

**İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN
POLİMER ELEKTROLİT
MEMBRAN YAKIT HÜCRESİ YIĞINI
GELİŞTİRİLMESİ**

Görkem YALIN
Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Mayıs-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1404F291**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Görkem YALIN'ın “İnsansız Hava Aracı için Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi Yığını Geliştirilmesi” başlıklı Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans tezi, **07.05.2015** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ	
Üye (İkinci Danışman)	: Yard. Doç. Dr. Levent AKYALÇIN	
Üye	: Prof. Dr. Yunus Ali ÇENGEL	
Üye	: Prof. Dr. Süleyman KAYTAKOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. Beycan İBRAHİMOĞLU	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSANSIZ HAVA ARACI İÇİN POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT HÜCRESİ YIĞINI GELİŞTİRİLMESİ

Görkem YALIN

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

II.Danışman: Yrd. Doç. Dr. Levent AKYALÇIN

2015, 62 sayfa

Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri yüksek verimlilikleri, düşük operasyon sıcaklıkları, ihmal edilebilir gürültü ve titreşim değerleri, hızlı başlangıç cevabı, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun menzil sağlaması açısından insansız hava araçlarının itki sistemleri için önemli bir adaydır. Bu çalışmada, öngörülen motorun çalışması için gerekli olan 12 V ve maksimum 32 A değerleri, tasarlanacak olan yakıt hücresinin bipolar plakaları, akış kanallarının geometrisi, yakıt hücresinin çalışma voltajını ve akımını belirlemede kullanılmıştır. Nafion 115 membran ve gaz difüzyon tabakası olarak SGL BC 10 karbon kağıt seçilmiştir. Katalizörlü yüzey için 0,5 mg Pt /cm² olacak şekilde ultrasonik püskürtme yöntemi ile yüzey üzerine püskürtülmüştür. Sonrasında membran elektrot bileşkesi sandaviç şeklinde bir araya getirilmiştir. Kısa yakıt hücre yığınının geçilmeden önce tekli yakıt hücresinin testleri yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki yapılan deneyler ile beraber bilgisayar destekli analizin gerekliliği, yakıt hücre yığınının oluşturulması aşamasına geçilmeden önce önemli bir adımdır. Ayrıca hücre içinde kullanılan sızdırmazlık elemanın seçimi, hücre çalışma koşulları ve verimlilik açısından oldukça hayati bir öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt hücresi, İHA, Dizayn

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DEVELOPMENT OF POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE FUEL CELL STACK FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

Görkem YALIN

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Aircraft Airframe Powerplant Maintenance Program

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Co-advisor: Yard. Doç. Dr. Levent AKYALÇIN

2015, 62 pages

The polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) is one of the important candidate for unmanned aerial vehicle (UAV) propulsion system due to high efficiency, low operating temperature, negligible noise and vibration, quick start up, high specific energy density and providing long endurance. In this study, power requirements during take-off, cruise flight and manoeuvre were measured on ground test set up for brushless engine that has 12 V operational voltage and 32 A maximum current. These test results were used to calculate the maximum fuel cell operating voltage and current for a certain surface area of a PEM fuel cell. After all the number of bipolar plates, rib-channel geometry and graphite bipolar plate's thickness are determined for fuel cell operating voltage, current and dimensional limits. NafionTM115 membrane, SGL BC 10 carbon paper as a gas diffusion layer (GDL) are selected for membrane electrolyte assembly (MEA). The catalyst layer (CL) was ultrasonically sprayed over the GDL, having micro porous layer. Amount of the loaded catalyst was 0,5 mg Pt/cm² for both anode and cathode. To have a MEA, membrane was sandwiched in between two electrodes.. The results of these studies show that validation between the CFD analyses and experiments are very crucial step. Furthermore sealing materials for fuel cell operating pressure and temperature are also important for PEMFC stack for UAV application.

Key Words: PEM fuel cell, UAV, Design

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgisi, tecrübesi ve samimiyetini üzerimden eksik etmeyen, yoğunluğunda bile bana vakit ayıran çok değerli hocam ve büyüğüm Yard. Doç. Dr. Levent AKYALÇIN'a, yüksek lisansa başladığım ilk günden beri hem akademik hem de çalışma hayatına alışmam noktasında desteklerini benden esirgemeyen Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ ve Yard. Doç. Dr. Önder ALTUNTAŞ hocalarıma gönülden teşekkür ederim.

Zaman ve bilgilerini benimle paylaşan Vehbi Emrah ATASOY, Selçuk EKİCİ, Pınar ULUDAĞ, Emre URAZ, Emre YUCA, Elif YILDIRIM ve tüm değerli arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında Anadolu Üniversitesi torna atölyesi çalışanları ve İbrahim UĞURLU'ya verdikleri her türlü teknik destek ve gösterdikleri alakadan ötürü teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi, manevi her türlü emek ve desteğiyle yanımda olan sevgili aileme ve pek muhterem anneme canı gönülden teşekkür ederim.

Görkem YALIN

Mayıs 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii

1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Literatür Özeti.....	3
1.2. Tezin Ana Hatları.....	11
2. POLİMER MEMBRAN ELEKTROLİT YAKIT HÜCRESİ	14
2.1. PEMYH Bileşenleri ve Malzeme Özellikleri.....	16
2.1.1. Membran.....	18
2.1.2. Elektrot.....	20
2.1.3. Gaz Difüzyon Tabakası.....	23
2.1.3.1. Önişlem ve Kaplamalar.....	24
2.1.3.2. Gözeneklilik.....	24
2.1.3.3. Elektriksel İletim.....	25
2.1.3.4. Sıkıştırılabilirlik.....	25
2.1.3.5. Geçirgenlik.....	25
2.1.4. Bipolar Plakalar.....	26
2.2. Yakıt Hücre Yığını Tasarım Temelleri.....	28
2.2.1. Yakıt Hücre Yığınının Boyutlandırılması.....	28
2.2.2. Hücrelerin Dizilimi.....	31
2.2.3. Hücrelerin Birleştirilmesi.....	34
3. YAKIT HÜCRESİ KİMYASI, TERMODİNAMİĞİNİN TEMELLERİ ve KAYIPLARI	37

3.1. Temel Tepkimeler.....	37
3.2. Tepkime Isısı.....	37
3.3. Hidrojenin Alt ve Üst Isıl Değerleri.....	38
3.4. Teorik Elektrik İşİ.....	39
3.5. Teorik Yakıt Hücresi Potansiyeli.....	40
3.6. Hücre Potansiyeline Sıcaklığın Etkisi.....	41
3.7. Hücre Potansiyeline Basıncın Etkisi.....	42
3.8. Teorik Yakıt Hücresi Verimliliği.....	44
3.9. Polarizasyon Eğrisi ve Potansiyel Kayıplar.....	45
3.9.1. Aktivasyon Kayıpları.....	45
3.9.2. Ohmik Kayıplar.....	47
3.9.3. Derişim Kayıpları.....	48
3.9.4. Oluşan İç Akımlar ve Çapraz Geçiş Kayıpları.....	49
3.9.5. Hücre Potansiyeli ve Polarizasyon Eğrisi.....	49
4. GEREÇ ve YÖNTEM	51
4.1. Deney Sistemi.....	51
4.2. Membran Elektrolit Bileşke (MEB) Üretimi.....	53
4.2.1. Elektrot Hazırlanması.....	53
4.2.2. Membran Hazırlanması.....	55
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Temel hücre bileşenlerinin bulunduğu temsili bir yakıt hücresi.....	16
2.2. PFSA polimerin (Nafion™) yapısı.....	19
2.3. PEMYH'deki idealleştirilmiş elektrot yapısı.....	21
2.4. Temsili bipolar plaka.....	27
2.5. Farklı aktif yüzey geometrileri.....	32
2.6. Farklı akış kanal tasarımları.....	33
2.7. Bağlantı elemanları ve montaj kuvveti gösterimi.....	35
2.8. Gereğinden fazla yük altında son plakaların bükülmesi.....	36
3.1. Polarizasyon eğrisi.....	50
4.1. PEMYH deneme istasyonu şeması.....	51
4.2. PEMYH deneme istasyonu.....	52
4.3. Yakıt hücresi gövdesinin iç ve dış kısmı.....	53
4.4. Solda karışımın hazırlanması ve sağda ultrasonik karıştırıcı.....	54
4.5. Ultrasonik ince film kaplama makinası.....	54
4.6. Solda elektrotların konulması ve sağda hücre bir arada.....	55
5.1. Oda sıcaklığında ve 1,0 barg basınç altında, 0,5 mg Pt cm ⁻² için oluşan polarizasyon eğrisi.....	57
5.2. Oda sıcaklığında ve 1,0 barg basınç altında, 0,5 mg Pt cm ⁻² için oluşan Güç – Akım yoğunluğu eğrisi.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Farklı İHA'lara ait farklı tipteki güç grupları ve özellikleri.....	3
2.1. Geçmişten günümüze yakıt hücreleri gelişimi.....	15
2.2. Yakıt hücrelerinin sınıflandırılması ve özellikleri.....	16

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A.B.D.:	Amerika Birleşik Devletleri
ADP	: Açık Devre Potansiyeli
AKT	: Aktivasyon
AID	: Alt Isıl Değer
AYH	: Alkali Yakıt Hücresi
Barg	: Basınç birimi (Bar gauge)
BP	: Bipolar Plaka
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
Der	: Derişim
DMY	: Direkt Metanol Yakıt Hücresi
EKYH:	Ergimiş Karbonat Yakıt Hücresi
FAYH:	Fosforik Asit Yakıt Hücresi
GDT	: Gaz Difüzyon Tabakası
İHA	: İnsansız Hava Aracı
KOYH:	Katı Oksit Yakıt Hücresi
LiPo	: Lityum-Polimer
MALE:	Orta İrtifa – Uzun Menzil (Medium Altitude - Long Endurance)
MEB	: Membran Elektrot Bileşkesi
ÜID	: Üst Isıl Değer

1. GİRİŞ VE AMAÇ

İnsansız hava aracı (İHA) üzerinde pilot bulundurmadan, uzaktan kontrol edilerek veya daha önceden uçuş rotası planlanmış otonom olarak, belirli bir görevi gerçekleştirmek üzere tasarlanmış karmaşık ve dinamik sistemlerdir [1].

İnsansız hava aracının kullanım amaçlarını şu şekilde sıralanabilir [1,2];

- Ticari ve askeri keşif
- Radar, optik ve/veya elektro optik algılayıcı
- İstihbarat toplama
- Etüt ve haritalama
- Ölümcül olmayan saldırı amaçlı
- Elektronik muharebe (düşman savunma sistemlerine yönelik)
- Tuzak amaçlı
- Yangın tespiti ve hedef tanımlama
- Arama ve kurtarma çalışmalarına destek
- Deniz sınır güvenliği
- Kimyasal ve biyolojik görüntüleme

Günümüzde İHA'lar boyutlarına, menzillerine, seyrüsefer maksimum irtifalarına, motor tiplerine, güç/itki oranlarına, görev tanımlarına gibi çeşitli özellikleri ve performans karakteristikleri dikkatte alınarak sınıflandırılmışlardır. Yukarıda belirtilen özellikler ve performans karakteristikleri tasarımcılar, üreticiler ve potansiyel müşteriler için önem arz etmektedir. Hedeflenen amaca uygun bir İHA böylelikle önceden belirlenen sınırlar içerisinde tasarlanabilir ve tedarik edilebilir [3]. İHA'larda kullanılan motor tipleri ve itki grubu büyük öneme sahiptir. Son yıllardaki teknolojik gelişmeler ve çevresel farkındalıktaki artışa paralel olarak daha çevreci itki-güç grubu sistemleri (elektrik, güneş panelleri, yakıt hücreleri, hibrit sistemler, hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlar vs.) geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanmış olmasına rağmen İHA'ların büyük çoğunluğu fosil yakıtların kullanıldığı içten yanmalı motorları bulundurmaktadırlar [4,5].

İHA'ların sahip oldukları itki sistemleri genel hatlarıyla aşağıda belirtilen bileşenlerden oluşmaktadır [4].

- Enerji kaynağı; kimyasal yakıtlar (fosil yakıtlar, biyoyakıtlar, ve kimyasallar), elektrik, güneş enerjisi (fotovoltaik hücreler ile), hidrojen, metanol, mekanik enerji.
- Depolama ortamı; tanklar, bataryalar, kapasitörler, metal hidratlar.
- Mekanik enerji dönüştürücü; içten yanmalı motorlar ve yakıt hücresi-elektrik motoru hibrit sistemler.
- Taşıma/itki dönüştürücü; rotor, fan, pervane, jet motor ve daha fazlası.

Temelde incelendiğinde 3 ana tip itki sistemi İHA'larda kullanılmaktadır [4];

1. Termal sistemler: Farklı termodinamik çevrimler, yakıtlar ve motor tipleri kullanan sistemlerdir (buji ateşlemeli, pistonlu ve yakıt olarak benzin, kerozen, avgas vs.).
2. Elektrikli sistemler: Gücün bir elektrik motoru vasıtasıyla sağlandığı ve elektriğin üretilme veya depolama şeklinde çeşitli yöntemler ile tedarik edildiği sistemler.
3. Hibrit sistemler: Bazen içten yanmalı motor veya bir elektrik motorunun bataryalar ile birlikte kullanıldığı, bazen de elektrik motorunun yakıt hücreleri ve bataryalar ile birlikte kullanıldığı sistemlerdir.

Çizelge 1.1. Farklı İHA'lara ait farklı tipteki güç grupları ve özellikleri [4]

Tip	Üretici/model	Ağırlık (kg)	Pik güç (kW)	Güç yoğunluğu (kW/kg)	Uygulama
<i>Piston motor (2 strok)</i>	Rotax 503	33,2	37	1,11	INTA SIVA İHA (SR)
<i>Turboprop</i>	Honeywell TPE 331-10	153	671	4,38	PREDATOR B (MALE)
<i>Turbofan</i>	Pratt & Whitney Canada PW545B	347	18,32 kN	10,86	PREDATOR C (MALE, 741 km/saat)
<i>Elektrik motor</i>	ElectriFly GPMG4805 Brushless DC	1,48	8,4	5,68	Radyo-Kontrollü Uçak
<i>Lityum iyon batarya</i>	ANR 26650 Cylindrical	-	-	2,60	Taşınabilir yüksek güç
<i>H₂ Yakıt hücresi</i>	UTRC Gen 1	1,78	1,2	0,675	Helikopter mini İHA
<i>H₂ Yakıt hücresi</i>	Protonex Ion Tiger UAV (NRL)	1	0,550	0,550	Sabit kanatlı CR İHA
<i>Güneş paneli</i>	Birkaç üretici firma	-	-	0,06	Uzay aracı uygulamaları
<i>Wankel motor</i>	O.S. engines 49-PI Type II 4,97 cc	0,333	0,934	2,8	İHA Wankel motor

1.1. Literatür Özeti

Uzun uçuş süresi ve uzun menzile sahip insansız hava araçları, havacılık çalışmaları içerisinde gelişimi önemle takip edilen ve çalışmaların yoğun olarak devam ettiği bir konudur. Bu noktadan bakıldığında insansız hava araçlarında kullanılan enerji kaynakları ve itki modülü büyük öneme sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalar uzun uçuş süresi ve menzil açısından, itki modülünde kullanılan yakıt hücrelerinin, uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Dünya genelinde geçmişten bugüne İHA yatırımları ve yakıt hücreli İHA çalışmaları incelendiğinde [6]:

1991-2001

- A.B.D. Savunma Departmanı yaklaşık 3 milyar doları insansız hava araçlarının üretimi, geliştirilmesi ve operasyonları için harcamıştır.

1995-2005

- A.B.D., askeri ar-ge faaliyetleri arasına PEMYH ve KOYH ile sağlanan alternatif güç grubu çalışmalarını koymuştur.

2002-2012

- 10 yıllık zaman zarfında A.B.D. Savunma Departmanı İHA'ların ar-ge faaliyetleri için yaklaşık 4 milyar dolar daha yatırım yapmıştır.

2002

- Boeing, yakıt hücreli İHA'ların geliştirilmesi için 460 milyon dolarlık bir ihaleyi A.B.D. Savunma Bakanlığından, ileri teknolojiler araştırma projesi olarak kazanmıştır.

2003

- AeroVironment grubu 380 gram ağırlığında 38 cm kanat açıklığına sahip bir mikro boyutta İHA'nın 15 dakika test uçuşunu gerçekleştirmiştir. Mikro İHA'da 10 W gücüne sahip bir PEMYH kullanılmıştır.
- Aynı grup 9 uçuş denemesinden sonra güneş enerjisi ve yakıt hücreleri (18 kW-336 kg) ile birlikte entegre çalışabilen esnek kanatlı bir uçağın 29524 metre irtifada test uçuşunu başarıyla gerçekleştirmişler.

2004

- Boeing sıvı hidrojeni depolayarak yakıt hücreli İHA'lara entegre etmiş ve bu alanda uzun menzil ve yüksek irtifa uçuşları için yapılacak olan çalışmalara yeni bir boyut kazandırmış.

2005

- AeroVironment grubu 24 saat uçuş süresine ve 1,5 kW gücüne sahip sıvı hidrojen yakıtlı yakıt hücresinin 1 saatlik uçuş testini başarıyla gerçekleştirmişler.
- Almanya'daki Fachhoch Schule Wiesbaden Üniversitesi Uygulamalı Bilimler bölümü yakıt hücresi ile çalışan bir İHA'nın 90 saniyelik test uçuşunu başarıyla gerçekleştirmişler.

- Amerika'daki bir araştırma laboratuvarında Protonex şirketi ile birlikte sıvı hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı 100 W güce sahip bir PEMYH'li İHA ile 3 saatlik bir uçuş gerçekleştirilmiştir.
- Protonex şirketi yaptığı 750,000 dolarlık anlaşma ile uzun uçuş süresine sahip PEMYH'li mikro İHA'ların üretilmesi ve 1000 W/kg mertebelerine çıkılması hedeflenmiştir.
- Amerika'daki Georgia Teknoloji Enstitüsü öğrencileri tarafından bir eğitim projesi olarak 45 dakikalık bir uçuş PEMYH'li İHA tarafından gerçekleştirilmiştir.
- Kaliforniya Eyalet Üniversitesi Disiplinler arası Akışkanlar Dinamiği ve Kontrol laboratuvarı tarafından 13 kg ağırlığında, 5,5 m kanat açıklığına sahip bir İHA bünyesinde bulunan PEMYH ile 2 dakikalık bir test uçuşu gerçekleştirmiştir.

2007

- AeroVironment grubu PEMYH'li İHA ile 7 saat süren ve 322 km menzile sahip bir test uçuşunu başarıyla gerçekleştirmişler.
- Protonex şirketi 800,000 dolarlık bir fon ile daha fazla güç yoğunluğuna sahip PEMYH geliştirerek 10 saatlik uçuş süresine sahip İHA tasarlamayı hedeflemişler.
- Boeing LiO batarya ile birlikte kullanılan PEMYH'li hibrit bir sistem ile 5 gün boyunca havada kalabilen bir İHA planlamış.
- Hyfish jet wing isimli PEMYH'li İHA, konsorsiyum ile geliştirilerek İsviçre üzerinde 20 dakika süreyle saatte 200 km ile uçarak testi başarıyla tamamlamıştır.
- Kore Bilim ve Teknoloji Araştırma Enstitüsündeki araştırmacılar 500 g Sodyumborohidrat kullanarak elde ettikleri hidrojen yakıtı ile PEMYH'li İHA'yı 10 saat boyunca uçurmuşlardır.
- Üniversite, özel sektör ortaklığı ile gerçekleştirilen çalışmada PEMYH ve sıvı hidrojen tankına sahip Pterosoar isimli İHA Kaliforniya üzerinde yaklaşık 125 km uçarak testi başarıyla tamamlamıştır. Bu İHA'nın prototipi toplam yakıt kapasitesinin % 25'i (16 gramını) kullanarak testi başarıyla tamamlamıştır.

PEMYH'li insansız hava araçları üzerine yapılan çalışmalar 2007 yılından sonra detayları ile açık literatürde yer almaya başlamıştır. Bradley ve ark. [7] tarafından yapılan çalışma açık literatürde yakıt hücreli olarak tasarlanan, sıkıştırılmış hidrojen kullanan ve test edilerek sonuçları ilan edilen ilk PEMYH'li İHA çalışmasıdır. Çalışmada, tasarlanan uçak performans karakteristikleri açısından bakıldığında düşük fakat yakıt hücreli bir uçağın performans değerlerinin alınması, uçak ve yakıt hücre yığının etkileşimini görmek açısından önemlidir.

Bu uçak itki elde edebilmek için sadece yakıt hücre yığını kullanmaktadır. Uçakta kullanılan güç grubu sırasıyla yakıt hücre yığını, ısıl yönetimi alt sistemleri, hava yönetimi alt sistemleri ve hidrojen deposunu içermektedir. Yukarıda belirtilen bütün alt sistemler ve uçaktan bilgi alımı 8-bit mikro denetleyici ile yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan PEMYH'si 32 hücreden oluşmaktadır. Hücreler 64 cm² aktif yüzey alanına sahip olup, yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı 60 °C ve ağırlığı 4,96 kg'dır.

Yukarıdaki verilen yığın özelliklerine ilaveten hücrede kullanılan bipolar plakalarda 3'lü serpantin kanal dağılımı kullanılmıştır. Yine üzerinde soğutma sıvısının geçtiği kanallar bulunmaktadır.

Hücre yığnında kullanılan son plakalar değiştirilerek hem ağırlıkları azaltılmış hem de uçak içine yerleştirmede kolaylık sağlanmıştır. Yığın üzerinde yapılan düzenlemeler neticesinde hücrelerin performansında herhangi bir düşüş gözlemlenmemiştir.

Yakıt hücre yığınının sıcaklık kontrolü hücre performansı açısından hayati bir öneme sahiptir. Dolayısıyla sıcaklık kontrolünün yakıt hücre yığını için belirlenen sıcaklık aralığında kalması gerekmektedir. Bu çalışmada saf su bir pompa eşliğinde radyatör üzerinden geçirilerek yakıt hücre yığınının istenilen sıcaklıkta tutulması sağlanmıştır. Saf su ile hücre içi akışkanları arasında hiçbir karışım söz konusu değildir. Kullanılan pompa dakikada 1,5 L saf suyu pompalamaktadır.

Yakıt hücresini soğutmada kullanılan radyatör, karbon köpük içerisinde alüminyum tüplerin yerleştirildiği ve havanın alüminyum ara yüzeyinde soğutmaya imkân verebilecek şekilde dolaşabileceği bir tasarıma sahiptir. Hava uçak gövdesi üzerine açılmış kanallar üzerinden doğruca radyatör üzerinde 80 mm

çapında 3 W'lık fanlara gelmektedir. Yapılan iyileştirmeler sayesinde 500 g ağırlıkça, 12 W'ta güç yönünden tasarruf sağlanmıştır.

Hava yönetim sistemi katot tarafından hücre içine giren havanın değişken debilerde basınçlandırılması ve filtre edilmesini sağlamaktadır. Özellikle düşük akım yoğunluklarında hücre için nemliliğinin öneminden dolayı kendinden nemlenen yakıt hücre yığınlarında hücre içine giren havanın debisinin kontrolü önemlidir. Kendinden nemlenen sistemlerde ortam havasının ve tepken gazların sahip olduğu nemlilik oranı hücre için yeterlidir. Katot girişindeki basıncın 0,3 bar olması için bir çek valf ve havanın debisinin ayarlanması için 2 adet kompresör kullanılmıştır. Düşük debilerde bir kompresör kapatılarak hava hücre içine alınmıştır. Yakıt hücre yığını üreticileri tarafından önerilen 2,0 ve 3,0 olan katot stokiyometrisi özellikle 12 A ve üzeri akımlarda iki kompresörde çalıştırılarak sağlanmış. 12 A altında tek kompresör, 5 A altında kompresör rölati ayarında çalıştırılmıştır. Tavsiye edilen stokiyometri hiç aşılmamıştır.

Sonuç olarak hidrojen beslemesi bir hidrojen tankı ile sağlanan 500 W gücünde yakıt hücresi ile kalkış ağırlığı 24,9 kg olan bir İHA başarıyla test edilmiştir. Bu çalışmada laboratuvar ve uçuş testleri neticesinde şu sonuçlara varılmış; (i) Mevcut hidrojen tank kapasitesi ile 43 dakikadan yatay uçuşun 52 dakikaya çıkarılabileceği. (ii) Yakıt hücresi güç grubunun yatay uçuşta ve maksimum güç gerektiren durumda hidrojen alt ısı değerinin sırasıyla % 34 ve %33'ünün elektrik enerjisine çevirdiği ve bu verimliliğin daha küçük PEMYH'in verimi olan % 35-36 değerleri ile kıyaslanabilir bir değer olduğu ortaya konulmuş. İHA'nın güç ve itki grubu bileşenlerinde ki güç kayıpları incelenmiş gelişen teknoloji ile birlikte PEMYH'li İHA'ların performansının artacağı görülmüştür.

Fürrutter ve Meyer [8] düz uçuş (seyir uçuşu) esnasında 100 W'lık PEMYH yığını kullanabilecek, kalkışta yakıt hücresine paralel bağlı bir LİPo batarya kullanacak uçağın tasarlanması ve güç yönetiminin yapılmasını içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan yakıt hücresi güç grubu aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- Yakıt Hücre Yığını,
- Hücre içine giren havanın ve hücre çalışma sıcaklığının kontrolü için bir kontrolör,

- Hat içinde basınç düşürücü bir regülatör,
- Hidrojen depolama tankı,

Çalışmada kullanılan PEMYH 100 W gücünde, 21 hücreden oluşmaktadır. Çalışma sıcaklığı 65 °C olup ağırlığı 835 gramdır. Çalışmada kullanılan yakıt hücresinden 12 V hücre potansiyelinde 8,4 A akım çekilebilmektedir. Hücre yığınının sıcaklığını kontrol etmek, hücre tarafından üretilen suyu tahliye etmek ve üretilen akımı kontrol etmek için bir kontrolör kullanılmıştır.

Yakıt hücre yığınının düz uçuş esnasında güç üretmesi, kullanılan yardımcı bataryanın ise kalkış ve kontrol servoları için kullanılması amaçlanmıştır.

Bir röle yardımıyla yakıt hücre yığınının ürettiği gücün tamamının elektrik motoruna verilip, hücre işleyişinde herhangi bir problem olduğunda batarya ile uçağın kontrolü sağlanmıştır. Gaz fazında depolanan hidrojenin yakıt hücresine gönderilirken basıncının ve debisinin bir regülatör yardımı ile kontrol edilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan hidrojen tankının dayanabileceği basınç 220 bar'dır. Fakat hidrojen tankı 30 bar için doldurulmuştur. Basınç düşürücü regülatör 30 bar'daki hidrojen basıncını yakıt hücresinin anodundaki kullanım basıncı olan 0,7 bar'a düşürmüştür.

Sıcaklık maksimum çalışma sıcaklığının üzerine çıktığında hücrenin nemliliği ve hücre performansı doğrudan etkilenir. Kontrolör böyle bir durumda yakıt akışını keserek bu problemi engelleyemediği için, uçağın gövdesi içine yeterli miktarda havanın alınmasıyla hücre yığını soğutulur. Bu çalışmada 60 mm, 3 W'lık bir fan kullanılarak yüksek akım yoğunluklarında sıcaklığın istenilen düzeyde kalması sağlanmıştır.

Kendinden nemlenen sistemlerde hava debisi kontrolü önemlidir (özellikle düşük akım yoğunluklarında). Bu çalışmada 100 W'lık sistem için ortam havasının nemliliği yeterli olmuştur.

Hücre yığını kontrolörü, üretilen su buharını ve suyu hücre içinden tahliye etmek zorundadır (hidrojenin hücre içine girebilmesi için). Bu çalışmada tahliye işlemi esnasında hücre potansiyelindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada;

- Yakıt hücresi performansının hücre girişindeki basınç değeriyle olan ilişkisinin önemi,
- Çalışmada tasarlanan kontrolör, yakıt hücresinin maksimum güç durumu için kullanışlı olduğu,
- Kontrolörün eniyilemesinin, farklı yüklemeler, hücre içine giren ve tahliye edilen hidrojen miktarı, akım ölçümleri açısından faydalı olabileceği görülmüş,
- Uçak içi hücre yığının konumunun doğru belirlenmesinin önemi vurgulanmış,

Tasarlanan uçağın uçuş testleri ve manevraları esnasında güç iletimi başarılı olmuştur. Yakıt hücre yığını kullanımı için tasarlanan teknoloji gösterimi uçağın gelecekteki tasarımlar açısından özellikle uzun menzil uçuşlar için motive edici olduğundan bahsedilmiş. Kontrolör tasarımı ve eniyilemesinin önemi vurgulanmıştır.

Kim ve ark. [9] yaptıkları çalışmada İHA için tasarlanan PEMYH sistemini, çalışma koşullarında test edip, uzun mesafeli uçuş testlerini başarıyla gerçekleştirmişler. Çalışmaya konu olan yakıt hücresi sistemi; PEMYH yığını, hidrojen üreticisi (sodyumborohidrat kullanılarak) ve hibrit enerji yönetim sisteminden oluşmaktadır. İHA'lar en fazla güç gereksinimine kalkış esnasında ihtiyaç duyarlar, yatay uçuş esnasında ise daha az enerji gereksinimi söz konusudur. Bu sebepten, çalışmada hibrit enerji yönetim sistemi, yardımcı bir batarya kullanılarak enerjinin daha verimli ve ekili bir biçimde kullanılması sağlanmıştır. Yapılan çalışmada oluşturulan yapı İHA'nın hem kalkışına hem de dönme hareketlerini gerçekleştirmesine olanak sağlarken, aynı zamanda yatay uçuş esnasında yakıt hücresi yığını beslenerek güç üretimi sağlanmıştır. Bu çalışmaya konu olan PEMYH yığını 100 W güç üretebilme kapasitesine, 24 adet tekil hücreden oluşan, 19,2 cm² aktif yüzey alanına sahip, havalı soğutma kanallarının bulunduğu 12,5 V ve 8 A akım ile 100 W gücü üretebilmektedir.

Bu çalışmada yakıt hücresi ile beraber lityum bir batarya ile itki modülü beslenen, kalkış ağırlığı 2,5 kg olan bir İHA'nın yer testleri ve 2 saati bulan test

uçuşu başarıyla tamamlanmıştır. Sonuç olarak PEMYH'li insansız hava araçlarının uzun menzil uçuşları için geliştirilebileceği ifade edilmiştir.

Espadin ve ark. [4] 2008 ile 2012 yılları arasında elektrik motorlu insansız hava araçları sayısının 85'ten 232'ye yükseldiğini belirtmişler. Aynı yıllarda üretilen İHA'lar içerisinde elektrik motoru kullanan araçların oranı 20% civarında olduğu ve artışa meyilli olduğu gözlemlenmiştir. Elektrik motorlu İHA'lar içerisinde de gücünü yakıt hücreleri ve melez sistemlerden alan hava aracı sayısı 10 adeti bulmuştur.

İHA'larda itki modülünde kullanılan içten yanmalı motorlar, bataryalar güneş panelleri ve yakıt hücreleri, İHA'ların kullanım amaçlarına, menzillerine, maksimum irtifalarına ve görev tanımlarına göre kendi içerisinde avantaj ve dezavantaja sahiptirler. Bataryalar yüksek güç yoğunluğuna sahipken, düşük enerji yoğunluğuna ve büyük hacme sahip olması İHA'lar açısından dezavantaj olarak görülmektedir [4].

Ticari uçaklara kıyasla insansız hava araçlarının itki modülü toplam ağırlığın üçte birini oluşturmaktadır [5]. Bu oranı azaltma İHA'lar için aşılması gereken problemlerden biridir ve çalışmalar devam etmektedir. Özellikle uzun menzilli İHA'larda kullanılan içten yanmalı motorların yakıt tüketimlerini ve boyutlarını azaltma yönünde çalışmalar yapılmaktadır [4].

Yakıt hücreleri İHA'ların avantaj ve dezavantajları sıralanırsa [4]:

Temel avantajları;

- Fosil yakıt kullanan teknolojilerden daha verimlidirler.
- Yüksek enerji yoğunluğuna dolayısıyla uzun uçuş süresine sahiptirler.
- Az sayıda hareketli parçaya sahiptirler ve kolaylıkla otomasyonu yapılabilir.
- Operasyon esnekliği sağlarlar. İhtiyaca göre bataryalarla birlikte kullanılabilirler.
- Modüler bir yapıya sahiptirler ve kolayca aracın içine yerleştirilebilir.
- Her hangi yanma işlemi gerçekleşmeden yakıtın enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürürler.
- İhmal edilebilecek düzeyde titreşim ve gürültüye sahiptirler.
- Emisyonları çok düşüktür.

- Yakıt hücresinin ürettiği su ve ısı özellikle büyük insansız hava araçlarında su kullanan ve buzlanmayı engelleyici sistemlere olan gereksinimi azaltır dolayısıyla ağırlıktan kazanç sağlanır.

Temel dezavantajları;

- Yüksek maliyet, özellikle insansız hava araçlarında kullanım için yeterli olgunluğa erişmemiş olması.
- Hassas filtreleme sistemlerine olan gereksinim.
- Bakım için gerekli olan kalifiye personel.
- Düşük güç yoğunluğuna sahip olması.
- Yakıt olarak hidrojen kullanılıyorsa, hidrojenin depolanması ve temini.
- Günümüzde yakıt hücreleri yer uygulamaları, taşınabilir uygulamalar, otomobil ve benzeri araçlar açısından ticari olarak olgunlaşmış olsa da İHA’larda kullanılması açısından hala ticari olarak güvenilirliğini ispatlayabilmiş değildir. Ar-ge faaliyetlerine gereksinim duyulmaktadır.
- Özellikle hidrojenin kullanıldığı sistemlerde havacılık kuralları açısından bakıldığında gerekli güvenlik prosedürlerinin sağlanması gerekmektedir (yerde ve havada).

Günümüzde yakıt hücreleri insansız hava araçları (özellikle PEMYH’li) birkaç firma tarafından ticari olarak temin edilebilmektedir ve kısıtlı güç yoğunluklarına sahip PEMYH’leri kullanılmaktadır. Mevcut güç yoğunlukları 700-1000 Wh/kg olup gelecek 10-15 yıl içerisinde 10kWh/kg ve 20-30 yılda da bu değerlerin 20 kWh/kg mertebelerine çıkacağı tahmin edilmektedir [10].

Yakıt hücreli İHA’lar, havada kalma süresinin uzunluğu açısından bakıldığında savunmada ve sınır güvenliğinde kullanılması, uydu sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri ile kıyaslandığında alternatif bir görüntüleme teknolojisiyle entegre kullanılabileceği ön görülmektedir [11,12,22].

1.2. Tezin Anahatları

Yapılan bu tez kapsamında sırasıyla bölümlerde anlatılanlar özetlenirse:

- Giriş kısmında insansız hava aracının tanımı ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Bu kısımda özellikle insansız hava araçlarının sahip olduğu

güç gruplarından, itki modülünden, kullanılan enerji kaynakları ve yakıt türleri hakkında bilgiler verilmiştir.

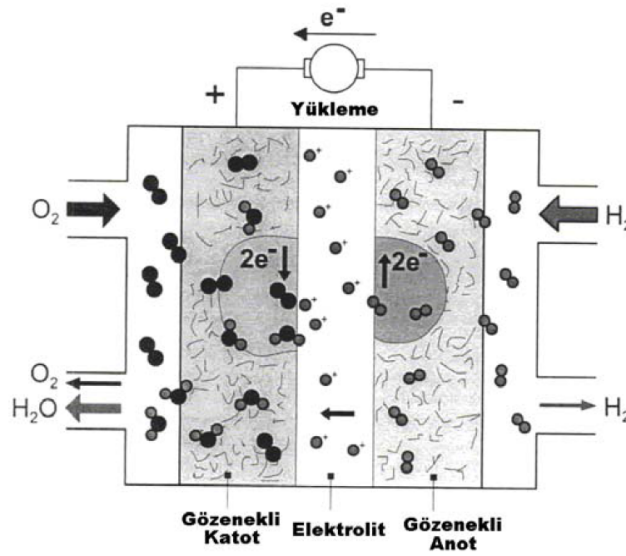
- Literatür kısmında, geçmişten bugüne kadar dünya genelinde insansız hava araçları üzerine yapılan önemli yatırımlardan, özellikle de yakıt hücreli insansız hava araçları üzerine yapılan yatırım ve çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca 2007 yılından sonra açık literatürde detayları ile birlikte yer almaya başlayan yakıt hücreli İHA'ların tasarlanıp üretildiği çalışmalardan, bu çalışmalarda karşılaşılan problemler ve getirilen çözümler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Son olarak 2008 yılından günümüze yakıt hücreleri İHA'ların artışından, yakıt hücrelerinin kullanımının avantaj, dezavantajlarından ve gelecek beklentilerinden bahsedilmiştir.
- Polimer Membran Elektrolit Yakıt Hücresi bölümünde, yapılan literatür araştırmaları doğrultusunda ve uygulama avantajları açısından PEMYH'lerinin insansız hava araçları için pratikte uygunluğu görülmüştür. Çalışmanın bu kısmı PEMYH'nin bileşenlerinin tanıtılması, kullanılan malzemelerin genel özelliklerinden bahsedilmesi, hücre yığınının tasarlanması ve üretilmesi aşamalarında dikkat edilmesi gereken hususları içermektedir.
- Yakıt Hücresi Kimyası, Termodinamiğinin Temelleri ve Kayıpları bölümünde, yakıt hücresi termodinamiğinin temel hesaplamaları, teorik elektrik işi, teorik hücre potansiyeli, sıcaklığın ve basıncın hücre potansiyeline etkileri, hücre verimi, Butler-Volmer ve Nernst denklemleri, hücrede gerçekleşen potansiyel kayıplar ve polarizasyon eğrisinden bahsedilmiştir.
- Gereç ve Yöntem bölümünde, çalışmada kullanılan yakıt hücresi deney sisteminden, hazırlanan gaz difüzyon tabakasından, membrandan, aktif tabakanın üretiminden ve yakıt hücresinin bir araya getirilmesinden bahsedilmiştir.

- Sonuç ve Öneriler bölümünde, yapılan tek hücre testlerinden elde edilen sonuçlar, bir insansız hava aracına yönelik PEMYH yığını geliştirmede dikkat edilmesi gerekli olan adımlar ve ileride yapılması önerilen çalışmalara yer verilmiştir.

Bu yüksek lisans tezi bir insansız hava aracı için geliştirilecek olan PEMYH yığınının tasarım ve üretim aşamalarından olan aktif yüzey alanının belirlenmesi, MEB'nin üretilmesi, uygun conta seçimi ve oda sıcaklığında tek hücre testlerinin yapılmasına yönelik çalışmaları içermektedir.

2. POLİMER MEMBRAN ELEKTROLİT YAKIT HÜCRESİ

Yakıt hücrelerinin yapıları temel olarak birbirine benzemektedir. Elektrolit ile birbirinden ayrılan iki elektrot bir dış devreye bağlanmıştır. Anot tarafından yakıt olarak beslenen hidrojen iyon haline gelerek elektrolit boyunca katoda taşınır. Katot üzerinde bir oksitleyici (hava, oksijen) ile tepkimeye girerek suyu oluşturur. Oluşan su ve tepkimeye girmeyen oksitleyici dışarı atılırken, devreyi tamamlayan elektronlar elektrik akımını meydana getirirler [13].



Şekil 2.1. Tipik bir yakıt hücresi [14]

Geçmişten günümüze yakıt hücreleri kullanılma amaçları, projelere ve zamanın ihtiyaçlarına göre gelişim göstermiştir. Bunlara petrol krizi, uzay araştırmaları ve çevre kirliliğinde içten yanmalı motorların sebep olduğu zararlı emisyonlar gibi bir çok faktör örnek verilebilir. 1980’li yılların sonuna kadar yakıt hücreleri üzerine araştırmalar devam etse de ticarileşmesi ve yaygın kullanımı hususunda istenilen düzeye gelinememişti. En büyük engel ise günümüzde artık geleneksel yöntemler ile üretilen ve kullanılan, pahalı bir soy metal olan platinin o yıllarda istenilen etkinlikte kullanılamamasıdır.

1990’lardan günümüze artık yakıt hücreleri üzerine olan çalışmalar büyük ilerleme kaydetmiş olup, günümüzde yakıt hücreleri ticari olarak önemli bir paya sahiptir. Yakıt hücreleri içerisinde de en fazla çalışılan konulardan biri Polimer elektrolit membran yakıt hücresidir [13,15].

Çizelge 2.1. Geçmişten günümüze yakıt hücreleri gelişimi [15]

Yıllar	Kilometre Taşları
1839	W.R. Grove ve C.F. Schönbein birbirlerinden ayrı hidrojen yakıt hücresini tanıttılar.
1889	L. Mond ve C. Langer gözenekli elektrotu geliştirip, CO zehirlenmesini tanımlayıp ve kömürden hidrojen elde ettiler.
1893	F. W. Ostwald yakıt hücresi elektrokimyasının temelleri ve hücre bileşenlerinin fonksiyonlarını ortaya koydu.
1896	W.W. Jaques ilk pratik yakıt hücresi uygulamasını gerçekleştirdi.
1933-1959	F.T. Bacon alkali yakıt hücresini geliştirdi.
1937-1939	E. Baur ve H. Preis katı oksit yakıt hücresini (KOYH) geliştirdiler.
1950	Teflon ilk defa platin/asit ve karbon/alkali yakıt hücrelerinde kullanıldı.
1955-1958	T. Grubb ve L. Niedrach General Elektrik bünyesinde PEMYH’sini geliştirdiler.
1958-1961	G.H.J. Broers ve J.A.A. Ketelaar tarafın EKYH geliştirildi.
1960	Bacon’ın çalışması temel alınarak geliştirilen alkali yakıt hücresi NASA tarafın Apollo uzay programında kullanıldı.
1961	G.V. Elmore ve H.A. Tanner FAYH’ni geliştirip ilk denemelerini yaptılar.
1962-1966	General Elektrik tarafından geliştirilen PEMYH’si NASA Gemini uzay programında kullanıldı.
1968	Dupont Nafion TM ’u tanıttı.
1992	Jet itki laboratuvarı DMYH’ni geliştirdi.
1990’lar	Dünya genelinde yakıt hücreleri ve özellikle PEMYH üzerinde geniş çaplı çalışmalar yürütülmeye başlandı.
2000’ler	Yakıt hücreleri geliştirilmeye devam edilmesinin yanında artık ticarileşmiş durumdadır.

Geçmişten bugüne farklı çalışma koşullarına, hücre bileşenlerine ve kullanım amaçlarına sahip yakıt hücrelerinin geliştirildiği görülmektedir (Çizelge 2.1.). Yakıt hücreleri genellikle kullandıkları elektrolit tiplerine göre sınıflandırılmaktadır. Bunlar sırasıyla, alkali yakıt hücresi (AYH), polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMYH), direkt metanol yakıt hücresi (DMFY), fosforik asit yakıt hücresi (FAYH), ergimiş karbonat yakıt hücresi (EKYH) ve katı oksit yakıt hücresi (KOYH) olarak sınıflandırılabilir [13]. Bunlara ilaveten yakıt hücreleri kullandıkları yakıt tipine, çalışma sıcaklığına ve

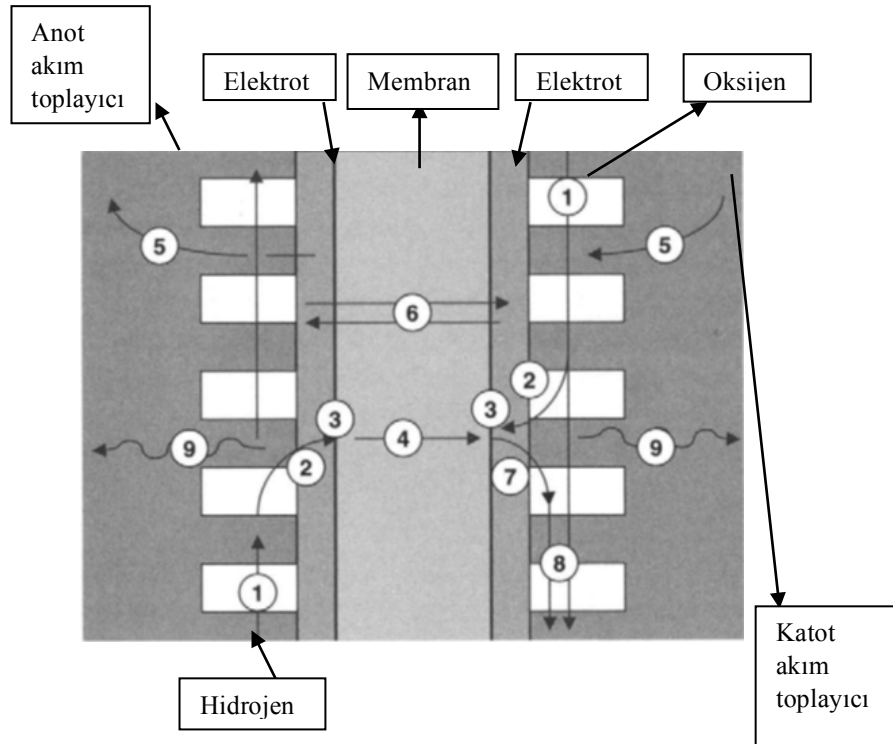
kullanım alanlarına göre de sınıflandırılabilir. Çizelge 2.2’de verilen yakıt hücresi tiplerine ilaveten Rejeneratif, Direkt sodyum bor hidrür, Sodyum bor hidrür hidrojen peroksit, Direkt etilen glikol, Direkt etanol, Direkt karbon, Direkt formik asit, Enzimatik ve mikrobilyal yakıt hücreleri günümüzde mevcuttur [15,21].

Çizelge 2.2. Yakıt hücrelerinin sınıflandırılması ve özellikleri [13]

	AYH	PEMYH	DMYH	FAYH	EKYH	KOYH
Çalışma sıcaklığı (°C)	<100	60-120	60-120	160-220	600-800	800-1000
Anot reaksiyonu	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow 6H^+ + CO_2 + 6e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{3}{2} O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Uygulama alanları	Taşımacılık, uzay, askeri, enerji depolama sistemleri		Merkezi olmayan yerleşik güç sistemleri için kombine ısı ve güç üretiminde		Merkezi olmayan yerleşik sistemler ve taşımacılık için kombine ısı ve güç üretimi	
Elde edilen güç	Küçük tesisler 5-150 kW modüler	Küçük tesisler 5-250 kW modüler	Küçük tesisler 5 Kw	Küçük-Orta tesisler 50 kW-11 MW	Küçük güç üretim tesisleri 100 kW-2 MW	Küçük güç üretim tesisleri 100-250 kW
Elektrolitteki yük taşıyıcı	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Yakıt	Hidrojen	Hidrojen	Metanol	Metanol, Doğal gaz, Nafta, Kömür gazı	Doğal gaz	Hidrojen, CO
Oksitleyici	Oksijen	Oksijen, hava	hava	hava	hava	hava
Elektrolit	KOH çözeltisi	Katı organik polimer membran	Katı organik polimer membran	Fosforik asit	Lityum, sodyum ve/veya potasyum karbonat çözeltisi	Yitrium ile stabilize edilmiş zirkonyum çözeltisi

2.1. PEMYH Bileşenleri ve Malzeme Özellikleri

Polimer esaslı proton iletken membran, yakıt hücresinin kalbi denilebilecek kritik öneme sahip bir yakıt hücresi bileşenidir. Bu bileşen her iki tarafında gözenekli elektrotlar bulundurmaktadır. Hücrenin iki tarafından beslenen tepken gazların elektrot ile membran ara yüzeyine ulaşması gerekir. Bu sebepten hücrede kullanılan elektrotlar gözenekli ve geçirgen bir yapıya sahip olmalıdır ki elektrotla membran arasında elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği, katalizörle kaplı yüzeye ulaşabilsin. Kullanılan üretim yöntemlerine göre katalizörle kaplı yüzey elektrotun üzerinde olabileceği gibi membranın üzerinde de olabilir. İki elektrotun ortasında membran olacak şekilde hazırlanan yapıya membran elektrot bileşkesi (MEB) adı verilir. Birden fazla hücrenin yan yana bulunduğu yakıt hücresi yığınlarında bir hücrenin anodu diğer hücrenin katoduna gelecek şekilde, içlerinden oksijen ve hidrojenin ayrı aktığı, elektrik iletken bipolar plaka (BP) kullanılır. Hazırlanan her bir MEB iki BP'nin arasına yerleştirilir. BP tepken gazların hücre içi akışını sağlayacağı gibi aynı zamanda hücre yığınının yapısal olarak rijitliğini sağlar [16].



Şekil 2.1. Temel hücre bileşenlerinin bulunduğu temsili bir yakıt hücresi [16]

Sırasıyla şekil 2.1’de gerçekleşen olaylardan bahsedecek olursak:

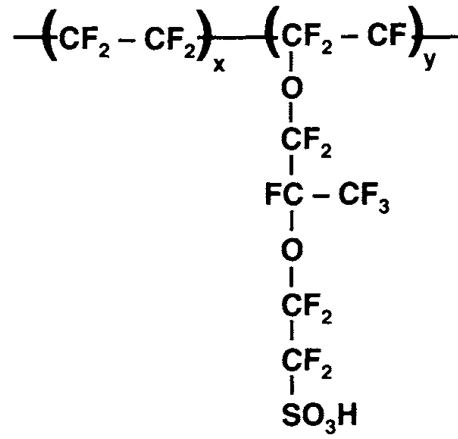
1. Gazların kanallar boyunca akışı.
2. Gazların gözenekli yüzey üzerine yayılması.
3. Ara adımların gerçekleştiği elektrokimyasal reaksiyonlar.
4. Polimer esaslı proton iletken membran üzerinden proton iletimi.
5. Elektrik iletken yüzeyler üzerinden elektron iletimi.
6. Membran üzerinden suyun çift yönlü hareketi.
7. Gözenekli gaz difüzyon tabakası (GDT) ve katalizörle kaplı yüzey üzerinden suyun (buhar ve/veya sıvı fazda) atılması.
8. Oluşan su damlacıkları ile beraber kullanılmayan gazın atıldığı iki fazlı akış.
9. Katı bileşenler üzerinden iletim ve tepken gazlar ile taşınım yoluyla ısıнын transfer edilmesi.

Yukarıda sayılan her bir bileşen yakıt hücresinin çalışması esnasında bir veya birden fazla görevi yerine getirmektedir. Açıkça görüldüğü gibi her bir bileşen ve o bileşenin malzemesinin özellikleri hücrenin istenilen şekilde çalışması için birbiriyle uyumlu olmalıdır. Örneğin GDT tepken gazların düzgünce yayılmasını sağlamalı, diğer bir yandan hücre içinde oluşan su damlacıklarının bir araya gelerek gözenekleri tıkamasını engellemelidir. Yine BP ısıyı ve elektriği iyi bir şekilde iletmeli, aynı zamanda hafif ama mukavemetli olmalıdır. Yakıt hücre yığınları basit gibi gözükseler de hücreler içerisinde eş zamanlı olarak birden fazla proses meydana gelmekte ve meydana gelen her bir proses karşılıklı olarak diğer prosesler ile etkileşim içinde olmaktadır [16].

2.1.1. Membran

Bir yakıt hücresi membranından öncelikle yüksek seviyede proton iletmesi, hidrojen ile oksijenin birbirine karışmasını engellemesi ve çalışma süresince hücre ortamında kimyasal ve fiziksel kararlılık göstermesi beklenmektedir. Endüstride PEMYH için üretilen ve geliştirilen membranlar yukarıda saydığımız ana esaslar üzerine üretilip, geliştirilmektedir. Tipik olarak PEMYH için üretilen membranların yapısını perflorakarbon sülfonik asit iyonomer (PSA) yapısı

oluşturmaktadır. Bu yapıya tetrafloraetilen yardımcı polimeri ve birden fazla perflorasülfonat monomeri ilave edilir. Endüstride en çok bilinen membran malzemelerinden biri olan ve Dupont tarafından geliştirilen NafionTM kullanılmaktadır. Bu malzemenin içeriğinde perflora-sülfonilflorüd etil-propil-vinil eter (PSEPVE) bulunmaktadır. Aşağıdaki şekil NafionTM'un kimyasal yapısını göstermektedir [16].



Şekil 2.2. PFSA polimerin (NafionTM) yapısı [16]

Şekil 2.2’de görüldüğü üzere NafionTM, un omurgasını politetrafloraetilen (TeflonTM) oluşturmaktadır. TeflonTM yapıya mekanik dayanım ve boyutsal kararlılık sağlamaktadır. NafionTM bu yapıya sülfonik asit (SO₃H⁺) fonksiyonel grubunun ilavesiyle meydana gelir. Bu kısım zincirin en alt kısmında görülmektedir. TeflonTM ile birlikte daha dayanıklı ve kararlı olan yapıya (SO₃⁻ H⁺) fonksiyonel grubunun ilavesiyle yapı aynı zamanda yüksek seviyede proton iletimi özelliğini de kazanmış olur [16,17].

İyonik olarak birbirine bağlanan SO₃H grubu, zincirin sonuna iyonomer denmesinin sebebidir. TeflonTM yapısı gereği hidrofobik (su tutmayan) bir karaktere sahiptir. Zincirin son halkası olan sülfonik asit ise tam tersi olan hidrofilik (su tutan) bir karaktere sahiptir. Bununla beraber H⁺ iyonlarının hareketi (anottan katoda taşınması) ortamdaki suyun varlığı hatta ortamın suya yeterince doymuş olması ile ilgilidir. Bu sebeplerden dolayı yüksek seviyede iletkenlik için NafionTM'un suya doymuş olması gerekmektedir. Bazı

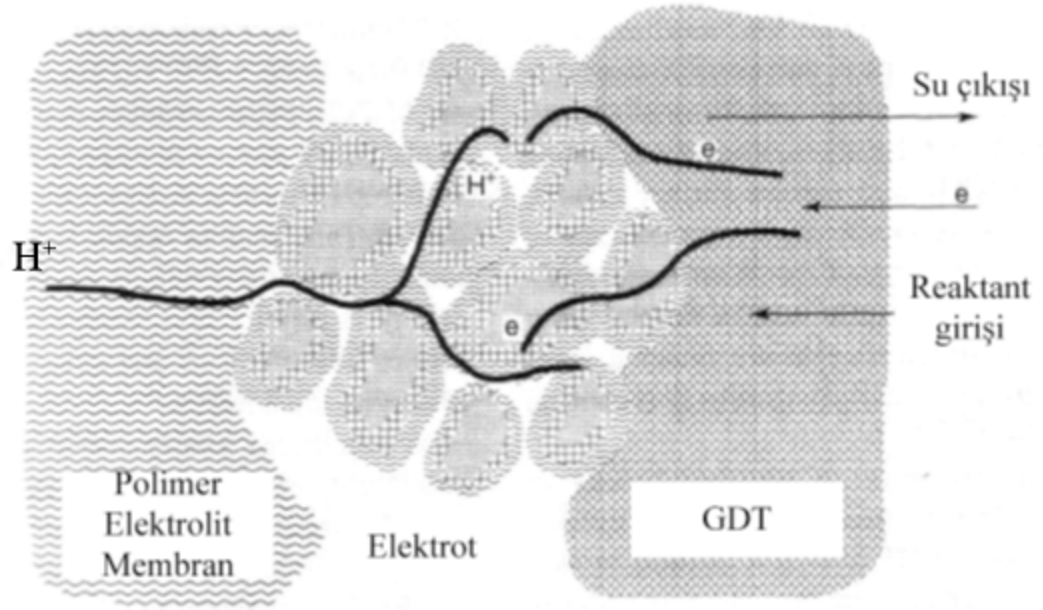
durumlarda bu miktar ağırlıkça 50 % mertebesinde olabilmektedir. [16,17]. Üretilen membranların boyutları ve özellikle kalınlığı hücre performansını etkileyen önemli parametrelerden biridir [16].

Membran alt başlığının giriş kısmında belirtildiği gibi bir PEMYH membranından beklenen başlıca görev yüksek seviyede proton iletkenliğidir. İletkenlik ise membranın içerisinde ne kadar su tutabildiği ile ilgilidir. Literatürde yapılan çalışmalar çeşitli membranlardaki proton iletkenliği ile membranların içerisinde bulundurduğu su miktarı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Membran içi su miktarının artışına paralel proton iletiminin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. NafionTM membran içerisinde ortalama bir SO₃H grubuna karşılık 22 sıvı su molekülü, buhar fazında ise (sıcaklığın artışı ile) bu değerin 14 su molekülüne karşılık geldiği bilinmektedir [16]. Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere artan sıcaklıkla beraber membranın kuruması ve proton iletiminin durması söz konusudur. Dolayısıyla çalışma koşullarında ki sıcaklık artışı veya azalışı hücre performansını doğrudan etkilemektedir. Bu konuyla ilgili problemlerin ısı yönetim ile üstesinden gelinmektedir. Piyasada sınırlı sayıdaki farklı membran çeşitleri arasından seçim yapılırken yakıt hücresi yığının çalışma basıncı, sıcaklığı ve ömrü dikkate alınmalıdır [13].

2.1.2. Elektrot

PEMYH elektrotu; elektrokimyasal reaksiyonları gerçekleştirdiği GDT ile membran arasında, üzerine ince film şeklinde katalizör kaplanmış elektrik iletken tabakadır. Elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşebilmesi için gazlar, elektronlar ve protonların katalizörle kaplı yüzeye erişmesi gerekmektedir. PEMYH'de bu erişimi sağlayan bileşen elektrotlardır. Katalizörle kaplı yüzey üzerinde serbest kalan elektronlar elektriksel olarak iletken katı yüzeyler üzerinden devreyi tamamlar, protonlar ise iyonomerlere doğru giderler ve membran içerisinde anottan katoda taşınırlar.

Anot tarafında hidrojenin katalizörle kaplı yüzeye erişebildiği gibi katot tarafında da oluşan suyun oksijen erişimini engellemeyecek ve hücre içini su basmayacak şekilde elektrot üzerinden dışarı atılması gerekmektedir [16].



Şekil 2.3. PEMYH'deki idealleştirilmiş elektrot yapısı [18]

Şekil 2.3'te anlatılmaya çalışılan etkin bir yakıt hücre performansının elde edilebilmesi için gerçekleşmesi gereken aktarım olaylarını maddeler halinde sıralayacak olursak [13];

1. Anottan gelen protonların membrandan geçerek katalizöre aktarımı.
2. Elektronların akım toplayıcıdan (devreyi tamamlayarak) katalizörle kaplı tabakaya doğru GDT'den aktarımı.
3. Tepken gazların katalizörle kaplı tabakaya, ürün gazların katalizörle kaplı tabakadan gaz kanallarına (BP'ye) aktarımı.

Platinyum (Pt) PEMYH'de hem oksijen indirgenme hem de hidrojen yükseltgenme reaksiyonlarında en çok kullanılan katalizördür. PEMYH'nin gelişim gösterdiği ilk yıllarda çok fazla miktarda Pt (28 mg cm^{-2}) katalizör olarak kullanılmaktaydı. 1990'lı yıllarda bu miktar $0,3\text{-}0,4 \text{ mg cm}^{-2}$ mertebelerinde olup günümüzde bu değer çok daha düşük miktarlara ulaşmış hatta Pt olmayan katalizörler geliştirilip, denenmeye başlanmıştır. Katalizörle kaplı yüzey üzerinde bulunan Pt parçacıkları (tane boyutları 4nm ve daha küçük) olabildiğince yüzey üzerine homojen bir şekilde dağılmalıdır. Bununla birlikte günümüzde PEMYH elektrotlarında karbon siyahı destek üzerine Pt katalizörler tercih edilmektedir. Bu

tip katalizörlerin hazırlanmasında emdirme, koloidal adsorbsiyon ve iyon değişim yöntemleri kullanılmaktadır [16,18].

Proton iletiminin istenilen seviyede olması ve tepken gazların yeterince nüfuz edebilmesi için katalizörle kaplı yüzeyin olabildiğince ince olması gerekmektedir. Aynı zamanda daha öncede belirtildiği gibi reaksiyonların gerçekleştiği katalizörle kaplı aktif yüzey alanının olabildiğince geniş ve bu yüzey alanı üzerine dağılan Pt parçacıklarının boyutlarının olabildiğince ince olması istenilmektedir [16].

Yüksek miktarda Pt katalizör yüklemesinin hücre potansiyelinin arttırdığı bilinmektedir. Fakat bu artış ile birlikte yükleme yapılan yüzey alanından elde edilen akım yoğunluğu değişmemekte ve daha fazla Pt yüklemesinin hücre performansını arttırdığı gözlemlenmemektedir. Bu sebepten PEMYH performans artışı daha fazla Pt kullanılmasından ziyade kullanılan platinin katalizörle kaplı yüzey üzerinde daha faydalı hale getirilmesiyle gerçekleşmektedir. Bunu sağlamak için elektrot hazırlanırken oluşturulan Pt/C parçacıklarının bulunduğu çözeltinin içine NafionTM (ağırlıkça 28%), alkol karışımı ve su ilave edilerek yüklenen platinin daha faydalı bir şekilde kullanılması sağlanır [16].

Prensipte katalizörle kaplı yüzey ile membranı bir ara getirmek için iki yöntem vardır. MEB'ini hazırlarken kullanılan bu yöntemlerden birincisi gözenekli yüzeyin bulunduğu GDT (karbon fiber kâğıt veya karbon kumaş olabilir) üzerinde katalizörle kaplı yüzeyin oluşturulması ardından sıcak baskı altında oluşturulan bu tabakanın membran ile birleştirilmesi. İkinci yöntem katalizörle kaplı yüzeyin doğrudan membran üzerinde oluşturulmasıdır. Bu yöntemde GDT sonradan eklenebilir.

GDT ve membran üzerine katalizörle kaplı yüzeyin oluşturulması için ise birden fazla yöntem kullanılmaktadır. Bunlar “sputtering, electrodeposition, decal, evaporative deposition, painting, screen printing ve impregnation reduction,” olarak literatür de kullanılmaktadır. Bununla beraber birçok ticari firma tarafından ticari sır olarak başka yöntemlerinde kullanıldığı bilinmektedir [16]. Günümüzde katalizör olarak platin olmayan, katalizörler üzerine çalışmalar sürdürülse de tam olarak istenilen seviyeye gelinmiş değildir. Bununla beraber PtCr, PtZr veya PtTi metal alaşımları kullanılmaktadır [16].

Gelecekte hücre içerisinde ki asidik ortamda Pt'den daha aktif veya en azından Pt kadar aktif dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi bu alanda çalışan bilim insanlarının hedeflerindendir.

2.1.3. Gaz Difüzyon Tabakası

Gaz difüzyon tabakası katalizör tabakası ile bipolar plaka arasında bulunan kısımdır. Elektrokimyasal reaksiyonlar ile doğrudan bir ilgisi olmasa da PEMYH için önemli denilebilecek fonksiyonlara sahiptir. Bunlar sırasıyla [16];

- Bipolar plaka içerisindeki kanallarda akan tepken gazların, katalizörle kaplı aktif yüzey alanı diye tabir edilen bölgeye erişimini sağlar.
- Katalizör tabakası üzerinde oluşan suyun bipolar plaka içerisindeki kanallara atılmasını sağlar.
- Katalizör tabakası ile bipolar plaka arasındaki elektriksel iletimi sağlayarak serbest kalan elektronların devreyi tamamlamasını sağlar.
- Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin bipolar plakalar üzerinden atılmasını sağlar.
- MEB'e mekanik destek vererek bu yapının bipolar plaka içerisindeki kanallar içerisine sehim vermesini engeller.

GDT'nin yukarıda saydığımız fonksiyonları yerine getirebilmesi için sahip olması gereken özellikleri sıralayacak olursak;

- Hücre içinde oluşan suyun ve tepken gazların etkin bir şekilde yapı içerisinden geçebilmesi gerekmektedir. Bunun için GDT yeterince gözenekli bir yapıya sahip olabilmeli, akışkanların zıt yönlerde yayılabilmesini sağlayabilmelidir.
- Yüzeyler boyunca elektriksel ve ısı iletimi iyi olmalıdır. Özellikle ara yüzeylerin temas direnci bu noktada çok önemlidir.
- Katalizör parçacıklar çok ince bir yapıya sahip olduğunda GDT'nin gözeneklerinin çok büyük olması istenilmemektedir.
- MEB'ini yeterince destekleyebilecek rijitlikte olmalı iyi bir elektriksel temas yüzeyi sağlamalıdır.

Belirtilen bu özellikleri karşılamak üzere üreticiler tarafından karbon elyaf esaslı karbon kâğıt ve karbon kumaşlar üretilmektedir [16].

2.1.3.1. Önişlem ve Kaplamalar

Gaz difüzyon tabakasının gözenekli kısmının su tutmaması (hidrofobik) istenir. Sebebi oluşan su damlacıklarının birleşerek hücre içini tıkamasıdır. Bu yapıya su tutmama özelliği, GDT'nin PTFE çözeltisi içerisinde ön işleme tabi tutularak ardından kurutma ve sinterleme işlemleri yapılarak kazandırılır. GDT'nin su tutmama özelliği üreticiler tarafından nadiren belirtilir. Özel bir yakıt hücresi dizaynında GDT'nin yüzeyi için temas açısının belirlendiği ölçümlerin yapılarak su tutmama özelliğinin istenilen değerlerde olması istenilir [16].

İlave olarak gaz difüzyon tabakası ile katalizör tabakası arasında katalizör tabakasının tutunabileceği bir kaplama yapılırsa veya mikro gözenekli bir yapı konulur. Bu durum dahi iyi elektriksel iletim sağladığı gibi difüzyon tabakasından suyun içeri ve dışarı geçişini kolaylaştırır. Kaplamanın veya mikro gözenekli tabakanın bulunduğu bu yapılar PTFE bağlayıcı içerisine karbon veya grafit parçacıklarının karışımını içermektedir. Mikro gözenekli yapının birinci görevi oluşan sıvı suyun hücre içini su basmayacak şekilde dışarı atılmasını sağlamanın yanında sahip olduğu gözenek boyutunun küçüklüğü mertebesinde elektriksel iletimin iyileşmesinde rol oynar [16].

2.1.3.2. Gözeneklilik

Gaz difüzyon ortamı gözeneklerin mevcudiyeti nispetinde mümkün olabilir. Tipik gözenek oranı yaklaşık olarak 70 % ile 80 % mertebelerinde olmaktadır [19]. Gaz difüzyon tabakasının gözenekliliği, sahip olduğu alansal ağırlık, kalınlık ve katı fazının yoğunluğu (karbon temelli malzemeler için $\rho_{\text{gerçek}}$, 1,6 ile 1,95 g cm⁻² arasında değişmektedir) bilindiğinde denklem (2.1)'den kolayca hesaplanabilmektedir (ε , burada sıkıştırmaya bağlı kalınlık değeridir) [16].

$$\varepsilon = 1 - \frac{Wa}{\rho_{\text{gerçek}} \cdot d} \quad (2.1)$$

W_a = alansal ağırlık (g cm^{-2})

$\rho_{\text{gerçek}}$ = katı fazın yoğunluğu

d = kalınlık (sıkıştırılmış veya sıkıştırılmamış)

2.1.3.3 Elektriksel İletim

Gaz difüzyon tabakasının fonksiyonlarından biri de katalizör tabakası ile bipolar plakayı elektriksel olarak birbirine bağlamaktır. Gaz difüzyon tabakası doğrudan bipolar plaka üzerindeki kanallar üzerine bastığından elektrik iletimi kanallar ile gaz difüzyon tabakasının birbirine temas eden kısımları üzerinden sağlanmaktadır. Bu kısımlarda oluşan temas direncinin olabildiğince düşük olması istenir. Bu sebepten gaz difüzyon tabakasının malzemesi önem arz etmektedir [16].

İyi bir elektrik iletimi için malzeme seçimi önemli olduğu gibi bipolar plaka üzerindeki akış kanallarının tasarımı, gaz difüzyon tabakasının kanallar ile teması gibi bir çok parametre söz konusudur. Bu kısım yakıt hücresi dizaynı ve bileşenlerinin bir araya getirilmesi ile ilgilidir.

2.1.3.4. Sıkıştırılabilirlik

Yakıt hücresi içinde gaz difüzyon tabakası temas direncini azaltmak için sıkıştırılır. Gaz difüzyon tabakası olarak kullanılan karbon kâğıt ve karbon kumaşın her ikisinde yumuşak ve kolayca deforme olabilecek malzemelerdir. Karbon kumaş, karbon kâğıda kıyasla daha fazla sıkıştırılabilme özelliğine sahiptir [16].

2.1.3.5. Geçirgenlik

Tipik bir PEMYH içerisinde gerçekleşen gaz difüzyonu, difüzyonun gerçekleştiği ortamın gözenekliliği ve geçiş yollarının düzgünlüğü ile yakından ilişkilidir. Birçok durumda gözenek çapının büyüklüğü gözenekten serbest olarak geçen gaz molekülünden birkaç kat daha büyüktür. Bu durum Knudsen

difüzyonuna karşı gelmektedir. Çünkü Knudsen difüzyonu gözenek çaplarının büyüklüğünün gaz moleküllerinin serbestçe geçebileceği yolun büyüklüğüne yaklaşması gerektiğini söyler. Difüzyon ortamının sahip olduğu akış direncini belirleyen Gurley sayısı veya Darcy katsayısıdır. Gurley sayısı mevcut basınç düşüşünde geçen hacimsel debiyi ifade etmek için kullanılır. Darcy katsayısı ise yine belirli bir basınç düşüşünde geçen hacimsel debi ile ilişkilidir ve bu ilişkiyi denklem (2.2) göstermektedir [16].

$$Q = K_D * \frac{A}{\mu l} * \Delta P \quad (2.2)$$

Q = hacimsel debi, $m^3 s^{-1}$

K_D = Darcy katsayısı, m^2

A = akışkanın geçtiği dikdörtgen bölge, m^2

μ = gazın viskozitesi, $kg m^{-1} s^{-1}$

l = yolun uzunluğu (difüzyon ortamının kalınlığı), m

ΔP = basınç düşüşü, Pa

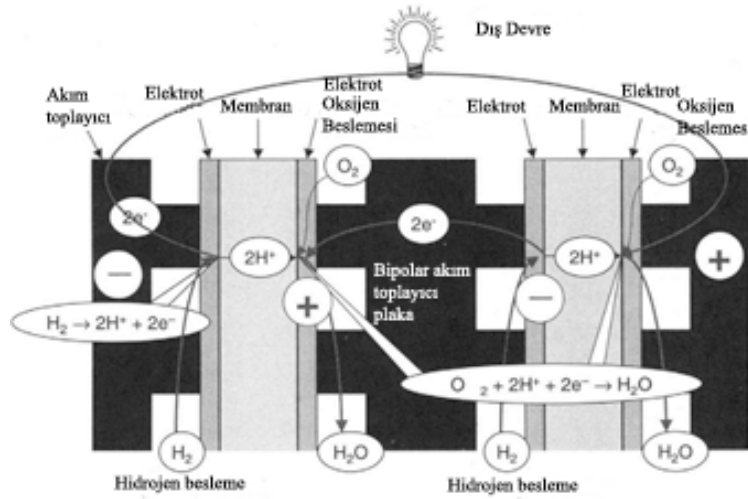
2.1.4. Bipolar Plakalar

Tek hücreden oluşan bir PEMYH bipolar plaka içermez. İki adet yarı bipolar plaka varmış gibi düşünülebilir. Fakat birden fazla hücre içeren bir PEMYH bipolar plakalar içermektedir. Şekil 2.4 temsili PEMYH'ni ve bipolar plakayı göstermektedir. Çoklu hücre düzeninde hücreler bir hücrenin katodu diğer hücrenin anoduna bağlanacak şekilde ve elektriksel iletimi bozmadan bir arada bulunmalıdır [16].

Bipolar plakalar yakıt hücresi içerisinde bir dizi fonksiyonu yerine getirmektedir. Bu fonksiyonları yerine getirmesi için sahip olması gereken özellikler sırasıyla [16];

- Hücreleri seri bir şekilde bağlamalıdır dolayısıyla, elektrik iletken olmalıdır.
- Ardışık hücrelerin gaz akışlarını birbirinden ayırmalıdır dolayısıyla, gaz geçirmemelidir.

- Hücre yığını için yeterli mukavemeti sağlamalıdır dolayısıyla, olabildiğince hafif fakat yeterli dayanımda olmalıdır.
- Tepkimenin gerçekleştiği bölgeden soğutucu bölgeye ısıyı iletebilmelidir dolayısıyla, ısı iletimine sahip olmalıdır.
- Akış kanallarına ev sahipliği yaptığından, akış için elverişli bir kanala ve kanal geometrisine sahip olmalıdır.



Şekil 2.4. Temsili bipolar plaka (bipolar akım toplayıcı plaka olarak da ifade edilebilir) [16]

İlaveten, yakıt hücresinin iç ortamı korozyona çok müsait olduğundan kullanılan malzeme korozyona dayanıklı, bulunabilir, düşük maliyetli ve seri üretime uygun olmalıdır. Yukarıda belirtilen birçok gereksinimi aynı anda sergilemesi çok kolay olmayabilir. Bu sebepten gereksinimler arasında bir eniyileme yapılması gerekmektedir. En önemli eniyileme kriterlerinden biri olarak üretilen kWh elektrik başına en düşük maliyet temel alınmaktadır [16].

PEMYH'lerde bipolar plakalar için başlarda grafit malzeme kullanılmaktaydı. Çünkü grafit hücre içinde kimyasal olarak kararlılık göstermektedir. Diğer bir yandan grafit doğası gereği gözenekli bir yapıya sahip olduğundan geçirgenliğini ortadan kaldırmak için bir işleme daha ihtiyaç duyulmuştur. İlaveten grafitin tezgâhlarda işlenmesi hem zor hem de masraflı olmaktadır. Grafit bipolar plakalar günümüzde tek hücre denemeleri için laboratuvarlarda kullanılmaktadır. Yakıt

hücrelerinin bipolar plakalarının malzemelerini iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlardan biri grafit temelli olan (grafit/kompozit d hil) diğeri ise metaliktir [16].

Bu malzemelerin kendi içerisinde korozyon direnci, ömür, ısı iletkenlik, ısı genleşme, mukavemet, üretim yöntemleri, hidrojen ge irgenliğı ve özellikle elektriksel iletkenlik gibi parametreler açısından kıyaslandığında bir birlerine görece üstünlük sağlamaktadırlar.

2.2. Yakıt Hücre Yığını Tasarım Temelleri

Denklem (3.17) yakıt hücresinin elektrokimyası kısmında bahsedildiğı üzere elektrokimyasal tepkime sonu oluşan teorik hücre potansiyeli 1,23 V'tur. Gerçek koşullarda ise yakıt hücresinin potansiyeli 1 V'nin altında kalmaktadır. Eğer 1kW gücünde bir yakıt hücresine sahip olmak istiyorsanız, 1000 Amperden daha yüksek akım değerlerine gerek duyulur. Bu büyüklükteki bir akım değerine ulaşmak içinde hücrenin 1000 cm² civarında oldukça geniş bir aktif yüzey alanına sahip olması anlamına gelir. Bununla kalmayıp birde elde ettiğiniz akımı iletebilecek kalınlıkta, çok fazla direnç kayıplarına sebebiyet vermeyecek kablolara ihtiyaç duyulacaktır. Bu sebeplerden dolayı birden çok hücrenin elektriksel olarak birbirine seri bağlandığı pratik çözüm yukarıda ifade edilen problemlerin üstesinden gelecektir.  rnek vermek gerekirse 1kW güç elde etmek için çalışma koşullarında hücre başına 0,6 V potansiyelde 1 A/cm² akım elde edebiliyorsanız 40 adet seri bağlı hücre ile toplam akım yaklaşık 42 A potansiyel ise 24 V olacaktır [16].

2.2.1. Yakıt Hücre Yığınının Boyutlandırılması

Yakıt hücre yığını tasarlarken ilk adım her bir hücrenin sahip olacağı aktif yüzey alanın ne kadar olacağıının belirlenmesi ve hücre yığının kaç adet hücreden oluşacağıının hesaplanmasıdır.

Belirli bir uygulamaya yönelik bir hücre yığını tasarlanıyor ise o uygulamada ihtiyaç duyulan maksimum net güç gereksinimi ve çalışma potansiyeli, maksimum yığın hacmi ve ağırlığının bilinmesi gerekmektedir [16].

Örnek vermek gerekirse belirli bir amaca yönelik bir insansız hava aracı için yakıt hücre yığını tasarımında, insansız hava aracının kalkışı, düz uçuşu ve manevra yapabilmesi için gerekli olan gücü, sahip olduğu elektrik motorun için gerekli olan akım ve potansiyel değerlerini, araç içinde hücre yığına ayrılan hacmi, soğutmanın nasıl yapılabileceği gibi birçok tasarım gereksinimlerinin ve kısıtlarının bilinmesi gerekmektedir.

Hücre yığını tasarım gereksinimleri kendi içerisinde birbiriyle çakışabilir. Örneğin yığının boyutları veya ağırlığı hedeflediğiniz güç gereksinimi için fazla olabilir. Dolayısıyla tasarım sürecinde kilit bir hedef konulup o hedef için birbiriyle çakışan gereksinimlerin eniyilemesi yapılmalıdır. Diğer bir tasarım girdisi de yığın performansını en iyi gösteren polarizasyon eğrisidir. Polarizasyon eğrisi hücre yığını tasarlanması ve boyutlandırılması noktasında kritik öneme sahiptir. Hücre performansını belirleyen çalışma basıncı ve sıcaklığı, tepken gazların bağıl nemliliği gibi faktörlerin bilinmesi ise polarizasyon eğrisinin oluşturulmasında doğrudan etkilidir. Bu sebeplerden dolayı tasarım gereksinimleri ve kısıtlarının bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekmektedir [16].

Hücre yığının net gücü yığın voltajı ve akım değerlerinin bilinmesiyle kolaylıkla hesaplanabilir:

$$W = V_{yığın} * I \quad (2.3)$$

Yığının potansiyeli her bir hücrenin ortalama sahip olduğu hücre potansiyellerinin toplamına eşittir:

$$V_{yığın} = \sum_{i=1}^{N_{hücre}} V_i = V_{hücre} * N_{hücre} \quad (2.4)$$

Hücresinin sahip olduğu aktif yüzey alanı ile akım yoğunluğunun bilinmesiyle toplan üretilen akım:

$$I = i^* A_{hücre} \quad (2.5)$$

Hücre potansiyeli ile akım yoğunluğu birbirinin fonksiyonudur Bu ilişki polarizasyon eğrisini oluşturur.

$$V_{hücre} = f(i) \quad (2.6)$$

Polarizasyon eğrisi bir grup veri ($V_{hücre}-i$) ile ilişkili veya yakıt hücrelerinin elektrokimyası kısmında verilen denklemler ile veya denklem (2.3)'ün lineer yaklaşımı ile oluşturulur. Yakıt hücre yığının yaklaşık olarak verimi basitçe aşağıdaki denklemden (2.7) hesaplanır. (Bu denklem hücre potansiyelinin açık devre potansiyeline yakın olduğu durumlarda geçerli değildir.) [16].

$$\eta = V_{hücre}/1.482 \quad (2.7)$$

Önceki kısımda beş denklem ve sekiz değişken ifade edilmiştir. Bu değişkenlere yığın hacmi, ağırlığı, hücre sayısı, hücre aktif yüzey alanı, yığının yapısı ve malzemelerin seçimi ilave edilebilir. Üç değişken biliniirse veya kısıt olarak istenilirse basit bir hesaplama ile diğer değerler bulunabilir ($V_{hücre} = f(i)$ denklemi hariç, çünkü bu denklem biraz iterasyon gerektirmektedir). Eğer üç değişkenden daha az biliniyorsa o halde sonsuz sayıda hücre aktif yüzey alanı, hücre sayısı kombinasyonu olur. Diğer bir yandan hücre sayısı ve hücre aktif yüzey alanı kombinasyonları için bazı teknolojik ve fiziksel kısıtlar da mevcuttur. Örneğin çok sayıda hücre ve çok küçük aktif yüzey alanına sahip bir yığını bir araya getirmek ve montajını yapmak olası zorlukları beraberinde getirir. Diğer açıdan bakıldığında az sayıda hücre ve büyük aktif yüzey alanına sahip bir yığın ise düşük potansiyel-yüksek akım değerlerine sahip olacağından önemli ölçüde direnç kayıplarına sebep olur. Bunların dışında basınç düşüşleri, yapısal sağlamlık, tepken gazların aktif yüzey alanı üzerine düzgün dağılımı ve yığını bir araya getirmek için uygulanan montaj kuvveti yığının boyutlandırılmasını kısıtlayan unsurlardır [16].

2.2.2. Hücrelerin Dizilimi

Yakıt hücre yığını birden fazla tekil hücrenin bir araya getirilerek bir hücrenin elektriksel olarak katodunun diğer hücrenin anoduna bağlanmasıyla meydana gelir. Bu şekilde aynı akım miktarının her bir hücrenin üzerinden geçmesi sağlanmış olur. Burada önemli bir husus şudur ki eğer devre kapalı ise elektronlar devreyi elektrik iletken katı kısım üzerinden geçerek tamamlarlar. İyonlar ise elektrolit (membran) üzerinden geçerek elektrokimyasal tepkimenin gerçekleşmesini sağlarlar [16]. Hücrelerin dizilimi yukarıda bahsettiğimiz temel prensiplere izin verecek şekilde olmalıdır.

Çeşitli yakıt hücre yığını dizilimleri olmasına karşılık bipolar plakalardan oluşan dizilim, özellikle büyük hücre yığınlarında tercih edilmektedir. Çünkü geniş bir yüzey alanı üzerinde çok kısa mesafelerde iletilen akım düşük dirençle karşılaşmaktadır [16].

MEB, bipolar plakalar, contalar, akım toplayıcı plakalar ve son plakalar yakıt hücre yığının ana bileşenleridir. Buna ilaveten bağlantı elemanları, akışkanların geçtiği borular ve izolasyon malzemeleri hücre yığnında bulunan diğer bileşenlerdir. Soğutma kanalları, soğutucu akışkan, hücre içinin nemlendirilmesi, üretilen suyun tahliye edilmesi gibi unsurlar hücrelerin dizilimi açısından önem arz etmektedirler.

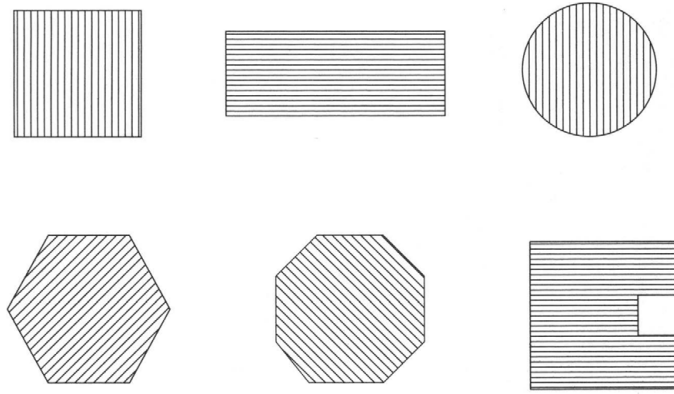
Yakıt hücre yığını tasarımında aşağıda belirtilen unsurlar göz önünde bulundurulmalıdır [16]:

- Her bir hücreye tepken gazların homojen dağılımı,
- Her bir hücre içinde tepken gazların homojen dağılımı,
- Minimum direnç kayıpları (seçilen malzeme, hücre dizilimi, eş basınç dağılımı),
- Tepken gazların ne hücre içinde nede hücre dışında sızma yapması,
- Basınç, ısı genleşme, harici kuvvetler ve titreşim gibi faktörler altında mekanik kararlılık,

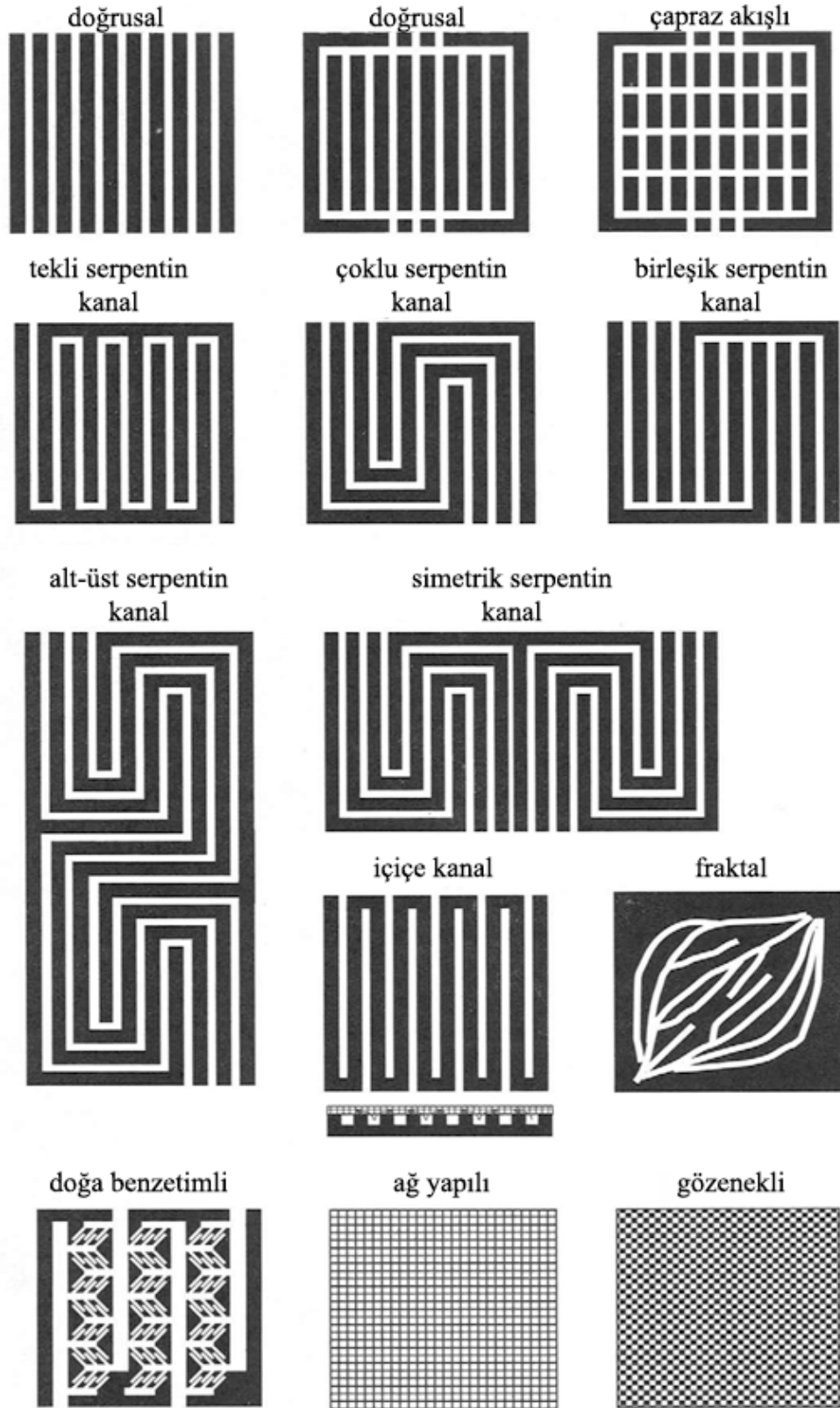
Yukarıda belirtilen her bir husus ayrı fiziksel ve kimyasal fenomenleri içinde bulundurmaktadır. Bu noktada yakıt hücreleri elektrokimya, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, mukavemet, malzeme bilimi, yüzey bilimi vs. birçok temel

disiplini bir arada barındıran ve çalışmaları esnasında birçok olayın eş zamanlı olarak gerçekleştiği bir enerji dönüşüm aracıdır. Akışkanlar mekaniği için örnek vermek gerekirse şekil 2.5 farklı aktif yüzey alanı geometrilerini, şekil 2.6 farklı akış dağılımlarını göstermektedir.

Yakıt hücrelerinde her özgün tasarım kendi içinde avantaj ve dezavantaja sahiptir ve kendi eniyileme problemini beraberinde getirir. Çünkü değiştirilen her bir parametre en az başka iki parametrenin değişmesine sebep olur ve bunlardan en az bir tanesi diğerlerine karşı yönde etki eder [16].



şekil 2.5. Farklı aktif yüzey geometrileri [16]



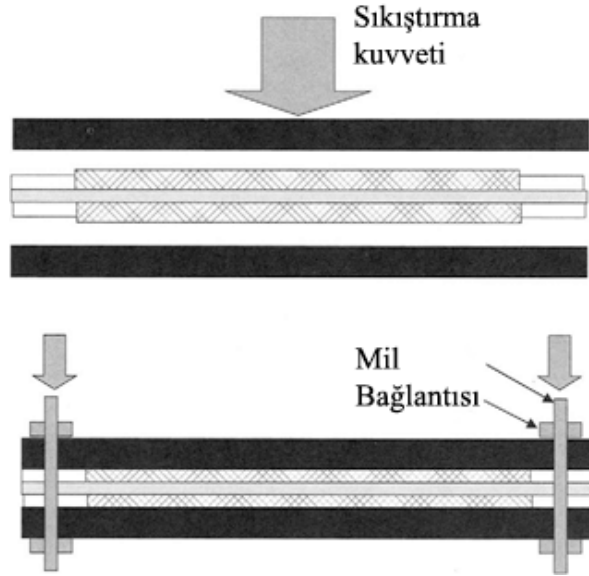
Şekil 2.6. Farklı akış kanal tasarımları [16]

2.2.3. Hücrelerin Birleştirilmesi

Her bir yakıt hücresi bileşeni, sırasıyla membran elektrot bileşkeleri, gaz difüzyon tabakaları ve bipolar plakalar yeterli temas basıncında, temas direncini minimize edecek şekilde ve tepken gazların tabakalar arasından sızmasını engelleyecek şekilde bir araya getirilmelidir. Hücrelerin birleştirilmesi genellikle bağlantı elemanları (mil, vida, somun vb.) kullanılarak yukarıda bahsedilen yakıt hücresi bileşenlerinin iki son plaka arasında sandviç benzeri bir yapıya sahip olacak şekilde bir araya getirilmesidir [16].

Hücreler bir araya getirildikten sonra yığını oluşturmak için uygulanacak olan montaj kuvveti önem arz etmektedir. Bu kuvvet, sırasıyla contaları gerekli ölçüde sıkıştıracak kuvvet, gaz difüzyon tabakasını yeterli düzeyde sıkıştırmak için gerekli olan kuvvet ve son olarak hücre içi gerekli olan (örneğin operasyon basıncı kaynaklı) kuvvetin toplamına eşit olmalıdır. Gerekli olan sıkıştırma basıncı tabakalar arası gaz sızıntısına izin vermemelidir. Bu basıncı belirleyen unsurlardan bir tanesi de kullanılan sızdırmazlık contalarının malzemesi ve tasarımıdır. Polimer esaslı çok çeşitli tasarımda conta malzemeleri üretilmektedir [16].

Sızdırmazlık contasının seçilmesi veya özel tasarım gerektiren hücre yığınları için tasarlanıp üretilmesi ayrı bir uzmanlık konusu olup hücre yığının bir araya getirildikten sonra hücre performansını doğrudan etkileyecek parametrelerin başında gelmektedir. Ayrıca seçilen contanın, çalışma ortamındaki sıcaklık, basınç, nemlilik gibi faktörlerden ne ölçüde etkilendiği önemlidir ve contanın kullanım ömrünü belirlemektedir.



Şekil 2.7. Bağlantı elemanlarını ve montaj kuvveti [16]

Hücreleri bir araya getirmek için uygulanması gereken moment aşağıdaki denklemden hesaplanır [16]:

$$T = \frac{F * Kb * Db}{Nb} \quad (2.8)$$

T = sıkıştırma momenti, Nm

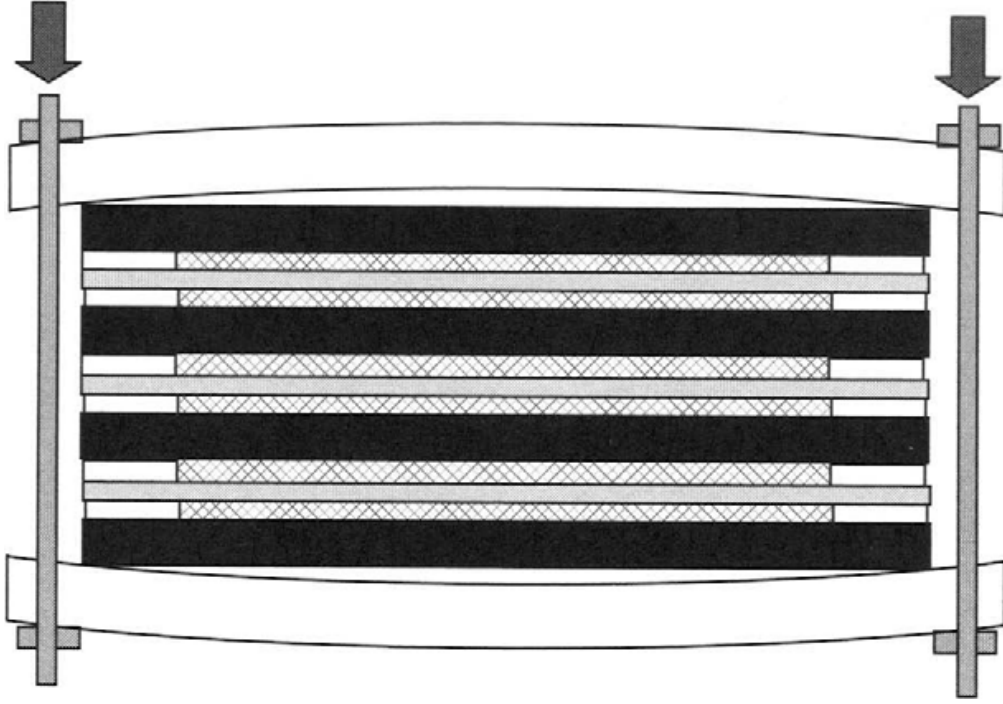
F = sıkma kuvveti, N

Kb = sürtünme katsayısı (0.20 kuru ve 0.17 yağlanmış cıvatalar için)

Db = Nominal cıvata çapı, m

Nb = cıvata sayısı

Gereğinden fazla kuvvet uygulanması, son plakaların bükülmesine ve aktif yüzey alanı üzerinde olumsuz etkilere sebep olur. Basınç hassas ince filmler kullanılarak montaj boyunca oluşan gerilim dağılımları elektronik olarak gerçek zamanlı tespit edilebilir. Bu tespitler sayesinde son plaka tasarımı istenilen sağlamlıkta yapılabilir [16].



Şekil 2.8. Gereğinden fazla yük altında son plakaların bükülmesi [16]

Sıkıştırma basıncının gereğinden fazla olmasının diğer bir dezavantajı, gaz difüzyon tabakalarının fazla sıkışması ve neticesinde kütle transferinin olumsuz etkilenmesidir. Bu sebepten kullanılan her bir difüzyon tabakası için deneysel olarak optimum sıkıştırma basınçlarının kıyaslanması ve hücre performansına etkilerinin gözlemlenmesi gerekmektedir. Yığın tasarımı, hücrenin çalışma süresi boyunca yeterli sıkıştırma kuvvetini sağlayacak şekilde olmalıdır. Hücre bileşenlerinde kullanılan malzemeler farklı olduğundan farklı ısı genleşme katsayılarına sahiptirler. Çalışma sıcaklığı esnasında farklı miktarda ısı genleşmeler bağlantı noktalarında eş olmayan gerilmelere sebebiyet verebilir. Bu problemin önlenmesi açısından poliüretan yaylar ve esneyen malzemelerin kullanılması faydalı olmaktadır [16].

3. YAKIT HÜCRESİ KİMYASI, TERMODİNAMİĞİNİN TEMELLERİ ve KAYIPLARI

Yakıt hücresi kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Bu sebepten termodinamik yasalarına uyumlu çalışmak zorundadırlar [16].

3.1. Temel Tepkimeler

Elektrokimyasal tepkimeler membranın iki tarafında anot ve katotta eş zamanlı olarak gerçekleşmektedirler. Temel yakıt hücresi tepkimeleri:

Anot tarafında:



Katot tarafında:



Toplam:



Bu tepkimeler esnasında bir kaç ara basamak ve istenmeyen tepkimeler gerçekleşebilir, fakat tepkimelerin bu halleri yakıt hücresinin içerdiği ana süreçleri doğru şekilde göstermektedir [16].

3.2. Tepkime Isısı

Denklem (3.3) toplamda gerçekleşen tepkimeyi göstermektedir ve hidrojenin yanma tepkimesiyle aynıdır. Yanma ekzotermik bir süreçtir ve bunun anlamı tepkime esnasında dışarıya enerji ısı yolu ile atılıyor demektir.



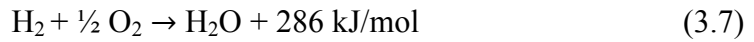
Bir kimyasal tepkimede açığa çıkan ısı (veya oluşan entalpi farkı) tepkimede oluşan ürünler ile girenlerin oluşum entalpilerinin farkına eşittir. Yani:

$$\Delta H = (h_{ol})_{\text{H}_2\text{O}} - (h_{ol})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (h_{ol})_{\text{O}_2} \quad (3.5)$$

Sıvı suyun (25 °C’de) oluşum entalpisi – 286 kJ mol⁻¹ olduğundan ve hidrojen ve oksijenin oluşum entalpilerinin sıfır olmasından:

$$\Delta H = (h_{ol})_{\text{H}_2\text{O}} - (h_{ol})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (h_{ol})_{\text{O}_2} = -286 \text{ kJ mol}^{-1} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (3.6)$$

Entalpinin önündeki negatif işaret tepkimenin ekzotermik olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Artık denklem (3.4) şöyle yazılabilir:

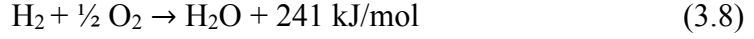


Denklem (3.7) oluşan sıvı suyun ve tepkimedeki diğer gazların 25 °C’deki halleri için hesaplanmıştır. Sıcaklık değiştikçe açığa çıkan ısıнын değeri değişecektir [16].

3.3. Hidrojenin Alt ve Üst Isıl Değerleri

Hidrojenin yanma tepkimesinin entalpisi denklem (3.7) hidrojenin ısı değeri. Diğer bir deyişle bir 1 mol hidrojenin tamamının yanması ile açığa çıkan ısı enerjidir. Isıl değerin ölçülmesi kalorimetre kabı ile gerçekleştirilir. Kalorimetre kabı içerisinde 1 mol hidrojenin ½ mol oksijen ile tam verimle tepkimeye girmesi sonucunda sıcaklığın atmosferik basınçta 25 °C’ye kadar düşürülmesiyle ve kap içerisinde sadece sıvı suyun kaldığı durumda açığa çıkan enerji, hidrojenin üst ısı değerini gösterir. Bu durumda açığa çıkan enerji değeri ise 286 kJ’dur. Eğer aynı tepkime fazla miktarda oksijen (hava) varlığında gerçekleşiyor ve tepkime sonucu kapta su buharı, tepkimeye girmemiş oksijen

ve/veya azot bulunuyorsa daha az miktarda ısı enerji açığa çıkmış demektir. Bu değer hidrojenin alt ısı değeri olarak bilinmektedir [16].



Üst ısı değeri ve alt ısı değeri arasındaki farkı ise 25 °C’de suyun buhar fazında bulunması için gerekli olan ısı enerjisi:

$$H_{fg} = 286 - 241 = 45 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (3.9)$$

3.4. Teorik Elektrik İş

Yakıt hücresi içerisinde yanma gerçekleşmediğine göre hidrojenin alt veya üst ısı değerinin bilinmesinin anlamı Gibbs serbest enerji denklemi ile anlaşılmaktadır. Hidrojenin ısı değeri yakıt hücresine giren enerjinin miktarını gösterir. Diğer bir deyişle maksimum ne kadar ısı enerji hidrojeninden elde edilebilir. Fakat ısı enerjinin tamamı elektrik enerjisine dönüştürülemez. Tüm kimyasal tepkimelerin entropi ürettiği termodinamik bir gerçektir. Bu gerçek, ısı enerjinin tamamının faydalı işe (elektrik işi) dönüşmeyeceğini gösterir. Gibbs serbest enerji denklemi (3.10) yukarıda sözel olarak ifade ettiğimiz fenomeni matematiksel olarak ifade eder. Hidrojenin üst ısı değerinin bir kısmı (veya entalpi değişiminin bir kısmı) elektrik işine dönüştürülebilir [16].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.10)$$

Diğer bir deyişle, enerji dönüşümü esnasında bir kısım tersinmezlik kaynaklı kayıplar entropi değişimi olarak karşımıza çıkar (ΔS). Entalpi değişimine (ΔH) benzer şekilde ΔS denklem (3.11) ile hesaplanır. Oluşum entropi değerleri 25 °C’de hidrojen, oksijen ve suyun termodinamik değerlerinin yer aldığı tablolardan okunabilir. Bu teorik hesap neticesinde yaklaşık 237,34 kJ mol⁻¹ enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir [16].

$$\Delta S = (s_{ol})_{\text{H}_2\text{O}} - (s_{ol})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (s_{ol})_{\text{O}_2} \quad (3.11)$$

3.5. Teorik Yakıt Hücresi Potansiyeli

Elektrik işi, potansiyel altında elde üretilen yükür (veya elde edilen akımdır):

$$W_{el} = q \cdot E \quad (3.12)$$

W_{el} = elektrik işi ($J \text{ mol}^{-1}$)

q = yük (coulombs mol^{-1})

E = potansiyel (Volt)

Bir yakıt hücresi tepkimesine karşılık (Denklem 3.1-3.3) transfer edilen yük miktarı, tüketilen hidrojen molekülü başına:

$$q = n \cdot N_{Avg} \cdot q_{el} \quad (3.13)$$

n = molekül başına düşen elektron sayısı ($H_2 = 2$ elektron)

N_{Avg} = mol başına düşen molekül sayısı (Avogadro sayısı, $= 6.022 \cdot 10^{23}$ molekül/mol)

q_{el} = bir elektron yükü $= 1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulombs/elektron

Ürünlerin Avogadro sayısı ve bir elektron başına düşen yük sayısı Faraday sabiti olarak bilinir:

$$F = 96,485 \text{ Coulombs/elektron-mol}$$

Elektrik işi:

$$W_{el} = n \cdot F \cdot E \quad (3.14)$$

Daha önce belirtildiği üzere yakıt hücresinde üretilebilecek maksimum elektrik enerjisi, Gibbs serbest enerjisine (ΔG) eşit olduğuna göre:

$$W_{el} = \Delta G \quad (3.15)$$

Teorik yakıt hücre potansiyeli:

$$E = - \Delta G/n * F \quad (3.16)$$

Bu değerler (ΔG , n ve F) bilindiğine göre teorik hücre potansiyeli artık hesaplanabilir:

$$E = - \Delta G/n * F = 237.34 \text{ J mol}^{-1}/2 * 96,485 \text{ As mol}^{-1} = 1,23 \text{ Volt} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17) 25 °C ve 1 atm'deki hidrojen/oksijen yakıt hücresi teorik potansiyeli olan 1,23 Volt değerini göstermektedir.

3.6. Hücre Potansiyeline Sıcaklığın Etkisi

Teorik hücre potansiyeli sıcaklık ile değişmektedir. Denklem (3.10), denklem (3.16) içinde yerinde konulursa:

$$E = -(\Delta H/n * F - T \Delta S/n * F) \quad (3.18)$$

Buradan anlaşılabacağı üzere hücre sıcaklığının artması teorik hücre potansiyelinin azalmasına sebep olmaktadır. Diğer bir husus ΔH ve ΔS 'de yine sıcaklığın birer fonksiyonudurlar:

$$h_T = h_{298,15} + \int_{298,15}^T C_p * dT \quad (3.19)$$

$$s_T = s_{298,15} + \int_{298,15}^T 1/T * C_p * dT \quad (3.20)$$

Sabit basınçta herhangi bir mükemmel gaz özgül ısıları, aşağıdaki ampirik denklem ile ve termodinamik tablolarda belirtilen her bir gaza ait katsayılar (a, b, c) yardımı ile hesaplanabilir.

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (3.21)$$

Denklem (3.21) denklem (3.19) ve denklem (3.20)' de yerine konulursa sırasıyla aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298,15} + \Delta a(T - 298,15) + \frac{\Delta b}{2}(T^2 - 298,15^2) + \frac{\Delta c}{3}(T^3 - 298,15^3) \quad (3.22)$$

$$\Delta S_T = \Delta S_{298,15} + \Delta a \ln(T/298,15) + \Delta b (T - 298,15) + \frac{\Delta c}{2}(T^2 - 298,15^2) \quad (3.23)$$

Yukarıda ifade edilen a, b, c katsayılarındaki değişimler termodinamik tablolarından ilgili gazlar için (burada su buharı, hidrojen ve oksijen) okunarak denklem (3.24)'de yerlerine konulur.

$$\begin{aligned} \Delta a &= a_{H_2O} - a_{H_2} - \frac{1}{2}a_{O_2} \\ \Delta b &= b_{H_2O} - b_{H_2} - \frac{1}{2}b_{O_2} \\ \Delta c &= c_{H_2O} - c_{H_2} - \frac{1}{2}c_{O_2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

C_p , ΔH ve ΔS değerleri 100°C altındaki sıcaklıklarda çok az miktarda değişmekte, daha yüksek sıcaklıklar özellikle katı oksit yakıt hücrelerinin çalışma sıcaklıklarında ihmal edilemeyecek değerlerde değişmektedirler. Teorik hücre potansiyeli sıcaklık arttıkça düşmektedir. Fakat genellikle çalışma esnasında artan sıcaklıkla beraber hücre voltaj kayıpları düşmekte bu düşüş teorik hücre potansiyelindeki azalışı fazlasıyla telafi etmektedir [16].

3.7. Hücre Potansiyeline Basıncın Etkisi

Daha önce ifade edilen denklemlerin hepsi atmosferik basınç şartları için geçerlidir. Yakıt hücreleri farklı çalışma basınçlarına sahip olabilmektedir. İzotermal bir hal değişimi düşünüldüğünde, en temel olarak Gibbs serbest enerji denklemi basınca bağlı olarak şöyle ifade edilir:

$$dG = V_m * dP \quad (3.25)$$

V_m = molar hacim, $m^3 \text{ mol}^{-1}$

P = basınç, Pa

İdeal gaz denklemi yazılırsa:

$$P \cdot V_m = R \cdot T \quad (3.26)$$

Buradan:

$$dG = R \cdot T \cdot dP/P \quad (3.27)$$

İntegral alınırsa:

$$G = G_0 + R \cdot T \cdot \ln(P/P_0) \quad (3.28)$$

Burada G_0 , standart sıcaklık ve basınçtaki (25°C ve 1 atm) Gibbs serbest enerjisi ve P_0 , standart basınç (1 atm) veya referans basınç değeridir [16].

Herhangi bir kimyasal tepkimenin denklemi yazılırsa:



Gibbs serbest enerji değişimi ürünler enerjileri toplamı ile girenlerin enerjileri toplamının farkına eşit olacaktır:

$$\Delta G = mG_C + nG_D - jG_A - kG_B \quad (3.30)$$

Denklem (3.28)'e uygulanırsa:

$$\Delta G = \Delta G_0 + R \cdot T \cdot \ln[(P_C/P_0)^m \cdot (P_D/P_0)^n / (P_A/P_0)^j \cdot (P_B/P_0)^k] \quad (3.31)$$

Bu bağıntı Nernst denklemi olarak bilinir, P tepkimeye girenlerin ve ürünlerin kısmi basınçlarını ifade eder ve P_0 ise referans basıncı (örneğin 1 atm veya 101,25

kPa) ifade eder [16]. Hidrojen ve oksijenin yer aldığı bir yakıt hücresi tepkimesi için Nernst denklemini yazılırsa:

$$\Delta G = \Delta G_0 + R \cdot T \cdot \ln(P_{H_2O}/P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}) \quad (3.32)$$

Denklem (3.32) hücre potansiyelini ifade edecek şekilde yazılırsa:

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln(P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5} / P_{H_2O}) \quad (3.33)$$

3.8. Teorik Yakıt Hücresi Verimliliği

Herhangi bir enerji dönüşüm cihazının verimliliği, giren enerjinin ne kadarının faydalı işe dönüştüğünün oranı ile belirlenir. Yakıt hücresi açısından değerlendirildiğinde üretilen elektrik enerjisi, hidrojenin üst ısı değerine oranlanırsa yakıt hücresinin teorik (tersinir) verimliliğini:

$$\eta = \Delta G / \Delta H_{ÜİD} = 237,34 / 286,02 = 83\% \quad (3.34)$$

Eğer teorik verimlilik alt ısı değer üzerinden hesaplanırsa:

$$\eta = \Delta G / \Delta H_{AİD} = 228,74 / 241,98 = 94,5\% \quad (3.35)$$

Gerçekte ise verim teorik hesaplamalardan farklı olmaktadır. Bunun nedeni yakıt hücresindeki tersinmezlikler ve kayıplardır. Eğer bu tersinmezlikler ve kayıplar hesaplanabilirse yakıt hücresinin gerçek durumdaki hücre potansiyeli hesaplanabilir.

$$E_{hücre} = E_r - E_{kayıplar} \quad (3.36)$$

$E_{hücre}$ = yakıt hücresinin gerçek potansiyeli

E_r = yakıt hücresinin tersinir haldeki (teorik) hücre potansiyeli

$E_{kayıplar}$ = yakıt hücresinde meydana gelen kayıplar kaynaklı potansiyeldeki düşüş

3.9. Polarizasyon Eğrisi ve Potansiyel Kayıplar

Elektrik devresinin kapalı olmadığı durumda hücre içine hidrojen ve oksijen gönderiliyorsa akım oluşmayacaktır. Fakat hücrenin bulunduğu şartlar (basınç, sıcaklık ve tepken gazların derişimi) altında hücre potansiyeli oluşması beklenir ve bu potansiyelin teorik hücre potansiyeli olmasa da ona yakın bir değerde olacağı düşünülür. Açık devre potansiyeli (ADP) olarak adlandırılan bu potansiyel, gerçek durumda genellikle 1 V değerinden daha düşük olmaktadır. Bu durum hücreden akım çekilmediği durumda bile bazı kayıpların olduğunu göstermektedir. Devre kapatıldığında ise çekilen akımın fonksiyonu olacak şekilde potansiyeldeki düşüş devam eder. Aşağıda ifade edilen faktörlerden dolayı hücrede kaçınılmaz kayıpların olacağı bilinmektedir [16].

- Elektrokimyasal tepkimelerin kinetiği
- İyonik ve elektriksel iç dirençler
- Tepken gazların tepkimenin gerçekleşeceği bölgeye erişimindeki zorluklar
- Tepken gazların çapraz geçişi
- Parazit akımlar

3.9.1. Aktivasyon Kayıpları

Yakıt hücrelerinde gerçekleşen tepkimelerde, tepkimeye giren kimyasalların bağlarının kopabilmesi için gerekli olan enerji aktivasyon enerjisi olarak tanımlanır. Dolayısıyla bağları koparmak için harcanan enerji, bununla beraber elektrot üzerinde ağır ilerleyen kimyasal tepkimeler aktivasyon kaybı olarak görülebilir. Özellikle düşük akım yoğunluklarında aktivasyon kaybının fazla olduğu bilinmektedir. Bu kayıplar hücrenin hem anot hem de katot kısmında meydana gelmektedir. Katot kısmındaki oksijen indirgenme tepkimesi daha yavaş gerçekleştiğinden aktivasyon kayıplarının büyük bir kısmı katot tarafında olmaktadır. Elektrokimyasal tepkimenin başlayabilmesi için aşırı potansiyel (elektrot potansiyeli ile tersinir potansiyel arasındaki fark) denilen gerilim farkının meydana gelmesi gerekmektedir [16].

Değişim akım yoğunluğu (i_0) ve potansiyel fark arasındaki ilişkiyi ise Butler-Volmer denklemi olarak bilinen aşağıdaki bağıntı ortaya koyar:

$$i = i_0 \left\{ \exp \left[- \alpha_{\text{ind}} * F * (E - E_r) / R * T \right] - \exp \left[- \alpha_{\text{yüks}} * F * (E - E_r) / R * T \right] \right\} \quad (3.37)$$

Butler-Volmer denkleminde E_r (tersinir potansiyel) hücrenin anot kısmı için 0 V, katot tarafı için ise 25°C ve 1 atm basınçta 1,229 V'dir. Farklı sıcaklık ve basınç değerleri altında değişen, denklemde ifade edilen potansiyel fark, akımın oluşmasını sağlar. Denklem (3.37) anotta ve katotta gerçekleşen indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleri için ayrı yazılabilir [16].

Değişim akım yoğunluğu i_0 , (aktif yüzey alanı üzerindeki) elektrot üzerine yüklenen katalizörün ve katalizörün yüklendiği alan üzerindeki etkin dağılımının bir fonksiyonudur. Ayrıca tepkimenin gerçekleştiği basınç ve sıcaklık şartları akım yoğunluğunu etkilemektedir [16].

Buradan hareketle akım yoğunluğunu ifade eden denklem:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_0^{\text{ref}} * a_k * L_k * (P_r / P_r^{\text{ref}})^{\gamma} * \exp[-E_c / R * T(1 - T / T_{\text{ref}})] \quad (3.38)$$

$\dot{I}_0^{\text{ref}}$ = referans değişim akım yoğunluğu (25°C ve 1 atm) birim katalizör yüzey üzerine, A cm⁻² Pt,

a_k = katalizör özgül yüzey alanı, mg cm⁻²

L_k = katalizör yüklemesi, mg Pt cm⁻²

P_r = tepken gazın kısmi basıncı, kPa

P_r^{ref} = referans basınç, kPa

γ = basınç katsayısı (0,5-1,0)

E_c = aktivasyon enerjisi, 66 kJ mol⁻¹ K⁻¹ (Pt üzerindeki oksijen indirgenme tepkimesi için)

R = gaz sabiti, 8,314 J mol⁻¹ K⁻¹

T = sıcaklık, K

T_{ref} = referans sıcaklık, 298,15 K

Hidrojen/oksijen yakıt hücrelerinin anot ve katot tarafında gerçekleşen tepkimelerin, farklı akım yoğunluklarında farklı miktarda aktivasyon kayıpları meydana gelir [16]. Buradan hareketle sırasıyla anot ve katot üzerindeki aktivasyon kayıpları:

$$\Delta V_{akt,a} = E_a - E_{r,a} = R \cdot T / \alpha_a \cdot F \cdot \ln(i/i_{0,a}) \quad (3.39)$$

$$\Delta V_{akt,k} = E_{r,k} - E_k = R \cdot T / \alpha_k \cdot F \cdot \ln(i/i_{0,k}) \quad (3.40)$$

Eğer aktivasyon kayıpları tek bir yakıt hücresi için yazılacak olursa:

$$E_{hücre} = E_c - E_a = E_r - \Delta V_{akt,k} - \Delta V_{akt,a} \quad (3.41)$$

$$E_{hücre} = E_r - R \cdot T / \alpha_k \cdot F \cdot \ln(i/i_{0,k}) - R \cdot T / \alpha_a \cdot F \cdot \ln(i/i_{0,a}) \quad (3.42)$$

Aktivasyon kayıplarının azaltmak için en genel haliyle yapılması gerekenler sıralanırsa [20]:

- Hücre sıcaklığını arttırmak.
- Etkili bir katalizör kullanmak.
- Elektrotun yüzey pürüzlülüğünü artırarak katalizörleri daha etkin kullanmak.
- Tepken gazların derişimini arttırmak (örneğin hava yerine saf oksijen beslemek).
- Hücre basıncını arttırmak.

3.9.2. Ohmik Kayıplar

Ohmik kayıplar diğer bir deyişle direnç kayıpları, iyonların elektrolit üzerinden ve elektronların elektrik iletken yakıt hücresi bileşenleri üzerinden geçmeleri ile meydana gelir [16].

Direnç kayıpları Ohm kanunu ile ifade edilirse:

$$\Delta V_{ohm} = i \cdot R_i \quad (3.43)$$

i = akım yoğunluğu, $A\ cm^{-2}$

R_i = toplam hücre iç direnci (sırasıyla iyonik, elektronik ve temas direnci, $\Omega\ cm^{-2}$):

$$R_i = R_{i,i} + R_{i,e} + R_{i,t} \quad (3.44)$$

Akım toplayıcı olarak grafit/polimer kompozit malzemeler dahi kullanılsa elektronik direnç ihmal edilebilecek değerlere sahip olmaktadır. İyonik ve temas direnci ise yaklaşık olarak birbirleri ile aynı derecede etkiye sahiptirler [16]. Özellikle temas direnci iyi bir yüzey imalatı ve düzgün bir montaj ile hücrelerin bir araya getirilmesiyle ters orantıya sahiptir.

3.9.3. Derişim Kayıpları

Elektrot üzerinde gerçekleşen elektrokimyasal tepkimeler, tepken gazların hızlıca tükenmesine neden olurlar. Bu sebepten dolayı hücre içerisinde tepken gazlarının derişiminde farklılıklar gözlenir. Anot tarafında hidrojen katot tarafında oksijene göre daha hızlı yayılır (molekül ağırlığı sebebiyle) dolayısıyla yüksek akım yoğunlukları gerektiren durumlarda özellikle katot tarafında oluşan suyun da etkisiyle önemli ölçüde derişim kayıpları söz konusudur. Derişim kayıplarını ifade eden denklem en genel haliyle:

$$\Delta V_{der} = (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \ln(i_L / (i_L - i)) \quad (3.45)$$

Burada i_L , bir yakıt hücresinde elde edilebilecek akımın limitini gösteren ifadedir. Eğer yakıt hücresinde limit akım değerine ulaşıldıysa hücre potansiyelinde keskin bir düşüş gözlenmektedir. Buna karşılık gözenekli elektrot üzerindeki homojen olmayan dağılımlardan dolayı limit akım değerlerine ulaşmak pratik görülmemektedir [16].

3.9.4. Oluşan İç Akımlar ve Çapraz Geçiş Kayıpları

Polimer elektrolit membran, elektriksel olarak iletken olmamasına ve pratikte tepken gazların birbirine karışmasını engellemesine rağmen az miktarda hidrojen gazı anot tarafından katot tarafına geçerek tepkimeye girmekte ve bazı elektronlar gidebilecekleri kısa yollar bulabilmektedirler. Bahsedilen bu olaylar çok az miktarda potansiyel kaybına neden olmaktadır. Fakat bu kayıplar hücre açık devre potansiyelindeyken veya düşük akım yoğunluklarındayken meydana geldiğinde önemli ölçüde potansiyel kaybına sebep olmaktadır. Denklem (3.46) hücre açık devre potansiyelindeyken oluşan potansiyel kaybını göstermektedir. Denklemdeki $i_{kayıp}$, oluşan iç akımlar ve çapraz geçişlerden kaynaklı akım kaybını göstermektedir [16].

$$E_{hücre,ADP} = E_r - (R \cdot T / \alpha \cdot F) \cdot \ln(i_{kayıp} / i_0) \quad (3.46)$$

Hidrojenin çapraz geçişi membranın geçirgenliği, membranın kalınlığı, hidrojenin kısmi basıncına bağlıdır. Çok düşük açık hücre potansiyeli hücrede sızıntıların veya kısa devrelerin olduğunun göstergesi olabilir [16].

3.9.5. Hücre Potansiyeli ve Polarizasyon Eğrisi

Hücre potansiyelinde meydana gelen kayıplar yakıt hücresinin karakteristiği olan polarizasyon eğrisinin oluşturulmasında bilinmesi gerekli olan parametrelerdir. Önceki bölümlerde ifade edilen her bir kayıp faktörünün, polarizasyon eğrini oluşturacak denklemin genel halini alması için bilinmesi gerekmektedir. Anot ve katottaki aktivasyon, derişim ve ohmik kayıplarının teorik hücre potansiyelinden çıkarılmasıyla, denklemin en genel hali yazılırsa (standart basınç ve sıcaklık için) [16]:

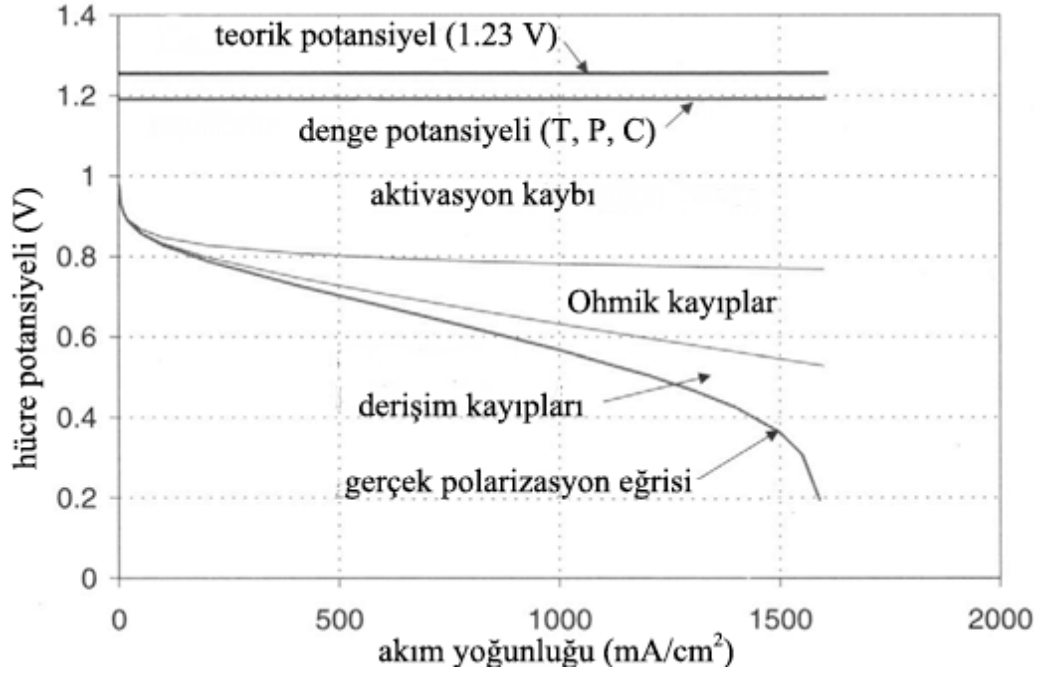
$$E_{hücre} = E_r - E_{kayıp}$$

$$E_{kayıp} = (\Delta V_{akt} + \Delta V_{der})_a + (\Delta V_{akt} + \Delta V_{der})_k + \Delta V_{ohm}$$

$$E_{hücre} = E_k - E_a$$

$$E_{\text{hücre}} = E_r - R \cdot T / \alpha_k \cdot F \cdot \ln(i / i_{0,k}) - R \cdot T / \alpha_a \cdot F \cdot \ln(i / i_{0,a}) - (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \ln(i_{L,c} / (i_{L,c} - i)) - (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \ln(i_{L,a} / (i_{L,a} - i)) - i \cdot R_i \quad (3.47)$$

Denklem (3.47)'den meydana gelen polarizasyon eğrisi şekil 3.1.'de görülmektedir.

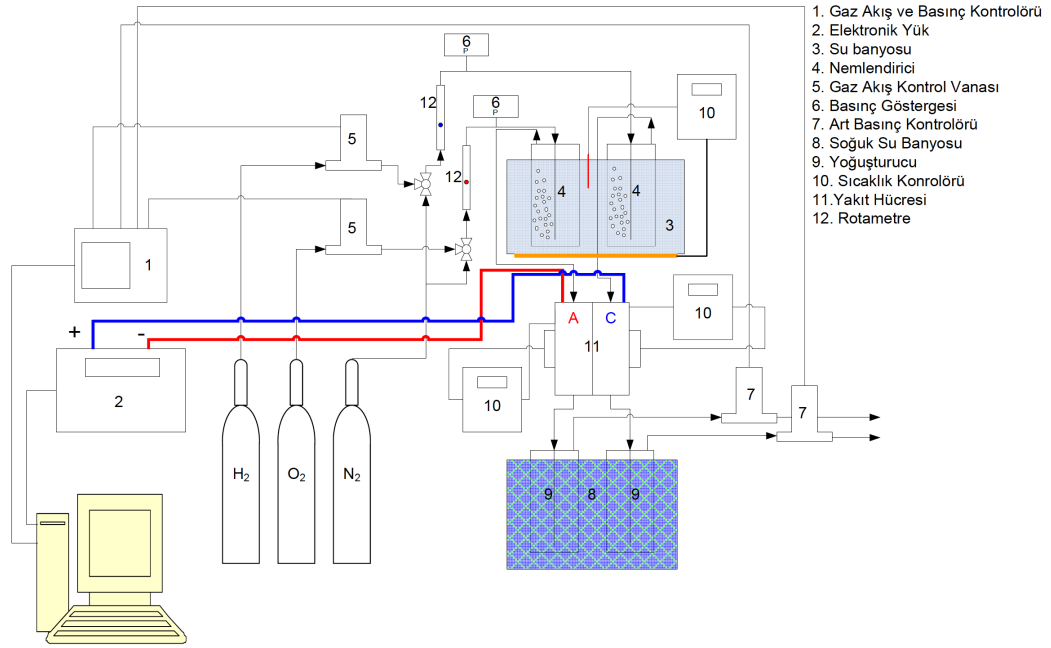


Şekil 3.1. Polarizasyon eğrisi [16]

4. GEREÇ VE YÖNTEM

4.1. Deney Sistemi

Üretilen MEB'lerin ve yakıt hücresi denemelerinin gerçekleştirildiği yakıt hücresi test istasyonu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [13].



Şekil 4.1. PEMYH deneme istasyonu şeması [13]

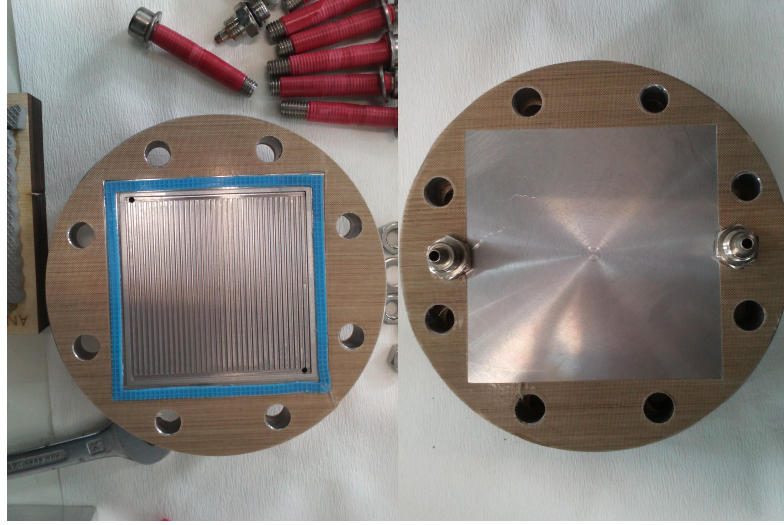
Deneme istasyonunda, deney esnasında gazların nemlendirilmesi ve çıkan gazlardaki nemin uzaklaştırılması için yüksek basınçlara dayanıklı 2 L hacminde 4 adet nemlendirici ve yoğuşturucu bulunmaktadır. Gaz beslemede kullanılmak üzere Brooks marka kütleli gaz akışı ve basınç kontrol sistemine ait gerekli bileşenler test istasyonunda bulunmaktadır. Agilent 34401 Veri Alma ve anahtarlama birimi ile 300 W'a kadar güç çekeabilen Agilent N3304 Elektronik Yük bilgisayara PCI-GPIB kartı ile bağlanmış olarak PEMYH test istasyonunda kurulu bulunmaktadır (Şekil 4.2) [13].

Verilerin alınması, depolanması ve bilgisayara aktarılması LabView yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2. PEMYH deneme istasyonu

PEMYH deneme istasyonunda tasarımı kendimize ait olan paralel akış özelliğine sahip 48.3 cm^2 gaz akış alanı olan paslanmaz çelikten imal edilmiş yakıt hücresi gerekli gaz bağlantı noktalarıyla beraber Anadolu Üniversitesi torna atölyesinde imal edilmiştir.



Şekil 4.3. Yakıt hücresi gövdesinin iç ve dış kısmı

Şekil 4.3’de görülen yakıt hücresinin iç kısmında akış kanallarını çevreleyen kısma Ice Cube marka sızdırmazlık contası konulmuştur. Birbirine temas eden yüzeylerde kısa devre olmaması için izolasyon bandı kullanılmıştır.

4.2. Membran Elektrolit Bileşke (MEB) Üretimi

4.2.1. Elektrot Hazırlanması

Bu çalışmada gaz difüzyon tabakası olarak Sigracet® GDL 10 BC karbon kağıt kullanılmıştır. İstenilen ölçülerde kesilen GDT’ları ultrasonik ince film kaplama makinasına aktif tabakanın GDT üzerine kaplanması için yerleştirilmiştir. Sırasıyla her bir elektrot için ayrı 60 % Pt/C, deiyonize su, 5 %’lik Nafion çözeltisi ve izopropil alkolden oluşturulan karışım ultrasonik karıştırıcıda hazırlanmıştır.



Şekil 4.4. Solda karışımın hazırlanması ve sağda ultrasonik karıştırıcı

Daha sonra hazırlanan karışım Sono-Tek ultrasonik ince film kaplama makinesine konularak, daha önceden yerleştirilmiş olan GDT üzerine püskürtülmüştür. Püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan elektrotlar etüvde 80 °C’de 24 saat bekletildikten sonra tartımları yapılmış, böylelikle aktif yüzey alanı üzerine ağırlıkça ne kadar platin kaplandığı belirlenmiştir. Bu çalışmada 0,5 mg Pt cm⁻² olacak şekilde platin yüklemesi yapılmıştır.

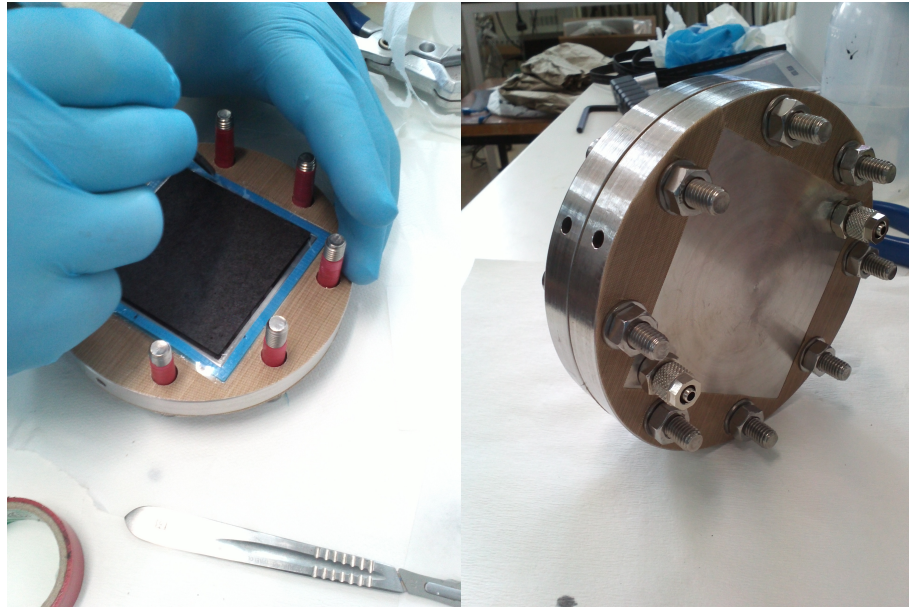


Şekil 4.5. Ultrasonik ince film kaplama makinesi

4.2.2. Membran Hazırlanması

Günümüzde bir çok firma tarafından perflüorosulfonik asit esaslı membranlar üretilmektedir. Bunlardan en çok bilinenleri DuPont® tarafından üretilen Nafion™ membranlardır. Bu çalışmada Nafion 115 mebran kullanılmış ve MEB oluşturulmadan önce membranlara aşağıdaki işlemler sırasıyla uygulanarak üzerlerindeki safsızlıklar giderilmiştir [13].

1. Membran istenilen ölçüde kesilir.
2. Distile suda 90 °C’de 15 dakika yıkanır.
3. 90 °C’deki H₂O₂ (5 %)’de 60 dk yıkanır.
4. 90 °C’deki distile suda 15 dk yıkanır.
5. 90 °C’deki H₂SO₄ (0,5 M)’de 30 dk bekletilir.
6. Taze H₂SO₄ ile beşinci basamak tekrar edilir.
7. 90 °C’deki distile suda 15 dk yıkanır.
8. Yedinci basamak taze distile su ile üç defa tekrar edilir.



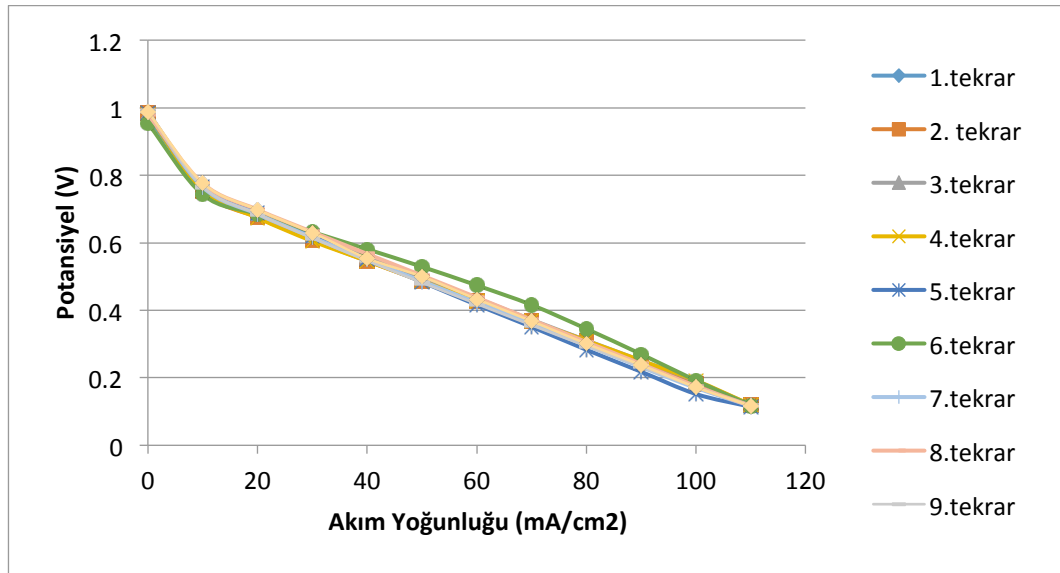
Şekil 4.6. Solda elektrotların konulması ve sağda hücre bir arada

Hazırlanan membranlar ve elektrotlardan emin olunduktan sonra tek hücre denemesinde kullanılmak üzere membran ve elektrotlar bir araya getirilmiştir. Bu çalışmada elektrotların akış kanalları üzerine bastığından emin olunduktan sonra 5 Nm ile torklanarak hücre, test istasyonunda denemelerin yapılabilmesi için hazır hale getirilmiştir.

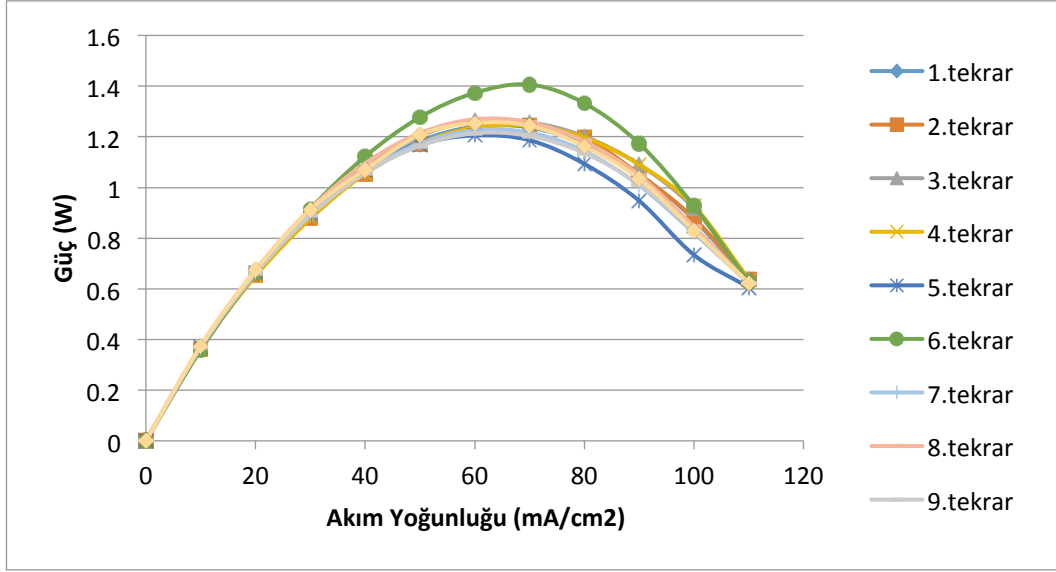
5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Üretilen MEB'ler tek hücre üzerinde yakıt hücresi test istasyonunda denenmiştir. Deneme çalışmaları esnasında hücreye 100 ccm hidrojen ve 100 ccm oksijen gönderilmiş, yakıt hücresi sıcaklığı laboratuvar şartlarında oda sıcaklığında (25 °C) denenmiş ve hücre basıncı 1,0 barg basınç değerinde sabit tutulmuştur.

Denemeler sırasında akım sabit tutulup potansiyeldeki değişimler kaydedilmiştir. Yakıt hücresi belirli bir süre çalıştırılıp şartlandırıldıktan sonra esas taramalara geçilmiştir. Taramalarda akım değeri değiştirdikten sonra 2 dk beklenmiş ve elde edilen potansiyel değeri kaydedilmiştir.



Şekil 5.1. Oda sıcaklığında ve 1,0 barg basınç altında, 0,5 mg Pt cm⁻² için oluşan polarizasyon eğrisi



Şekil 5.2. Oda sıcaklığında ve 1,0 barg basınç altında, 0,5 mg Pt cm⁻² için oluşan Güç-Akım yoğunluğu eğrisi

Bu çalışmada bir araya getirilen ve test edilen tekli yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi ve Güç-Akım yoğunluğu eğrisi şekil 5.1 ve şekil 5.2’de görülmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışma neticesinde;

- Bir İHA’da itki üretmek amacıyla tasarlanacak olan PEMYH yığını için hangi tasarım parametrelerinin bilinmesinin, çalışmada kullanılacak PEMYH yığınının bir teknoloji gösterimi amaçlı olarak mı yoksa özel bir görev için tasarlanmış insansız hava taşıtı için mi kullanılacağına bilinmesinin önemi görülmüştür.
- Tekli yakıt hücre denemeleri öncesinde hücre ve yığın tasarımı için gerekli olan parametreleri sıralayacak olursak; akım, potansiyel, aktif yüzey alanı, hücre sayısı, hücrede kullanılacak bipolar plaka kalınlığı, akış kanalları geometrisi, bağlantı elemanlarının ve son plakaların boyutlarının belirlenmesi, çalışmada kullanılacak membran, gaz difüzyon tabakası ve hedeflenen akım-potansiyel değerine göre püskürtülecek olan platin miktarının belirlenmesi, uygun conta ve izolasyon malzemesinin seçimi, tekli hücre ve kısa hücre yığını denemeleri için kullanılacak olan

malzemelerin imalat yöntemlerinin belirlenmesi ve planlanmasının önemi görülmüştür.

- Tasarlanan yakıt hücre yığını özel bir uygulama olan İHA için tasarlanacak ise insansız hava aracında kullanılabilir nitelikte olması gerekmektedir. Örneğin İHA içerisinde hücre yığını, gerekli ise soğutma sistemi, hidrojen tank ve üreticinin, elektronik kontrol ünitesinin nasıl konumlandırılacağına önemli olduğu görülmüştür.
- Tasarım öncesi her bir hücre bileşeni ve yakıt hücresi alt sistemlerinin öngörülen ağırlıklarının bilinmesi gerekmektedir.
- Yakıt hücre yığınının çalışma basınç ve sıcaklığının önceden belirlenip yer testlerinin o şartlarda gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir.
- Yakıt hücre yığını eğer bir teknoloji gösterimi olan İHA'da test edilecek ise yakıt hücresi performansının gözlemlenmesi gerektiği, özel kullanım amaçlı İHA'da kullanılacak ise hücre yığın performansı yanında İHA'nın performansının da önemli olacağı ön görülmüştür.
- Özel tasarım olan İHA'nın ve ona uygun üretilen PEMYH yığının rüzgar kanallarında ve bilgisayar ortamında gerekli testlere tabi tutulmasının tasarım öncesi gerekli ve ekonomik olacağı görülmüştür.
- Yapılan literatür çalışmasında incelenen çalışmalardan yakıt hücreli İHA'ların özellikle PEMYH ve KOYH'li insansız hava araçlarının uzun menzil ve görev süresi açısından büyük avantajlara sahip olduğu ve gelecekte uzaktan görüntüleme sistemlerinin bir parçası olmaya aday olduğu görülmüştür.

Buraya kadar ifade edilen öneriler bu çalışma genelinde ve literatür araştırmaları neticesinde ortaya konulmuştur. Yapılan çalışma özelinde karşılaşılan problemlerden ve bu problemlere getirilen çözümler ve öneriler sıralanacak olursa;

- PEMYH yığını tasarlarken sırasıyla bilgisayar destekli tasarım ve analizlerinin gerekliliği maliyet, zaman ve doğrulama açılarından önemli olduğu görülmüştür.

- Kısa hücre yığını testlerine geçilmeden gerçekleştirilen tek hücre testlerinin hedeflenen tasarım parametreleri ile uyumluluğunun gözlemlenmesi büyük önem taşımaktadır.
- Membranların, elektrotların, MEB'lerinin hazırlanması insandan bağımsız hale getirilmeli ve mümkün olduğunca belirli bir standart üzere üretilip test edilmelidir.
- Çalışmada kullanılan bağlantı elemanları büyük önem arz etmekte olup, hücreden dışarı gaz sızıntısı noktasında dikkatle bir araya getirilmelidir.
- Uygun conta malzemesi seçilmesi ve conta kanalının tasarlanmasının hem hücre performansı hem de maliyet açısından önemli olduğu görülmüştür.
- Hücre elemanları bir araya getirilirken homojen bir şekilde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmeli, aksi takdirde özellikle grafit esaslı bipolar plakalar üzerinde çatlaklara sebebiyet vereceğinden dikkat edilmelidir. Yine bu bağlamda bipolar plaka tasarımı plakanın mukavemet değerleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.
- Uygun sıkıştırma basıncı ile hücre bir araya getirilmelidir. Temassızlık olması durumunda daha kalın GDT ve/veya membran kullanımının temassızlık probleminin üstesinden geleceği görülmüştür.
- Elektrotların akış kanalları üzerine bastığından emin olunması gerekmektedir.
- Hücre elemanları bir araya getirilirken olabildiğince safsızlıklar giderilmelidir.
- Bu çalışmada oda sıcaklığında test edilen tekil hücrenin performansının düşük olduğu önceden belirlenen hedefler ve literatür perspektifinden bakıldığında gelişime açık olduğu görülmüştür. Akış kanal geometrisinin değiştirilmesi, bilgisayar destekli analizlerin yapılması, hücre sıcaklığının artırılarak hücre performansının gözlemlenmesi ileride yapılması planlanan çalışmalar arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Wezeman, S., UAVs and UCAVs: developments in the european union, 2007.
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2007/381405/EXPO-SEDE_ET\(2007\)381405_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2007/381405/EXPO-SEDE_ET(2007)381405_EN.pdf)
- [2] McConnell, V. P., “Military UAVs Claiming the Skies with Fuel Cell Power,” Fuel Cells Bulletin, 12, 12–15, 2007.
- [3] Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M. ve Zhou, T., Classification of Unmanned Aerial Vehicles. Project, University of Adelaide, 2006.
<http://personal.mecheng.adelaide.edu.au/maziar.arjomandi/Aeronautical%20Engineering%20Projects/2006/group9.pdf>
- [4] González-Espasandín, Ó., Leo, T. J., ve Navarro-Arévalo, E., “Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion,” The Scientific World Journal, 2014, 1-12, 2014.
- [5] Austin, R., Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment, John Wiley & Sons, Wiltshire, UK, 2010.
- [6] McConnell, V. P., “Military UAVs Claiming the Skies with Fuel Cell Power,” Fuel Cells Bulletin, 12, 12–15, 2007.
- [7] Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Mavris, D. N. ve Parekh, D. E. “Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft,” Journal of Power Sources 171, 793-801, 2007.
- [8] Furrutter, M. K., ve Meyer, J., “Small fuel cell powering an unmanned aerial vehicle,” AFRICON 2009, IEEE, Nairobi, 1-6, 2009.
- [9] Kim, T, ve Kwon, S. “Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft,” International Journal of Hydrogen Energy 37 615-622, 2012.
- [10] Romeo, G, Borello, F., Correa, G. ve Cestino, E., “ENFICA-FC: design of transport aircraft powered by fuel cell and flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fuelled by hydrogen,” International Journal of Hydrogen Energy, 38, 469–479, 2013.
- [11] Bone, E., ve Bolkcom, C., Unmanned aerial vehicles: Background and issues for congress raporu. Washington, 2003.

- [12] S. Tomazic, A. Vugrinec, P. Skraba, Proceedings of the 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, Limassol, Cyprus, May 29–31, 2000.
- [13] Akyalçın, L. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi platin buharı püskürtme yöntemiyle üretimi ve en iyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007
- [14] Carrette, L., Friedrich, K. A., ve Stimming, U., “Fuel Cells - Fundamentals and Applications,” Fuel Cells, 1, 5-39, 2001.
- [15] Sharaf, O. Z., ve Orhan, M. F., “An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications,” Renewable and sustainable energy reviews, 32, 810-853, 2014.
- [16] Barbir, F., PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Editorial Elsevier, 2005.
- [17] O’Hayre, R., Cha, Suk-Won, Colella, W., ve Prinz B. F., Fuel cell Fundamentals, John Wiley ve Sons, New York, A.B.D., 2006.,
- [18] Kocha, S. S., “Principles of MEA preparation,” Handbook of Fuel Cells (Eds. Vielstich W., Lamm, A., Gasteiger, H. A.), 3, 539-565, Wiley, A.B.D., 2003.
- [19] Mathias, M. E., Roth, J., Fleming, J. ve Lehnert, W., Diffusion Media Materials and Characterization, Handbook of Fuel Cells, Fundamentals, Technology and Applications, John Wiley 8k Sons, New York, 2003.
- [20] Larminie, J. ve Dicks, A., Fuel Cell Systems Explained, Wiley, A.B.D., 2002.
- [21] İbrahimoglu, B., Hidrojenli Enerji Üreteçleri, Nobel Yayın Dağıtım, Türkiye, 2008.
- [22] Veziroglu, T. N., ve Barbir, F., Hydrogen energy technologies, Emerging Technology Series, Vienna, 1998