

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

İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİ

EMRE ATA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2013

T.C.

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN YAKIT
HÜCRESİ SİSTEMİ**

EMRE ATA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI

YRD. DOÇ. DR. İLYAS KANDEMİR

GEBZE

2013



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan
jüri tarafından/...../..... tarihinde tez savunma sınavı yapılan
.....'ın tez çalışması
.....Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak
kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :

ÜYE :

ÜYE :

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

İnsansız hava aracı (İHA); kullanıcı olarak insan taşımayan, havada tutunmak için aerodinamik kuvvetlerden yararlanan, önceden programlanarak veya yerden komuta ile harici bir pilot tarafından uçurulan, uçuş sonrası tahrip olan veya yeniden kullanılabilen, motor gücüne sahip hava aracıdır.

Elektrik motorlu İHA'ların enerji ihtiyacı genellikle, düşük enerji yoğunluklu piller ile karşılanmaktadır. İHA'larda yaşanmakta olan en önemli sorun menzil ve havada kalma süresindeki kısıtlamalardır.

Bu tez kapsamındaki çalışmalarda, hidrojenin özel bir kartuş sisteminde sodyum bor hidrür (SBH)'den üretildiği ve özel olarak imal edilecek olan PEM tipi yakıt hücresinde elektrik enerjisine çevrildiği bir yakıt hücresi sistemi geliştirilmiştir. Bu sayede 100-250 Wh/kg'lık enerji yoğunluğundan 100-600 Wh/kg'lık enerji yoğunluklarına çıkılarak daha verimli bir sistem elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sistemde kullanılacak olan katalizörler ve çift kutuplu plakalar yerli olarak tasarlanıp ve üretilmiş, contalar ve gaz difüzyon tabakaları da denenmiştir. Membranlar ve maliyeti çok düşük olan standart fan ve elektriksel güç elemanları gibi elektronik malzemeler satın alınmıştır. Böylece kartuş sistemiyle birlikte mini İHA'ların içerisine yerleştirilebilecek kompakt bir sistem tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı (İHA); Enerji; PEM Tipi Yakıt Pilleri; Sodyum Bor Hidrür.

SUMMARY

Unmanned Air Vehicle (UAV) is an engine powered air vehicle that does not carry a human controller, uses aerodynamic forces to hang in the air, flies by pre-programming or a land based external pilot, demolishes completely or reutilized for next flight.

In general, electric motor operated UAVs' energy need is satisfied with low energy density batteries. The most important issue encountered in UAVs is range and endurance limitations.

In the scope of this thesis study, a fuel cell system that hydrogen is generated from sodium boron hydride (SBH) in a unique cartridge system, and converted to electrical energy in a custom manufactured PEM fuel cell is developed. Thus it is objected to obtain a more efficient system by increasing the energy density from 100-250 Wh/kg to 100-600 Wh/kg. The catalysts and bipolar plates are designed and acquired by domestic production, gaskets and gas diffusion layers are tried to be produced in the laboratory environment. Membranes, low-cost standard fans and electrical power equipments are purchased. By the way, a compact system which can be placed in mini UAVs is designed including a cartridge system.

Key Words: Unmanned Air Vehicle (UAV); Energy; PEM Fuel Cells; Sodium Borohydride.

TEŞEKKÜR

Özellikle manevi desteğiyle kendime güvenmemi sağlayarak bana akademik hayatı sevdiren, geniş bir bilimsel perspektife sahip danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR'e,

Akademik çalışma hayatına beni teşvik ederek yol haritamı belirlememe vesile olan, birikimlerinden istifade ettiğim sayın Prof. Dr. Ali ATA'ya,

Tez konumuyla ilgili tüm bilgi birikimini aktararak bana yardımcı olan değerli arkadaşım sayın Yrd. Doç .Dr. Furkan DÜNDAR'a,

Yoğun çalışma temposu içerisinde bizden yardımlarını esirgemeyen değerli meslektaşım sayın Mustafa ESMER'e,

Huzurlu bir ortamda zevkle çalışmama vesile olan sevgili nanoteknoloji ekibine,

Maddi ve manevi desteklerinden dolayı sevgili eşim Elif KAYAALP ATA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
1.2. İnsansız Hava Araçları (İHA)	2
1.3. Türkiye'de İHA Serüveni	6
2. YAKIT HÜCRELERİ	8
2.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi	8
2.2. Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensipleri	9
2.3. Yakıt Hücresi Tipleri	9
2.4. PEM Tipi Yakıt Hücresi	11
2.4.1. Aktivasyon Kayıpları	14
2.4.2. Direnç Kayıpları	15
2.4.3. Kütle Transferi (Konsantrasyon) Kayıpları	15
2.4.4. Yakıt Sızıntısı ve İç Akım Kaybı	16
2.4.5. PEM Tipi Yakıt Hücresi Verimi	16
2.5. PEM Tipi Yakıt Hücresi Elemanları	17
2.5.1. MEA	18
2.5.2. Gaz Difüzyon Tabakası	18
2.5.3. Bipolar Plakalar	19
2.6. PEM Tipi Yakıt Hücresi Sistemi Elemanları	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1. PEM Tipi Yakıt Hücresi Hazırlama Metotları	21
3.1.1. Katalizör Hazırlanması	21

3.2. Yakıt Hücresi Ölçümleri	23
3.2.1. Polarizasyon ve Güç Eğrisi	23
4. DENEYLER ve DİZİN ÇALIŞMALARI	25
4.1. Modelleme ve Analiz sonuçları	25
4.2. Performans Testleri	27
4.2.1. Membran Optimizasyonu	27
4.2.2. Gaz Difüzyon Tabakası (GDL) Optimizasyonu	28
4.2.3. Katalizör ve Platin Yükleme Miktarı Optimizasyonu	29
4.2.4. Farklı Test İstasyonu ve Test Hücrelerinde Yapılan Ölçümler	31
4.2.5. Güç Eğrileri	32
4.3. Dizin Tasarımları	34
5. SONUÇLAR ve YORUMLAR	38
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	41

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
F	: Faraday Sabiti
i	: Akım Yoğunluğu
i_0	: Denge Akım Yoğunluğu
i_l	: Limit Akım Yoğunluğu
$i_{iç}$: İç Akım Yoğunluğu
İHA	: İnsansız Hava Aracı
n	: Transfer Olan Elektron Sayısı
R	: Gaz Sabiti
R	: Direnç
$S_{yakıt}$: Yakıt Sitokiyometrisi
SBH	: Sodyum Bor Hidrür
T	: Sıcaklık
V	: Çalışma Gerilimi
V_{tn}	: Termonötr Gerilim
V_{teo}	: Teorik Gerilim
V_{ak}	: Aktivasyon Gerilim Kaybı
V_{kt}	: Kütle Transferi Gerilim Kaybı
V_d	: Direnç Gerilim Kaybı
α	: Yük Transfer Katsayısı
η_t	: Termodinamik Verim
$\eta_{kyı}$: Kinetik Verim (Yüksek Isı)
$\eta_{kaı}$: Kinetik Verim (Alçak Isı)
$\eta_{pyı}$: Pratik Verim (Yüksek Isı)
η_{pa}	: Pratik Verim (Alçak Isı)
ΔG	: Gibbs Serbest Enerjisi Değişimi
ΔH	: Entalpi Değişimi
ΔS	: Entropi Değişimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: PEM tipi yakıt hücresinin şematik gösterimi.	12
2.2: Tekli ve çok hücreli PEM yakıt hücresi şematik gösterimi.	12
2.3: PEM tipi yakıt hücresinde oluşan kayıplar.	14
2.4: Örnek bir yakıt hücresiyle çalışan sistem şeması.	20
3.1: 25 Örnek bir polarizasyon ve güç eğrisi.	24
4.1: 2 mm'lik bipolar plaka üzerindeki gerilme dağılımı .	25
4.2: Membran üzerine gelen, homojen olmayan basınç dağılımı.	26
4.3: Membran üzerindeki homojene yakın basınç dağılımı.	26
4.4: Membranların kıyaslanması.	28
4.5: Ticari gaz difüzyon tabakalarının kıyaslanması.	29
4.6: Katalizörlerin kıyaslanması.	30
4.7: %10 Pt/C katalizör ile yükleme oranı kıyaslanması.	30
4.8: %38 Pt/C katalizörlerle yükleme oranı kıyaslanması.	31
4.9: Farklı test istasyonlarındaki test sonuçları.	32
4.10: İmal ettirilen paslanmaz çelik plaka ile elde edilen güç eğrisi.	33
4.11: Hedeflenen PEM yakıt hücresi dizini güç eğrileri.	33
4.12: İlk dizin tasarımının patlatılmış resmi.	34
4.13: 50x50 mm ² aktif alanlı plakaların montaj resmi.	34
4.14: Yeni plaka tasarımları.	36
4.15: Gaz akış kanalı tasarımı profil görünüşü.	36
4.16: Tasarlanan baskı plakası.	37
4.17: Homojene yakın basınç dağılımı analizi.	37
4.18: Yeni dizin tasarımı.	37

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Yakıt hücresi türleri ve bazı özellikleri.	10
2.2: Yakıt hücrelerinin kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları.	10
2.3: Entalpi değişimi, Gibbs serbest enerjisi ve gerilim değerleri.	13

1. GİRİŞ

Enerji, tüm evrendeki canlı cansız her şeyin varlığını devam ettirebilmesi için ihtiyaç duyduğu en önemli gereksinimdir. Enerjinin zaman ilerledikçe insanlar tarafından kullanımı ve ihtiyacı da artmaktadır. Dünyada artan nüfus ve refah seviyesi paralelinde enerji tüketimini de arttırmıştır. Enerjiye duyulan ihtiyacın gelecekte de sürekli artacağı tartışmasız bir gerçektir.

Dünyada kullanılan enerjinin çoğu kömür, petrol, ve doğal gaz gibi yenilenemeyen fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu yakıtların çevre ve sağlık üzerinde sera etkisi, küresel ısınma, iklim değişiklikleri, yağış anormallikleri, asit yağmurları, sağlık problemleri gibi olumsuz etkileri vardır. Bu yakıt kaynaklarının rezervlerinin kısıtlı olması, maliyet artışı, nüfus artışı, endüstrileşme, ulusal kaynaklarının değerlendirilmesi zorunluluğu, çevre üzerindeki olumsuz etkileri, insanlığı alternatif, yenilenebilir enerji kaynaklarını bulup kullanmaya zorlamaktadır.

Doğada var olan bu temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından başlıcaları hidrojen, rüzgar, güneş, biyokütle, hidroelektrik ve deniz-dalga enerjileridir. Alternatif yakıtlar içinde en verimlisi ve kullanışlısı hidrojendir [Web 1, 2013]. Hidrojen, birincil enerji kaynağı olmamasına rağmen, yakılmasıyla doğrudan kullanılabilmesi gibi, enerji kaynağı olarak da kullanılabilir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Günümüzde hidrojenle ilgili olarak karşılaşılan en büyük iki problem hidrojenin üretimi ve depolanmasıdır.

Hidrojen, suyun elektrolizi, doğal gazın dönüşümü ve metan buharı dönüşümü, buhar/oksijen dönüşümü ve otomatik ısıl dönüşüm gibi teknolojiler kullanılarak üretilir. Ancak hidrojenin üretilmesinde kullanılacak kaynakların araştırılması, bu kaynaklardan üretim sırasında çevresel zararların oluşmaması (CO_x emisyonları), üretim maliyetlerinin düşük olması ve hedeflenen üretim miktarlarının karşılanması hususları hedeflenmelidir.

Hidrojen gazının yakıt olarak kullanılmasındaki en büyük sıkıntı sızdırmazlık ve yüksek depolama maliyetidir. Depolama için uygulanacak yeni yöntemlerin

bulunması ve depolamada kullanılacak yeni malzemelerin araştırılıp geliştirilmesi en önemli hususlardan birini oluşturmaktadır.

Hidrojenin depolanması için önemli yöntemlerden birisi hidrojenin sodyum bor hidrür (SBH) gibi bir alkali metal hidrürün yapısında depolanmasıdır. SBH'e su eklenmesi durumunda kullanılan katalizörün yardımıyla açığa saf hidrojen gazı çıkmaktadır. Sodyum bor hidrürle hidroliz tepkimesine giren 2 molekül suyun yapısında bulunan 4 hidrojen atomu da açığa çıkmakta ve bu sayede Hidrojen gazının teorik verimi % 21,2'ye ulaşmaktadır.

Üretim aşamasından sonra depolanan hidrojenin en etkin kullanım yolu yakıt hücrelerinde kimyasal enerjiden elektrik enerjisinin elde edilmesiyle [Haile, 2003]. Yakıt hücreleri temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüştürücüleridir. Yakıt hücresi hidrojen ve oksijen gazından elektrik enerjisi üreten elektrokimyasal bir ünedir. Yakıt ile oksidan arasındaki katalizör tabakasında tetiklenen reaksiyon sonucunda elektrik üretilmektedir.

Bir yakıt hücresine dışarıdan sürekli olarak saf hidrojen beslendiği takdirde, genellikle eser miktarlarda zararlı olarak nitelendirilebilecek bileşenler içerse de son ürün olarak ısı ve su buharı oluşur, bu sebeple yakıt hücreleri çevre açısından zararsızdır denilebilir.

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 gitgide 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 zayıatını 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 gönderiyordu. 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. A. M. Low tarafından 1916 yılında geliştirilen ve sınırlı sayıda üretilen Hewitt-Sperry otomatik uçak, I. Dünya Savaşı sırasında kullanılmıştır.

1935'te ilk ölçekli RPV (Remote Piloted Vehicle - Uzaktan Komutalı Araç) geliştirmiştir. II. Dünya Savaşı süresince çok sayıda uçak üretilmiş ve bunlar trenleri koruma amaçlı uçaksavar ve saldırı görevlerinde kullanılmıştır. Bu uçaktan 380 tanesi İngiliz ordusunda kullanıma girmiş ve 1947'ye kadar görev yapmıştır. Bu başarıyla birlikte, bugün Northrop Grumman olarak anılan Radioplane Company tarafından, radyo kontrollü olarak geliştirilen düşük maliyetli sahte hedef uçaklar paraşütle inme özelliğine sahipti. Savaşta düşman uçaksavarlarını meşgul etmekten çok, uçaksavar personelini eğitmede kullanılan uçaklar, eğitim amaçlı sahte hedef uçağı kullanımının da ilk örneği olmuştur.

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 sahipti. V-1'lere karşı ABD tarafından geliştirilen BQ-7 tipi araçlar ise tarihe ilk karşı tedbir İHA'sı olarak geçmiştir.

İlk jet motorlu model 1951 yılında Teledyne Ryan firması tarafından geliştirilen Firebee'dir. 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. 1955 yılında Beechcraft firmasının ABD Deniz Kuvvetleri için ürettiği Model 1001 araçlar Vietnam Savaşı süresince birer uzaktan kumandalı uçak olmaktan daha ileriye gidememişlerdir.

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 HALE (High Altitude Long Endurance - Yüksek İrtifa Uzun Dayanım) İHA'ların öncüsü olmuştur.

1980li yıllardan sonra İHA'ların gelişim süreci ivmelenerek 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 geliştirilmiştir. Pioneer uçak gemisine iniş yapmayı başarmış ilk İHA olarak tarihe geçmiştir. 20 adet Pioneer, ABD ordusu tarafından kullanıma alınmış ve Körfez savaşında büyük başarılar 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 sağlar. Kokpitteki mürettebat için gereken yaşamsal sistemlere ve bu sistemlerin gerektirdiği çok sayıda elektronik ve

mekanik donanıma ihtiyaç duyulmaz. İHA, 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 hızları, görev irtifaları, menzilleri ve dayanma süreleri ile de çeşitli sınıflara ayrılırlar.

- Çok küçük boyutlarda olup sadece görüntü ya da ses almak amacıyla kullanılan İHA'lar, mikro İHA sınıfına girmektedir.
- 3000 m'ye kadar irtifaya, 1 saatlik havada kalış süresine sahip İHA'lar mini İHA sınıfına girer. Bunlar elden ya da rampadan fırlatılan, kendi inebilen, paraşütle inen ya da bir ağ yardımıyla yakalanabilen İHA'lardır.
- 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. Orta İrtifa Uzun Dayanımlı (MALE: Medium Altitude Long Endurance) olarak da adlandırılmaktadır.
- 9000 m'den yüksek irtifada çalışabilen, 24 saatten fazla havada kalabilen İHA'lar stratejik İHA olarak sınıflandırılmaktadır. Yüksek İrtifa Uzun Dayanımlı (HALE: High Altitude Long Endurance) olarak da adlandırılmaktadır.

1.3. Türkiye'de İHA Serüveni

İlk yerli İHA üretim projesi 1990 yılında TAI tarafından başlatılmıştır. UAV X-1 adlı bu proje çeşitli problemler nedeniyle gelişme evresine geçmeden sonlanmıştır. Aynı yıllarda TÜBİTAK tarafından Otomatik Uçuş Kontrol Sistemi projesi başlatılmış, bu projeye laboratuvar ortamında yazılımsal olarak otomatik uçuş ve seyrüsefer kabiliyetleri geliştirilmiştir. TAI daha sonraları bir kaç proje daha başlatmış olup, Turna, Keklik, Baykuş, Pelikan adlı İHA'lar hava savunma sistemleri atış, takip ve pilot eğitimleri için kullanılmıştır. Turna projesinin sonraki versiyonu olan Turna/G, 2001 yılından beri aktif olarak kullanılmaktadır. Martı adlı proje, kıyı erozyonunu inceleme amacıyla yapılmış olup, Martı'nın fırlatıcıdan kalkma ve otonom uçuş yeteneği bulunmaktaydı. Kısa mesafe keşif ve gözetleme amaçlı olarak üretilen Gözcü ise, havaalanına ihtiyaç duymadan kalkış ve iniş yetenekleri ile donatılmıştı.

2004 yılından sonra Savunma Sanayi Müsteşarlığı tek yetkili kurum haline gelmiş ve Türkiye'nin İHA gereksinimlerini Mini, Taktik ve MALE olarak belirlemiştir. TAI şirketi tarafından MALE sınıfında TİHA (Anka) geliştirilmiştir. Anka 24 saat havada kalma ve 9000 m irtifada uçabilme kabiliyetleri ile donatılmış olup, üzerindeki araştırma ve geliştirmelere günümüzde halen devam edilmektedir. Taktik İHA sınıfında Baykar-Kale Kalıp ortaklığınca Çaldıran, Vestel Savunma Sanayi tarafından Karayel projeleri geliştirilmiştir. Mini İHA sınıfında yine Baykar tarafından Bayraktar ve mini insansız hava helikopteri olan Malazgirt geliştirilmiştir. Bunların haricinde üniversiteler tarafından geliştirilerek uçurulan farklı tipte İHA'lar da mevcuttur.

2. YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücresi, dışarıdan sağlanan yakıt ile oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren bir sistemdir. Yakıtın enerjiye dönüşümü yanma ile değil, elektrokimyasal yolla olur. Genel olarak bir yakıt hücresi, kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği anot ve katot kısımları ile iyonik iletkenliğe sahip ve elektrolit özelliğindeki membrandan meydana gelir. Bu yapısıyla tıpkı bir pili andıran yakıt hücresi, yakıtın sürekli olarak dışarıdan beslendiği durumda çalışabilmesi prensibiyle pilden farklılık gösterir [Sammes, 2006].

2.1. Yakıt Hücrelerinin Tarihçesi

1838'de Alman bilim adamı C. Friedrich Schönbein, suyun elektrolizini tersine döndürerek elektrik ve ısı açığa çıkarmayı başarmış ve bu çalışmasını 1839'da yayınlamıştır. Bu çalışmadan esinlenen Galli bilim adamı W. Robert Grove 1843 yılında günümüzdekine benzer ilk yakıt hücresini geliştirmiştir. Sonraki yıllarda General Electric şirketi çalışanları W. Thomas Grubb ve L. Niedrach tarafından elektrolit olarak kullanılan membran ve membran üzerine platin kaplama metotları geliştirilmiştir. Grubb-Niedrach yakıt hücresi olarak anılan yakıt hücresi, General Electric ve NASA işbirliğiyle geliştirilmeye devam ederek Gemini uzay projesinde 1960'lı yıllarda kullanılmıştır. 1959'da İngiliz mühendis F. Thomas Bacon 5 kW'lık durağan bir yakıt hücresi geliştirmiştir. Bu sistem, elektrolit olarak potasyum hidroksit, reaksiyona giren maddeler olarak da sıkıştırılmış hidrojen ve oksijen kullanılmaktaydı. 1959'un sonlarına doğru Bacon ve ekibi bir kaynak makinesini çalıştırabilen 5 kW'lık bir yakıt hücresi geliştirmiştir. 1960'larda Bacon'ın patentleri ABD'nin uzay programında elektrik ve içme suyu sağlamada kullanılmıştır. Aynı yılın sonlarında H. Karl Ihring 20 beygir gücünde bir yakıt hücresiyle çalışan traktör dizayn etmiş, bu buluş günümüzdeki modern yakıt hücresiyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur. 1970'li yıllarda General Motors "Elektrovan" adlı yakıt hücresiyle çalışan bir araç geliştirmiştir ve aynı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde, devlet destekli yakıt hücresi araştırmaları başlamış, bu amaçla Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarları kurulmuştur.

2.2. Yakıt Hücrelerinin Çalışma Prensipleri

Yakıt hücrelerinin çalışma prensibi kataliz temeline dayanmaktadır. Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar neticesinde, yakıt elektron ve protonlarına ayrılır. Elektrolit görevi gören membran elektronik olarak yalıtkan, iyonik olarak iletken bir yapıya sahiptir. Bu yüzden protonlar membran içerisinde bir tabakadan diğerine taşınırken, elektronlar bir elektronik devre üzerinden akmaya zorlanır. Böylece iki tabaka arasında gerilim farkı oluşur. Sistemden akım çekildiğinde bu gerilim farkı elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur. Devre üzerinden akan elektronlar toplanarak oksitleyici ile birleşerek su, karbon dioksit ve ısı gibi son ürünleri oluşturur. Anot ve katot kısımlarında elektronik iletkenliği yüksek tabakalar vardır. Yakıt olarak genellikle hidrojen kullanılır. Diğer yakıtlar arasında hidrokarbonlar ve alkoller sayılabilir. Bu yakıtlar, yakıt hücresindeki anot kısmına beslenirken, katot kısmına hava ve oksijen gibi bu yakıtı oksitleyici gazlar beslenir. Hava, klor, ve klor dioksit oksitleyici olarak kullanılabilir. [Meibuhr, 1966] Genellikle anot ve katot kısımlarındaki gaz beslemeleri, bu kısımlardaki gaz akış kanalları yoluyla gerçekleştirilir. Bir yakıt hücresi dizini, bir yakıt hücresinin bir diğer yakıt hücresine peş peşe elektriksel seri devresi şeklinde, bir hücrenin anodu, diğer hücrenin katoduna olacak şekilde bağlanmasıyla meydana gelir. En uç noktadaki anot ve katot tabakaları birbirine bağlanarak sistem kapalı elektrik devresine dönüştürülmüş olur.

2.3. Yakıt Hücresi Tipleri

Günümüzde farklı çalışma koşulları, farklı yakıt, oksitleyici ve bileşenleri olan çok sayıda yakıt hücresi tipi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları üzerinde geliştirme, bazıları üzerinde ise daha çok deneme sayılabilecek türden çalışmalar yapılmaktadır. Yakıt hücreleri genellikle elektrolitlerine veya kullandıkları yakıtı göre isimlendirilirler. En çok bilinen yakıt hücreleri, kullandıkları elektrolitler, yük transfer türü, yakıt tipleri, çalışma sıcaklıkları, güç aralıkları gibi özellikleri ile birlikte Tablo2.1'de gösterilmektedir. Bu yakıt hücrelerinin avantaj ve dezavantajları ile uygulama alanları da Tablo 2.2'de verilmiştir:

Tablo 2.2: Yakıt hücresi türleri ve bazı özellikleri.

Yakıt Hücresi Türleri	Elektrolit	Mobil İyon	Çalışma Sıcaklığı	Güç Aralığı	Yakıt	Verim
Proton Geçirgen Membran (PEM)	Nafion	H ⁺	20-100 °C	1W-200kW	H ₂	35-50%
Alkali (AFC)	Bazik Solüsyon (NaOH, KOH)	OH ⁻	50-100 °C	1W-250kW	H ₂	35-50%
Fosforik Asit (PAFC)	Fosforik Asit (H ₃ PO ₄)	H ⁺	190-220 °C	10kW-1MW	H ₂	35-50%
Eriyik Karbonat (MCFC)	Eriyik Alkali Karbonat (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	CO ₃ ⁻²	600-650 °C	200kW-10MW	H ₂ , CO	45-60%
Katı Oksit (SOFC)	Seramik (YSZ, CeO ₂)	O ⁻²	500-1000 °C	1W-250kW	H ₂ , CO, CH ₄	45-60%
Doğrudan Alkol (Metanol, Etanol, Formik Asit) (DMFC, DEFC, DAFC)	Nafion	H ⁺	50-100 °C	<1W-250W	CH ₃ OH, C ₂ H ₅ OH, HCOOH	25-40%
Doğrudan Bor Hidrür (DBFC)	Bazik Solüsyon, Anyon Veya Katyon Geçirgen Zar	OH ⁻	20-100 °C	1W-200W	BH ₄ ⁻	35-50%

Tablo 2.3: Yakıt hücrelerinin kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları.

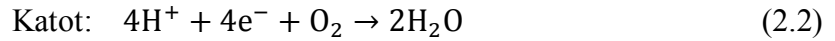
Yakıt Hücresi Türleri	Kullanım Alanları	Avantajları	Dezavantajları
Proton Geçirgen Membran (PEM)	<ul style="list-style-type: none"> Portatif Sistemler <ul style="list-style-type: none"> Jeneratör Askeri Sistemler 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük sıcaklık Yüksek enerji yoğunluğu, hafif Hızlı ilk çalışma 	<ul style="list-style-type: none"> Çok saf H₂ (99,99%) Pahalı katalizör
Alkali (AFC)	<ul style="list-style-type: none"> Uzay Araçları 	<ul style="list-style-type: none"> Katottaki aktivasyon kaybı düşük Sıvı elektrolit 	<ul style="list-style-type: none"> Çok saf H₂ Pahalı katalizör
Fosforik Asit (PAFC)	<ul style="list-style-type: none"> Elektrik Santralleri Orta Ölçekli İşletmeler için Isı ve Elektrik 	<ul style="list-style-type: none"> Saflığı düşük hidrojen kullanılabilir Sıvı elektrolit, yüksek temas 	<ul style="list-style-type: none"> Pahalı katalizör Düşük Enerji yoğunluğu
Eriyik Karbonat (MCFC)	<ul style="list-style-type: none"> Elektrik Santralleri 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek verim Yakıt çeşitliliği Ucuz katalizör Sıvı elektrolit 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek sıcaklık Korozyon
Katı Oksit (SOFC)	<ul style="list-style-type: none"> Elektrik Santralleri Orta Ölçekli İşletmeler için Isı ve elektrik Portatif Sistemler 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek verim Yakıt çeşitliliği Ucuz katalizör Katı Elektrolit 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek sıcaklık Korozyon Üretimi zor ve pahalı
Doğrudan Alkol (Metanol, Etanol, Formik Asit) (DMFC, DEFC, DAFC)	<ul style="list-style-type: none"> Portatif Sistemler 	<ul style="list-style-type: none"> Ucuz yakıt Kolay depolanan sıvı yakıt 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük verim Metanol zehirli bir yakıttır
Doğrudan Bor Hidrür (DBFC)	<ul style="list-style-type: none"> Deneme aşamasında 	<ul style="list-style-type: none"> Alternatif yakıt Yüksek açık uç gerilimi 	<ul style="list-style-type: none"> Yakıtın elde edilmesi zor

2.4. PEM Tipi Yakıt Hücresi

PEM tipi yakıt hücresi, Proton Geçirgen Membran veya Polimer Elektrolit Membran şeklinde isimlendirilen yakıt hücresi tipidir. Basit, hafif, ilk çalışması hızlı, yüksek enerji yoğunluklu ve düşük sıcaklıklarda çalışabilme özelliklerine sahip olduğundan günümüzdeki yakıt hücresi araştırmalarının büyük bir kısmı bu tipteki yakıt hücresi üzerinde yoğunlaşmaktadır [Basu, 2007].

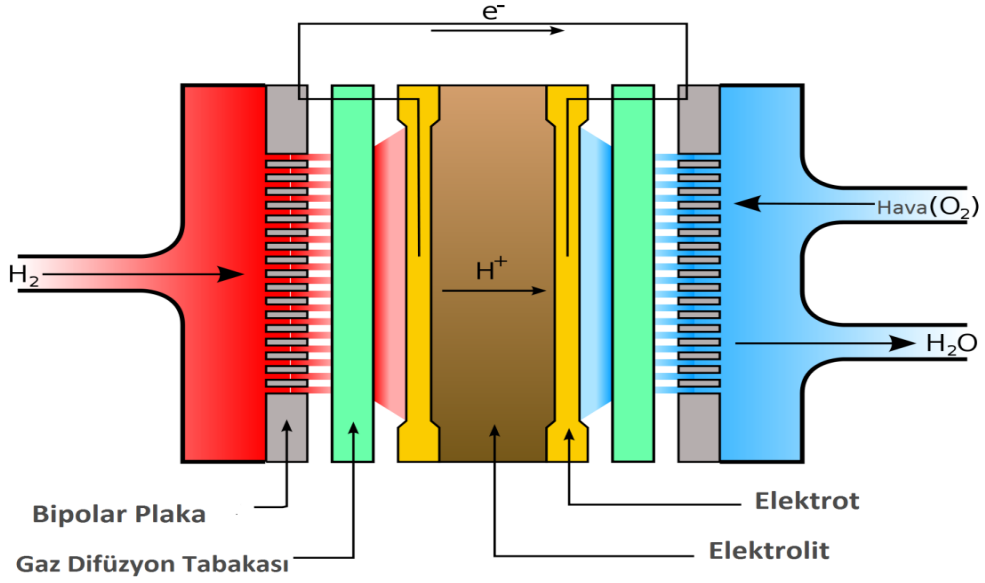
PEM yakıt hücrelerinde yakıt olarak hidrojen, oksitleyici olarak oksijen veya hava kullanılırken, elektrolit olarak iyonik iletkenliği yüksek, elektronik iletkenliği oldukça düşük bir membran kullanılmaktadır. Anot tarafında hidrojen gazı yükseltgenirken, katot tarafında ise oksijen gazı indirgenmektedir. Anot ve katot kısımlarındaki bu reaksiyonların gerçekleşebilmesi için çeşitli özelliklerde katalizörler kullanılmaktadır.

Reaksiyonlar, membranın her iki yüzeyine homojen olarak dağıtılmış olan anot ve katot katalizör tabakalarında meydana gelir. Bir PEM tipi yakıt hücresinde anot ve katot reaksiyonları ile net reaksiyon aşağıdaki gibidir:

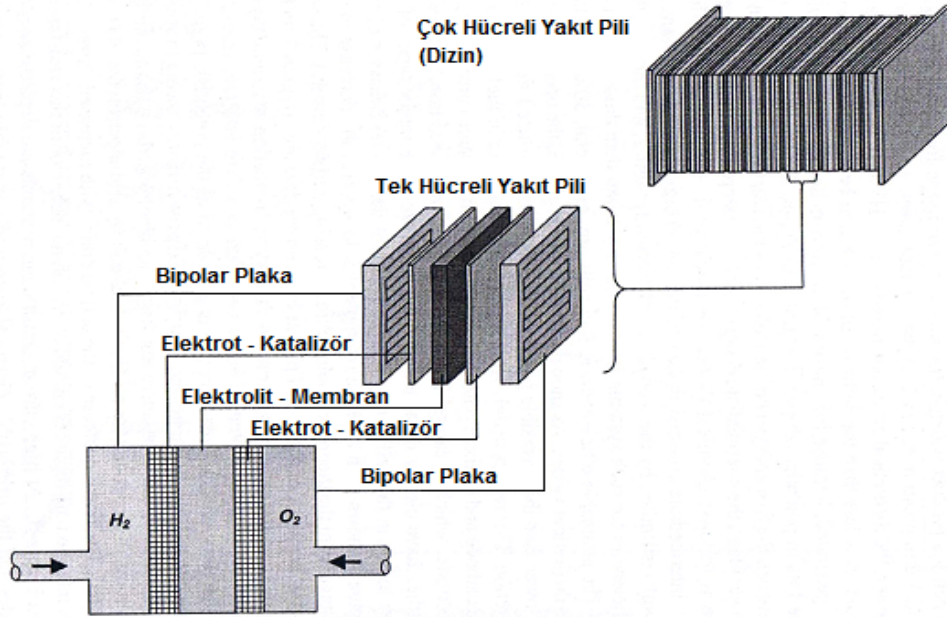


Anotta oluşan elektronlar membrandan geçemez ve katoda devreyi dışarıdan kapatan iletken bir yol üzerinden iletilirken, H^+ iyonları iyonik iletken membran içerisinden geçerek katoda ulaşmaktadır. Katot kısmında oksijen, H^+ iyonları ve elektronlarla birleşerek su ve ısı açığa çıkarmaktadır. Bu şekilde bir yakıt hücresindeki tüm hücrelerde üretilen elektronlar, hücre dışarısından kapalı bir elektrik devresi oluşturularak hareket ettirilmektedir. Elektronların sahip oldukları potansiyel enerji, kinetik enerjiye dönüştürülmekte ve böylece yakıt hücresinden elektrik akımı, dolayısıyla enerji elde edilmektedir.

Şematik olarak PEM tipi yakıt hücresi şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: PEM tipi yakıt hücresinin şematik gösterimi.



Şekil 2.2: Tekli ve çok hücreli PEM yakıt hücresi şematik gösterimi.

Entalpi (H), maddenin yapısında depoladığı tüm enerjilerin toplamıdır. Bir mol maddede depolanmış enerjiye o maddenin molar entalpisi denir. Bir maddenin entalpisinin tam olarak tespiti çok zordur. Kimyasal reaksiyonda girenler ve ürünler arasındaki enerji farkı o reaksiyon sonucu entalpideki değişimi (ΔH) vermekte ancak gerçekte bu enerjinin tamamı açığa çıkamamaktadır [Barbir, 2005]. Bu reaksiyonlar

sonucu açığa çıkabilecek enerjiye Gibbs Serbest Enerjisi (ΔG) adı verilmektedir. Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki gibidir:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

Entropi (S), bir sistemin mekanik işe çevrilemeyecek termal enerjisini temsil eden termodinamik terimidir. Çoğunlukla bir sistemdeki rastgelelik ve düzensizlik olarak tanımlanır. Gerilim (V), 1 mol elektron başına üretilen enerji miktarına denilmektedir. Yakıt hücresinden elde edilen elektriksel terminolojideki gerilim kavramı, entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi kavramlarına bağlıdır. Teorik olarak gerilim iki şekilde hesaplanabilir:

Termonötr gerilim:
$$V_{tn} = -\Delta H / n.F \quad (2.5)$$

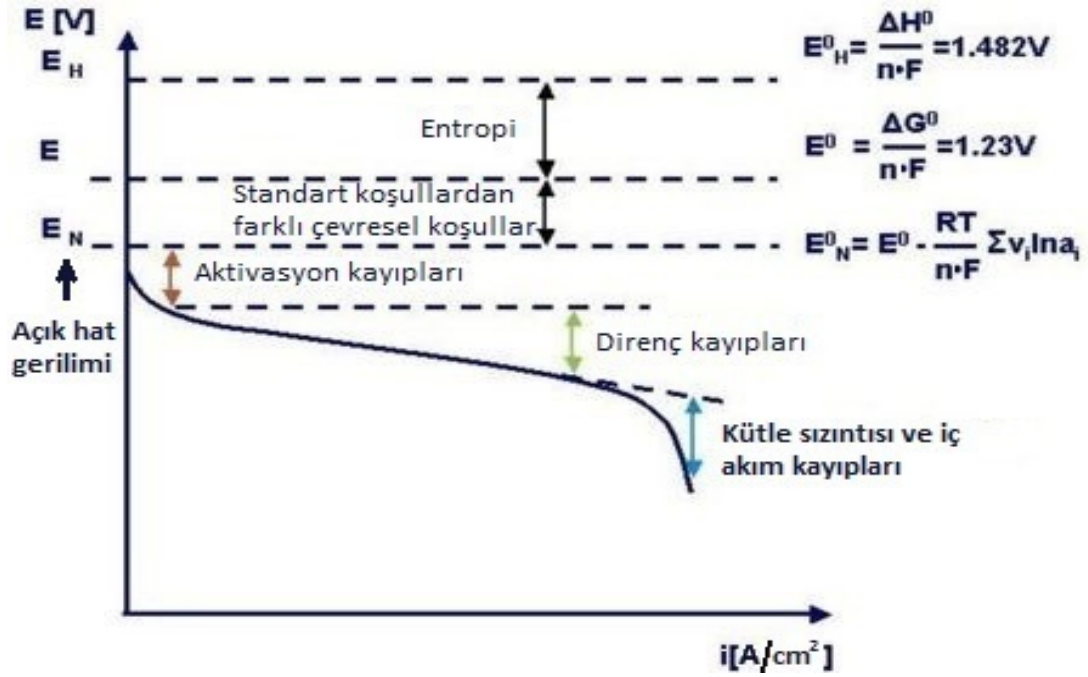
Teorik gerilim:
$$V_{teo} = -\Delta G / n.F \quad (2.6)$$

Bu durumda, anot ve katot kısımları için farklı entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi değerleri ile farklı gerilim değerleri elde edilir. Ancak bir yakıt hücresinden elde edilen net gerilim, anot ve katotta oluşan bu farklı gerilim değerlerinin arasındaki fark kadardır.

Tablo 2.4: Entalpi değişimi, Gibbs serbest enerjisi ve gerilim değerleri.

Isı Durumu	Entalpi Değişimi (ΔH) (kJ/mol)	Gibbs Serbest Enerjisi (ΔG) (kJ/mol)	Termonötr Gerilim (V)	Teorik Gerilimi (V)	Sıcaklık (°C)
Yüksek Isı (Oluşan ürün sıvı su)	-286,02	-237,34	1,48	1,23	25
	-284,85	-231,63	1,48	1,20	60
	-284,18	-228,42	1,47	1,18	80
Alçak Isı (Oluşan ürün Su buharı)	-241,98	-228,74	1,25	1,19	25
	-242,37	-226,79	1,25	1,18	60
	-242,60	-225,63	1,25	1,17	80

Pratikte yakıt hücrelerinden elde edilen gerilim bazı kayıplar neticesinde yaklaşık 1 V'a kadar düşmektedir. Bu kayıplar aktivasyon kaybı, direnç kaybı, kütle transferi kaybı, yakıt sızıntısı ve iç akım kaybıdır. Genel olarak sistemden çekilen akım arttıkça kayıplar da artar. Kayıpları gerilim akım değişimini veren polarizasyon eğrileri üzerinde inceleyebiliriz. Örnek bir polarizasyon eğrisi aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.3: PEM tipi yakıt hücresinde oluşan kayıplar.

2.4.1. Aktivasyon Kayıpları

PEM tipi yakıt hücrelerinde bu kayıplar elektrotların yüzeyinde meydana gelen reaksiyonların yavaşlığından kaynaklanır. Tepkime esnasında üretilen gerilimin bir kısmı, elektron transferi sırasında kaybolur. Her kimyasal reaksiyonda olduğu gibi, yakıt hücresinde gerçekleşen reaksiyonlar için de bir aktivasyon enerjisi söz konusudur. Reaksiyona girenler, belirli bir aktivasyon enerjisine ulaşmadıkça reaksiyon gerçekleşmez. Reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle platinden yapılan katalizör kullanılır. Anot ve katot reaksiyonları bu katalizörlerin yüzeyinde gerçekleşmektedir. Gerekli aktivasyon enerjisine ulaşamayan katalizörlerin üzerinde reaksiyon gerçekleşmez ve bu genel olarak aktivasyon kaybı denilen kayıpların oluşmasına yol açar. Aktivasyon kaybı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V_{ak} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n_e \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (2.7)$$

Burada, R ideal gaz sabiti, T sıcaklık; α yük transfer katsayısı, n_e aktarılan elektron sayısı, F Faraday sabiti, i hücreden çekilen akım yoğunluğu, ve i_0 denge

akım yoğunluğu olmaktadır. Yük transfer katsayısı, reaksiyonun ileri yöndeki hızının geri yöndeki hızına oranıdır ve elektrot malzemesiyle ilişkilidir [Larminie, 2003]. Hidrojen elektrotu ve günümüzde kullanılan bir çok malzeme için 0,5 civarındadır. Oksijen elektrotu içinse 0,1-0,5 arasındadır. Denge akım yoğunluğu yakıt hücresinden hiç akım çekilmediğinde oluşan akım yoğunluğudur.

2.4.2. Direnç Kayıpları

PEM tipi yakıt hücrelerinde, hücre içerisindeki elektron ve iyonların hareketleri esnasında karşılaştıkları dirençler nedeniyle oluşan kayıplara direnç kayıpları ya da ohmik kayıplar denilmektedir. Bu dirençler elektrotların elektriksel direnci ve elektrolitin iyonların akışına gösterdiği dirençle olabildiği gibi, elektronların devreyi tamamlaması esnasında yol boyunca diğer sistem elemanlarında karşılaştıkları dirençler de olabilmektedir. Bu kayıpların büyük kısmını sistemin bütün elemanlarının kendi aralarındaki temas noktalarında oluşan dirençler oluşturmaktadır. Yakıt hücresindeki direnç kaybı şu denklemlerle hesaplanmaktadır:

$$V_d = i \cdot R \quad (2.8)$$

Burada i , akım yoğunluğu, R , hücrede 1 cm^2 'lik alanda oluşan dirençtir.

2.4.3. Kütle Transferi (Konsantrasyon) Kayıpları

PEM tipi yakıt hücrelerinde anot ve katottaki reaksiyonlarda ortaya çıkan ürünlerin yeni reaksiyona girecek ürünleri engellemesi veya bazı bölgelere yeterli reaksiyona girecek gaz gelmemesi sonucu oluşan kayıplara kütle transferi kaybı denilmektedir. Katotta yakıt hücresinden çekilen akıma göre artan hava sirkülasyonu, katottaki oksijenin yüzde olarak azalmasına sebebiyet vererek, oksijenin kısmi basıncında azalmaya neden olmaktadır. Benzer konsantrasyon kaybı hidrojen tarafında da olabilmektedir fakat anot tarafında oluşan H^+ iyonu zardan geçip geldiği kanala geri dönmediği için anot tarafında bu kayıp pek önemsenmeyecek boyutta olmamaktadır. Yakıt hücresinde gerçekleşen gerilim kaybı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$V_{kt} = R.T/n.F \cdot \ln\left(\frac{i_l}{i_l - i}\right) \quad (2.9)$$

Voltaj arttıkça akım yoğunluğu da artmakta fakat belli bir noktadan sonra voltaj artışı akım yoğunluğunda hiçbir değişikliğe sebep olmamaktadır ve bu akım değerine limit akım (i_l) denilmektedir.

2.4.4. Yakıt Sızıntısı ve İç Akım Kaybı

PEM tipi yakıt hücrelerinde elektrolitin gaz ve elektronların diğer tarafa geçmesine izin vermiyor olmasına rağmen, az miktarda gaz ve elektron geçişi olabilmektedir. Genellikle daha küçük partikül yapısına sahip olduğundan anot tarafından katot tarafına geçen hidrojen, geçtiği yerde katot reaksiyonunun oluşmasına mani olmakta ve bu da katotta oluşan gerilimin düşmesine sebebiyet vermektedir. Böylece yakıt hücresinin içinde, dışarı çıkamayan bir iç akım oluşmaktadır. Aktivasyon kaybı ifadesindeki hücreden çekilen akım, oluşan bu iç akımla birlikte toplanarak, ifade aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilmektedir:

$$V_{ak} = R.T/\alpha \cdot n_e \cdot F \cdot \ln\left(\frac{i + i_{iç}}{i_0}\right) \quad (2.10)$$

Tüm kayıplar birlikte yakıt hücresindeki gerilim aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$V = V_{teo} - \frac{R.T}{\alpha \cdot n_e \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{i + i_{iç}}{i_0}\right) - i \cdot R - \frac{R.T}{n.F} \cdot \ln\left(\frac{i_l}{i_l - i}\right) \quad (2.11)$$

2.4.5. PEM Tipi Yakıt Hücresi Verimi

Yakıt hücresinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan Gibbs serbest enerjisinin, bu reaksiyonların entalpisine oranına termodinamik verim (η_t) denilmektedir. PEM tipi yakıt hücrelerinin yüksek ısı değerine göre termodinamik verim değeri % 83, alçak ısı değerine göre termodinamik verim değeri % 94.5'tir [Barbir, 2005].

$$\eta_t = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2.12)$$

Yakıt hücresinde meydana gelen gerilim kayıpları hesaba katılarak hesaplanan verime kinetik verim (η_k) denilmektedir. Kinetik verim, yakıt hücresinde oluşan gerilimin teorik olarak oluşması gereken verime oranıdır. Kinetik verim, yüksek ısı değerine ve alçak ısı değerine göre aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_{ky1} = V / \frac{-\Delta H_{y1}}{n \cdot F} \quad (2.13)$$

$$\eta_{ka1} = V / \frac{-\Delta H_{a1}}{n \cdot F} \quad (2.14)$$

Kinetik verim hesabına yakıt hücrelerine beslenen yakıtların sitokiyometrileri (S_y) de katılırsa ortaya çıkan verim, pratik verim olur. Yüksek ısı ve alçak ısı değerine göre pratik verim aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_{py1} = \frac{1}{S_y} \cdot V / \frac{-\Delta H_{y1}}{n \cdot F} \quad (2.15)$$

$$\eta_{pa1} = \frac{1}{S_y} \cdot V / \frac{-\Delta H_{a1}}{n \cdot F} \quad (2.16)$$

2.5. PEM Tipi Yakıt Hücresi Elemanları

PEM tipi bir yakıt hücresi, başlıca MEA, gaz difüzyon tabakası (GDL) ve bipolar (çift kutuplu) plakalardan meydana gelir.

Bunlardan başka, yakıt hücresi içerisindeki gaz sızdırmazlıklarını sağlayan ve hücreye uygulanan sıkma kuvvetlerinin yüzeye homojen uygulanmasını sağlayarak MEA'nın ezilmesini engelleyen contalar kullanılır. Genellikle çalışma sıcaklıklarında deforme olmayan, korozyona dayanıklı, mukavemeti yüksek yapıdaki silikon ve

teflon türündeki film tabakalar malzeme seçimi için uygundur. Yakıt hücresinde üretilen elektronların iyi bir şekilde kayıplara uğramadan toplanabilmesi için elektronik iletkenliği yüksek metal akım toplayıcı plakalar kullanılmaktadır.

2.5.1. MEA

PEM tipi yakıt hücrelerinde membran, anot ve katottan oluşan yapıya MEA denilmektedir. Elektrolit görevi üstlenen ve içerisinde hidrojen iyonları geçen zar şeklindeki tabaka membrandır. Membranın her iki yüzünde anot ve katot katalizör tabakaları yer almaktadır. Anotta hidrojen yükseltgenmesi, katotta ise oksijen indirgenmesi ve su üretimi gerçekleşir. Bir yakıt hücresinin kalbi denebilecek kısım MEA kısmıdır. Membranın yüksek iyonik iletkenliğe sahip, gaz geçişine izin vermeyen, elektriği iletmeyen, belli mekanik yüke dayanabilen, ısıl genişmesi belli bir değerin altında bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Bu özelliklere en yakın malzeme, günümüzde oldukça geniş ölçüde ticarileşmiş olan Nafion'dur.

Katot reaksiyonu anot reaksiyonuna göre daha zor gerçekleşen bir reaksiyondur. Bunun için katot tarafında daha etkili katalizörler kullanılmalıdır. Anot ve katot tarafında gerçekleşen reaksiyonların yaklaşık aynı hızda olması istenir. Bu durumda anot tarafında ya daha düşük aktiflikte bir katalizör kullanılır, genelde ucuz olur, ya da anottaki katalizör yükleme miktarı az tutulur. Böylece katot reaksiyonunun sınırlayıcılığı kısmen azaltılmış olmaktadır.

2.5.2. Gaz Difüzyon Tabakası

PEM tipi yakıt hücrelerinde gaz difüzyon tabakalarının yaptığı görevler aşağıdaki gibi sıralanabilir [Barbir, 2005]:

- Bipolar plaka ile gelen gazı anot ve katoda homojen olarak dağıtmak
- Hücre içerisinde elektronların gerekli yerlere ulaşmasını sağlamak
- Anot ve katotta oluşan ısının bu tabakalardan uzaklaştırılmasını sağlamak
- Katalizör tabakasıyla çift kutuplu tabaka arasındaki temas direncini azaltmak
- Sıkıştırma sırasında membranın çift kutuplu tabaka tarafından yırtılmasını veya membranın gaz akış kanallarının içine doğru esnemesini engellemek

Gaz, elektron, su ve ısı transferine izin verebilen bir yapıda olması gerektiğinden gözenekli, iletken (hem ısıl hem de elektronik) ve hidrofob bir yapısı

vardır [Barbir, 2005]. Bu özelliklere sahip karbon kağıdı ve karbon kumaşı olarak adlandırılan malzemeler mevcuttur. Gaz difüzyon tabakasında temas direncini azaltmak ve yüzeyde oluşan suyun kılcallık etkisi sayesinde yüzeyden hızlıca uzaklaştırılmasını sağlamak için katalizör ile temas eden yüzey mikro gözenekli olacak şekilde karbonla kaplanır. Bu tabakanın hidrofobluğunu arttırmak için genellikle teflon ile bu kağıt takviye edilmektedir [Barbir, 2005].

2.5.3. Bipolar Plakalar

Yakıt hücrelerinde birincil görev olarak gazların MEA'ya homojen şekilde iletilmesi sağlayan plakalar, tekli bir yakıt hücresinde birer yüzleri işlenmiş şekildedir. Çoklu bir yakıt hücresinde bu plakaların bir yüzü anot, bir yüzü katot olmak üzere her iki yüzü de gaz kanalları açılarak işlenmektedir. Bu plakalar bir hücrenin anoduyla aynı yükteyken diğer hücrenin katoduyla aynı yükteyken, yani bir hücreye bakan tarafı eksi yüklü kutupken diğer hücreye bakan tarafı o hücre için artı yüklü kutuptur. Bu özelliğinden dolayı bu plakalara çift kutuplu plakalar denilmektedir. Genel olarak PEM tipi yakıt hücrelerinde kullanılan çift kutuplu plakaların sahip olmaları gereken özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

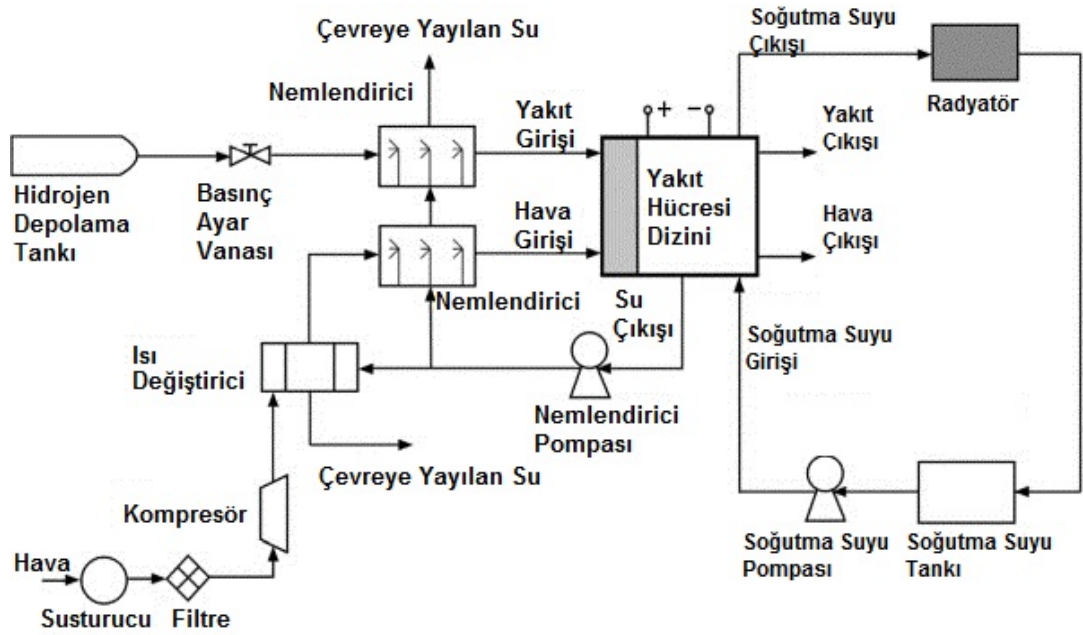
- Yüksek elektriksel iletkenlik – Hücreler arasında elektron transferi için.
- Düşük gaz geçirgenliği – İki farklı gazın birbirinin olduğu tarafa geçmesi durumunda hem yakıt hem gerilim kaybı yaşanmaması için.
- Mekanik dayanıklılık – Hücre dizini oluşturmada yapısal dayanıklılık için.
- Hafiflik – Portatif uygulamalarda hafiflik için.
- Yüksek ısı iletkenlik – Yakıt hücresinde oluşan ısının uzaklaştırılması için.
- İşlenebilirlik – Yakıt hücresine beslenen gazların beslenmesi için kullanılan akış kanallarının işlenebilmesi için.
- Korozyona karşı dayanıklılık – Yakıt hücrelerindeki asidik, hidrojen ve oksijen gazı bulunan ve farklı gerilimlerin olduğu ortama dayanabilmesi için.

Yukarıda belirtilen özellikleri sağlayan grafit polimer kompozit plakalar ve metalik plakalar konusunda araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Günümüzde ticari olarak hazırlanan yakıt hücresi sistemlerinin çoğunda grafit plakalar tercih edilmektedir. Metal plakaların yüzeyine farklı kaplamalar yapılarak korozyon ve temas direnci değerleri iyileştirilebilmektedir.

2.6. PEM Tipi Yakıt Hücresi Sistemi Elemanları

Bir yakıt hücresi sistemi dizayn ederken hidrojen ve oksijenin karakterine uyumlu parçalar kullanılması önemlidir. Sistemin verimini yükseltmek için sistemden dışarı atılan ısı miktarının mümkün olduğunca az tutulması gerekmektedir. Yakıt pili sistemleri tasarlanırken, yakıt pilinin uygulanacağı sistemin atalet ve güç gibi ihtiyaçları da göz önünde bulundurulmalıdır. Yakıt pillerinin kontrolü, dizaynı ve optimum çalışma durumu için süreksiz hareket durumlarında akım, gerilim ve güç değişikliklerini tam olarak anlayabilmek gerekir. Bu dinamikler konut ve otomotiv uygulamaları için önemlidir. Süreksiz çalışma durumu, ani güç gereksiniminin olduğu durumların ya da taşıtın hızlanması veya yavaşlaması şartlarının bir sonucu olarak ortaya çıkabilir [Kim, et al., 2004].

Şematik örnek bir sistem şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Örnek bir yakıt hücresiyle çalışan sistem şeması.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. PEM Tipi Yakıt Hücresi Hazırlama Metotları

PEM tipi yakıt hücrelerinin MEA'larını hazırlamak için pek çok farklı yöntem bulunmuştur. Katalizör tabakasının homojen bir şekilde membran veya gaz difüzyon tabakasına kaplanması gerekmektedir. Katalizör tabakasının içinde Nafion ve katalizörler homojen olarak dağılmalıdır. Genellikle iki farklı şekilde MEA hazırlanmaktadır. Ya membran katalizör ile kaplanmakta, ya da gaz difüzyon tabakası katalizör ile kaplanmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda taşıyıcı kağıt metodu ile, yani membran üzerine katalizör kaplanarak MEA hazırlanması tercih edilmiştir. Bu yöntem diğer yöntemlere göre daha homojen bir katalizör tabakası elde edilmesini sağlamaktadır [Smirnova et. al, 2006].

MEA hazırlanmadan önce katalizör hazırlanır ve hazırlanan bu katalizör, katalizör çamuruna dönüştürülür. Ardından bu çamur, ipek baskı yöntemi (veya taşıyıcı kağıt yöntemi) ile iki adet teflon kağıt üzerine, istenilen boyutlarda, homojen olarak aktarılır. Daha sonra bu teflon kağıtlarının arasına Nafion yerleştirilip sıcak pres yöntemi ile Nafion'un faz değişimi sıcaklığını geçmeyecek şekilde belirli sıcaklık ve sürede basınç uygulanır. Böylece teflon üzerinde bulunan katalizör tabakası Nafion'un üzerine yapışır. Bir spatül yardımıyla teflon kağıtlar ile Nafion'un birbirinden ayrılması sağlanır. Bu ayrılma neticesinde anot ve katot katalizör tabakaları Nafion'un her iki yüzeyine kaplanmış olur. Plakalardan birinin üzerine silikon conta uygun şekilde kesilerek konulur. Gaz difüzyon tabakası plakadaki aktif alan boyutlarında kesilerek gaz akış kanalının üzerine yerleştirilir. Üzerine MEA yerleştirilir ve tam oturmuş olmasına dikkat edilir. Bunların üzerine ikinci bir gaz difüzyon tabakası ve silikon conta da yerleştirildikten sonra üzerine ikinci plaka yerleştirilir ve bu işlemlerin ardından sıkma işlemi yapılır. Çoklu bir yakıt hücresi sistemi için yerleştirme aşamaları tekrar edilerek sistem bir araya getirilir.

3.1.1. Katalizör Hazırlanması

Yakıt hücrelerinde kullanılması öngörülen katalizörlerin bazı özelliklere sahip olmalıdır. Bu özelliklerin en önemlilerinden birisi, katalizörün istenilen tane

boyutunda olmasıdır. Tanecik boyutu gerekli aktivasyon enerjisini sağlayabilecek kadar büyük, toplam aktif yüzey alanını çok düşürmeyecek kadar da küçük olmalıdır.

Katalizörün saflığı, PEM tipi yakıt hücrelerinde oldukça yüksek öneme sahiptir. Safsızlıklar aktif yüzey alanında azalmaya, membranın iyonik iletkenliğinin düşmesine, hücre içerisinde su yönetiminin kötüleşmesine sebep olmaktadır.

Katalizörün aktif yüzey alanı, katalizör üzerindeki reaksiyonların gerçekleştiği alandır. Aktif yüzey alanı ne kadar büyük olursa, gerçekleşen reaksiyon sayısı da o kadar artmakta, bu da hücrenin performansını doğrudan etkilemektedir.

Katalizör sentezi için kullanılan çok sayıda yöntem bulunmaktadır. PEM tipi yakıt hücrelerinde yaygın olarak kullanılan malzeme platindir. Platin katalizör olarak tek başına kullanılmamakta, bir destek malzemesiyle birlikte hazırlanmaktadır. Günümüzde destek malzemeleri çoğunlukla karbon esastır. Platin tanelerinin karbon desteğinin yüzeyinde homojen olarak dağılmış olması aktif yüzey alanının artmasını sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan, ağırlıkça %45'lik platin içeren karbon destekli katalizörlerde platin, hegzakloroplatinik asit ($H_2PtCl_6 \times 6H_2O$)'ten elde edilirken, karbon için Vulcan XC-72 adlı başlangıç malzemesi kullanılmıştır. İndirgeyici ajan olarak sodyum bor hidrür ($NaBH_4$) kullanılması tercih edilmiştir. %45Pt/C katalizör hazırlanışı şu şekildedir:

50mg karbon (Vulcan XC-72) tartılarak 50ml'lik behere konur. Üzerine 4ml metanol eklenerek distile su ile 10 ml'ye tamamlanır. Bu aşamada platinin sulu ara çözeltisi kullanılır. Platin ara çözeltisi 10 ml kadar alınır, ikinci bir behere konur ve üzerine 140 ml distile su ilave edilerek manyetik karıştırıcıda karıştırılır, üzerine seyreltilmiş amonyum hidroksit (NH_3OH) eklenir. Çözeltinin pH'ı 5.0 oluncaya kadar amonyum hidroksit eklenmeye devam edilir. Diğer yandan, 5,8 mg $NaBH_4$ tartılarak distile su ile 14 ml'ye tamamlandıktan sonra ağzı kapalı üçüncü bir kaba konur. Bu kap dondurucuda bekletilir. Karbon konulan birinci kap ultrasonik karıştırıcıda 5 dk kadar karıştırılır. Dondurucuya konan ikinci $NaBH_4$ kabı alınarak birinci kaba boşaltılır ve birinci kap 1 dakika daha ultrasonik karıştırıcıda karıştırılır.

Birinci ve ikinci kapların karıştırılmasıyla hazırlanan, destek malzemesi ve indirgeyici ajan içeren çözelti, manyetik karıştırıcıda çok hızlı bir şekilde karıştırılır ve pH'ı 5.0 olarak ayarlanan platinik asit çözeltisine aniden boşaltılır. Bu son karışım 1 dakika daha hızlı karıştırıldıktan sonra bir kenara ayrılır ve platinler kabın dibine çökene kadar beklenir.

Bekleme sonrası çözelti vakumla 0,45 µm'lik süzgeç kağıdından geçirilerek veya santrifüj kullanılarak süzülür. Süzgeç kağıdından elde edilen veya santrifüj tüpünün dibine çöktürülen katalizör kalıntısı, iyice temizlendiğinden emin olunana dek bir kaç kez yıkanır ve ardından vakumlu etüvde kurutulur. Kurutulan kalıntı, uygun büyüklükte bir havanda dövülerek ve 60 delik/inç'lik elekten geçirilerek ince toz halinde katalizör elde edilir.

Elde edilen katalizör tozu ile katalizör çamurunun hazırlanışı aşağıdaki gibidir:

Hazırlanacak katalizör yeterli büyüklükte bir behere konur ve tartılır. Bu miktarın 5-10 katı kadar distile su bu katalizöre eklenir. Katalizör miktarının 5-10 misli kadar propandiol ve 5-20 misli kadar izopropanol de bu kaba eklenir ve manyetik karıştırıcıya konur. Katalizör ağırlığının 6,94 misli kadar %5'lik Nafion çözeltisi karışıma katılır. Nafion'un buradaki görevi, membran üzerindeki katalizör tabakasının içerisinde H⁺ iyonlarının iletimini kolaylaştırmaktır [Dündar, 2011]. Bu karışım ağzı açık bırakılarak manyetik karıştırıcıda karışmaya bırakılır. Katalizörün içerisindeki alkoller zamanla uçar ve kıvamı katılaşılarak kullanıma hazır hale gelir.

3.2. Yakıt Hücresi Ölçümleri

PEM tipi yakıt hücreleri için kullanılan katalizörler sıvı elektrolit ortamında ön performans testlerine tabi tutulabilirler, analitik yöntemlerle birçok parametreleri tespit edilebilir veya bu katalizörler kullanılarak hazırlanan MEA'lar bir takım performans testlerine tabi tutulabilirler [Dündar, 2011]. PEM tipi yakıt hücrelerinin performanslarının ölçümü için yakıt hücresi test istasyonları kullanılmaktadır.

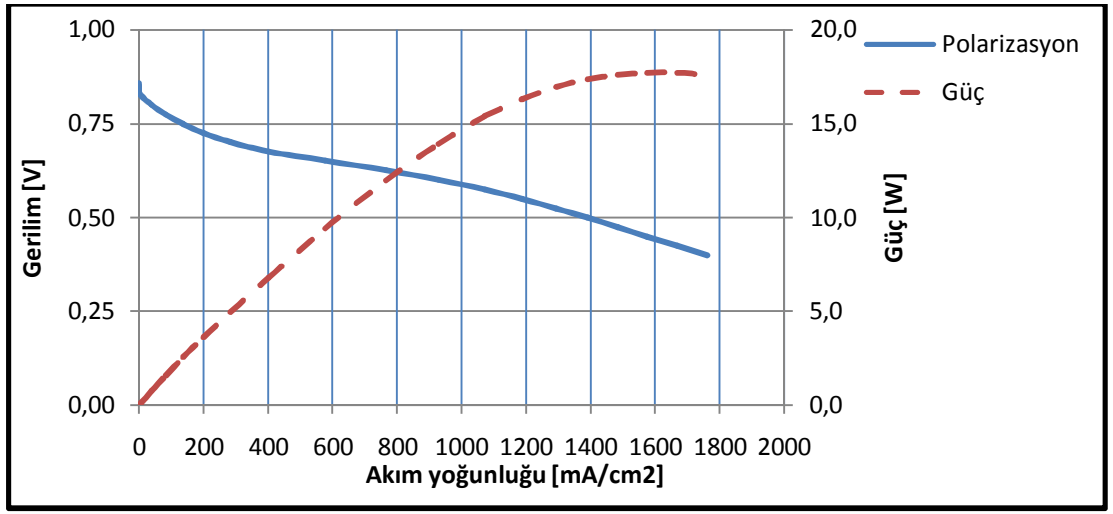
Performans ölçümünde en kullanışlı yöntem, polarizasyon eğrileri oluşturulmasıdır. Polarizasyon eğrileri üzerinde, yakıt hücresinden çekilen akım ile hücrenin değişen potansiyeli arasındaki ilişki ve bu sayede hücredeki kayıplar görülebilmektedir. Test istasyonları ile yakıt hücresinin voltaj, akım, güç değerleri ölçülüp kaydedilebilmektedir.

3.2.1. Polarizasyon ve Güç Eğrisi

PEM tipi yakıt hücrelerinin performansını ifade etmede en yaygın olarak kullanılan eğriler polarizasyon (akım yoğunluğu-gerilim) eğrileri ve güç eğrileridir. Polarizasyon eğrisi, MEA hazırlanmasının ardından, yakıt hücresinin anot tarafına

hidrojen, katot tarafına ise hava veya oksijen beslenerek hücreden akım çekilmesi durumunda gerilimde oluşan değişimi göstermektedir. Güç eğrisi de aynı şartlarda yakıt hücresinden çekilen akıma bağlı olarak elde edilen gücü ifade etmektedir. Yakıt hücresinde pek çok parametrenin bu eğrilere etkisi vardır. Sıcaklık, basınç, gazların akış hızları, gazların türü, gazların nemliliği gibi pek çok parametre polarizasyon ve güç eğrilerini etkilemektedir.

Yakıt hücresi elemanlarının ve bu farklı parametrelerin birbirlerine karşı kıyaslanması bu polarizasyon eğrilerine bakılarak yapılabilmektedir. Aşağıda örnek bir performans eğrisi ve güç eğrisi grafiği birlikte verilmiştir:



Şekil 3.1: Örnek bir polarizasyon ve güç eğrisi.

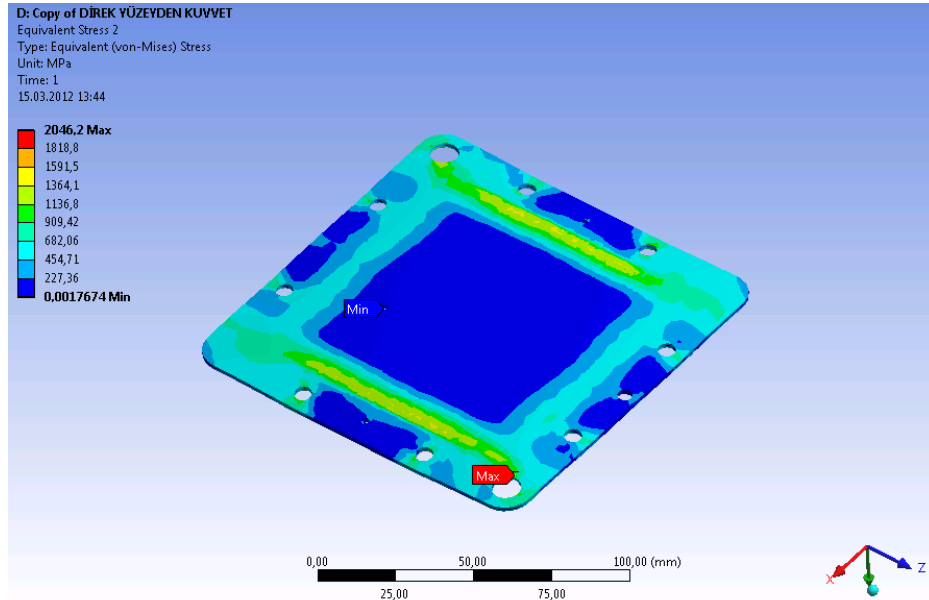
4. DENEYLER ve DİZİN ÇALIŞMALARI

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar genel hatlarıyla, katalizör sentezlenmesi, bipolar plakaların ve baskı plakalarının analizi, modellenmesi, tasarlanarak üretilmesi, yakıt hücresi elemanlarının optimizasyonu, tekli ve çoklu hücre testleri şeklinde sınıflandırılabilir.

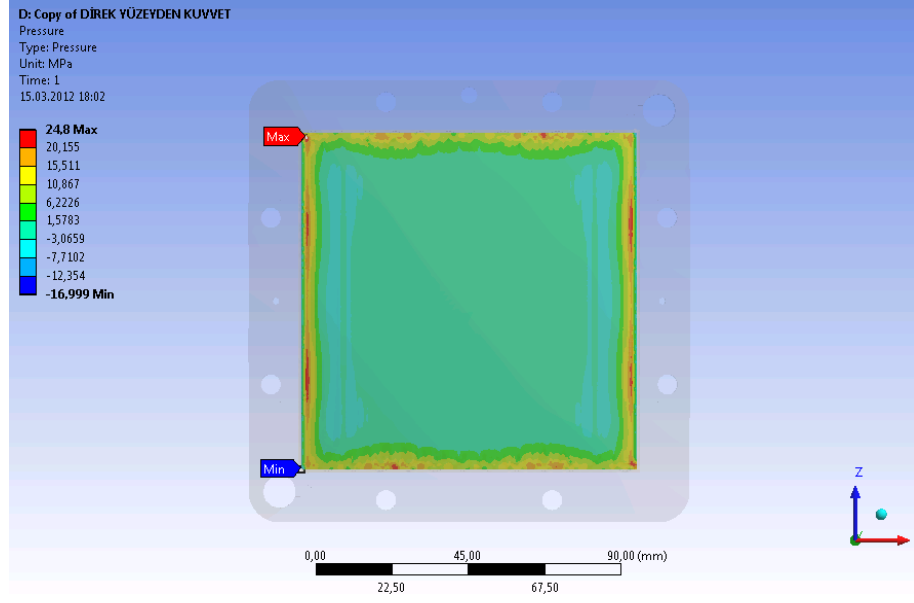
4.1. Modelleme ve Analiz sonuçları

Yakıt hücrelerinin analizi için ANSYS programının mekanik modülü kullanılmıştır. Modellemede hesaplanan cıvata yükleri ile çalışma basıncı başlangıç şartları olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafik ve sayısal veri olarak ortaya konmuş ve değerlendirilmiştir.

Şekil 4.1'de çalışma basıncı ve şekil üzerinde görülen cıvata deliklerinden uygulanan sıkma kuvveti altında 25 cm²'lik aktif alana sahip 2 mm kalınlığında bir bipolar plakanın üzerinde oluşan gerilmeler gösterilmektedir. Bu plakada gerilme değeri 2046 MPa'ya kadar yükselmekte ve bu değer, plakanın yüksek miktarda plastik deformasyona uğramasına sebep olmaktadır.

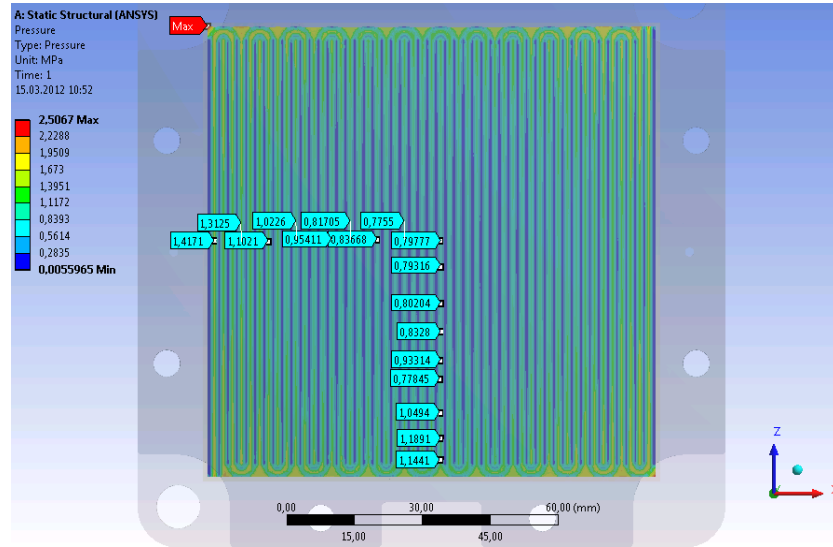


Şekil 4.1: 2 mm'lik bipolar plaka üzerindeki gerilme dağılımı.



Şekil 4.2: Membran üzerine gelen, homojen olmayan basınç dağılımı.

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, membran üzerindeki basınç homojen olmamaktadır. Bipolar plaka plastik deformasyona uğradığı için civatalara yakın olan kısımlarda yüksek basınç görülmektedir. Bu yüksek basınç değerleri, membranın kenar kısımlarından delinmesine sebep olmaktadır. Membranın orta kısımlarında neredeyse hiç basınç oluşmamakta ve bu, yakıt hücresi performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında kuvvetin homojen olarak dağıtılabilmesi için baskı plakaları tasarlanmıştır.



Şekil 4.3: Membran üzerindeki homojene yakın basınç dağılımı.

Şekil 4.3'te baskı plakasının kullanılması neticesinde membran üzerindeki homojene yakın basınç dağılımı görülmektedir. Bu plakanın kullanılmasıyla beraber membran üzerindeki basınç dağılım aralığı 0-2,5 MPa aralığına çekilmiştir.

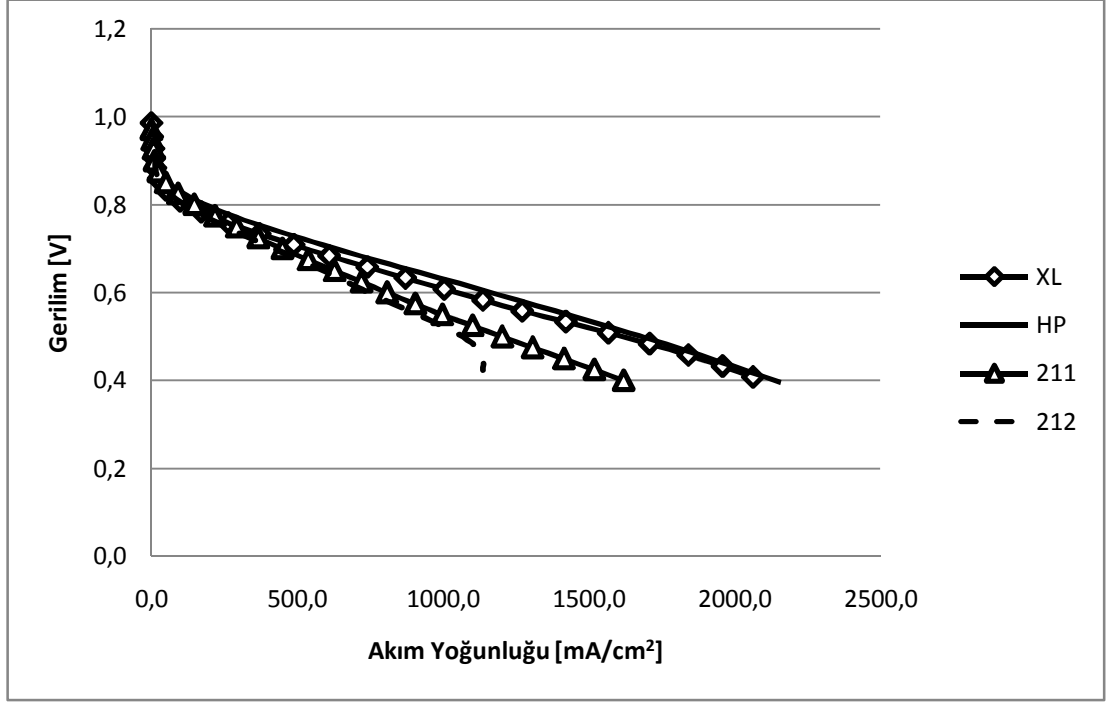
Plakalara cıvata ile sıkma kuvveti uygulamak yerine iki uçtan homojen baskı yapabilecek bir sıkıştırma metodu uygulanması, daha iyi basınç dağılımı sonucunu verecektir. Böyle bir durumda basınç dağılım aralığı 0-1,9 MPa civarında olmaktadır.

4.2. Performans Testleri

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda katalizörler, membranlar, gaz difüzyon tabakaları ve contaların performansları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yakıt hücresi test istasyonunda, ticari test sisteminde bu kıyaslamaların her birisi ayrı ayrı yapılmıştır. Sistem elemanları sabit tutulmak suretiyle kıyaslanacak yakıt hücresi bileşeni değiştirilerek elde edilen sonuçlar performans eğrilerine dönüştürülmüş ve grafikler üzerinde kıyaslanmıştır. Bu çalışmalarda membran, gaz difüzyon tabakası, katalizör cinsi, katalizör yükleme miktarı ve farklı test istasyonlarındaki ölçümlerin kıyaslamaları verilmektedir.

4.2.1. Membran Optimizasyonu

Bu çalışmalarda Dupont firmasının geliştirdiği NR211, NR212, NRXL, NRHP isimli Nafion membranlar test edilmiştir. Yakıt hücresinin anot kısmına minimum 0,1 l/dk debi ve 1,1 sitokiyometri ile 60°C'de nemli hidrojen gazı beslenirken, katot kısmına minimum 0,5 l/dk debi ve 2 sitokiyometri ile 60 °C'de nemli oksijen gazı beslenmiştir. Anot katalizöründeki yükleme 0,15 mg Pt/cm², katot katalizöründeki yükleme 0,3 mg Pt/cm² olarak yapılmıştır. Anot ve katot tarafında Freudenberg firmasına ait H2315 T10A C1 kodlu gaz difüzyon tabakası kullanılmıştır. Anot kısmının basıncı 1,3 Bar civarında iken, katot kısmının basıncı 2 Bar olarak sabit tutulmuştur. Yapılan testler neticesinde elde edilen sonuçlar kıyaslanarak şekil 4.4'te gösterilmektedir.



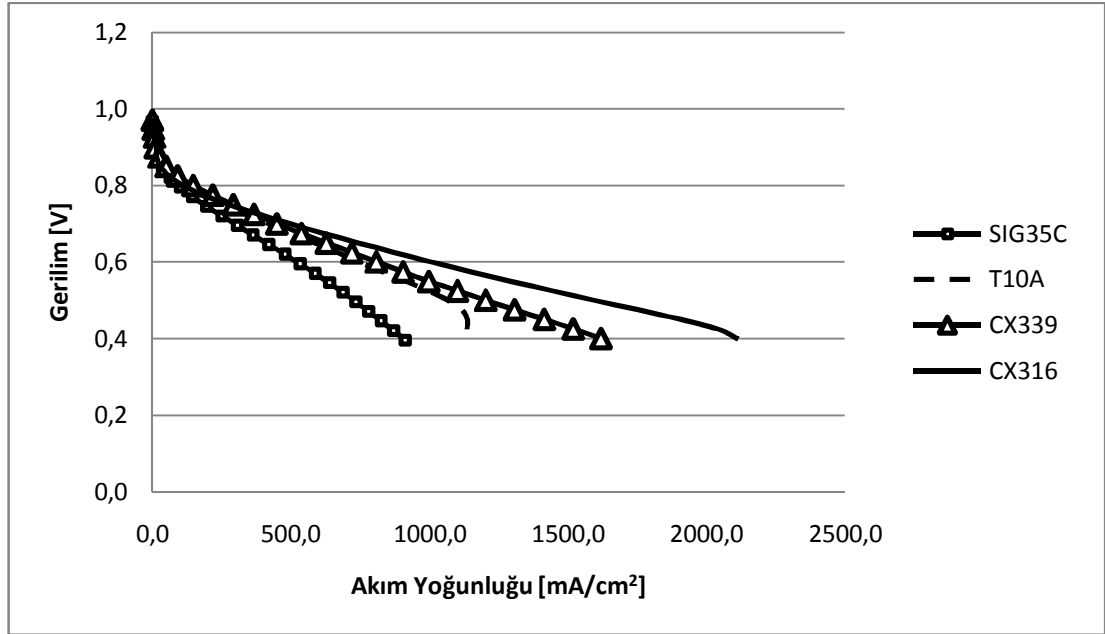
Şekil 4.4: Membranların kıyaslanması.

Test sonuçları doğrultusunda, ferflurosülfonik asit gruplarıyla güçlendirilmiş olmaları sayesinde NRXL ve NRHP kodlu membranla hazırlanan MEA'lar diğerlerine kıyasla daha yüksek performans göstermişlerdir. NRXL 27,94 mikron, NRHP ise 20,32 mikron kalınlığında olup, bu membranlar birinci gün testlerinde birbirine yakın performans gösterirken, NRHP'nin daha sonraki günlerde yapılan testlerde NRXL'ye göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. NRHP düşük nemli uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmış bir membran olması yönüyle gerçek sistemde kullanılabilirliği daha yüksek olmaktadır.

4.2.2. Gaz Difüzyon Tabakası (GDL) Optimizasyonu

Bu çalışmalarda Freudenberg firmasına ait H2315 CX339, X0090 IX92 CX316 ve H2315 T10A C1 kodlu GDL'ler ve Sigradur firmasına ait 35BC kodlu GDL test edilmiştir. Yakıt hücresinin anot kısmına minimum 0,1 l/dk debi ve 1,1 sitokiyometri ile 60°C'de nemli hidrojen gazı beslenirken, katot kısmına minimum 0,5 l/dk debi ve 2 sitokiyometri ile 60 °C'de nemli oksijen gazı beslenmiştir. Anot katalizöründeki yükleme 0,15 mg Pt/cm², katot katalizöründeki yükleme 0,3 mg Pt/cm² olarak yapılmıştır. Bu testlerde NR211 kodlu Nafion membran kullanılmıştır.

Anot kısmının basıncı 1,3 Bar civarında iken, katot kısmının basıncı 2 Bar olarak sabit tutulmuştur. Sonuçlar Şekil 4.5'te görülmektedir.



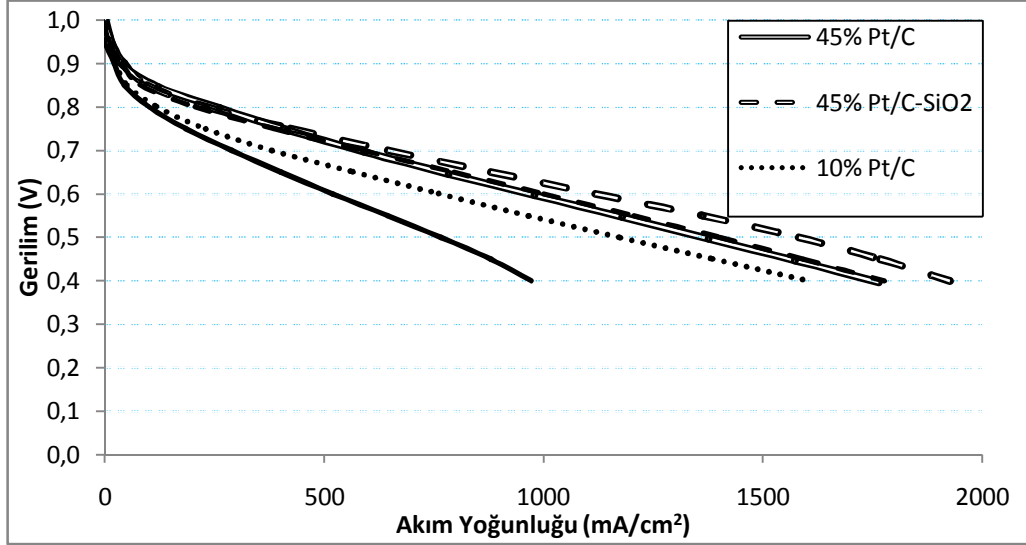
Şekil 4.5: Ticari gaz difüzyon tabakalarının kıyaslanması.

Gaz difüzyon tabakalarının yüksek ve düşük sıcaklık ve nem koşullarında ve değişken akım yoğunluklarında çalışabilmelerine göre farklı tipleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, gerçek sistemde ihtiyaç duyulan yüksek performans ile düşük, orta ve yüksek nemli çalışma koşullarına en uygun gaz difüzyon tabakası seçilmektedir.

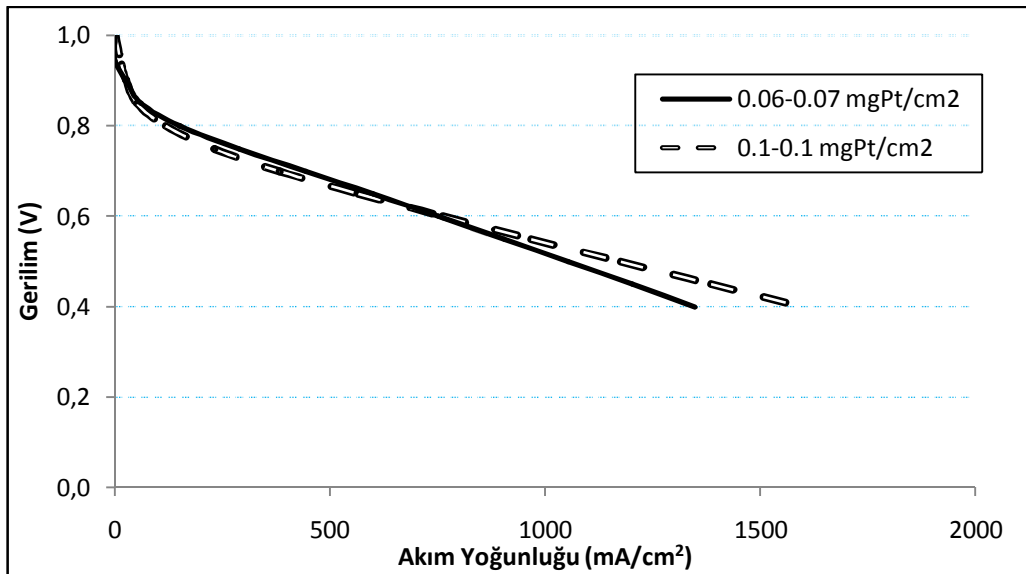
4.2.3. Katalizör ve Platin Yükleme Miktarı Optimizasyonu

Bu çalışmalarda Tanaka firmasından alınan T2 kodlu 38% Pt/C katalizörü ile laboratuvarında sentezlenen 4 farklı tip katalizör 10% Pt/C, 10Pt, 10%Co/C, 45% Pt/C ve 45% Pt/C-SiO₂ kullanılmıştır. Yakıt hücresinin anot kısmına minimum 0,1 l/dk debi ve 1,1 sitokiyometri ile 60°C'de nemli hidrojen gazı beslenirken, katot kısmına minimum 0,5 l/dk debi ve 2 sitokiyometri ile 60 °C'de nemli oksijen gazı beslenmiştir. Anot katalizöründeki yükleme 0,15 mg Pt/cm², katot katalizöründeki yükleme 0,3 mg Pt/cm² olarak yapılmıştır. Bu deneylerde NR-XL kodlu Nafion membran ve Freudenberg firmasına ait X0090 IX92 CX316 kodlu GDL kullanılmıştır. Anot kısmının basıncı 1,3 Bar civarında iken, katot kısmının basıncı 2 Bar olarak sabit tutulmuştur. %10 Pt/C ve %10 Pt,%10 Co/C katalizörlerde 0,1 mg

Pt/cm² yükleme oranına ulaşılabilmüş ve bu katalizörlerle hazırlanan MEA'lar diğerlerine kıyasla oldukça düşük performans göstermiştir. Şekil 4.6'da katalizörlerin kıyaslanması görülmektedir.

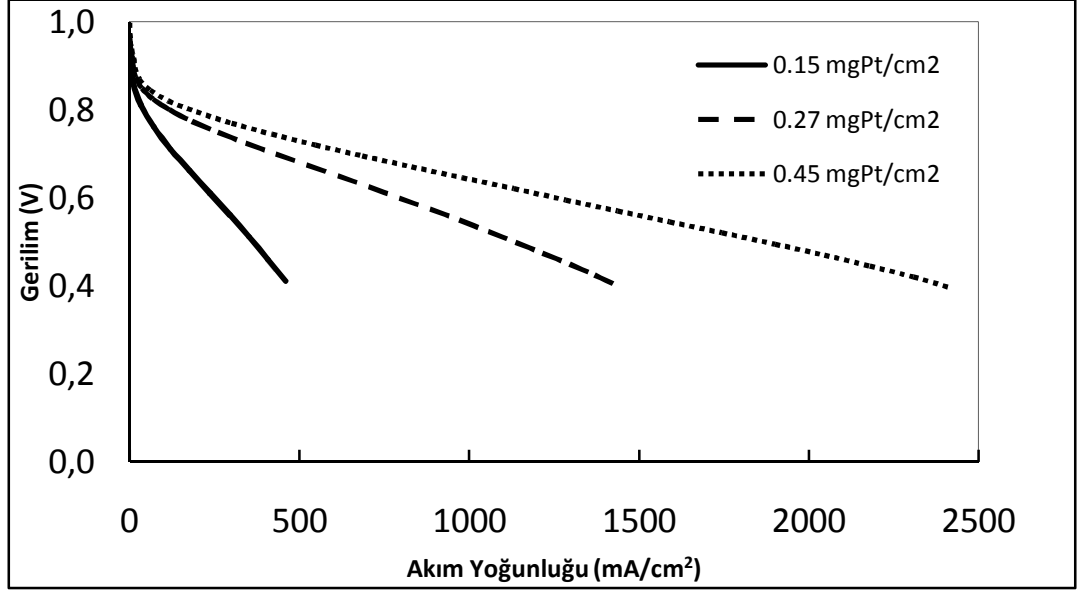


Şekil 4.6: Katalizörlerin kıyaslanması.



Şekil 4.7: %10 Pt/C katalizör ile yükleme oranı kıyaslanması.

Farklı katalizör yükleme oranları da bu yükleme oranıyla kıyaslanmıştır. %10 Pt/C katalizörü ile 0.06-0.07 mg Pt/cm² ve 0,1-0,1 mg Pt/cm² yükleme oranları ile yapılan kıyaslama Şekil 4.7'de görülmektedir.

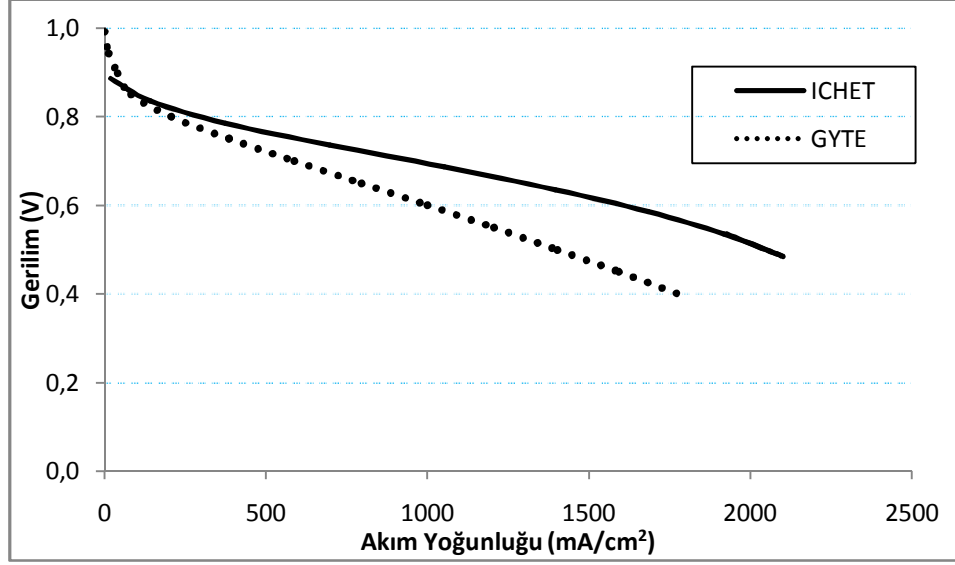


Şekil 4.8: %38 Pt/C katalizörlerle yüklenme oranı kıyaslanması.

Platin oranı daha yüksek olan %38 Pt/C, %45 Pt/C gibi katalizörlerle, birim yüzey alanı üzerinde istenilen platin yüklenme miktarına ulaşarak, daha ince katalizör tabakaları oluşturmak mümkün olmaktadır. Katalizör tabakasının ince olması, kütle transfer kayıplarının az olmasını sağlamakta ve bu da hücre performansını olumlu yönde etkilemektedir. Kobalt ilaveli katalizör ile elde edilen sonuçlar, beklenenden daha düşük olmuştur. Bunun başlıca sebebi, mevcut kaplama yöntemi ile istenilen tabaka inceliğinin elde edilememiş olmasıdır.

4.2.4. Farklı Test İstasyonu ve Test Hücrelerinde Yapılan Ölçümler

GYTE laboratuvarlarında bulunan mevcut Scribner-850C test istasyonu ile yakıt hücresi performans testleri hidrojen ve oksijen gazları ile yapılmıştır. Yakıt hücresinin anot kısmına minimum 0,1 l/dk debi ve 1,1 sitokiyometri ile 60°C'de nemli hidrojen gazı beslenirken, katot kısmına minimum 0,5 l/dk debi ve 2 sitokiyometri ile 60 °C'de nemli oksijen gazı beslenmiştir. Anot katalizöründeki yüklenme 0,15 mg Pt/cm², katot katalizöründeki yüklenme 0,3 mg Pt/cm² olarak yapılmıştır. Bu testlerde NRXL kodlu Nafion membran kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, GYTE laboratuvarında kullanılan test istasyonunda oldukça büyük direnç kayıpları olduğunu göstermektedir. Bu sebeple test istasyonunda bazı iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Kıyaslama yapmak amacıyla UNIDO ICHET laboratuvarında bulunan test istasyonu ile yapılan ölçümler ise şekil 4.9'da gösterilmektedir.

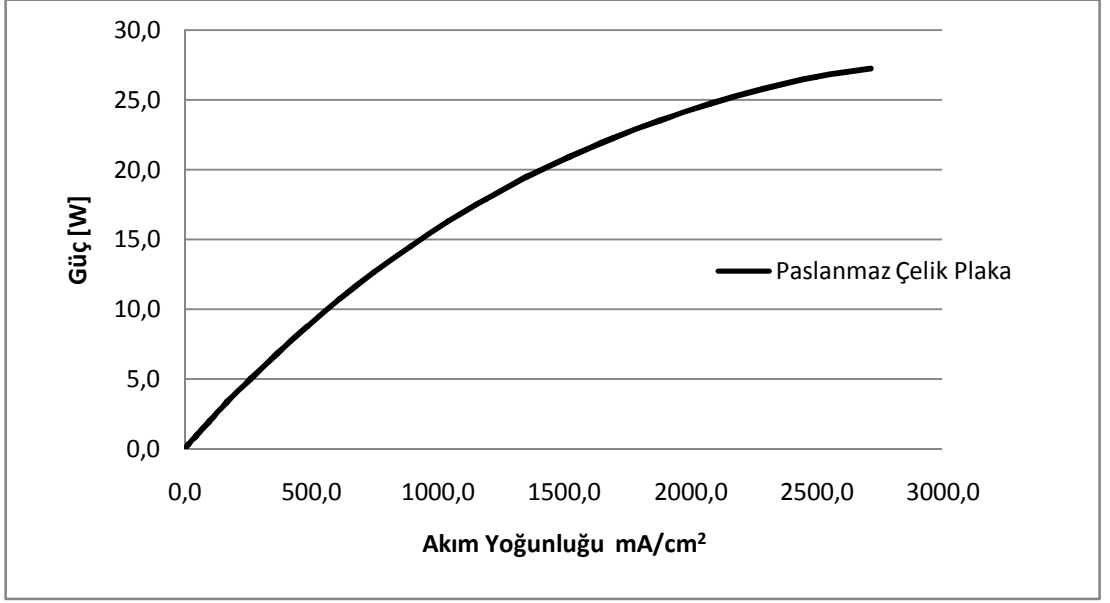


Şekil 4.9: Farklı test istasyonlarındaki test sonuçları.

Tek hücre testleri sonrasında 0,26 mg Pt/cm² anot ve 0,28 mg Pt/cm² katot yükleme oranları ile 25 cm²'lik hücreden 60 °C'de 0 psi geri basınç altında 27,2 W güç elde edilmiştir. Bu şartlardaki güç yoğunluğu değeri 1,088 W/cm²'ye ulaşmıştır. Bu değer laboratuvarında hazırlanan %45 Pt/C katalizör ve ticari Nafion XL membran ile elde edilmiştir.

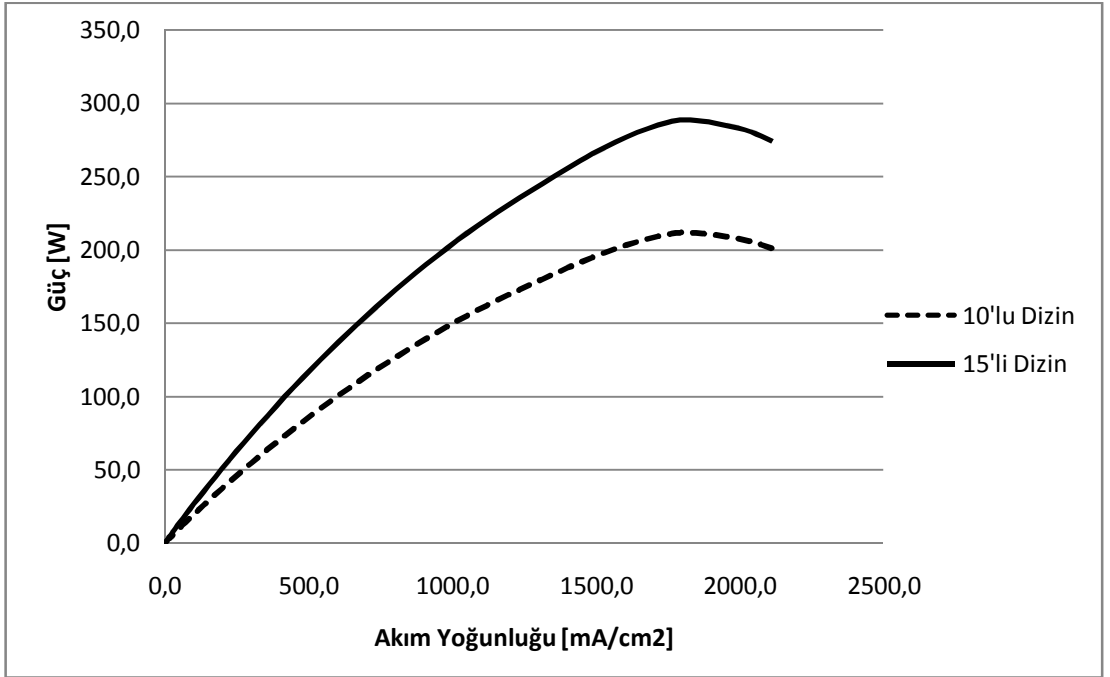
4.2.5. Güç Eğrileri

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, performans testleri yapılırken, güç eğrileri de elde edilmektedir. Gerçek İHA sisteminin ihtiyaç duyduğu güç değeri olan 200 W, tekli bir hücreden elde edilen en yüksek değer olan 2 A/cm²'lik akım yoğunluğu, hedeflenen sistem ağırlığı ile birlikte hesaba katılarak, yaklaşık 10-12 adet 25 cm²'lik hücreden elde edilmesi hedeflenmiştir. Tasarımı yapılan tekli bir test hücresi ile yapılan testlerde elde edilen sonuçlardan birisi aşağıdaki grafikte gösterilmektedir. Bu sonuç, %45 Pt/C katalizör ile hazırlanan MEA, CX316 gaz difüzyon tabakası ve 0,2 mm'lik contalar kullanılarak, sistemin katot kısmına saf oksijen beslenerek elde edilmiştir. Bundan önce laboratuvarında yapılan testlerde bu güç değerine çok uzak olacak şekilde düşük sonuçlar elde edilmiş olması, test sisteminde bazı aksaklıkların olduğunu göstermektedir. Bundan sonra yapılan testlerde bu değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.10: İmal ettirilen paslanmaz çelik plaka ile elde edilen güç eğrisi.

PEM yakıt hücresi dizininde, tekli hücredekenden daha fazla kayıp olacağından, bu sebeple, gerçek İHA sisteminde bir hücreden yaklaşık 20 W'lık güç elde edileceği öngörülmüştür. Bu durumda elde edilen dizinin güç eğrisi aşağıdaki gibi olacaktır:

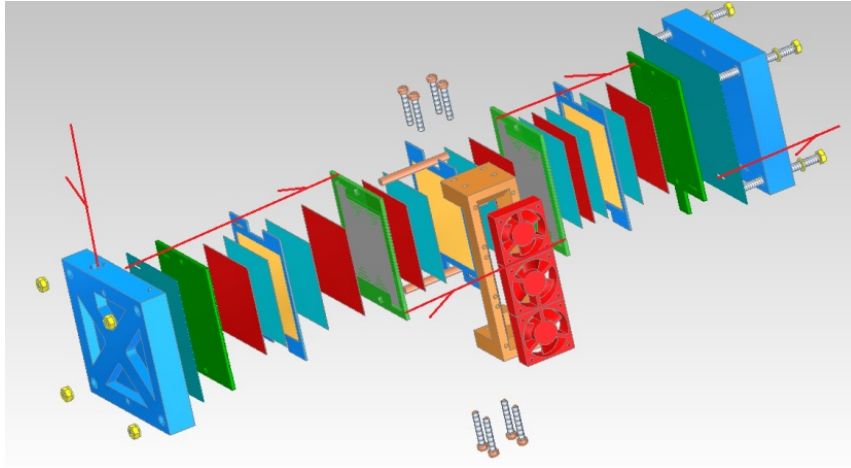


Şekil 4.11: Hedeflenen PEM yakıt hücresi dizini güç eğrileri.

4.3. Dizin Tasarımları

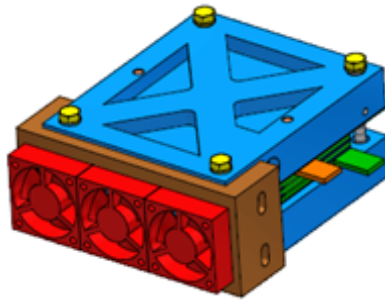
PEM Yakıt hücresi dizin tasarımları, 3, 5, 10 ve 20 adet MEA yerleştirilebilecek dizinler şeklide yapılmıştır. Farklı sayıda MEA ile dizin hazırlanması için bağlantı ekipmanları ve aparatlar imal ettirilmiştir.

İHA sisteminde hücrelerin hidrojen ve hava ile çalışması tasarlanmıştır. Hidrojen gazının tanktan beslenmesi, havanın fan ile beslenmesi düşünülmüştür. Test hücrelerinde hidrojen ve oksijen gazlarında yüksek performans elde edilmesi sonrasında ticari ürüne yönelik hücreler tasarlanmıştır. İlk tasarımlar, 25 cm²'lik aktif alanı çıkıntılı, 316L paslanmaz çelik malzemeden plakalar şeklinde tasarlanıp imal ettirilmiştir. Bunlar öncelikli olarak tekli hücreler şeklinde takılarak test edilmiştir.



Şekil 4.12: İlk dizin tasarımının patlatılmış resmi.

Hazırlanan kare plakaların içinde bulunduğu ticari ürüne yönelik patlatılmış çizimi şekil 4.12'de, dizin montajı şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13: 50x50 mm² aktif alanlı plakaların montaj resmi.

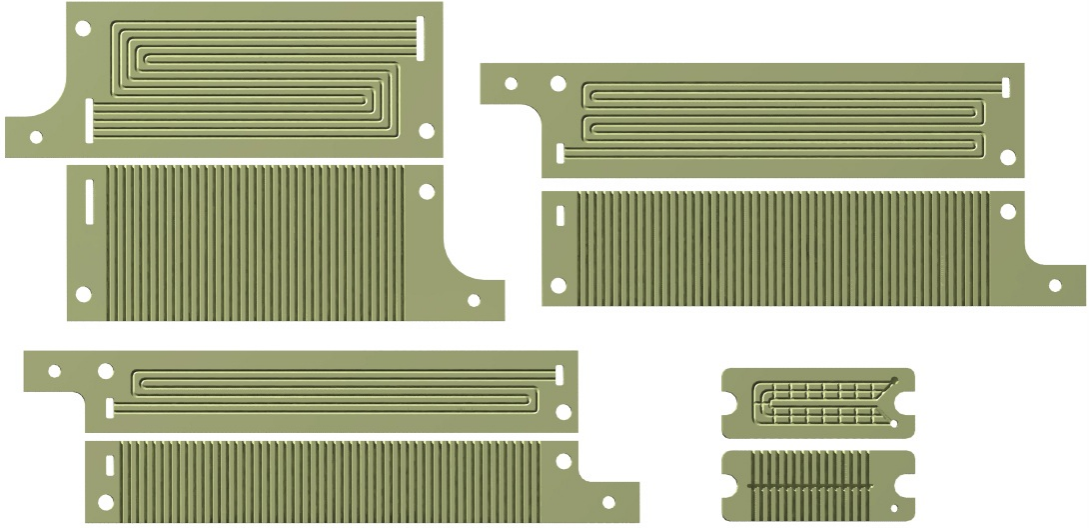
Hidrojen ve oksijen gazları ile ticari test hücrelerinde 25 cm^2 'lik aktif alanda ortalama 1000 mA/cm^2 akım yoğunluğuna ulaşılırken, imal ettirilen hücrelerde en fazla 140 mA/cm^2 akım yoğunluğuna ulaşılabilmiştir. Bu durum üzerine tasarımda inceleme yapılmıştır.

Silikon contaların havanın yakıt hücresine girdiği kanalları kapatması ve yetersiz hava beslenmesi sonucunda katotta reaksiyonların oluşmadığı, suyun kanallarda biriktiği görülmüş, bu sebeple performansta düşüşün meydana geldiği düşünülmüştür. Bu durumu düzeltmek için silikon conta yerine daha sert bir malzeme olan teflon conta kullanılmıştır. Teflon conta ile 300 mA/cm^2 akım yoğunluğuna ulaşılmış, ancak bu sonucun da oldukça düşük olduğu durumda, su birikmesi probleminin devam ettiği gözlenmiştir.

Su birikmesi problemi, hücrede anot kısmında da benzer şekilde görülmüş, ve çözüm için anot kısmı nemli hidrojen gazı yerine kuru hidrojen gazı ile beslenmiştir. Buna rağmen anot kısmında su birikmesi sorunu yaşanmaya devam etmiş, anot kısmındaki su sorununun, katotta biriken ve membran üzerinden difüzyon yoluyla anoda geçen su sebebiyle oluştuğu düşünülmüştür. Bunu engellemek için mini diyafram pompa kullanılmıştır. Mini diyafram pompa kullanılması, anlık olarak hücre performansında iyileşmeler sağlamış, fakat kalıcı bir çözüm getirmemiştir. Katot tarafındaki su birikmesi performansı yüksek oranda düşürdüğünden bu yöntemin anottaki su birikimi sorununu tamamen giderip gidermediği tam olarak tespit edilememiştir. Sistemde bu sorunun çözümüne yardımcı olarak biriken su taneciklerini kanal duvarlarından koparmak için titreşim motoru alınmıştır. Gerçek sistemde 1-3 W civarında güç harcayan bu motorun belli aralıklarla kesik kesik kullanılması öngörülmüştür.

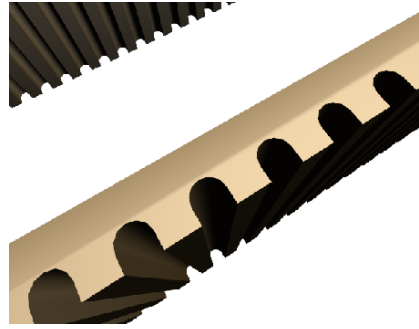
Katot tarafında biriken suyun uzaklaştırılması için plaka tasarımında bazı değişikliklere gidilmiştir. Hücredeki su yönetiminin iyileştirilmesi için katot kısmındaki hava kanallarının boyunun kısaltılmasının gerektiği düşünülmüş, bu sebeple yeni tasarımlar kare yerine dikdörtgen şeklinde yapılmıştır. Bu şekilde aktif alanı 11×100 , 19×99 , 71×29 ve $10 \times 40 \text{ mm}^2$ olan 4 farklı tipte plaka tasarlanmıştır. Katot kısmında hava kanallarının derinliği $0,5 \text{ mm}$ 'den 1 mm 'ye yükseltilmiştir. Plaka aktif alanı üzerindeki çıkıntılardan vazgeçilmiş, yeni tasarımlar çıkıntısız olarak düzenlenmiş, plaka kalınlığı 2 mm 'den $2,3 \text{ mm}$ 'ye yükseltilmiş ve böylece imalat sırasında karşılaşılan problemler azaltılarak daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. 400 serisi paslanmaz çelik malzemedan yapılan bu plakalar, titanyum

nitrür ile kaplatılmıştır. Yeni tasarlanan plakalara ait resimler ise şekil 4.14'de gösterilmektedir.



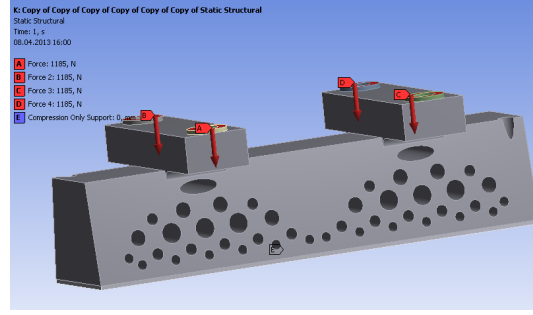
Şekil 4.14: Yeni plaka tasarımları.

Ayrıca suyun kanallara yapışmasını engellemek amacıyla yeni yaptırılan kanalların profilleri şekil 4.15'deki gibi yuvarlak freze uç ile açılmıştır.

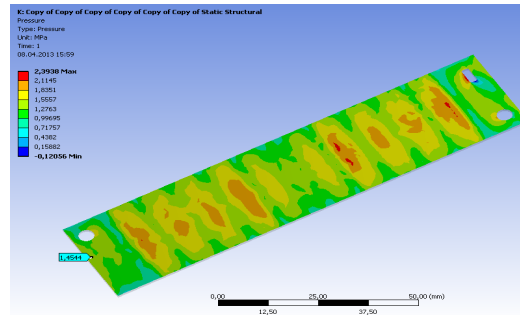


Şekil 4.15: Gaz akış kanalı tasarımı profil görünüşü.

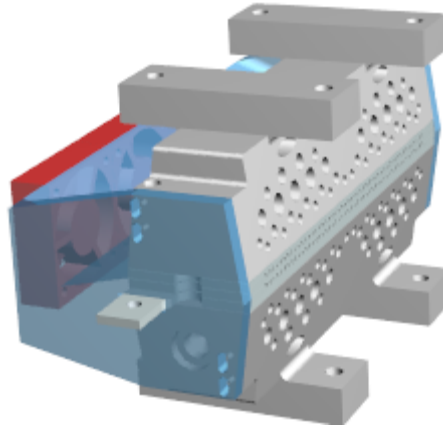
Yapılan bu iyileştirmelerin ve yeni tasarımların ardından, gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonrasında hücredeki basınç dağılımında halen büyük ölçüde homojensizlikler olduğu görülmüştür. Yeni plakaların homojen basınç dağılımı altında testlerinin yapılabilmesi amacıyla baskı plakası geliştirilmiştir. Tasarlanan baskı plakası üzerindeki delikler, sıkma kuvvetinin baskı yüzeyine oldukça eşit seviyede dağılmasını sağlamaktadır. 3,5 cm kalınlığında çelik plaka ile yapılan düz baskı plakası tasarımı şekil 4.16'de, yüzeydeki iyi homojenlikte basınç dağılımı şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.16: Tasarlanan baskı plakası.



Şekil 4.17: Homojene yakın basınç dağılımı analizi.



Şekil 4.18: Yeni dizin tasarımı.

Yeni dizin tasarımının denenmesinin ardından, sistemde anot tarafındaki hidrojen gaz akışının sağlanamadığı, gazın içerideki sirkülasyonu tamamlanmadan dışarıya sızdığı görülmüştür. Gaz sızıntısının performans düşüklüğünde büyük rol oynadığı düşünülmektedir. Bu sebeple gaz sızıntısının önlenmesi amacıyla çeşitli düzenleme ve iyileştirmeler yapılması öngörülmüştür.

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Yapılan çalışmalarda, hem ticari ve satın alınan sistemler, hem de tasarlanıp ürettirilen sistemlerde bir takım sorunlarla karşılaşmıştır. PEM tipi yakıt hücrelerinde, sistem performansını etkileyen bir çok faktör mevcuttur. Verimi yüksek bir sistem tasarlayarak iyi sonuçlar elde edebilmek için azami ölçüde sistematik şekilde çalışılmalı, işlem sırasına riayet edilmeli ve sonuçlar dikkatle gözlemlenmelidir. Parametreler üzerindeki değişiklikler sıra ile yapılmalı, aynı anda birden fazla parametre değiştirilmemelidir. Halen araştırma geliştirme safhasında sayılabilecek PEM tipi yakıt hücreleri ile alakalı literatürde konuyla alakalı yapılmış çalışmalar takip edilmeli, bu sayede yaşanabilecek problemler hakkında bir öngörü oluşturulmalıdır.

Yapılan çalışmalarda MEA üzerine uygulanan basıncın homojenliği konusu üzerinde durulmuş, homojensizlikler bilgisayar kullanılarak tespit edilmiş ve çözüm yolları aranmıştır. Homojen baskı sağlayabilmek amacıyla baskı plakaları tasarlanmış, testler bu baskı plakaları ile gerçekleştirilmiştir. Yine homojen baskı sağlayabilmek için pnömomatik mengene kullanılmış, fakat bu çalışma daha ileriye götürülemediği. Gerçek sistemde uygulanabilecek hafiflikte bir sıkma mekanizması tasarlanabilirse, homojen basınç sağlanabilecek ve böylece hücre performansı arttırılabilecektir.

PEM tipi yakıt hücrelerinde performansı etkileyen en önemli parametrelerden biri olan membran geliştirilmesi üzerinde uluslararası ölçekte ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Nitekim bu konuda yurt çapında yeterli seviyede çalışma bulunmamaktadır. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda gaz difüzyon tabakası ve membran geliştirilmesi üzerinde durulmamış, bu iki yakıt hücresi elemanı, ticari firmalardan tedarik edilerek denenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda membran ve gaz difüzyon tabakası üzerinde geliştirme çalışmaları yapılması milli menfaatler yönünden yararlı olacaktır.

Katalizör hazırlanmasında tercih edilen yöntem, halihazırda kullanılan en iyi yöntemlerden biri olup, 0,2-0,4 mg Pt/cm² yükleme oranları için oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Daha ince tabakaların kaplanması ve daha düşük platin yükleme oranlarına ulaşılabilmesi için yöntem değişikliğine gidilmelidir. Literatürde çok iyi

sonuçlar elde edilen kobalt ilaveli ve karbon silika destekli kataliz6rler üzerinde yeni denemeler yapılmalıdır.

Ticari test sistemleriyle yapılan tekli hücre testlerinde oldukça iyi sonuçlar alınmış olması, membran, kataliz6r, gaz difüzyon tabakası ve conta gibi elemanların seçiminin doğru yapıldığını g6stermektedir. Çoklu hücre testlerinde istenilen seviyeye ulaşılamaması, bipolar plakaların ve baskı plakalarının tasarımı ile conta ve gaz difüzyon tabakası kalınlıkları ile alakalı bir takım düzeltmeler yapılması gerektiğini g6stermektedir. 6zellikle anot tarafına beslenen hidrojenin sızdırmazlık sağlanamaması neticesinde hücreye yeterince beslenememesi, çok büyük performans kayıplarına yol açmaktadır. Bu sebeple hücrede sızdırmazlığı sağlayan contaların kalınlık ve yerleşim düzeni ile alakalı iyileştirmeler yapılması gerekmektedir.

Hücrede 6nemli 6lde su birikmesi problemi yaşanmış, kuru gaz g6nderilmesi ve mini diyafram pompa kullanılması yeterli iyileşmeyi sağlayamamıştır. Fakat yine de gerçek sistemde mini diyafram pompa kullanılabileceği düşünülmektedir. Mini diyafram pompa ile birlikte, bu sorunun 6zmne yardımcı olarak biriken su taneciklerini kanal duvarlarından koparmak için 1-3 W civarında g harcayan titreşim motoru kullanılması da uygun g6rlmektedir.

KAYNAKLAR

Basu S., (2007), "Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology", 1st Edition, Springer.

Barbir F., (2005), "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", 2nd Edition, Elsevier Academic Press.

Dünder F., (2011), "Topaklaşma ve Karbon Korozyonu Sorunlarının Giderilmesi Amacıyla Özgün Yapıda Katalizör Sentezi ve Yakıt Hücresi Çalışma Koşullarının Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Haile S. M., (2003), "Fuel Cell Materials and Components", Acta Materialia Journal, 51, 5981-6000.

Kim S.H., Shimpalee S., Van Zee J. W., (2005), "The Effect of Flow Field Design and Voltage Change Range on the Dynamic Behavior of a PEMFC", Journal of Electrochemical Society, 152 (6), 1265-1271.

Larminie J., Dicks A., (2003), "Fuel Cell Systems Explained", 2nd Edition, Wiley.

Meibuhr S.G., (1966), "Review of United States fuel-cell patents issued during 1860 to 1947", Journal of Electrochimica Acta, 11, 1301-1308.

Sammes N. M., (2006), "Fuel Cell Technology: Reaching Towards Commercialization", 1st Edition, Springer.

Smirnova A., Dong X., Hara H., Sammes N., (2006), Journal of Fuel Cell Science and Technology, 3(4), 477-481.

Web 1, (2013), <http://ec.europa.eu/atwork/key-documents>, (Erişim Tarihi: 10/05/2013).

ÖZGEÇMİŞ

Emre Ata, 1981 yılında İstanbul'da doğdu. İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2011 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE), Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2011-2013 yılları arasında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Nanoteknoloji Merkezi'nde, Yakıt Hücresi laboratuvarlarında proje asistanı olarak çalışmış ve 2013 yılında Piri Reis Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır.