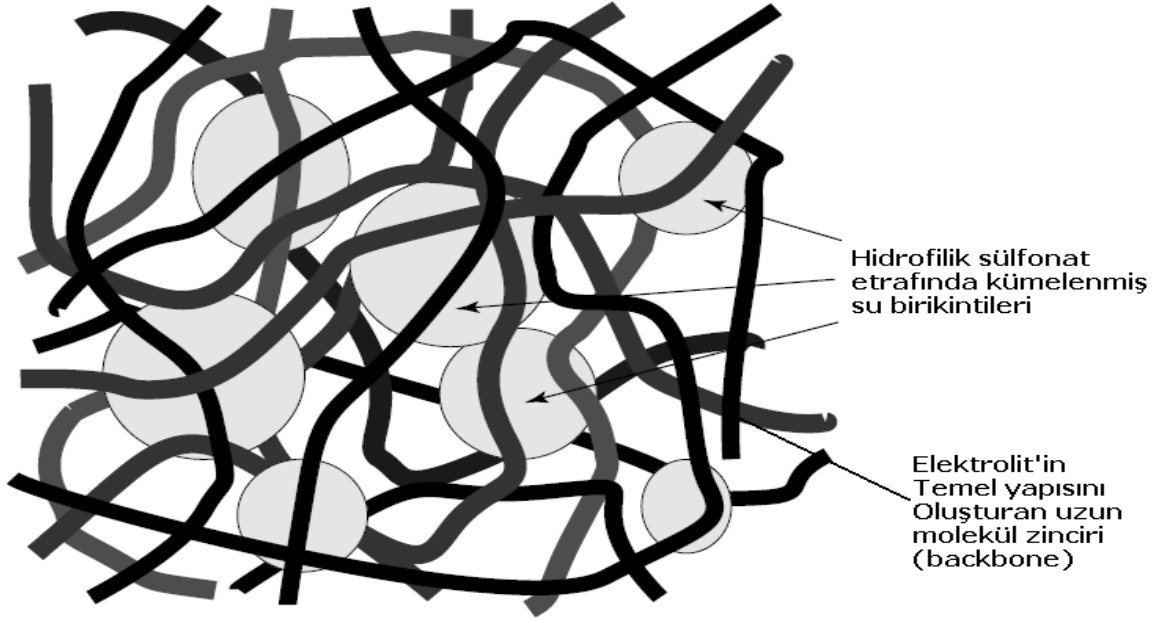
#### 3.1 Membran Elektrot Grubu (MEG)

PEM yakıt pillerinde membran elektrot grubu (MEG), temel reaksiyonların meydana geldiği kısımdır. MEG aşağıda şekilde de gösterildiği gibi üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar Polimer elektrolit, Elektrotlar (Katalizör Tabakalar) ve Gaz difüzyon tabakalarıdır.



Şekil 3.1. MEG'in hücre içindeki gösterimi

### 3.1.1 Polimer Elektrolit



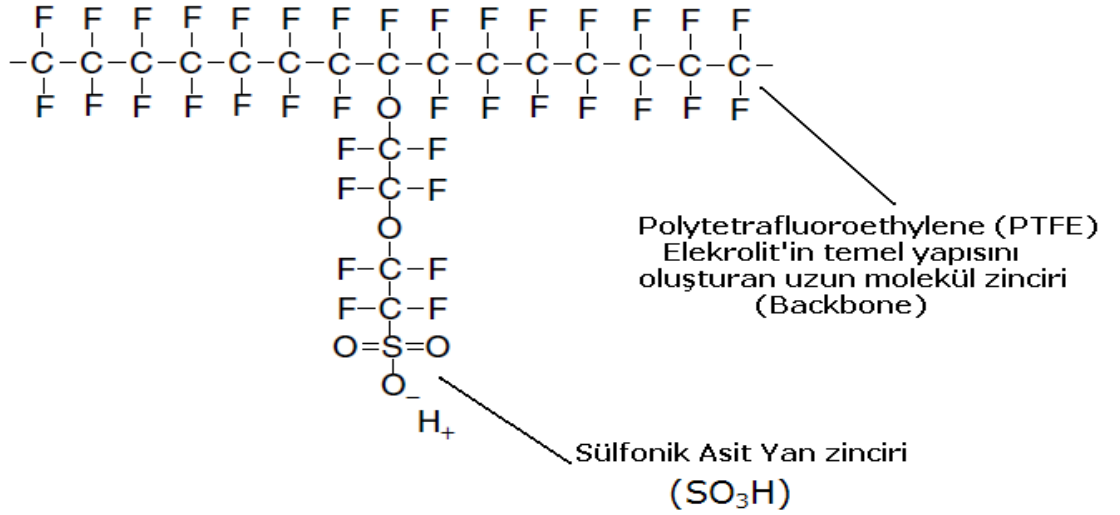
Şekil 3.2. Polimer elektrolit membranının yapısı

PEM yakıt pillerinde elektrolitin temel görevi, pozitif hidrojen iyonlarının ( $H^+$ ) geçişini sağlamak ve elektronların ( $e^-$ ) geçişine engel olmaktır. Böylece hidrojen protonlarının, elektronlarından ayrılması sağlamaktadır. Polimer elektrolit membran; yüksek iyon ( $H^+$ ) iletkenliği, elektriksel yalıtkanlık, asidik özellik, kimyasal ve mekanik olarak kararlı bir yapıya sahip olması gerekmektedir. PEM yakıt pillerinde genellikle, Polimer Elektrolit Membran olarak, perflorocarbon-sülfonik asit iyomeri kullanılmaktadır. Bunlar, tetrafloretilen kimyasal bileşikleri ve çeşitli florosulfon monomerlerinin birleştirilmeleri ile oluşturulmaktadır. Günümüzde membran üretiminde, Dupont firmasının geliştirdiği Nafion™ kullanılmaktadır, bu malzeme bilinen en iyi polimer malzemedir (Şekil 3.2). Şekil 3.3'de Nafion'un genel kimyasal yapısı (omurgası) politetraflouroetilen-asit (PTFE-asit) gösterilmektedir. Burada PTFE-asit iki temel yapıdan meydana gelmektedir (Doyle ve Rajendran, 2003).

- 1) Aşağıda gösterilen PTFE (genellikle teflon) membranın temel yapısını oluşturmaktadır. Bu yapı hidrofobik (su sevmez) olup iyonik iletkenlik özelliği

bulunmamaktadır. Temel özelliği membranın destek yapısını oluşturmakla beraber membrana kararlılık ve dayanıklılık sağlamaktadır.

- 2) PTFE zincirine bağlı Sülfonik asit grubu (SO<sub>3</sub>H) hidrofilik (su sever) özellikte olup iyon iletkenliğini bu yapı sağlamaktadır. Bu yapı iyon iletimi sırasında suyu absorbe ederek İyon (H<sup>+</sup>) iletimini kolaylaştırmaktadır. Burada iyon iletiminde su önemli bir rol oynadığı için suyun sıcaklığı da iyon iletimini etkilemektedir. PEM yakıt pilinde çalışma sıcaklığı suyun kaynama sıcaklığı olan 100 °C geçtiği durumlarda, iyon iletimi olumsuz etkilenmektedir. Dolayısıyla performans düşürücü etki göstermektedir.



Şekil 3.3. PTFE zincirine bağlı sülfonik asit grubu

Genel olarak PEM yakıt pillerinde kullanılan elektrolitte bulunması gereken temel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek iyonik (H<sup>+</sup>) iletkenlik (0.1 ohm<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup> den büyük olmalı)
- Yüksek su tutma kapasitesi ve minimum su geçirgenliği
- Dehidratasyona karşı yüksek direnç
- Düşük gaz geçirgenliği
- Su emilimi nedeniyle minimum şişme
- Yüksek mekanik dayanıklılık
- Oksidasyon, indirgenme ve hidrolize karşı yüksek direnç

- Düşük maliyet (Weber ve Newman, 2003)

Çizelge 3.1’de farklı membran türlerinin özellikleri gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Farklı membran türlerinin karşılaştırılması (Zhang vd. 2004; Jung vd. 2006)

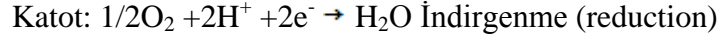
Zar	Kalınlık (µm)	Su miktarı (%)	Geçirgenlik (C/cm)
Nafion 117	175	34	0.020
Nafion 115	100	35	0.050
Nafion 112	60	36	0.100
Dov	125	54	0.114
Flemion	120	35	0.076
BAM3G	12	87	-
NASTAI	170	60	-
NASTATHI	120	30	-
Aciplex-S1104	120	43	0.108
MF-4CK	120	40	-

Ticari boyutta PEM yakıt hücrelerinin yaygın olarak kullanımının önündeki büyük engellerden biri, membranın maliyetidir. Maliyetin yüksek olmasının nedeni, karmaşık yöntemler kullanılarak membran sentezinin yapılmasıdır. En çok kullanılan membran olan Nafion’un maliyeti yaklaşık 800 \$/m<sup>2</sup>’dir. Bu nedenle, membran maliyetinin düşürülmesi yakıt hücrelerinin yaygın olarak kullanımı için çok önemlidir. Diğer taraftan, membranların katottaki oksidasyon reaksiyonuna karşı dirençlerinin düşük olması, sülfonasyon sonrası suya karşı dirençlerinin azalması veya suda çözümleri gibi nedenler membranların, dolayısıyla da yakıt hücrelerinin kullanım ömrünü azaltmaktadır.

### 3.1.2 Elektrotlar (Katalizör Tabakalar)

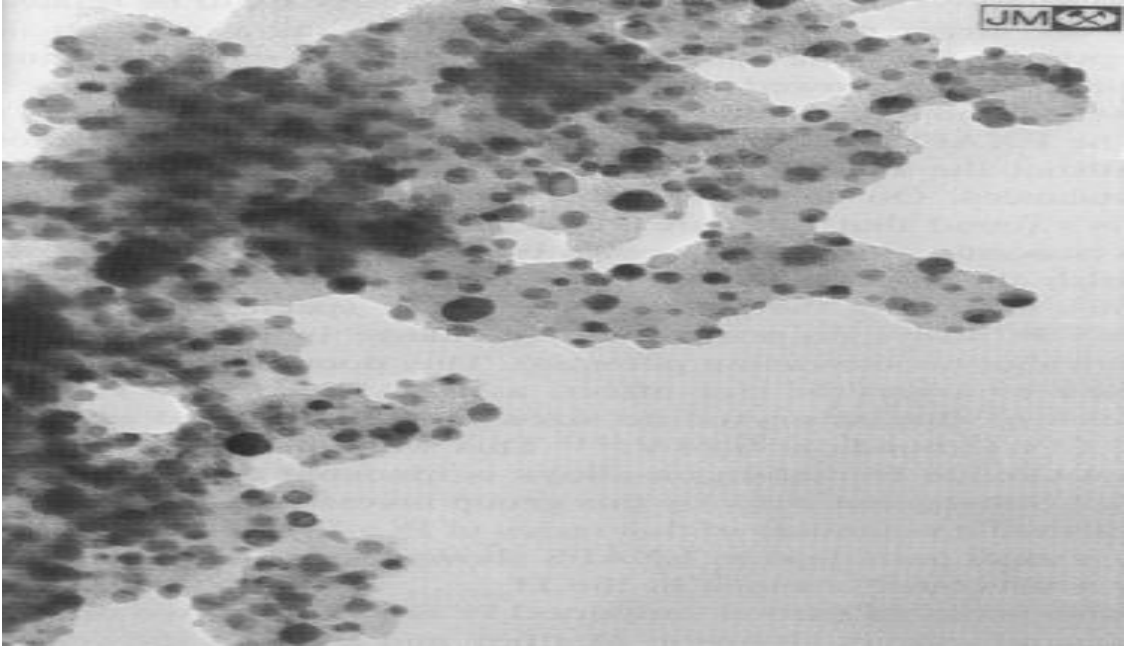
PEM yakıt pillerinde katalizör tabaka, elektrolit ile Gaz difüzyon tabakası arasında preslenmiş biçimde bulunmaktadır. Anot ve katot taraflarının her ikisinde de mevcuttur.

Kimyasal reaksiyonların tam olarak meydana geldiği tabakadır. PEM yakıt pilinde iki ayrı yarı tepkime gerçekleşmektedir.



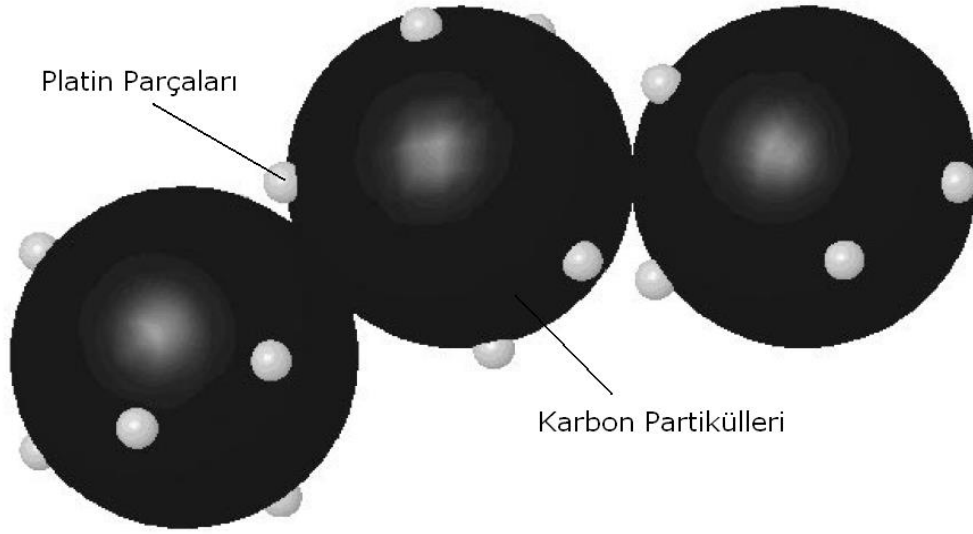
Anot tarafına gelen Hidrojen atomları katalizör tabakada reaksiyona uğrayarak iyonlarına ( $H^+$ ) ve elektronlarına ( $e^-$ ) ayrışır. Elektrolitten geçen hidrojen iyonları katoda ulaşır. Harici devre ile elektronlar katoda ulaşır. Bu anot tarafında meydana gelen olay yükseltgenme reaksiyonu diye bilinmektedir.

Katot tarafında ise kanallardan katoda gelen oksijen atomları, hidrojen iyonları ve elektronlar bir araya gelerek su meydana getirirler. Burada meydana gelen reaksiyon ise indirgenme reaksiyonudur. Şekil 3.4’de reaksiyonların gerçekleştiği katalizör tabakanın mikro yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 3.4.** Katalizör tabakanın mikro yapısı





**Şekil 3.5.** Katalizör tabakanın yapısı (Litster ve Mc Lean, 2004)

PEM yakıt pillerinde meydana gelen reaksiyonların hızlı olabilmesi için çeşitli katalizörler kullanılmaktadır. Bunlardan en popülerleri platindir (Pt). Platin her iki tarafta da (anot ve katotta) kullanılmaktadır. Günümüz teknolojisinde katalizör tabakada  $0.2\text{mg/cm}^2$  Pt kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te karbon destekli bir katalizör tabakada karbon-platin yapısı görülmektedir.

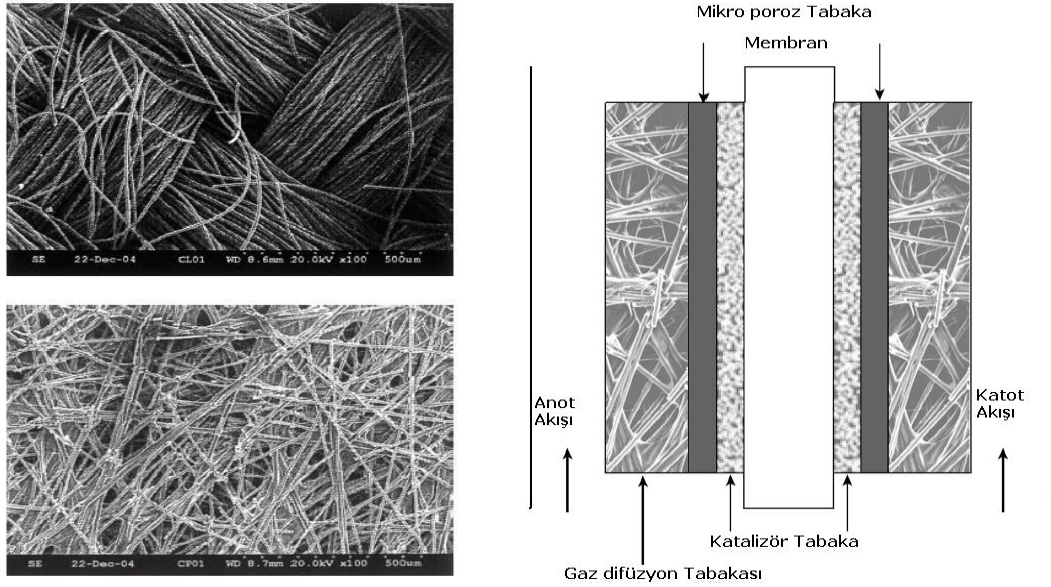
Elektrokatalizörler'in sahip olması gereken özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Geniş yüzey alanı
- Yüksek elektriksel iletkenlik
- Çok iyi elektrokatalitik özellikler
- Uzun süreli mekanik ve kimyasal kararlılık
- Minimum gaz kabarcık problemleri
- Düşük maliyet ve bulunabilirlik
- Sağlık bakımından elverişlilik

### **3.1.3 Gaz Difüzyon Tabakaları (GDT):**

Destek katmanları olarak da bilinen bu katmanlardan biri anot da diğeri katot da bulunmaktadır. Genellikle karbon kâğıt veya karbon bezden imal edilirler. Bu tabakanın en büyük özelliği gözenekli yapısıdır. Bu gözenekli yapı büyüklüklerine göre kendi

içinde makro gözenekli tabaka ve mikro gözenekli tabaka olarak ikiye ayrılmaktadır. GDT'nin membran içindeki görevi reaktant gazların katalizör tabakaya eşit bir şekilde dağılımını sağlamaktır. Böylece reaksiyon meydana gelen aktif alan dengeli bir şekilde kullanılmaktadır. GDT ayrıca PEM yakıt pillerindeki ısı ve su yönetiminde etkin rol oynamaktadır. Karbondan yapılmış elektriksel iletken yapısı sayesinde de katalizör tabakadan akım toplama plakalarına elektronların iletimini sağlayan köprü görevi görmektedir. Şekil 3.6'da GDT'nin yapısı gösterilmiştir. Şekilde sol üst tarafta örgü tipi GDT, alt tarafta ise karışık tip GDT gösterilmiştir. Üst taraftaki karbon bez, alt taraftaki ise karbon kağıt olarak piyasada satılmaktadır.



**Şekil 3. 6.** Gaz difüzyon tabakasının yapısı

Gaz difüzyon tabakasında bulunması gereken özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Uygun elektriksel iletkenlik özelliklerini gösterebilmesi için, elektriksel direnci  $0.08 \Omega.cm$  civarında olmalıdır (Mathias vd., 2003).
- Reaktantların transferi için 0.7-0.8 arasında gözenekliliğe sahip olmalıdır.
- Reaksiyon sonrası ürünlerin hücreden uzaklaştırılması için 5-55 Darcys arası geçirgenliğe sahip olmalıdır.
- Oluşan ısının uzaklaştırılması için  $0.2-1.8W/m.K$  ısı iletkenliğe sahip olmalıdır (Khandelwal ve Mench, 2006).

- Elektrolite mekanik olarak destek sağlayarak dışarıdan gelebilecek zararlı etkilere karşı (bölgesel su birikmeleri, basınç düşümleri) korumaktadır.

### **3.2 Bipolar (Çift Kutuplu) Plakalar**

Yakıt pillerinde, Membran Elektrot Grubu (MEG) için gazların dağılımının sağlanmasında ve oluşan akımın ve suyun toplanmasında kullanılacak MEG'den sonra en önemli sistem parçası Bipolar Plakalardır. Tek MEG'den oluşturulan ve tekli hücre adı verilen yakıt pili hücresinde iki adet bipolar plaka bulunmaktadır. Bu plakaların üzerinde, MEG'in gaz difüzyon tabakasına yakıt ve oksidantı sağlayan akış kanalları bulunmaktadır. Yakıt hücreleri seri olarak birleştirildiğinde akış plakasının bir yüzeyinde anot gazı diğer yüzeyinde ise katot gazı geçmektedir. Aynı plakanın üzerinde hem anot hem katot kutupları bulunduğu için "Bipolar Plaka (Çift Kutuplu Plaka)" olarak adlandırılmıştır. Yakıt pili yığınlarında soğutma işlemi için ekstra plaka kullanılabilir.

#### **3.2.1 Fonksiyonları**

Bipolar plakalar (BPP) PEM yakıt pili yığınlarında performansı doğrudan etkileyen, iyi bir yığın performansı ve çalışma süresi için en önemli parçalardan birisidir. Bipolar plakalar üzerinde bulundukları akış alanları ile elektrotlara reaktant gazlarının temasını sağlarlar ve elektrokimyasal hücre yığınlarında bir hücreden diğerine elektriksel olarak bağlanmalarını sağlarlar. Ayrıca plakalar, mekanik olarak zayıf ince olan MEG'lere yapısal olarak destek sağlamaktadır. Bunun yanında hücrelerde oluşan suyun yönetimini kolaylaştırmak için kullanılmaktadır. Soğutma plakalarının bulunmadığı plakalarda ısı yönetimi sağlarlar. Plakanın malzemesi ve kanal tasarımı bu fonksiyonların geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Kanal tasarımı, düz akış, serpantin akış veya interdigitated akış (engelli akış), içten kolektörlü, içten nemlendirme ve içten soğutmaya kapsamaktadır. BPP tasarımı üzerinde birbirine zıt birçok fonksiyonel gereklilikler bulunduğu için BPP için optimal tasarımın belirlenmesi gerekmektedir.

#### **3.2.2 Özellikler**

Bipolar plakaların en önemli özelliği, fiziksel ve kimyasal karakteristiklerinden ötürü reaktant gazların konsantrasyon kaybı yaşamadan elektrot yüzeylerine düzgün bir

şekilde dağılmasını sağlamaktır. Bunun yanında akım toplamak için yüksek elektriksel iletkenlik değerlerine, yığın bütünlüğü için yüksek mekanik dayanım değerine, güvenli çalışma için reaktant gazları sızdırmama özelliğine, uzun çalışma ömrü için zorlu hücre çalışma şartlarına ve korozyona karşı yüksek dirence, kolay imalata ve düşük maliyete sahip olması gerekmektedir.

### **3.2.3 Kanal Kesiti**

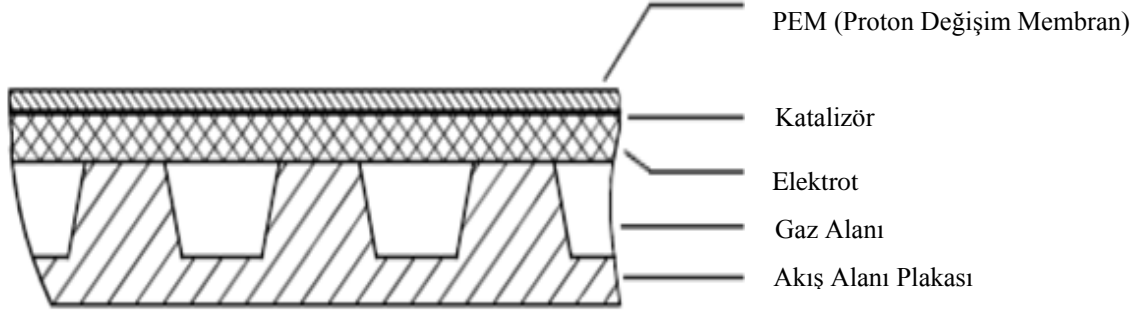
Bipolar plaka üzerindeki akış kanalları genellikle kare kesitli olmakla beraber ikizkenar yamuk, üçgen, yarım çember gibi tasarımlar üzerine çalışmalarda yapılmıştır (Hontanon, 2000). Akış kanalı, sürtünmeden kaynaklanan basınç düşümlerinin mümkün olan en düşük seviyede olması için 1-2 mm kanal genişliği ve derinliğinde imal edilmektedir. Bipolar plaka kanal imalatı için yaygın olarak frezeleme kullanılmaktadır. İkinci yöntem olarak yüksek sıcaklık ve basınçta kalıp ile imal etme yöntemi kullanılmaktadır.

Literatürde yapılan simülasyon çalışmalarında kanal derinliği, kanal genişliği ve taban genişliği için sırasıyla 1.5, 1.5, 0.5 mm değerlerine yakın olduğu rapor edilmiştir (Kumar vd., 2003). Kanaldaki taban genişliğinin azalması anottaki hidrojen konsantrasyonunu arttıracaktır. Bunun için sıfıra yakın taban genişliklerine sahip üçgen ve yarı çember kesit alanlı akış kanalında hidrojen anot yüzeyine daha yoğun temas edebilmektedir. Pratikte bu tasarım önerilerini kısıtlayan bazı durumlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin üçgen kesitli veya taban genişliği sıfıra yakın olan bir kanal tasarımında, kontak basıncının yüksek olduğu bölgelerde MEG, kanal içine doğru buruşarak akış direnci oluşturduğu gibi akım toplamaya da engel olan boşluklar oluşabilmektedir.

### **3.2.4 Bipolar Plaka Üzerinde Akış Alanı Dizaynı**

Bipolar plakalar, akış kanalları ile reaktantların dağılımını ve katalizör tabakasına ulaşmalarını sağlarken, aynı zamanda elektrik akımının iletimi sağlamaktadır. Bipolar plakanın elektrik akımının iletimi için bazı bölgelerden elektroda temas etmesi gerekmektedir. Açık gaz kanalından reaktantların aktarımı sağlanırken, elektroda temas eden yüzeylerden de elektrik akımının iletimi sağlanmaktadır. Bu teması sağlayan ve

performansın bu temasa bağlı olduğu birçok parametre bulunmaktadır. Şekil 3.7’de bipolar plaka ile temas halindeki MEG’in kesiti gösterilmiştir.



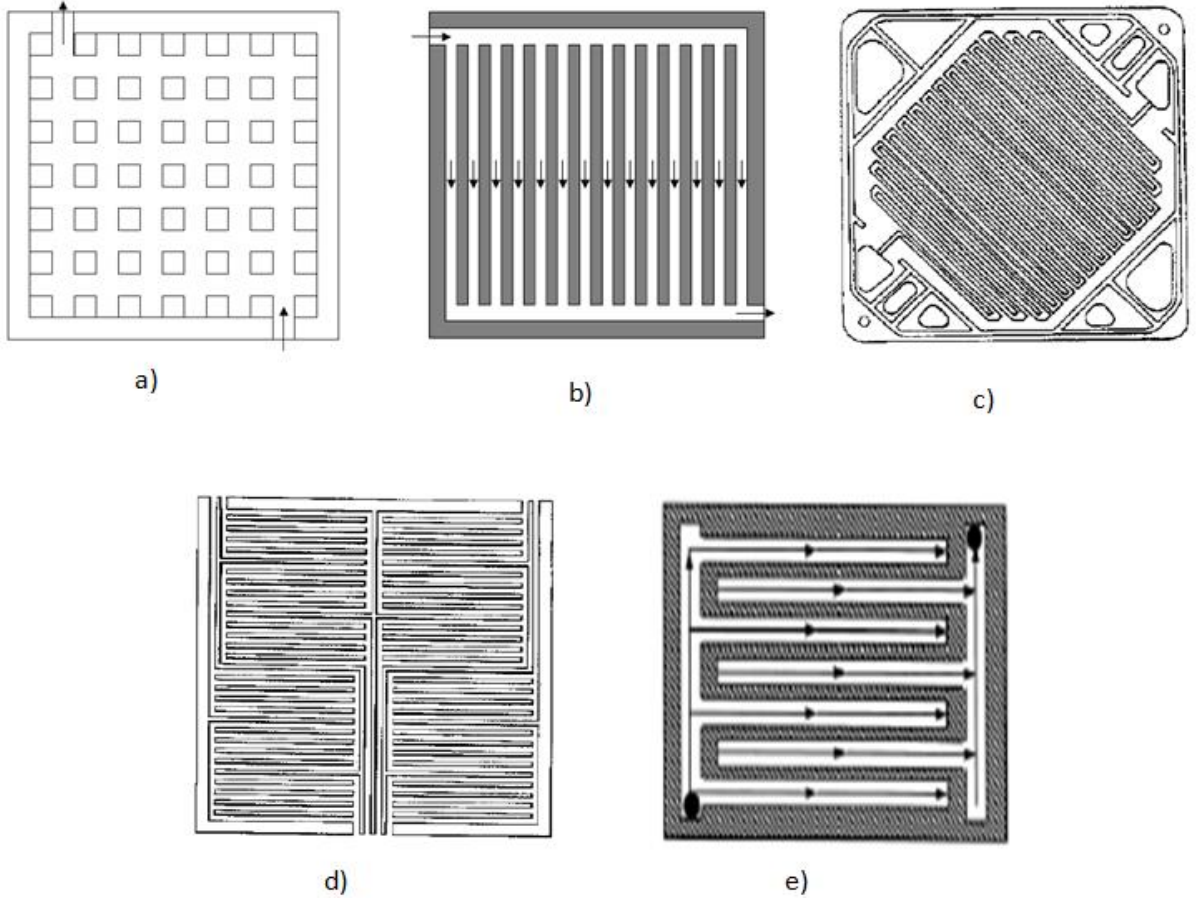
**Şekil 3.7.** Bipolar plaka ile temas halindeki MEG'in kesit görüntüsü

Bipolar plakalarda yakıt ve oksitleyicinin etkin bir şekilde dağılımını sağlamak için akış alanı tasarımı son derece önemlidir. Aşağıda tasarımların bazıları özetlenmiştir.

- a. **Pin-Tipi Akış Alanı (Şekil 3.8.a):** Bu tasarımda katot ve anot plakaları, dairesel veya dikdörtgen şeklindeki çıkıntılardan oluşmaktadır. Bu tasarımda basınç düşümü çok azdır (Granata ve Woodle, 1987). Reaktantlar en az direnmeyle karşılaştıkları yoldan gitme eğilimindedirler. Bu durum madde akışının olmadığı ölü bölgelerin oluşmasına, maddelerin düzgün dağılmamasına, dolayısıyla da düşük hücre performansına neden olmaktadır.
- b. **Düz veya Paralel Tasarım (Şekil 3.8.b):** Giriş ve çıkışlara bağlı birçok sayıda ayrı paralel akış kanalından meydana gelmiştir. Yakıt pillerinde uzun süreli çalışmalar için düşük ve kararsız voltaja sebep olmaktadır. Bu tasarımda gaz ve sıvı dağılımı homojen olmamaktadır.
- c. **Serpantin Akış Alanı (Şekil 3.8.c):** Suyun belli bölgelerde tıkanma yapmasını engellemek için akış kanallarının sürekli olduğu bir tasarımdır. Bu tasarım, reaktantların tüm aktif alan boyunca ilerlemesini sağlar. Böylece reaktantlar için ölü alan kalmamaktadır. Yüksek akım yoğunlukları için tasarıma birbirine paralel birkaç akış kanalı açılabilir.

- d.** Cavalca Tasarımı (Şekil 3.8.d): Seri ve paralel bağlantılarla bölümlere ayrılmıştır. Ölü akış alanı yoktur. Reaktantlar aktif alan boyunca düzgün dağılmaktadır. İlk üç çeşit akış alanı tasarımına göre daha avantajlıdır.
- e.** Interdigitated Akış Alanı (Şekil 3.8.e): Interdigitated akış alanı yukarıda belirtilen klasik akış alanlarına göre çok farklı bir tasarıma sahiptir. Kanalların uçları kapalıdır, bu yüzden reaktanların üzerinde bir basınç oluşur. Reaktantları elektrot yüzeyine doğru iter, bundan dolayı yüksek güç yoğunluğunda yüksek performans elde edilebilmektedir. Fakat bu tasarımda büyük basınç kayıpları ve buna bağlı olarak yüksek pompalama ihtiyacı doğmaktadır. Ayrıca oluşan suyun tahliyesi için bazı sıkıntılar oluşmaktadır. Bu nedenle küçük boyutlu yığınlar için uygundur (Spurrier vd., 1986).

Yukarıdaki akış alanları literatürde rapor edilen tasarımlardır. Yığın üretici firmalar, akış alanlarının tasarımlarını gizlemektedirler. Fakat yine de patent metinleri akış alanı tasarımı konusunda ipuçları vermektedir.

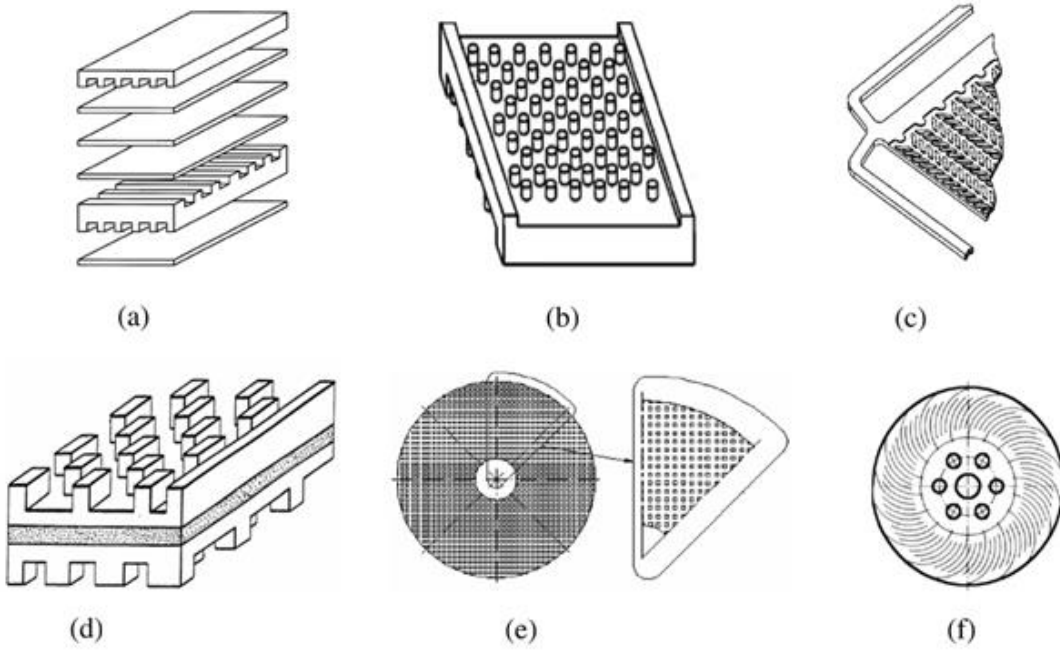


**Şekil 3.8.** Bipolar plaka akışalanı tasarımları a) Pin - Tipi (Reiser ve Sawyer, 1988; Reiser, 1989) b) Düz ve Paralel (Pollegri ve Spaziante, 1980; Voss ve Cohw, 1993) c) Serpentine (Wilkinson vd., 1996) d) Cavalca tasarımları (Cavalca vd., 1997) e) Interdigitated (Ernst ve Mittleman, 1999)

Bipolar plakalar üzerine soğutma amaçlı da ayrı kanallar açılmaktadır. Küçük yakıt pilleri ve elektrolizörler için ayrı bir soğutma kanalına ihtiyaç yoktur (Cavalca vd., 1997).

Akış alanı tasarımlarının tek tek deney düzeneklerinde denenmesi hem yüksek maliyetli, hem zaman alıcı hem de çok çaba harcanması gereken bir çalışmadır. Bu yüzden bu tasarımlar öncelikle CFD (Computational Fluid Dynamics) tekniği ile kanal geometrisi tespit edilebilmektedir. Yukarıdaki tasarımlar genellikle PEM ve metanol yakıt pillerindeki çalışma şartlarına uygun olarak tasarlanmıştır.

Bu tasarımlardan hareketle literatürde yakıt pilleri için birçok kanal tasarımı rapor edilmiştir. Bu tasarımların diğerlerinden farkı yüksek sıcaklıktaki basınç düşümü ve akış hareketine uygun olarak CFD analizlerinin yapılarak belirlenmiş olmalarıdır. Ashok ve Singaravelu (1999) yakıt pilleri için en çok yaygın kullanılan düz akış tasarımı kullanmıştır. Li vd. (2006) reaktantlar için akış alanını maksimize etmek ve kütle transferini arttırmak için dairesel tip pin tasarımı önermiştir. Haltiner ve Mukerjee (2005) yakıt pili içindeki yakıt ve oksidantın akışını optimize etmek için açılı baklava dilimleri şeklinde bir tasarım kullanmıştır. Nguyen ve Craig (1994) düz şekilli rib tasarımı önermiştir. Bedogni vd. (2007) dairesel tip MEG için daha küçük rib tasarımlı akış dizaynı kullanmışlardır. Bossel (2003) dairesel MEG için spiral tipte paralel akış kullanmıştır. Şekil 3.9’da bu tasarımlara ait şekiller gösterilmiştir.



**Şekil 3.9.** Düzlemsel yakıt pilleri için geliştirilmiş bazı akış tasarımları a) Düz Akış (Ashok ve Singaravelu, 1999) b) Dairesel Tip Pin (Li vd., 2006) c) Açılı Baklava (Haltiner ve Mukerjee, 2005) d) Düz Şekilli Rib (Nguyen ve Craig, 1994) e) Küçük Rib (Bedogni vd., 2007) f) Spiral Tip (Bossel, 2003)



Tüm bu tasarımlarda kanal içerisindeki akış dağılımını geliştirmek ve basınç düşümünü minimize etmenin ortak amaç olduğu belirlenmiştir.

### **3.3 Sıkıştırma ve Akım Toplama Plakaları**

Yakıt pillerinde oluşan elektriksel akımı toplamak için yakıt pili yığınının her iki kutbuna metal akım toplama plakası yerleştirilir. Yakıt pilinde üretilen akımı, kayıpsız toplayabilmek için akım toplama plakalarının elektriksel iletkenliğinin ve yüzeysel akım toplama yaptığı için yüzey kalitesinin iyi olması gerekmektedir. Yakıt pili uygulamalarında akım toplama plakası malzemesi olarak; kolay temin edilebilirliği, kolay imalatı ve yüksek elektriksel iletkenliğinden dolayı, yaygın olarak, bakır kullanılmaktadır.

Bakır plakalar yüzeylerinde, zamanla oksit tabakası oluşturmakta ve yüzeyde elektriksel direnç artmaktadır. Bu durumu engellemek için bakır akım toplama plakaları korozyon direnci yüksek bir malzeme ile kaplanmaktadır. Kaplama işleminde yaygın olarak altın, gümüş ve nikel gibi malzemeler kullanılmaktadır.

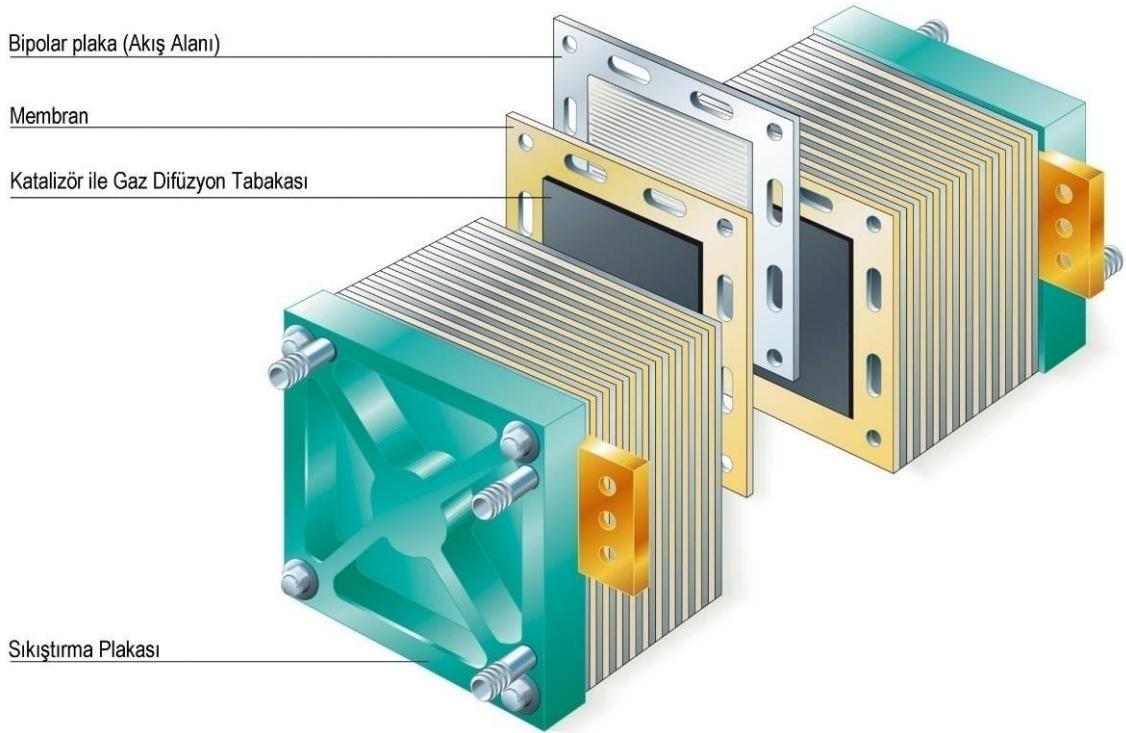
Yakıt pillerinde, bütün yığın elemanlarını bir arada tutmak ve yığın elemanlarının görevlerini yerine getirebilmesi için belli sıkıştırma oranında basınç uygulamak amacı ile sıkıştırma plakaları kullanılmaktadır. Sıkıştırma plakası olarak genellikle metal malzemeler kullanılmaktadır. Ancak yığın ağırlığını azaltmak için hafif metallerin (alüminyum vb.) veya kompozit sert plastik malzemelerin de kullanıldığı bilinmektedir. Sıkıştırma plakası olarak hafif metallerin veya kompozit sert plastik malzemelerin kullanılması durumunda mekanik stresten kaynaklanacak bükülme, eğilme vb. problemler ortaya çıkabilmektedir.

### **3.4 PEM Yakıt Pillerinde Yığın Elemanları**

PEM yakıt pillerinde bir hücrenin çıkış gerilimi teorik gerilim olan 1,23 Volt'tan daha düşüktür ancak birçok çalışmada 1,23 Volt'tan daha büyük değerlere ihtiyaç vardır. Yakıt hücrelerinin seri olarak birbirine bağlanması ile istenilen gerilim değerleri elde edilebilmekte olup, oluşturulan sisteme “yığın” adı verilmektedir.

Dış devre yardımıyla yığının son iki plakası, birbirine bağlanarak devre tamamlanmış olur. Bir yakıt pili yığını birkaç hücreden oluşacağı gibi, seri bağlanmış daha fazla hücrelerden de oluşabilir. Buradaki sayı ihtiyaç duyulan güç değerine göre belirlenmektedir.

Yakıt pili yığın elemanları, tek hücreyi oluşturan elemanlar ile aynıdır. Her iki başta akım toplama plakaları ve sıkıştırma plakaları bulunmaktadır. Yakıt ve oksidantın hücrelere dağılımı Şekil 3.10'da da görüldüğü gibi yığının birleşmesinden doğan kolektörden sağlanmaktadır.



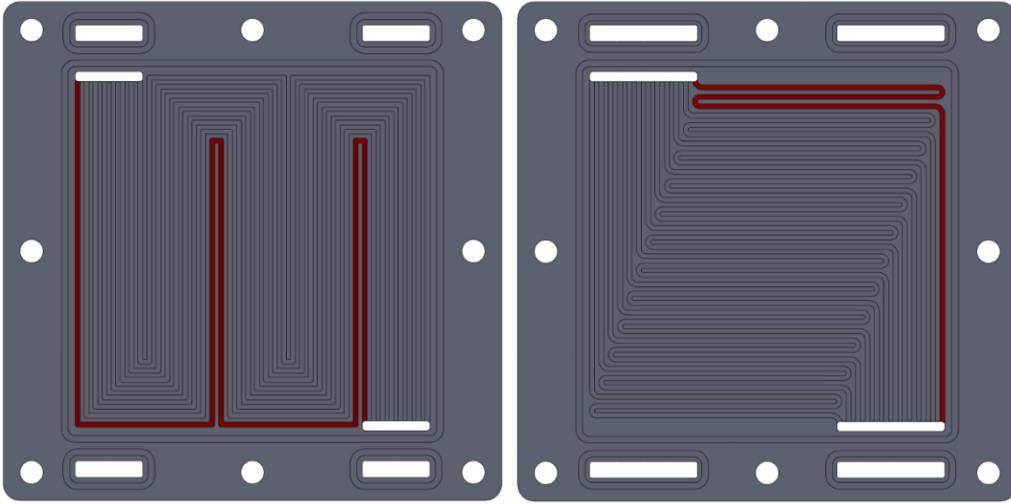
**Şekil 3.10.** Yakıt pili yığın elemanları

## BÖLÜM IV

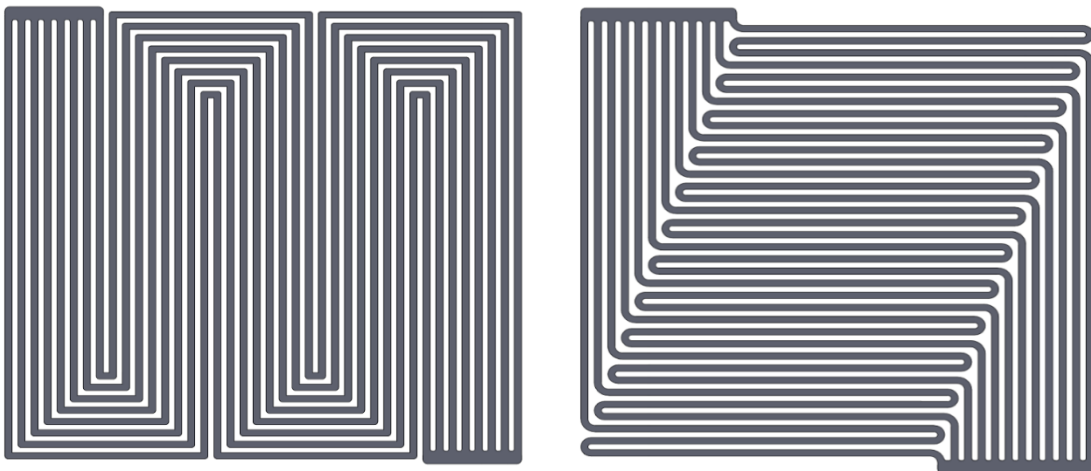
### SAYISAL ÇALIŞMA

#### 4.1 Model Oluşturma

Sayısal çözümler Comsol 4.3b akışkanlar mekaniği paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Comsol paket programı bilinen diğer hesaplamalı akışkanlar mekaniği paket programlarından farklı olarak, kontrol hacim metodu ile çözüm yerine sonlu elemanlar metodu ile sayısal çözümler yapmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan serpantin ve yeni tasarıma ait akış geometrilerinin CAD tasarımları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



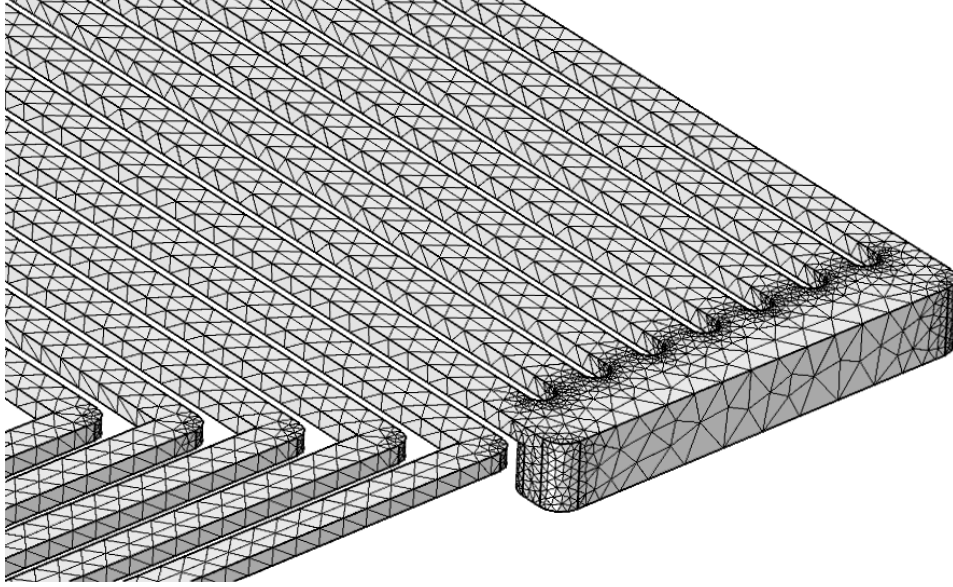
Şekil 4.1. Serpantin (a) ve yeni tasarıma (b) ait akış geometrilerinin CAD çizimleri



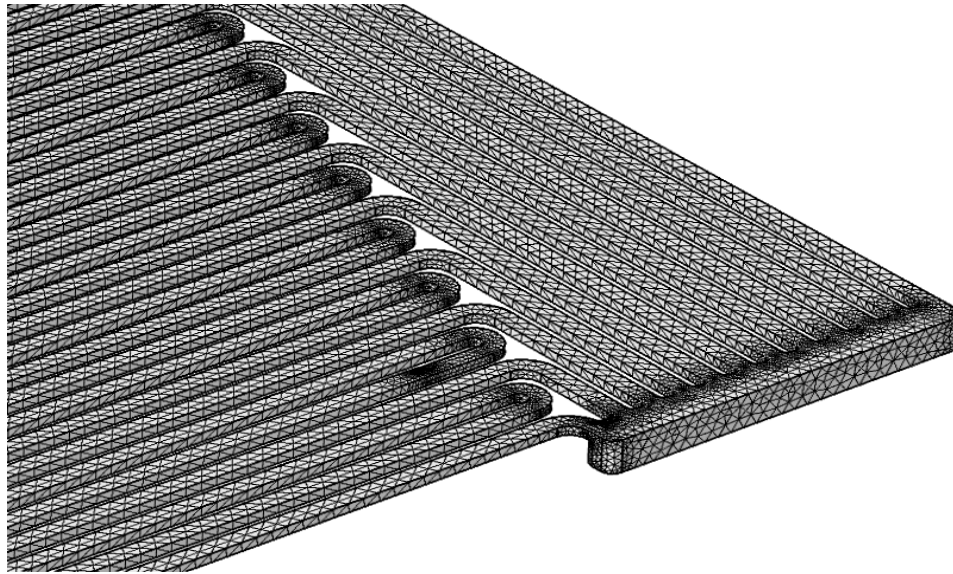
Şekil 4.2. Serpantin (a) ve yeni tasarıma (b) ait akış geometrilerinin COMSOL tasarımları

## 4.2 Ağ Yapısı ve Sınır Şartları

Sayısal çalışmada gerçek boyutlu akışın hız ve basınç dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4’de akış tasarımlarının geometrileri ve ağ yapısı oluşturulmuş halleri gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de ağ yapıya ait özellikler verilmiştir. Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de akış analizi yapılan geometrilere ait hız ve basınç dağılımları verilmiştir.



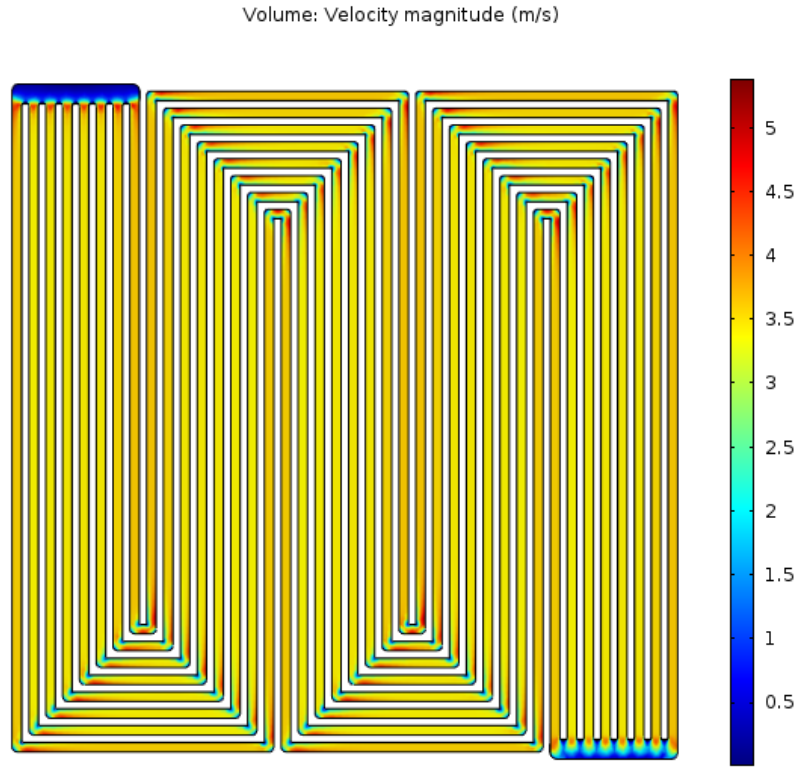
Şekil 4.3. Serpantin tasarım ağ yapının geometrisi ve ağ yapısı



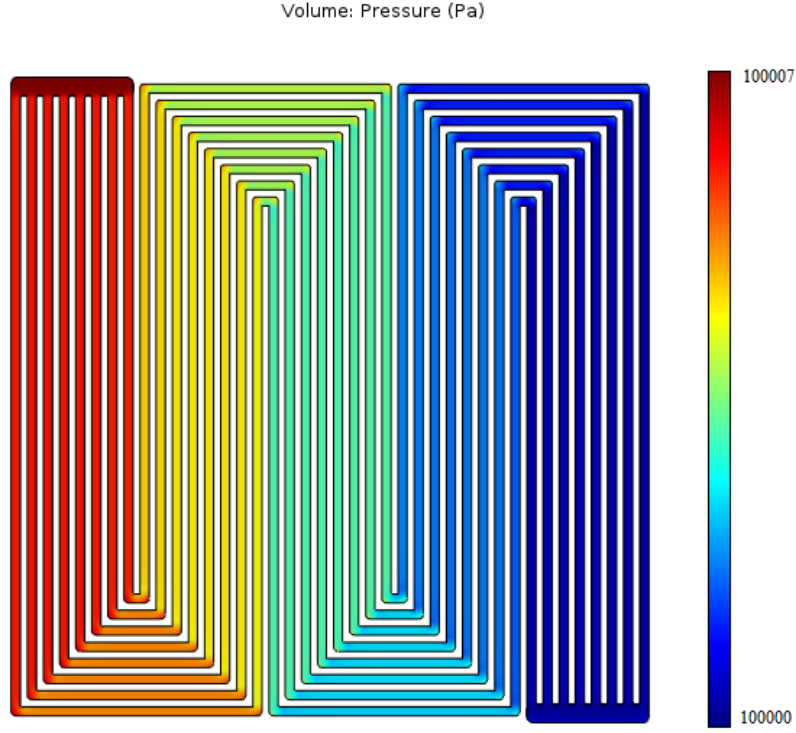
Şekil 4.4. Yeni tasarım ağ yapısının geometrisi ve ağ yapısı

**Çizelge 4.1.** Tasarımların ağ yapısına ait özellikleri

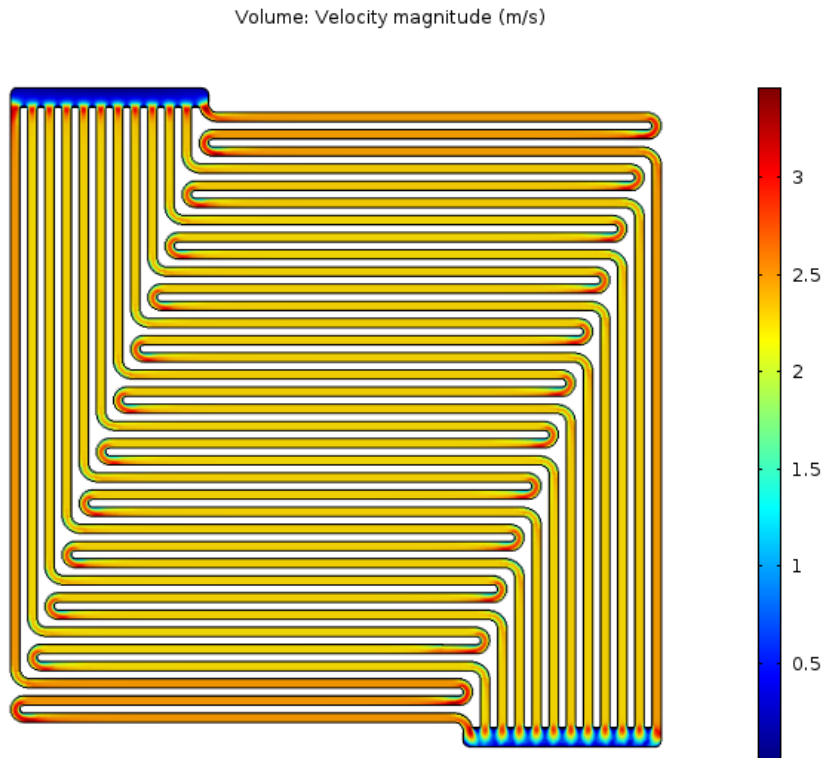
	Serpantin ağ yapısı	Yeni tasarım ağ yapısı
Elemanların toplam sayısı	76037	102246
Üçgen elemanlar	56146	52356
Kenar elemanlar	17004	14370
Köşe elemanlar	532	592
Minimum eleman kalitesi	0.01089	0.04384
Ortalama eleman kalitesi	0.6657	0.6627
Eleman hacim oranı	4.64E-4	1.266E-4
Ağ hacmi	5.448E-6 m <sup>3</sup>	5.198E-6 m <sup>3</sup>
Maksimum büyüme oranı	5.92	3.755
Ortalama büyüme oranı	1.863	1.729



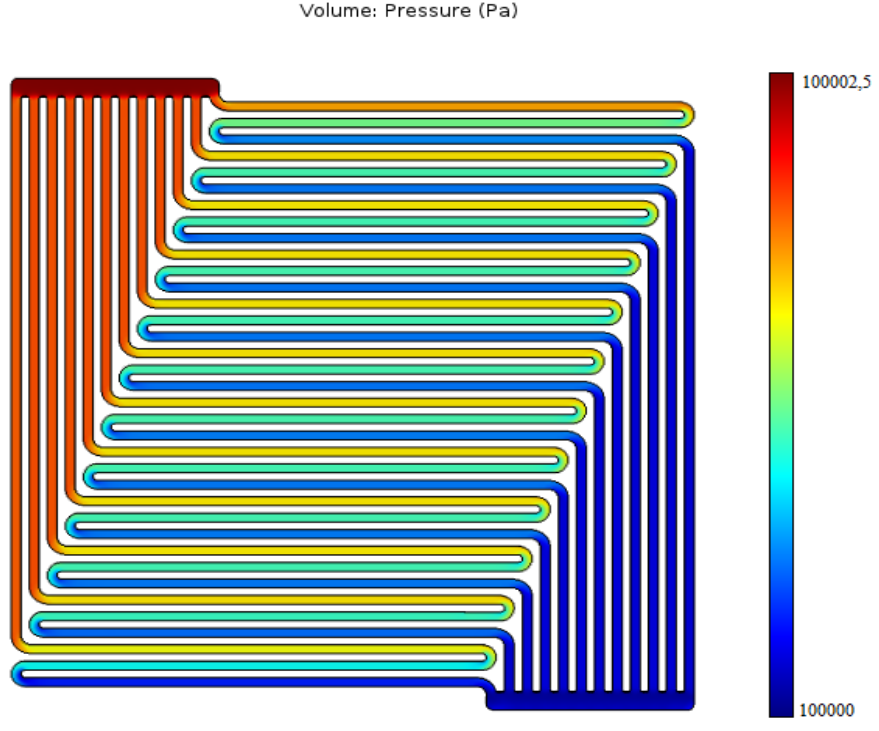
**Şekil 4.5.** Serpantin akış tasarımına ait hız dağılımı



Şekil 4.6. Serpantin akış tasarımına ait basınç dağılımı



Şekil 4.7. Yeni tip akış tasarımına ait hız dağılımı



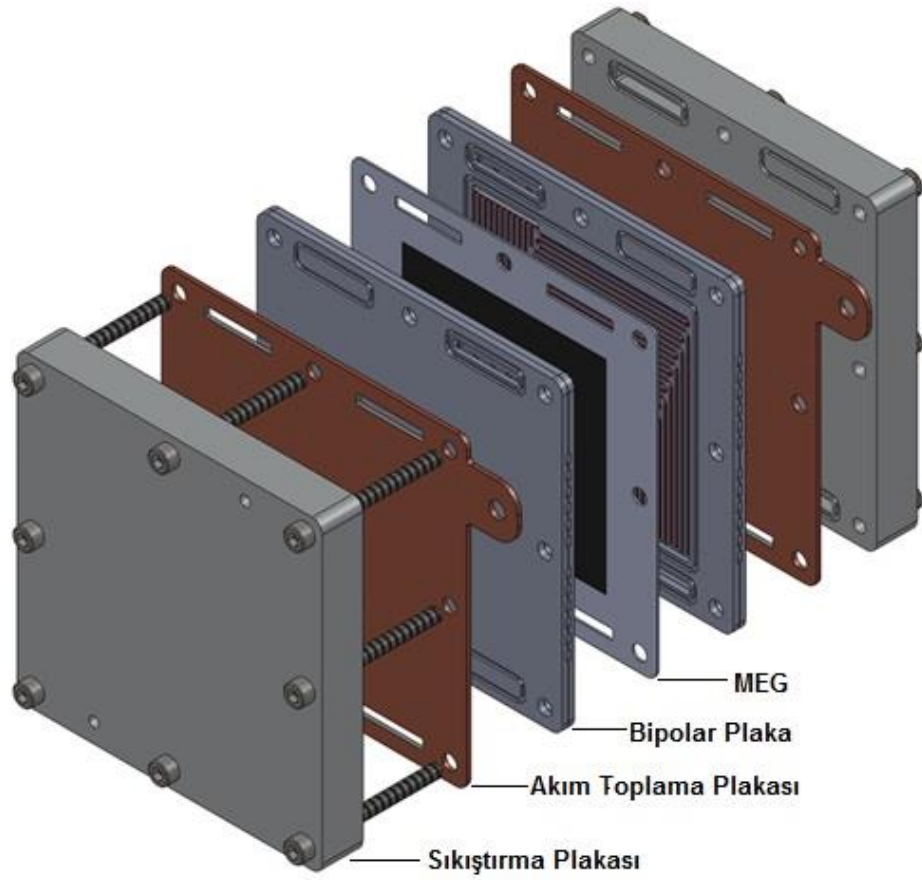
**Şekil 4.8.** Yeni tip akış tasarımına ait basınç dağılımı

## BÖLÜM V

### DENEYSEL ÇALIŞMA

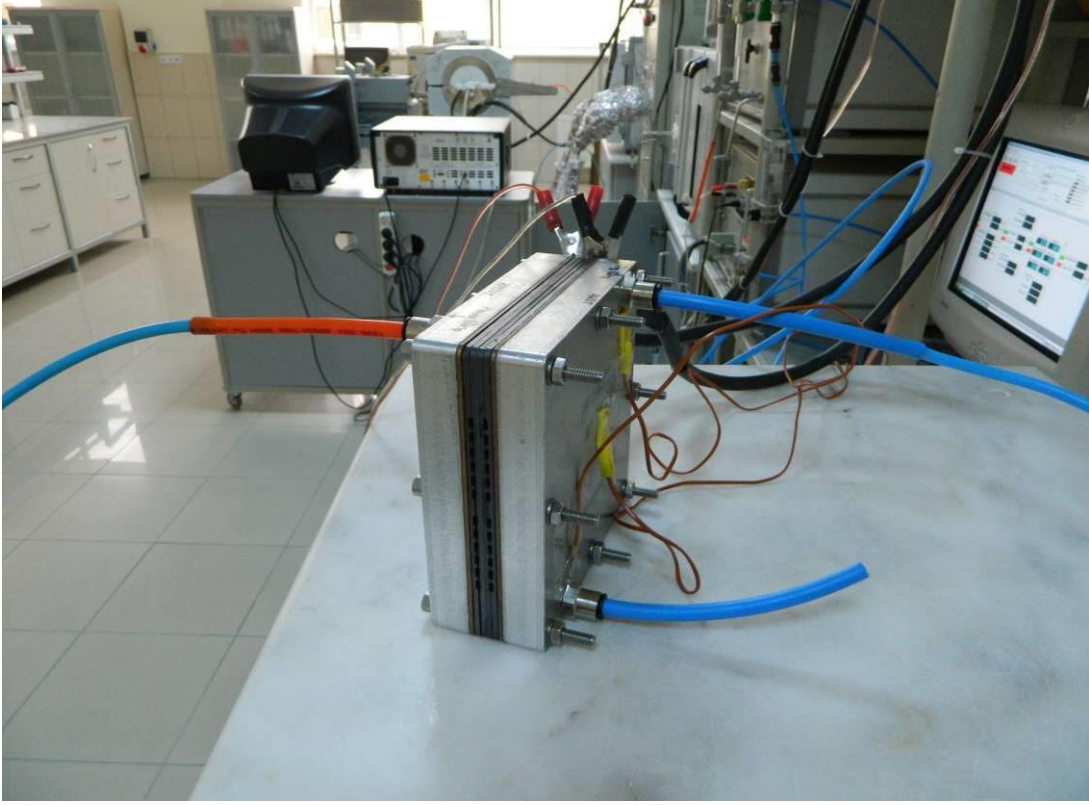
#### 5.1 PEM Yakıt Pili Hücre Geliştirilmesi

Solid Works katı modelleme programı kullanılarak PEM yakıt pili hücresi tasarlanmış ve CNC tezgahlarında imal ettirilmiştir. Tasarımlar Şekil 5.1 ile Fotoğraf 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Şematik gösterilmiş yakıt pili hücresi





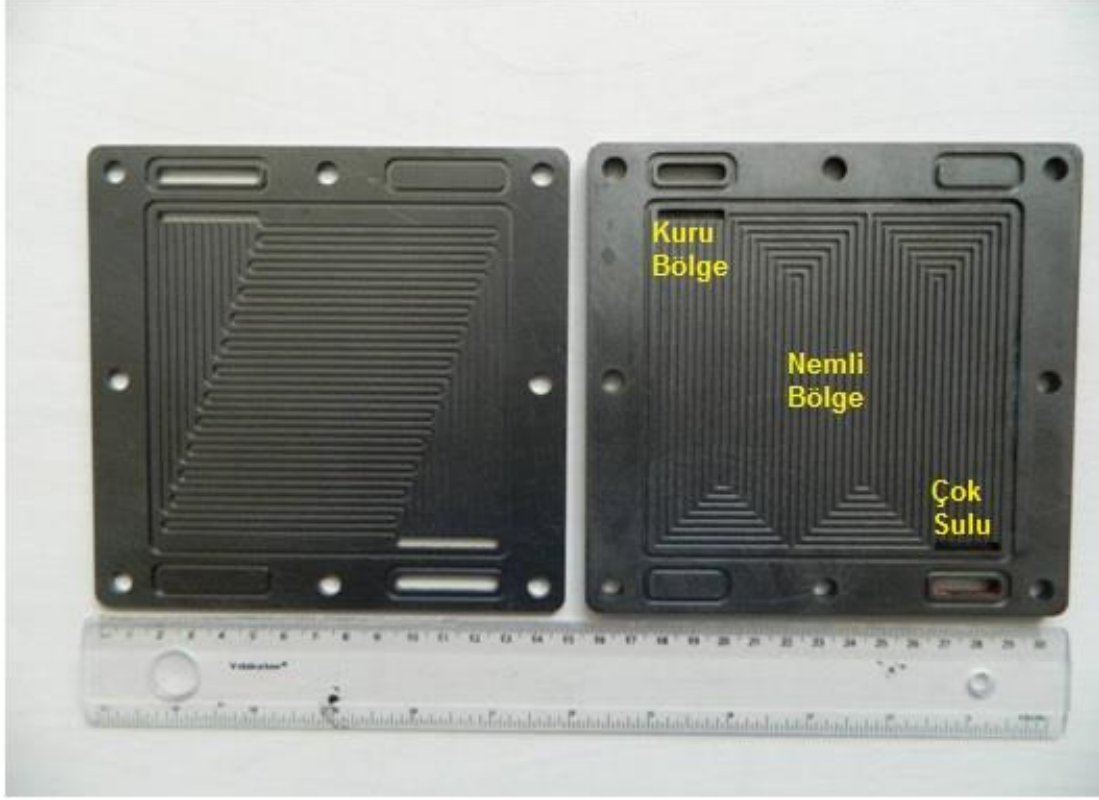
**Foto 5.1.** Montajı yapılmış tek hücrel yakıt pili

PEM yakıt pili temel olarak, grafit/alüminyum plakalar, membran elektrot grubu (MEG), sızdırmazlık elemanları, akım toplama plakaları, alüminyumdan üretilmiş sıkıştırma plakaları ve sıkıştırmak için kullanılan cıvata-somunlardan oluşmaktadır.

Hücre performans testlerinde, PaxiTech Fuel Cells Systems and Technologies firmasından temin edilen 7 tabakalı MEG kullanılmıştır. MEG'in aktif alanı  $100 \text{ cm}^2$  olup, katot ve anot tarafında screen-printing yöntemi kullanılarak, Pt/C Nafion membrana preslenerek elde edilmiştir. 7 tabakalı MEG; 1 elektrolit, 2 katalizör, 2 GDT ve 2 sızdırmazlık elemanından oluşmaktadır.

PEM yakıt hücresinde, öncelikle boyutları aynı, kanal tasarımları farklı, klasik serpantin tip ve yeni tasarımı bipolar plakalar kullanılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Tek hücre deneyleri kompozit grafit plakalar kullanılarak yapılmıştır. Fotoğraf 5.1'de grafit plakalardan oluşturulmuş tek hücreli yakıt pili görülmektedir. Plakalar Shunk firmasından temin edilmiş olup, akış kanalları CNC ile işlenmiştir. Daha sonrasında ise boyutları ve kanal tasarımları aynı olan grafit ve alüminyum plakalar kullanılarak

oluşturulan yakıt hücrelerinin deneysel sonuçları incelenmiştir. Plakaların boyutu 15x15cm, kalınlığı 3 mm, kanal derinlikleri 1 mm ve genişlikleri ise 1,4 mm olarak imal edilmiştir. Bipolar plakaların kanal dizaynı Fotoğraf 5.2’de gösterilmiştir.



**Foto 5.2.** Sol tarafta yeni tip, sağ tarafta klasik tip (serpantin tip) bipolar plaka görünümü

Akış plakalarının performans ve soğutmaya doğrudan etki etmesinin yanı sıra su yönetimi içinde oldukça önemlidir. Literatürde en yaygın tasarım olarak kullanılan serpantin akış ile yeni geliştirilen akış plakasının performansları karşılaştırılmıştır. Serpantin akış plakalarında su yönetiminin iyi olmamasından dolayı, konsantrasyon kaybı ve basınç düşüşü oluşmaktadır. Yeni tasarımda suyun yüzey alanda homojen nemlilik sağlaması hedeflenmiştir. Fotoğraf 5.2’de gösterildiği gibi klasik serpantin akışta giriş bölgesi çok kuru, orta bölgeler nemli, çıkış bölgesi ise çok suludur. Bu nedenle çıkış ve giriş bölgelerinde performans düşüktür. Bu sorunun çözümü için paralel akışlı geometri önerilmektedir. Fakat bu tasarımlarda ise akış kanallara homojen dağılmadığı gibi yakıtın gideceği mesafe kısaldığı için akış alanı hem kuru, hem de yeterince difüzyon zamanı olmadığı için performans yine düşük çıkacaktır. Yeni

tasarımda serpantin akışın kıvrımlı yapısından doğan avantaj ile paralel akışın su yönetim dağılımı birleştirilmiş ve ortaya yeni bir akış tasarımı çıkarılmıştır.

### **5.1.1 Test İstasyonu**

Yakıt pili testlerinde Electrochem firmasından alınmış yakıt pili test istasyonu kullanılmıştır. Test istasyonu temel olarak iki üniteden oluşmaktadır. Bunlar yakıt piline uygulanan yükü elektronik olarak ayarlayan ve gaz akışını kontrol eden ünitelerdir. Bilgisayar yardımıyla kontrol edilen üniteler, bütünüyle otomatik kontrollüdür.

Güç istasyonu; nemlendirme, sıcaklık operasyon kontrollü ve gaz yönetimi kontrollerinin datalarını veren bütünleşik laboratuvar sistemidir. Bu sistemde;

1. Birden fazla gaz yönetim birimi
2. Güç istasyonu sistem kontrolü (ve yük)
3. Bütünleşik güç istasyonu yazılımı
4. İlave opsiyonel parçalar bulunmaktadır.

Fotoğraf 5.3'de test istasyonunun genel görünümü gösterilmiştir. Visual basic tabanlı yazılım kullanılarak, yakıt pili test istasyonunun kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 5.2'de yazılıma ait görünüm gösterilmiştir.

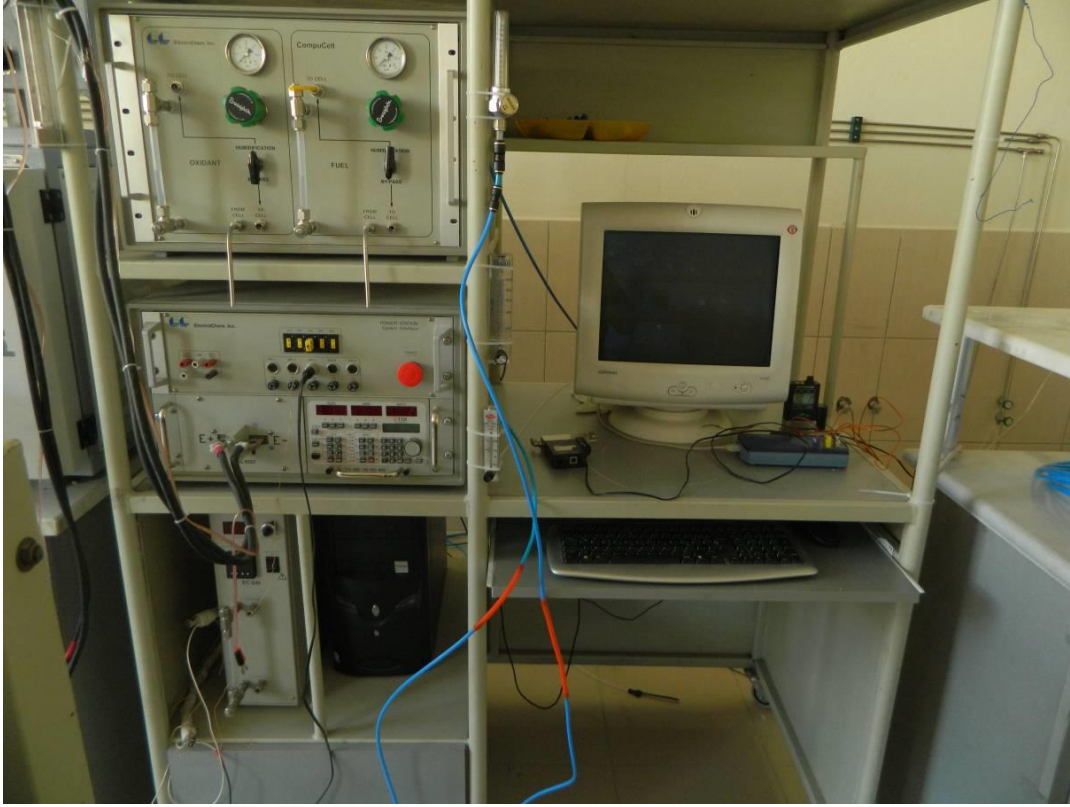
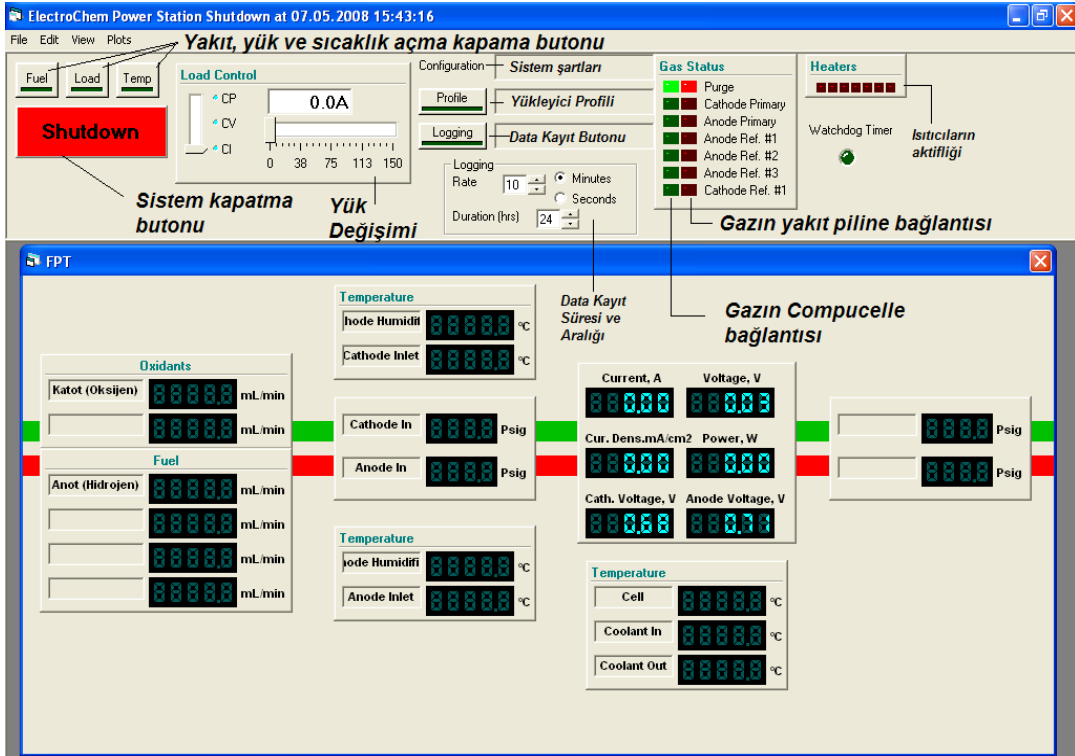


Foto 5.3. Yakıt pili test istasyonu

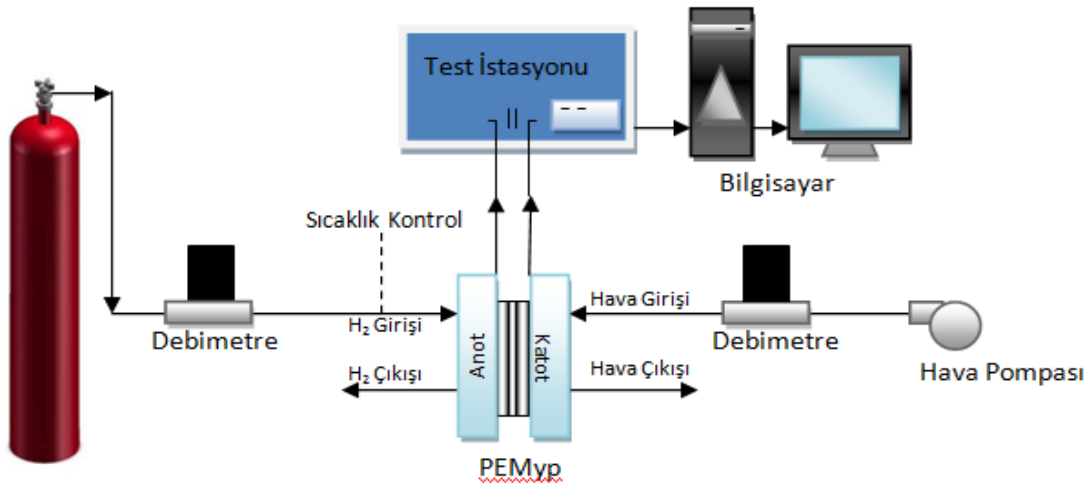


Şekil 5.2. Visual basic tabanlı yazılımın görünümü

### 5.1.2 Deneysel DüzeneK

Yakıt pillerinin hücre performansı, akış kanalının tasarımı, kullanılan MEG'in kalitesi, mekanik ve elektriksel kontak vb. gibi birçok parametreye bağlıdır. Bazı malzemeler yakıt pillerindeki bilimsel çalışmaların çoğalmasi ile beraber standart olarak kullanılmaya başlanmıştır. MEG üreten firmalar tarafından, yakıt pillerindeki karbon bezlerin, sıcak baskı ile membrana birleşik olarak imal edilmesi, conta kalınlıkları ile malzemesinin membrana ve çalışma ortamına göre (basınç, sıcaklık vb.) standartlaşması buna örnek gösterilebilir.

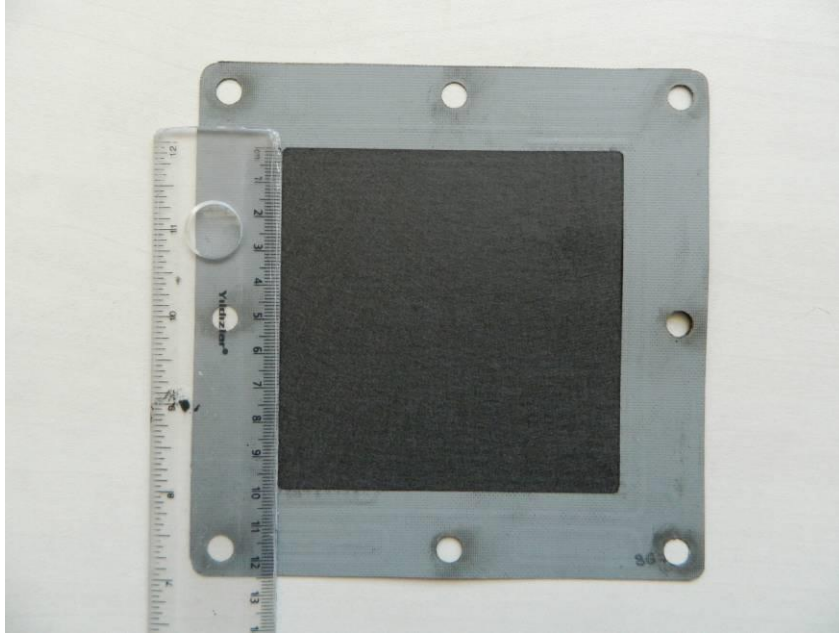
Karbon difüzyon tabakası ile bipolar plaka arasındaki temasın çok iyi durumda olması halinde, yakıt pilinde akım etkin bir şekilde toplanabilmektedir. Bu temas conta malzemesinin fiziksel özelliklerine ve yakıt pilinin montaj basıncına bağlıdır. Sıkıştırmanın aşırı olması halinde, membranın gözenekliliği azalarak kütle transfer direnci artmakta ve hücrenin performansı buna bağlı olarak düşmektedir. İnce conta kullanılması halinde sızdırmazlığı sağlamak amacıyla yakıt pili hücresindeki sıkıştırma basıncı artırılmak durumunda kalınmakta ve bundan dolayı karbon difüzyon tabakasının üzerine düşen yük artmaktadır. Bundan dolayı hücre performansını ve sıkıştırma basıncını etkileyen conta malzemesinin seçimi büyük önem arz etmekte olup, uygun conta malzemesi ve kalınlığı seçilmelidir.



Şekil 5.3. Deneysel kurulum diyagramı

Şekil 5.3’de deneysel akış diyagramı gösterilmiştir. Yakıt piline test istasyonundan gönderilen gazlar debimetreler ile kontrol edilerek gönderilmektedir. Yakıt piline ayarlanabilir bir kompresörden sağlanan, 0-10000 ml/dk’lık hava debisi, bilgisayar kontrolündeki debimetreden geçerek verilmektedir. Çalışmalar sırasında hava ve hidrojen debileri, hava giriş nemliliği, hidrojen giriş nemliliği, hücreye ait voltaj, akım ve sıcaklık değerleri ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir.

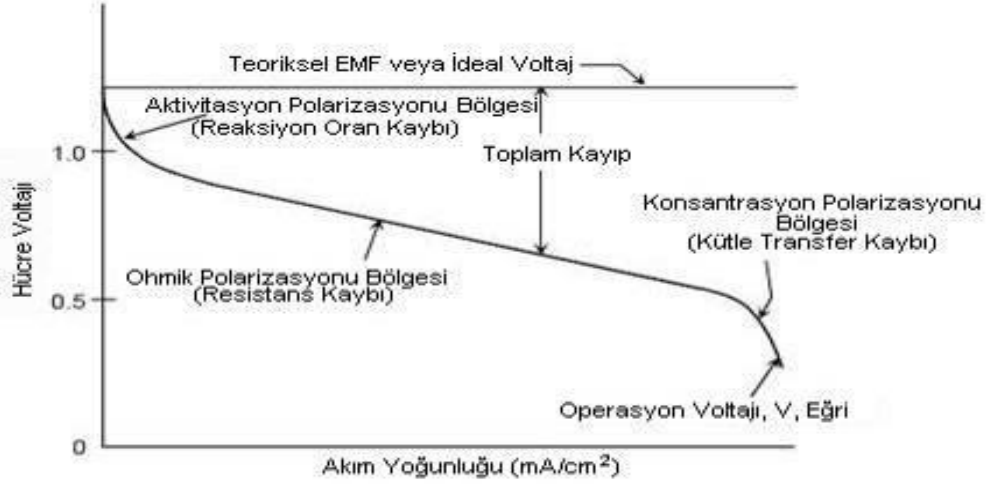
Deneylerde yığında kullanılacak MEG, PaxiTech Fuel Cells Systems and Technologies firmasından hazır olarak temin edilmiştir (Fotoğraf 5.4). MEG 7 tabakalı olup, gaz sızdırmazlık elemanları da MEG üzerine preslenmiştir. Gaz difüzyon tabakası olarak karbon kağıt kullanılmıştır.



**Foto 5.4.** Çalışmalarda kullanılan 7 tabanlı Membran Elektrot grubu

### 5.1.3 Polarizasyon Eğrileri

Yakıt pilinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon ile dışarıdan bir yük bağlandığı zaman bu yükten geçen akım yoğunluğu birbirine orantılıdır. Hücrenin sağladığı akım, aktif alana bağlıdır. Tersinmez voltaj kayıplarının hesaba katılması sonucu, yakıt pillerinde voltaj-akım yoğunluğu ilişkisi anlaşılabilir.



**Şekil 5.4.** Yakıt pili voltaj- akım eğrisi ve kayıplar

Şekil 5.4'de PEM yakıt pillerindeki standart potansiyele göre voltaj-akım eğrisi gösterilmiştir. Voltaj-akım eğrisine göre yakıt pilinin gücünü etkileyen üç ana başlıkta toplanabilecek kayıp vardır. Bu kayıplar konsantrasyon kaybı, ohmik kayıplar ve aktivasyon kaybıdır. Teorik voltaja ulaşmasını engelleyen parazitik kayıplar, yakıt pili hücresinin açık devre voltajında çalışmasından dolayı meydana gelmektedir. Teorik voltajdan kayıplar çıkarılarak, yakıt pili hücresinin belli bir akım yoğunluğundaki çalışma voltajı hesaplanmaktadır.

#### Parazitik Kayıplar;

Bir yakıt pilinde, parazitik reaksiyonlardan dolayı tersinmez voltaj kayıpları, akım çekilmediği durumlarda bile meydana gelmektedir. Oluşan voltaj kayıpları, katalizör ve elektrot malzemesinin oksidasyonundan, anottan katoda giden yakıttan ve bazı membranların elektronik iletkenliğinden kaynaklanmaktadır. Elektrolit malzemesinin ideal olarak sadece iyonların taşınmasına izin vermesi gerekmektedir. Gerçekten de membranın oksidasyonuna neden olan durum, yakıtın anottan katoda difüzyonla geçmesidir. Birkaç miliamper gibi çok küçük değere sahip olan akım, yakıtın karşıya geçişiyle oluşan kısa devre sonucu oluşmaktadır. Bundan dolayı, parazitik kayıplar büyük bir akım kaybına sebep olmamakta olup, açık devre voltajının bir miktar düşmesine sebep olmaktadır. Bu durum aktivasyon kayıplarının, PEM yakıt pili hücrelerinde önemli bir kayıp olduğunu göstermektedir.

### Aktivasyon Kaybı;

Aktivasyon kaybı parazitik kayıplardan sonra yakıt pilinde görülen kayıptır. Yakıt pilinde oluşan elektrokimyasal tepkimeler teorik voltajda çok az meydana gelmekte ve bu nedenle hücre akım oluşturamamaktadır. Bu tepkimelerin oluşması için bir voltaj farkına ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrokimyasal tepkimeyi oluşturmak için harcanan, voltaj farkından dolayı oluşan kayıp, aktivasyon kaybıdır. Tepkimeyi gerçekleştirmek için gereken voltaj farkının artması için, hücreden çekilen akımın artırılması gerekmektedir. Yakıt pilinin 50-80 °C gibi yüksek sıcaklıklarda ve yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılması neticesinde, aktivasyon kaybının düştüğü tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, tepkimeyi oluşturmak için harcanan potansiyel farkı azalmakta ve kimyasal kinetik hızlanmaktadır.

### Ohmik Kayıplar;

Gaz difüzyon tabakası, akım toplama plakaları ve katalizörde elektron akışından dolayı oluşan basit kayıplara ohmik kayıplar denilmektedir. Ohmik kayıplar elektrik akımı olan bütün yakıt pillerinde, cismin elektrik akımına karşı direncinden dolayı oluşmaktadır. Bipolar plakanın haricinde akım toplama plakası da, yakıt pillerinde ilave olarak bir direnç meydana getirmektedir. Yakıt pili hücresinin enerji sağladığı cihazla bağlantı mesafesi düşürüldüğünde veya çok iyi bir iletken malzeme kullanıldığında, ohmik direnç azalacaktır. Ayrıca, iyi bir tasarıma ve iletkenliğe sahip kısa mesafeli bipolar plaka sayesinde, ohmik direnci düşürmek mümkündür. Protonun geçiş hızını arttırmak için, ince elektrot kullanmakta başka bir seçenektir. Böylece daha fazla tepkime oluşacak ve meydana gelen bu elektron akışı ile, ohmik direnç azalacaktır.

### Konsantrasyon Kaybı;

Büyük akım yoğunluklarında, hücrenin çok büyük yakıt kullanma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. İhtiyaç duyulan yakıtın tepkime bölgesine gözenekli elektrot yapısı sebebiyle ulaşamaması sonucu konsantrasyon kaybı oluşmaktadır. Büyük akım yoğunluklarında ve düşük debilerde konsantrasyon kaybı yüksek olmaktadır.



### 5.1.4 Yakıt Pillerinde Verim

Yakıt pilleri için üç farklı verim ifade edilmektedir. Bu verim ifadeleri toplamda yakıt pilinin çalışma durumunu etkilemektedirler. Bu sebeple yakıt pilinin gerçek verimi üç verim ifadesi olan ideal verim, voltaj verimi ve yakıt kullanım veriminin çarpımına eşittir.

$$\varepsilon_{gerçek} = \varepsilon_{ideal} \times \varepsilon_{voltaj} \times \varepsilon_{kullanım} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{ideal} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (5.2)$$

Burada,  $\Delta G$  Gibbs serbest enerji,  $\Delta H$  ise entalpidir.

$\Delta H$  : Entalpi

Alt ısı değerine göre, yakıt pillerinde  $\varepsilon_{ideal}$  aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\varepsilon_{ideal} = \frac{228,74}{241,98} = \%94,5 \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{voltaj} = \frac{V_{hücre}}{V_{maks}} \quad (5.4)$$

$V_{hücre}$  : Deneysel ölçülen voltaj değeri

$$V_{hücre} = V_{teorik} - \Delta V_{ohmik} - \Delta V_{aktivasyon} - \Delta V_{konsantrasyon} \quad (5.5)$$

$$V_{maks} = \frac{R \times T}{2F} \ln(K) + \frac{R \times T}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2,anot}}{P_{H_2O,anot}} \times \sqrt{\frac{P_{O_2,katod}}{P_{ref}}}\right) \quad (5.6)$$

Burada R ideal gaz sabiti, T sıcaklık (K) ve F Faraday sabiti olup, değeri 96485 C'dir.

$$K = f(T) = A \times e^{-\frac{E_0}{R \times T}} \quad (5.7)$$

$$V_{maks} = -\frac{E_0}{2F} + \frac{R \times T}{2F} \ln(A) + \frac{R \times T}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2,anot}}{P_{H_2O,anot}} \times \sqrt{\frac{P_{O_2,katod}}{P_{ref}}}\right) \quad (5.8)$$

A faktörü ve  $E_0$  termodinamik sabitler olup, hidrojen ve hava ile çalışan yakıt pillerinde sırasıyla 0,00144 ve 246 kJ/mol değerlerini alırlar.

Hücrenin voltaj ve akım yoğunluğu; elektrot/ katalizör karakteristiği, yakıt pilinin şekli, deney şartları (relatif nemlendirme, sıcaklık, basınç, akış oranı ve konsantrasyon), membran/elektrolit özellikleri, ohmik, kinetik, ve kütle transfer direncinin fonksiyonudur.

### **5.1.5 Akış Plakalarının Gümüş ile Kaplanması**

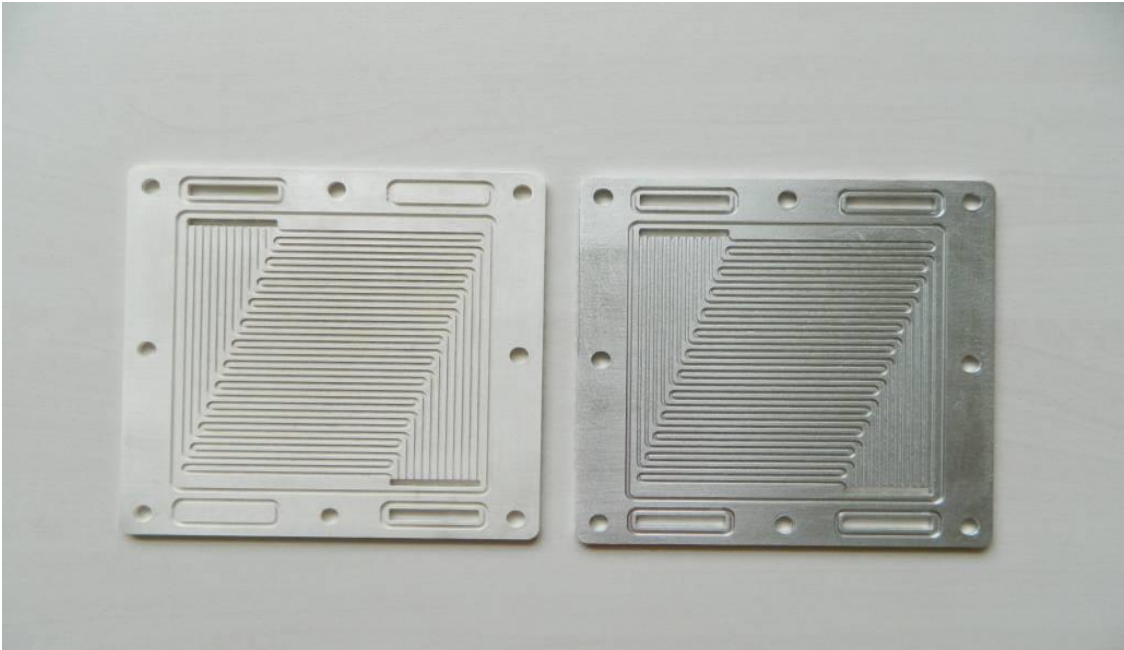
PEM yakıt pillerinde katot tarafında havanın oksitleme özelliğinin yanı sıra yüksek sıcaklık ve elektrik akımı, akış plakalarının oksitlenmesini hızlandırmaktadır. Tez kapsamında kullanılması planlanan alüminyum plakalar yakıt pili çalışması esnasında alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) oluşmasına neden olacaktır. Alüminyum oksitin yalıtkan olması sebebiyle, yakıt pilinin performansı oldukça düşecektir. Bununla beraber alüminyumun hafif olması ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ), grafitten daha mukavemetli olması, ısıtma ve soğutmada daha başarılı olması yakıt pilleri için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle yakıt pilinde kullandığımız alüminyum akış plakası Elektrokimyasal Kaplama Cihazı ile gümüş kaplanmıştır (Fotoğraf 5.5).

Gümüş kaplama işleminden önce, alüminyum plakaları temizlemek amacıyla yağ giderme işlemi yapılmıştır. Bunun için 1 litrelik saf suya 75 gr. yağ giderme kimyasalından konularak iyice karıştırılmıştır. Paslanmaz çelik, cihazın kırmızı anot [+] çıkışına bağlanarak banyonun içine sarkıtılmıştır. Kaplanacak parça ise askıya takılarak, cihazın siyah katot kısmına [-] bağlanmıştır. Voltaj 8'e getirilerek parçalar askı banyonun içine daldırılmıştır. Alüminyum akış plakaları 30 saniye yağ giderme elektrotine daldırıldıktan sonra su ile durulanmıştır.

Yağ giderme işleminden sonra parçalar 2 mikron kaplama için, Gümüş Kaplama Banyosuna daldırılmıştır. Kaplama için, gümüş plaka cihazın kırmızı anot [+] çıkışına bağlanarak banyonun içine sarkıtılmıştır. Kaplanacak parça ise askıya takılarak, cihazın siyah katot kısmına [-] bağlanmıştır. Voltaj 8'e getirilerek askı banyonun içine daldırılmıştır. Akış plakalarına 4 dakika boyunca 2 mikron gümüş kaplanmış ve su ile durulanmıştır. Fotoğraf 5.6'da elektrokimyasal kaplama ile kaplanmış ve kaplanmamış plakaların fotoğrafı gösterilmiştir.



**Foto 5.5.** Gümüş kaplama banyosu



**Foto 5.6.** Kaplama yapılmış (solda) ve yapılmamış (sağda) alüminyum plakaların görünümü

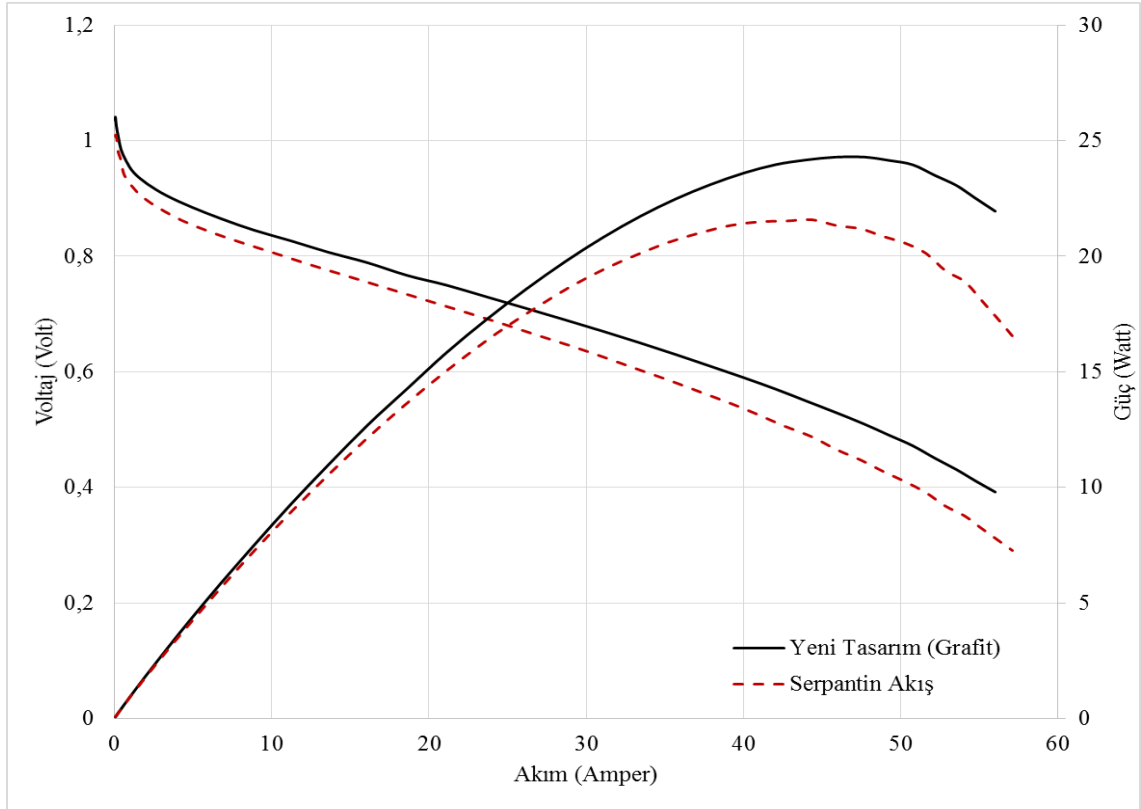
## 5.1.6 Deneysel Sonuçlar

### 5.1.6.1 Serpantin Akış Kanallı ve Yeni Tasarım Grafit Plakaların Performanslarının Karşılaştırılması

Yeni tasarımın amacı,

- Su yönetimini iyileştirmek,
- Konsantrasyon düşüşünü azaltmak,
- Basınç dağılımını iyileştirmektir.

Öncelikle eski tip (serpantin kanallı) ve yeni tasarım grafit plakaların tek hücreli testleri yapılmıştır. Akım toplama plakası için bakır plaka, sıkıştırma plakası olarak alüminyum kullanılmıştır. Anot tarafından 1 L/dk'da 60 °C'lik sudan geçirilen nemli hidrojen ve katot tarafından 2,5 L/dk'da 60 °C'lik sudan geçirilen nemli hava verilmiştir. Hücre içi sıcaklığı 70 °C'de iken alınan performans testi verilmiştir.



Şekil 5.5. serpantin akış ve yeni tasarım grafit plakalardan oluşan tek hücreli yakıt pilinde I- V ve I - P karşılaştırması

Şekil 5.5'den de anlaşılacağı üzere yeni tasarım grafit plakaların daha yüksek güç ürettiği görülmüştür. Yeni akış tasarımı ile, 100 cm<sup>2</sup>'lik bir hücreden 24 Watt güç elde edilmiştir. Bu değerler yukarıda verilen Akım-Voltaj ve Akım-Güç grafiklerinde gösterilmiştir. Dolayısıyla MEG'den birim alanda 0,24 W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu değerine ulaşılmıştır.

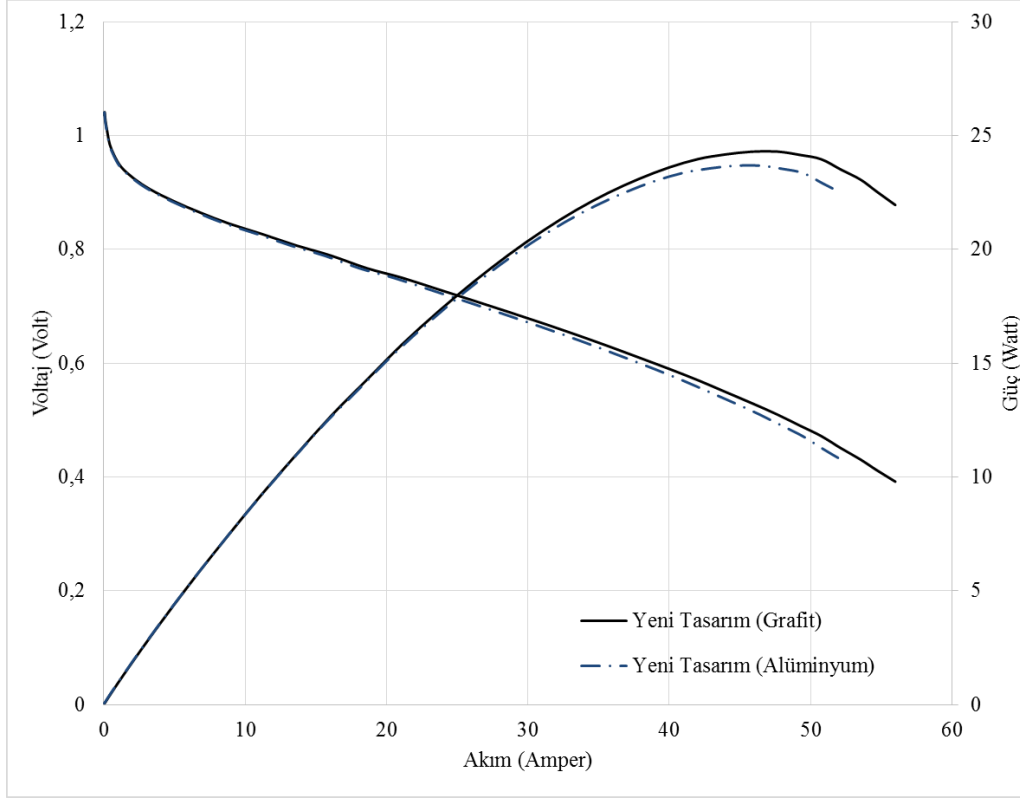
### **5.1.6.2 Yeni Tasarım İçin Grafit ve Alüminyum Akış Plakaların Performans Karşılaştırılması**

PEM yakıt pilleri için alüminyumdan akış plakası yapılmasının temel nedenleri;

- Alüminyumun ucuz olması ve daha çok bulunması,
- Alüminyumun ısı iletiminin grafitte göre yüksek olması ( $k_{Al}$ :205-307 W/mK,  $k_{Gr}$ :135 W/mK)
- Alüminyumun daha mukavemetli olması başlıca sebeplerden sayılabilir.

Alüminyumun tek dezavantajı, oksijenle tepkimeye girmesinden ötürü alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oluşmasıdır. Bunu önlemek amacıyla alüminyum plakalar, 2 mikron kalınlığında Gümüş Kaplama işlemine tabi tutulmuşlardır.

Yeni akış tasarımının grafit ve alüminyum plakalardan oluşan tek hücreli performans testlerinin sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir. Akım toplama plakası için bakır plaka, sıkıştırma plakası olarak alüminyum kullanılmıştır. Anot tarafından 1 L/dk'da 60 °C'lik sudan geçirilen nemli hidrojen ve katot tarafından 2,5 L/dk'da 60 °C'lik sudan geçirilen nemli hava verilmiştir. Hücre içi sıcaklığı 70 °C'de iken alınan performans testi verilmiştir.



**Şekil 5. 6.** Yeni tasarım grafit ve alüminyum plakalardan oluşan tek hücreli yakıt pilinde I - V ve I - P karşılaştırması

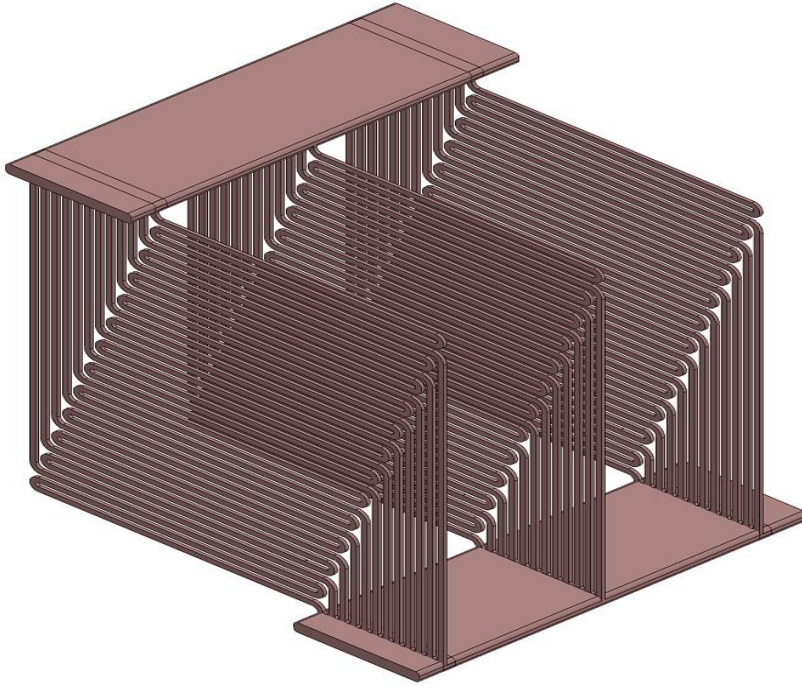
Şekil 5.6'dan da anlaşılacağı üzere yeni tasarım alüminyum plakaların, grafit plakalara yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Yeni tasarım alüminyum ve grafit plakalardaki, 100 cm<sup>2</sup>'lik bir hücreden 24 Watt civarında güç elde edilmiştir. Bu değerler yukarıda verilen Akım-Voltaj ve Akım-Güç grafiklerinde gösterilmiştir.

### **5.1.6.3. Yeni Tasarım Alüminyum Plakadan Oluşturulmuş 10 Hücreli Yakıt Pilinin Deney Sonuçları**

10 hücreli yakıt pili yığınının ait görsel Fotoğraf 5.7'de gösterilmiştir. Yakıt pili yığınının hücrelere akış kollektör tasarımı ile sağlanmıştır. Yığının ortasındaki hücrelerde bulunan kanalların seri dizilimde akış kanalı oluşturması ile her bir hücreye eşit miktarda yakıtın gitmesi sağlanmıştır. Kollektör tasarıma ait gösterim Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

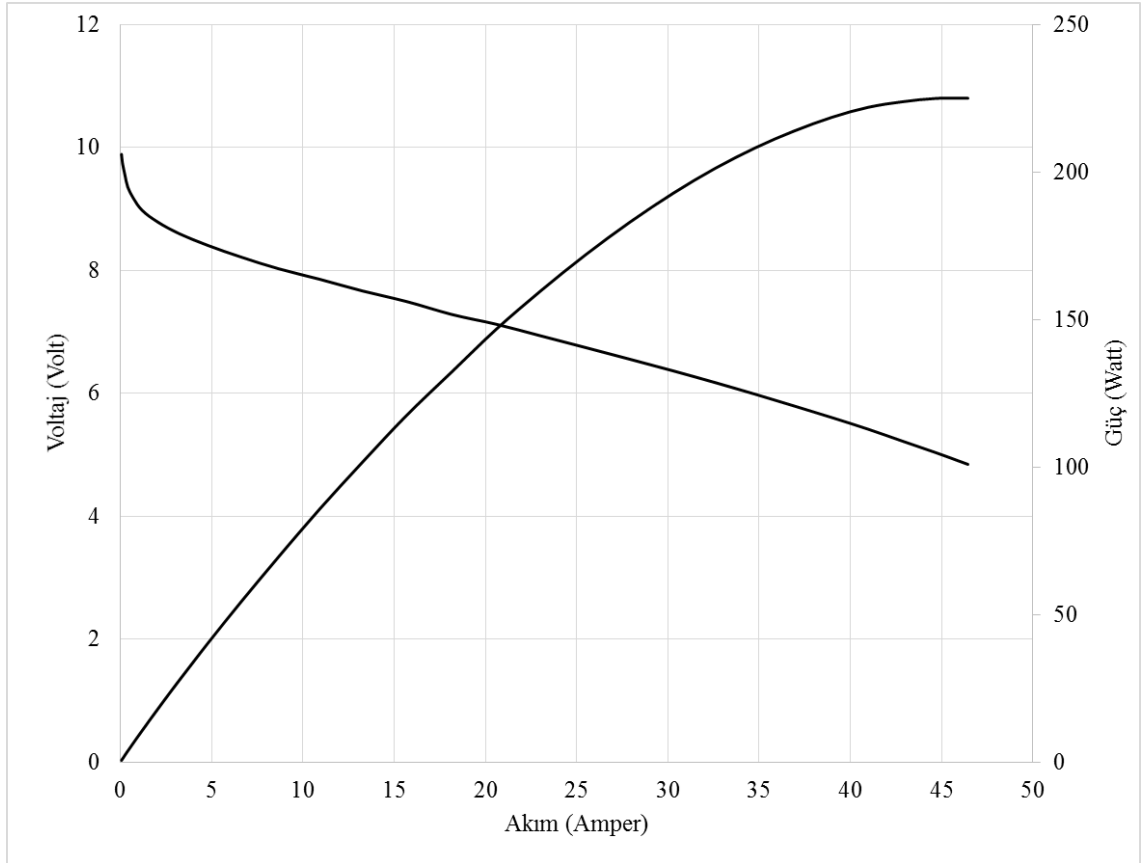


**Foto 5.7.** Yeni tasarım alüminyum plakalardan oluşan 10 hücreli yakıt pilinin görünümü



**Şekil 5.7.** Yeni tip bipolar plakanın akış kanalı görünümü.

Şekil 5.7’de kanal şekli gösterilen, yeni tasarım alüminyum plakalardan oluşan Fotoğraf 5.7’de belirtilen 10 hücreli yakıt piline ait deneyler yapılmıştır. Anot tarafından 7,5 L/dk’da 60 °C’lik sudan geçirilen nemli hidrojen ve katot tarafından 15 L/dk’da 60 °C’lik sudan geçirilen nemli hava verilmiştir. Performans sonuçları hücre 70 °C iken elde edilmiştir. Deney sonuçları aşağıda Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

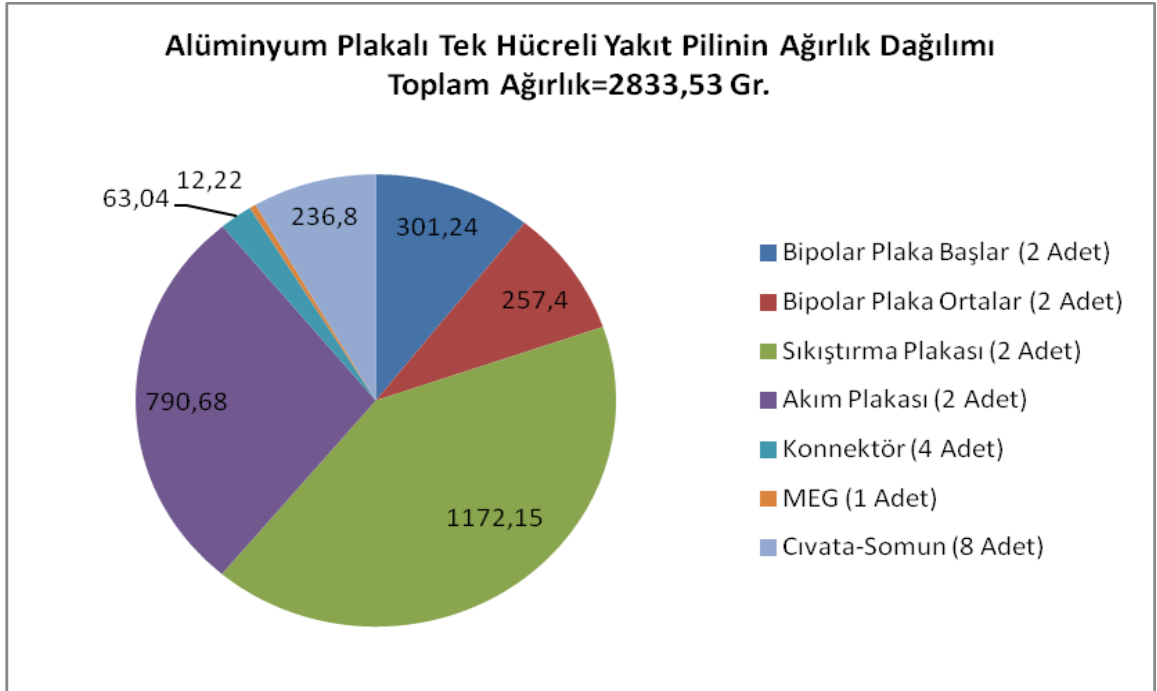


**Şekil 5.8.** Yeni tasarım alüminyum plakalardan oluşan 10 hücreli yakıt pilinde I - V ve I - P karşılaştırması

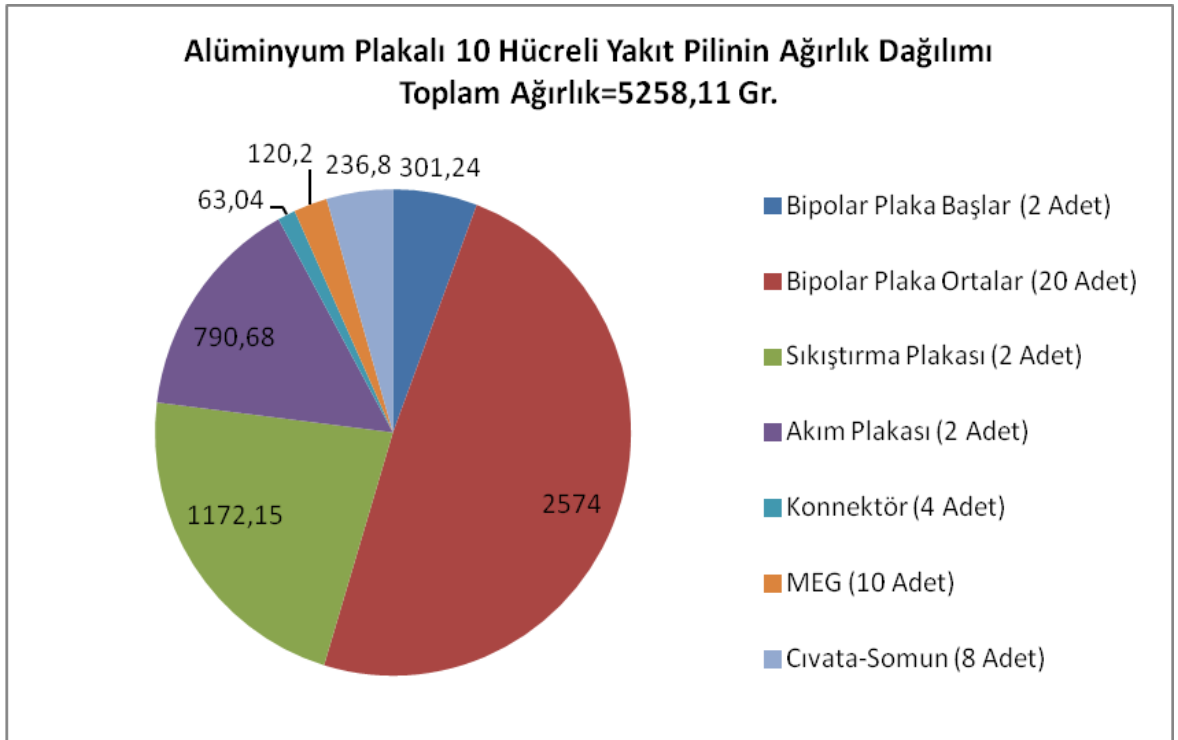
Şekil 5.8’de alüminyum plakalardan oluşan 10 hücreli yakıt pilinden yaklaşık 220 Watt güç elde edilmiştir. Tekli hücrede 100 cm<sup>2</sup>’den 0,24 W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu oluşurken, 10’lu yığımda ise 100 cm<sup>2</sup>’den yaklaşık 0,22 W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu oluşmaktadır. Bir miktar düşüş olmasının nedeni yığındaki madde dağılımı ve ohmik dirençlerin artmasından kaynaklanmıştır.



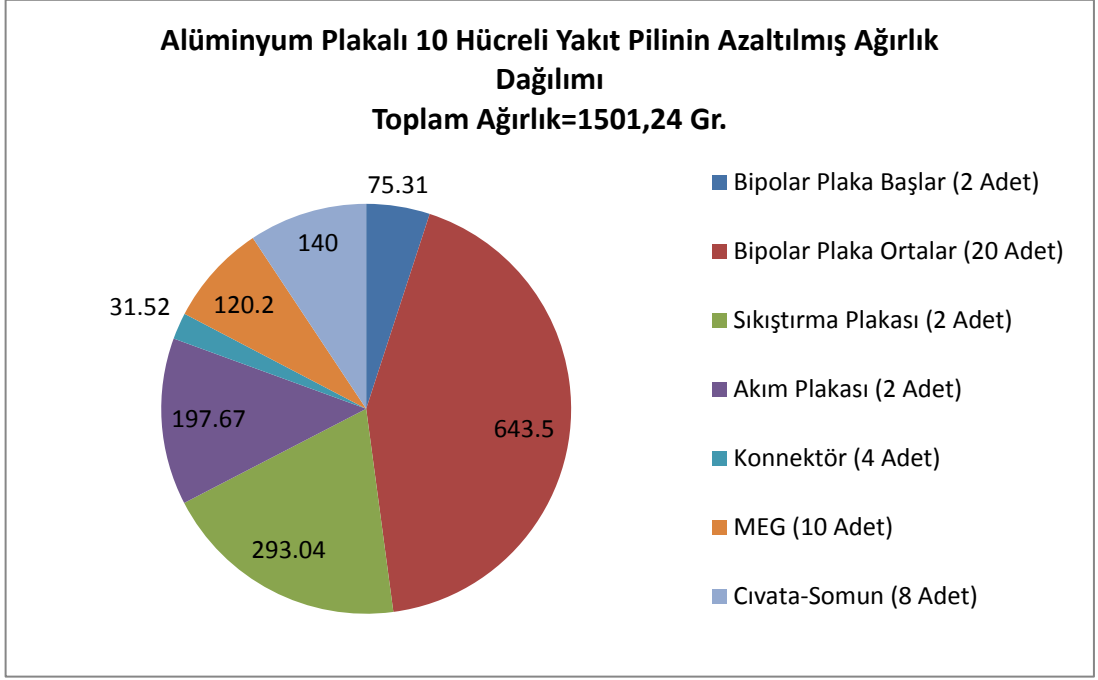
#### 5.1.6.4. İHA'lar İçin Yakıt Pillerinin Ağırlık Dağılımlarının Karşılaştırılması



Şekil 5.9. Alüminyum plakalı tek hücreli yakıt pilinin ağırlık dağılımı



Şekil 5.10. Alüminyum plakalı 10 hücreli yakıt pilinin ağırlık dağılımı



**Şekil 5.11.** Alüminyum plakalı 10 hücreli yakıt pilinin azaltılmış ağırlık dağılımı

## BÖLÜM VI

### SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, insansız hava aracı için yüksek performansa sahip, yeni bir akış alanı tasarımı kullanılarak tekli ve 10'lu olarak yakıt pili performansı araştırılmıştır. PEM yakıt pillerinde çok sık kullanılan pahalı ve kırılabilir kompozit bipolar plaka yerine daha ucuz ve mukavemetli alüminyum akış plakalarının da kullanılabileceği gösterilmiştir.

İnsansız hava ve kara aracı gibi otonom sistemlerin operasyon süresi bataryanın kapasitesi ile sınırlıdır. Yakıt pilleri yüksek enerji yoğunlukları sayesinde bataryalara alternatif olarak kullanılarak daha uzun operasyon süresi sunmaktadırlar. Yakıt pillerinin W/kg cinsinden enerji yoğunluğunun artırılması için akış plakaları, sıkıştırma plakaları ve diğer çevre elemanlarına ait ağırlıklarının azaltılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında İHA'larda kullanılmak üzere, ısı ve su yönetimi özgün olan bir yakıt pili akış alanı tasarlanmıştır. Bu tasarım literatürde sık kullanılan serpantin akış ile hem sayısal hem de deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sayısal programda akış alanlarının hız ve basınç dağılımları elde edilmiştir. Yeni tasarımda basınç düşüşünün serpantin akışa göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Deneysel programda her iki tasarım için akış malzemesi olarak kompozit grafit kullanarak tek hücreli yakıt pilleri imal edilmiş ve performans testleri yapılmıştır. Yeni tasarıma sahip yakıt pili, serpantin akışa göre daha yüksek performans sergilemiştir.

Yakıt pillerinde kullanılan kompozit grafitlerin maliyetlerinin yüksek olması sebebi ile alternatif akış alanı malzemesi olarak alüminyum kullanılması düşünülmüştür. Alüminyumun yüksek elektriksel iletkenliği, yüksek termal iletkenliği ve kompozit grafitte yakın yoğunlukta ve kompozit grafitte göre ucuz olması sebebi ile yakıt pillerine uygun bir malzeme olarak görülmektedir. Fakat alüminyum plakaların oksijen ve elektrik ortamında yalıtkan bir oksit tabakası ( $Al_2O_3$ ) oluşturması yakıt pillerinde kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle alüminyum akış plakalarına gümüş kaplanarak korozyon direnci artırılmıştır. Gümüş kaplı alüminyum plakalar ile kompozit grafitin performansları karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın çıktığı gözlemlenmiştir. Son olarak yeni akış alanı tasarımına sahip alüminyum plakalardan yapılmış on hücreli yakıt pili yığını oluşturulmuş ve performans testleri yapılmıştır. Yakıt pili yığımından

beklenenin üzerinde maksimum 220 Watt güç elde edilmiştir. Bu sonuca göre 150 Watt'lık bir insansız hava aracı için uygun güç değerinde bir yığın tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Mini taktik İHA'ların toplam yük taşıma kapasiteleri kanat genişliklerine göre 10 kg'a kadar çıkmaktadır. Faydalı yük (payload) taşıma kapasiteleri ise İHA'nın tasarımına göre değişmekle beraber ortalama 3 kg'a kadar faydalı yük taşıma kapasitesine çıkabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen yakıt pili yığın tasarımıımızın toplam ağırlığı 5250 gram gelmiştir. Tez kapsamında akış kanalının performansının iyileştirilmesi çalışması yapıldığı için ağırlık ile ilgili herhangi bir azaltma çalışması yapılmamıştır. Akış plakası malzemesi olarak alüminyumun seçilmesinin en önemli nedeni daha sonraki çalışmalarla ağırlık azaltma işlemi sağlamaya çok uygun olmasındandır. Alüminyum plakaların dış yüzeyi yoğun, iç yüzeyi gözenekli olarak imal edilme imkânına sahiptir. Yakıt pili akış plakalarının bu şekilde imal edilmesi durumunda ağırlıklarda en az 4'te 1'e düşme sağlanacaktır. Sıkıştırma plakaları ise akış plakalarından sonra en ağır yığın elemanı olarak görülmektedir. Bu yığın tasarımında sıkıştırma ve akım toplama plakaları, performans sonuçlarının garanti olması için kalın imal ettirilmiştir. Bu plakaların da ağırlıklarının düşürülmesi muhtemeldir. Bu sonuca göre yakıt pili yığının ağırlığı 1500 grama düşmektedir. Çevre elemanları olarak kullanılan kompozit tank, basınç regülatörü ve hava pompasının ağırlığı ile beraber toplam sistem ağırlığının 3 kg olması beklenmektedir. İHA'larda kullanılan bataryalarında ağırlıklarını göz önüne aldığımızda yakıt pili sisteminin bataryanın yerine veya batarya ile hibrit olarak kullanılmaya müsait olduğu belirlenmiştir.

Tüm bu sonuçlara göre PEM yakıt pillerinin İHA'lar için kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür. Yenilikçi akış plakasının yüksek performans verdiği ve akış plakası olarak alüminyumun kullanılabilir olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak PEM yakıt pilinin İHA'larda kullanılması durumunda ülkemizin askeri teknolojisine büyük katkılar sağlayacağı tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

Aero Viroment, <http://www.designation-systems.net/dusrm/app4/puma.html>, 2007.

Ashok, C.K.and Singaravelu, E., US Patent No. 5856035, 1999.

Ata, E., “İnsansız Hava Aracı İçin Yakıt Hücre Sistemi”, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bili Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2013.

Bedogni, S., Campanari, S., Iora, P., Montelatici, L. and Silva, P., Experimental analysis and modeling for a circular-planar type IT-SOFC, J. Power Sources 171 (2) 617–625, 2007.

Bossel, U., Spirocell: an innovative cell design for low cost SOFC solution, in: Proceedings of the 8th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC VIII), The Electrochemical Society Proceedings, Pennington, NJ, 2003, pp.768–775.

Bradley, T.H., Moffitt, B. A., Thomas, R.W., Mavris, D. and Parekh, D.E., Test Results for a Fuel Cell- Powered Demonstration Aircraft, SAE International, Warrendale, PA., 2006.

Cavalca, C, Homeyer, ST. and Walsworth, E. US Patent No. 5,686,199, 1997.

Çelik, S., “Doğrudan Metanollu Yakıt Pili İki Fazlı Akışın Nümerik İncelenmesi”, Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bili Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2009.

Çuhadaroğlu, H., Uyaroğlu, Y. ve Yalçın, M.A., “Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri Teknolojisi”, Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2011.

Doyle, M. and Rajendran, G., “Pefluorinated Membranes,” in Handbook of FuelCells— Fundamentals, Technology and Applications, W.Vielstich, A. Lamm, and H.A. Gasteiger, Eds., Wiley, New York, 2003, pp. 351–395.

Ernst W.D. and Mittleman, G., US Patent No. 5,945,232, 1999.

Granata, Jr. S.J. and Woodle, B.M., US Patent No. 4,684,582, 1987.

Haltiner, K.J. and Mukerjee, S., US Patent No. 2007/0248867 A1, 2005.

Hontanon, E., Optimisation of flow field in PEM fuel cell using CFD techniques. *J Power Sources* 2000;86:363–8.

Jung, E.H., Jung, U.H., Yang, T.H., Peak, D.H., Jung, D.H. and Kim, S.H., “Methanol crossover through PtRu/Nafion composite membrane for a direct methanol fuel cell” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006.

Khandelwal, M. and Mench, M.M., “Direct Measurement of Through-Plane Thermal Conductivity and Contact Resistance in Fuel Cell Materials,” *J. Power Sources*, Vol. 161, pp. 1106–1115, 2006.

Kumar, A. and Reddy Ramana, G., Effect of channel dimensions and shape in the flow field distributor on the performance of PEM fuel cells. *J Power Sources* 2003;113:11–8.

Li, P.W., Chen S.P. and Chyu, M.K. To achieve the best performance through optimization of gas delivery and current collection in solid oxide fuel cells, *J. Fuel Cell Sci. Technol.* 3 (2) 188–194, 2006.

Litster, S. and McLean, G., “PEM Fuel Cell Electrodes,” *J. Power Sources*, Vol. 130, pp. 61–76, 2004.

Mathias, M. F., Roth, J., Fleming, J. and Lehnert, W., “Diffusion Media Materials and Characterization,” in *Handbook of Fuel Cells—Fundamentals, Technology and Applications*, Vol.3, Vielstich W., Lamm A. and H. Gasteiger A., Eds., Wiley, New York, 2003, pp. 517–537.

Nguyen, Q.M. and Craig, R.H., US Patent No. 5290642, 1994.

Pollegri, A. and Spaziante, P.M., US Patent No. 4,197,178, 1980.

Reiser, C.A. and Sawyer, R.D., Solid polymer electrolyte fuel cell stack water management system. US Patent No. 4,769, 297, 1988.

Reiser, C.A., Water and heat management in solid polymer fuel cell stack. US Patent No. 4, 826, 742, 1989.

Spurrier, F.R., Pierce, B.E. and Wright, M.K., US Patent No. 4,631,239, 1986.

Voss, H.H. and Chow, C.Y. Coolant flow field plate for electrochemical fuel cells. US Patent No. 5,230,966, 1993.

Weber, A.Z. and Newman, J., “Transport in Polymer-Electrolyte Membranes I. Physical Model,” J. Electrochem. Soc., Vol. 150, No. 7, pp. A1008–A1015, 2003.

Wilkinson, D.P., Lamont, G.J., Voss, H.H. and Schwab, C., Embossed fluid flow field plate for electrochemical fuel cells. US Patent No. 5,521,018, 1996.

Yıldırım, Y., “Yakıt Pilleri Ders Notları”, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 2011.

Zhang, R., Kunz, R. and Fenton, James M., “Development of Methanol Evaporation Plate to Reduce Methanol Crossover in a DMFC”, Department of Chemical Engineering University of Connecticut, 10 March 2004.

<http://www.bloomberght.com/haberler/haber/1798795-fosil-yakit-cagi-sona-erecek>, 09 Haziran 2015.

<http://www.eurekaalert.org/multimedia/pub/13174.php>, 2009.

[http://www.fcbt.gatech.edu/fuellcellairplane/documents%20Folder/2\\_6\\_Education\\_PEM\\_FC\\_UAV\\_v2\\_2.pdf](http://www.fcbt.gatech.edu/fuellcellairplane/documents%20Folder/2_6_Education_PEM_FC_UAV_v2_2.pdf), 2006.

<http://www.horizonfuelcell.com/hyfish.htm>, 2007.

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa GÖREN 1980 yılında Nizip'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Nizip'te tamamladı. 2000 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında askerlik görevini Piyade Asteğmen olarak yaptı. 2007 yılında İkizler Mühendislik (Malatya) ve 2008 yılında Güneydoğu Mühendislik Danışmanlık Doğalgaz ve İnşaat San.Tic.Ltd.Şti. (Gaziantep)'nde firma mühendisi olarak çalıştı. 2009 yılından itibaren K.K.K.lığı 21'inci Ana İkm.Mrk.K.lığı (Bor/Niğde)'nda Tedarik Uzmanı olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir kız çocuğu babasıdır.