

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR HİBRİT (YAKIT PİLLİ & GÜNEŞ PİLLİ) ENERJİLİ
ARACIN MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE
PROTOTİP UYGULAMASI**

Elektrik Müh. Tunacan AKFİDAN

**FBE Elektrik Anabilim Dalında Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ	4
2.1 Giriş	4
2.2 Yakıt Pili Nedir?	4
2.3 Yakıt Pili Tarihi	4
2.4 Yakıt Pillerinin Genel Yapısı ve Temel Prensibi	5
2.5 Yakıt Pili Çeşitleri	7
2.5.1 Alkali Yakıt Pili (AFC)	8
2.5.1.1 Alkali Yakıt Pili Çalışma Prensipleri	8
2.5.2 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PEM).....	10
2.5.2.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili Çalışma Prensibi.....	11
2.5.3 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC).....	12
2.5.3.1 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili Çalışma Prensibi	13
2.5.4 Fosforik Asit Yakıt Pilleri	14
2.5.4.1 Fosforik Asit Yakıt Pili Çalışma Prensibi	15
2.5.5 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC).....	15
2.5.5.1 Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri Çalışma Prensibi.....	15
2.5.6 Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC).....	17
2.5.6.1 Katı Oksit Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri.....	17
2.6 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması	18
2.7 Yakıt Pillerinde Verim ve Ekserji.....	21
2.7.1 Verim ve Verimin Limiti	24
2.7.2 Yakıt Pili ve Ekserji.....	27
2.8 Yakıt Pillerinde İşletme Gerilimleri	29
2.8.1 Yakıt Pili Tersinmezliği (Gerilim Düşüşünün Nedenleri).....	31
2.8.2 Aktivasyon Kayıpları.....	31
2.8.2.1 Tafel Eşitliği	31
2.8.2.2 Tafel Eşitliğindeki Değerler	32
2.8.2.3 Aktivasyon Aşırı Gerilimini Düşürmek.....	34
2.8.3 Yakıt Kaçışı ve İç Dirençler	34
2.8.4 Ohm Kayıpları	35

2.8.5	Kütle Transfer ve Konsantrasyon Kayıpları	36
2.8.6	Tersinmezliklerin Birleştirilmesi	38
2.8.7	Yük Çift Katmanı	39
2.8.8	Farklı Tersinmezliklerin Ayırt Edilebilmesi	41
2.9	Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları	42
3.	GÜNEŞ PİLİ TEKNOLOJİSİ	50
3.1	Giriş	50
3.2	Güneş Pili Yapısı ve Özellikleri	50
3.3	Maddenin Yapısı ve Yarı İletkenler	51
3.3.1	N Tipi Yarı İletken	53
3.3.2	P Tipi Yarı İletken	53
3.4	PN Kavşağı	54
3.5	Fotovoltaik PİL	55
3.6	Güneş Pili Çeşitleri	56
3.6.1	Selenyum Güneş Pili	56
3.6.2	Silisyum Güneş Pili	57
3.7	Güneş Pili Eşdeğer Şeması ve Güneş Panelleri	58
3.8	Güneş Pillerinin Çalışma İlkeleri	62
3.9	Güneş Pillerinin Yapısı	62
3.10	Güneş Pillerinin Türleri	64
3.10.1	Kristal silisyum güneş pilleri	64
3.10.2	Monokristal silisyum güneş pilleri	65
3.10.3	Yarı kristal silisyum güneş pilleri	65
3.10.4	Ribbon silisyum güneş pilleri	65
3.10.5	Polikristal silisyum güneş pilleri	65
3.10.6	İnce film güneş piller	65
3.10.7	Amorf silisyum güneş pilleri	66
3.10.8	Diğer yapılar	66
3.11	Güneş Pili Nasıl Çalışır	66
3.11.1	Açık Devre Gerilimi	68
3.11.2	Kısa Devre Akımı	69
3.11.3	Güneş Hücre Modeli	69
3.11.4	Pillerin Boşalmasını Engelleyen Anahar	71
3.11.5	Güneş Hücre Dizilerinin Bağlanması	72
3.11.6	Dizinin Gölgeleme Durumu	73
3.12	Güneşten Elektrik Üretiminin Yararları	73
4.	ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ	75
4.1	Giriş	75
4.2	Elektrikli Araçların Tarihçesi	76
4.3	Elektrikli Araç Sistemleri	81
4.3.1	Sadece Elektrikle Çalışan Araçlar	81
4.3.2	Hibrid Elektrikli Araçlar	82
4.3.3	Yakıt Pili Elektrikli Araçlar	83
4.4	Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bileşenler	85
4.4.1	Bataryalar	85
4.4.2	Pem Yakıt Pilleri	87
4.4.2.1	Giriş	87
4.4.2.2	Membran Elektrot Ünitesi	88

4.4.2.3	Polimer Elektrolitin Çalışması.....	90
4.4.2.4	Elektrotlar ve Elektrot Kavramı.....	92
4.4.2.5	PEMFC’de Su Yönetimi.....	95
4.4.2.6	PEMFC’de Soğutma ve Hava Kaynağı	104
4.4.2.7	Pem Tipi Yakıt Pillerinin Konstrüksiyon Yöntemleri	107
4.4.2.8	İşletme Basıncı.....	112
4.4.2.9	Yüksek Basınç Altında Çalışan Sistemlerin Kazanç-Maliyet Faktörlerinin Basit Olarak İncelenmesi	114
4.4.3	Ultra Kapasitörler	117
4.4.4	Güç Elektroniği Sistemi.....	118
4.4.4.1	Doğrultucular	119
4.4.4.2	Kıyıcılar	119
4.4.4.3	İnvertörler	120
4.4.5	Motor Sistemi	122
4.4.5.1	Doğru Akım Motorları.....	123
4.4.5.2	Asenkron Motorlar.....	126
4.4.5.3	Sürekli Mıknatıslı Motorlar	128
4.4.5.4	Anahtarlama Relüktans Motoru	129
5.	YAKIT PİLLİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ PROJESİ.....	131
5.1	Giriş	131
5.2	Projeye Genel Bakış	132
5.3	Modifikasyon Süreci.....	135
5.3.1	Yakıt Pili ve Hidrojen Manifold Sistemi Entegrasyonu	135
5.3.2	Güneş Paneli ve Ekipmanlarının Entegrasyonu	139
5.3.3	Veri Toplama Sistemi ve Kontrol Kartının Entegrasyonu	141
5.3.3.1	Veri Toplama Sistemi	141
5.3.3.2	Kontrol Kartı.....	146
5.4	Elektrikli Aracın Çalışma Sistemi	148
5.4.1	Elektrik Sisteminde Enerjinin Depolanması ve Akışı	148
5.4.2	Hidrojen Sisteminde Depolama ve Gaz Akışı	152
5.5	Sistemin Çalışma Algoritması	156
5.6	Araç Modellemesi ve Simülasyonu	158
6.	SONUÇ.....	176
	KAYNAKLAR.....	179
	EKLER	181
	Ek 1 Yakıt pili teknik özellikleri	182
	Ek 2 Gaz manifold sisteminin şeması.....	183
	Ek 3 Güneş paneli teknik özellikleri.....	184
	Ek 4 Haberleşme modülü ile 8 kanallı analog modülün teknik özellikleri	185
	Ek 5 Elektronik kontrol kartının teknik şeması	188
	Ek 6 Metal hidrür tüpün teknik bilgileri	189
	Ek 7 Hibrid yakıt pilli elektrikli araç sisteminin devre şeması.....	190
	ÖZGEÇMİŞ.....	191

SİMGE LİSTESİ

A	Tafel çizgisinin eğimi
B	Toplu aşırı yüklülük eşitliğinin sabiti
C	Aktivasyon gerilim sabiti
d	Plakalar arası uzaklık
e	Elektriksel geçirgenlik
E	Denge potansiyeli
F	Faraday sabiti
g_f	Gibbs fonksiyonu
h_f	Oluşum entalpisi
I	Elektriksel akım
i_0	İşsel ve yakıt köprü dengi akım şiddeti
i_n	Eğer katot aşırı gerilimi anottan çok daha fazlaysa katottaki değişme akış şiddeti ya da her iki değişim akım şiddetinin fonksiyonudur.
i_l	En düşük sınırlayıcı akım şiddetine sahip elektrotun sınırlayıcı akım şiddeti
k	Valf sabiti
K	Boltzmann sabiti
m_a	Kuru hava kütlesi
m_w	Havadaki su miktarı
P	Gaz basıncı
r_{H-O}	Hidrojen oksijen akış oranı
R	Gaz Sabiti
R_{int}	Yakıt pili yığını iç direnci
t	Zaman sabiti
T	Sıcaklık
V	Elektriksel potansiyel fark
Z	Empedans
α	Yük aktarım katsayısı
λ	Hava fazlalık katsayısı

KISALTIMA LİSTESİ

EA	Elektrikli Araba
HEA	Hibrid Elektrikli Araba
İYM	İçten Yanmalı Motor
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
PEM	Proton Exchange Membrane
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PAFC	Fosforik asit yakıt hücresi
GDL	Gas Duffusion Layer : Gaz difüzyon tabakası
MEA	Membrane Electrode Assembly : Membran elektrot ünitesi
AFC	Alkali Fusl Cell : Alkali yakıt pilleri
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell : Doğrudan Methanol kullanan yakıt pilleri
PAFC	Phosparic Acid Fuel Cell : Fosforik ait yakıt pilleri
MCFC	Molten Carbonat Fuel Cell : Erimiş karbonatlı yakıt pilleri
SOFC	Solid Oksid Fuel Cell : Katı oksit yakıt pilleri
PTFE	Politetrafloraetilen
HHV	High Heat Value : Üst ısıl değer
LHV	Low Heat Value : Alt ısıl değer
EMF	Elektro Motive Force : Elektro motor kuvveti
PFSA	Perflorosülfonik asit

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Elektroliz ve yakıt pilinin karşılaştırmalı prensibi.....	5
Şekil 2.2	Yakıt hücrelerinin genel gösterimi.....	6
Şekil 2.3	Alkali yakıt pili şematik çalışma prensibi.....	8
Şekil 2.4	Alkali yakıt pillerinde basınç etkisi.....	9
Şekil 2.5	Alkali yakıt pillerinde sıcaklık etkisi.....	10
Şekil 2.6	Proton değişim membranlı yakıt pili.....	10
Şekil 2.7	Proton değişim membranlı yakıt pilinin şematik çalışma prensibi.....	11
Şekil 2.8	Seri bağlanmış yakıt hücreleri.....	12
Şekil 2.9	Doğrudan metanol kullanılan yakıt pillerin şematik çalışma prensibi.....	13
Şekil 2.10	Fosforik asit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi.....	14
Şekil 2.11	Erimiş karbonat yakıt pili şematik çalışma prensibi.....	17
Şekil 2.12	Katı oksit yakıt pili şematik çalışma prensibi.....	17
Şekil 2.13	Rüzgâr türbini.....	22
Şekil 2.14	Yakıt pilinde girişler ve çıkışlar.....	22
Şekil 2.15	Maksimum hidrojen yakıt pili veriminin (HHV'e göre) Carnot makinesiyle karşılaştırılması. Carnot verimi (limiti) 50 °C'deki egzost sıcaklığına göre hesaplanmıştır.....	27
Şekil 2.16	Isı makinesi, yakıt pili ve birleşik yakıt pili/türbin sistemlerinin verim limitleri. Alt sıcaklık 100 °C'dir. Yakıt pili verimi HHV'e göredir.....	29
Şekil 2.17	SOFC yakıt pilinin gaz türbiniyle beraber çalıştığı durumdaki enerji veriminin değişimi.....	29
Şekil 2.18	40 °C de çalışan bir yakıt pilinin grafiği görülmektedir.....	30
Şekil 2.19	800 °C de çalışan bir yakıt pilinin grafiği görülmektedir.....	30
Şekil 2.20	Yavaş ve hızlı elektro kimyasal reaksiyonlarda oluşan Tafel grafikleri.....	32
Şekil 2.21	Akım yoğunluğu-pil gerilimi grafiği (göz önüne alınan kayıplar sadece bir elektrodaki aktivasyon aşırı gerilimine göredir, 3 farklı akım yoğunluğuna göre).....	33
Şekil 2.22	PEMFC polarizasyon eğrisi.....	37
Şekil 2.23	Yakıt hücresi katot yüzeyindeki yük çift katmanı.....	39
Şekil 2.24	Yakıt pili denge devresi modeli.....	41
Şekil 2.25	Bir yakıt pili için akım kesintisinden sonra voltaj- zaman grafiği.....	42
Şekil 2.26	1959 yılında üretilen 5 kW alkalin yakıt hücresi.....	42
Şekil 2.27	Teksas valisi hidrojen yakıtlı arabaya hidrojen doldururken.....	43
Şekil 2.28	1960'larda kurulmuş bir hidrojen güç santrali.....	43
Şekil 2.29	Gaz türbinli,yakıt hücreli kojenerasyon sistemi.....	44
Şekil 2.30	Hidrojenle çalışan emisyonuz otobüsler.....	45
Şekil 2.31	Hidrojen Dolum İstasyonu.....	45
Şekil 2.32	Hidrojenle çalışan bisiklet.....	45
Şekil 2.33	General Motors firmasının hidrojen yakıtlı otomobili.....	46
Şekil 2.34	Hidrojen yakıtlı opel zafira'nın yakıt pili, yakıt tankı ve aksesuarları.....	46
Şekil 2.35	Yakıt olarak hidrojen kullanan denizaltı.....	47
Şekil 2.36	Bir yakıt pilli otomobilin iç yapısı.....	47
Şekil 2.37	Hidrojen yakıtlı roket.....	48
Şekil 2.38	Hidrojen yakıtlı supersonic uçak.....	48
Şekil 2.39	Hidrojenle çalışan uçak ve yakıt hücresi.....	49
Şekil 2.40	Yakıt pilleri ile çalışan laptop ve cep telefonları.....	49
Şekil 3.1	Bir Yarı İletkenin Yapısı.....	51
Şekil 3.2	Enerji Bandları.....	52
Şekil 3.3	Germanyum Kristali Temsili Yapısı.....	53
Şekil 3.4	P – N Kavşağının Oluşumu.....	54

Şekil 3.5	P – N Kavşağı ve İç Akım	54
Şekil 3.6	P – N Kavşağında Enerji Bandı	55
Şekil 3.7.	Fotovoltaik Pilin Yapısı	56
Şekil 3.8.	Fotovoltaik Pil Eşdeğer Elektrik Devresi.....	56
Şekil 3.9	Selenyum Güneş Pilinin Yapısı	57
Şekil 3.10	Güneş Pili.....	58
Şekil 3.11	P – N Kavşağına Düşen Foton Enerjisi ile İletkenlik Temini.....	58
Şekil 3.12	Güneş Pili Eşdeğer Elektrik Şeması.....	59
Şekil 3.13	34 Wattlık Bir Güneş Pilinde Akım-Gerilim Eğrileri (Yüzey Sıcaklığı 27 °C İçin)	59
Şekil 3.14	Güneş Panelinde Karakteristiklerin Sıcaklıkla Değişimi.....	60
Şekil 3.15	Otomatik Ayarlı Güneş Paneli Şarj Sistemi.....	60
Şekil 3.16	Güneş Panelinin Enine Kesiti	60
Şekil 3.17	Güneş Pillerinin Konutlarda Çeşitli Kullanım Yerleri.....	61
Şekil 3.18	Güneş Pili ve Sirkülasyon Pompası Karakteristikleri	61
Şekil 3.19.	Güneş Pilinin Yapısı	62
Şekil 3.20	Tipik Bir Silisyum Güneş Pilinin Ön Yüzü	63
Şekil 3.21	Bataryalardan Modül ve Örgülerin Yapılması.....	64
Şekil 3.22	Bağlantıları Birleştirilmiş Elektron-Boşluk Çifti.....	67
Şekil 3.23	Güneş Pili Şeması	68
Şekil 3.24	Açık Devre Voltajı	68
Şekil 3.25	Kısa Devre Akımı	69
Şekil 3.26	Güneş Hücresi – Diyot Modeli	70
Şekil 3.27	Pillerin Boşalmasını Engelleyen Anahtar	70
Şekil 3.28	Güneş Hücresinin Elektriksel Modeli	71
Şekil 3.29	Tipik Güneş Hücresi V – I Eğrisi.....	72
Şekil 3.30	Güneş Hücrelerinin Seri Bağlantısı.....	72
Şekil 3.31	Yanlış Eşleşmiş Hücrelerin Bağlantı Şeması.....	73
Şekil 4.1	Araç teknolojisinin yüzyıllara göre gelişimi.....	76
Şekil 4.2	1895 yılında yapılan Electrobats isimli elektrikli araç.....	77
Şekil 4.3	Londra elektrikli taksi aracı	77
Şekil 4.4	1967 yılında Ford tarafından Comuta model ilk prototip çalışma.....	79
Şekil 4.5	Tamamen elektrikle çalışan araç sistemi	81
Şekil 4.6	Hibrid elektrikli araç sistemi.....	83
Şekil 4.7	Hibrid aracın enerji sistemini oluşturan başlıca bileşenler	83
Şekil 4.8	Yakıt pili ile çalışan Honda FCX.....	85
Şekil 4.9	PEM yakıt pili hücrelerini oluşturan bileşenler	87
Şekil 4.11	PEM yakıt pili modülü.....	88
Şekil 4.12	Katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları ve proton değişimli membrandan oluşan membran elektrot ünitesinin şematik bir gösterimi	88
Şekil 4.13	Politetrafloroetilen'in yapısı	91
Şekil 4.14	Nafion membranının yapısı.....	91
Şekil 4.15	Nafion malzemesinin mikro yapısı	92
Şekil 4.16	Elektrot içindeki karbon ve platin dağılımının ideal hali.....	92
Şekil 4.17	Elektrot içindeki karbon ve platin dağılımının gerçek hali.....	93
Şekil 4.18	PEM yakıt pili elektrotunun basit ve ideal yapısı	94
Şekil 4.19	Şekil 4.18'in büyütülmüş görüntüsü	94
Şekil 4.20	MEA deki su hareketlerini gösteren şematik şekil.....	96
Şekil 4.21	Bağıl nem – sıcaklık grafiğine hava fazlalık katsayısının etkisi.....	100
Şekil 4.22	Nemlendirmeyi yaymak için reaksiyon gazlarının zıt yönlü akışı.....	101
Şekil 4.23	Atık gazların nemlendirmede kullanılması	103
Şekil 4.24	Çıkış havasını kullanarak nemlendirme yapılan bir yakıt hücresi örneği	103

Şekil 4.25	Birbirine bağlı akış yollarıyla nemlendirme	104
Şekil 4.26	Reaksiyon gazlarını ve soğutma havasını ayırmak için tasarlanmış MEA ve iki kutuplu plakalar.....	106
Şekil 4.27	Foam metal kullanılarak yapılan iki kutuplu plaka yapısı	109
Şekil 4.28	Yakıt hücrelerini seri bağlamak için basit bir yöntem	111
Şekil 4.29	Hatlar şeklinde bir yapıya sahip PEM pili	112
Şekil 4.30	Motor sürücülü bir kompresör ve PEM yakıt pili	114
Şekil 4.31	İki farklı PEM tipi yakıt pili için yüksek basınçta net voltaj değişiminin sonuç	117
Şekil 4.32	Bir elektrikli araçta kullanılabilecek dönüştürücü türlerinden bazıları.....	118
Şekil 4.33	Bir fazlı invertör	120
Şekil 3.34	Kare dalga invertör kontrolü ve çıkış gerilimi	121
Şekil 4.35	İnvertör kontrol ve çıkış gerilimi	121
Şekil 4.36	Üç fazlı invertör	122
Şekil 4.37	DC motor çeşitleri	124
Şekil 4.38	Serbest uyarmalı DC motor kontrol sistemi.....	124
Şekil 4.39	DC motor eş değer devresi	125
Şekil 4.40	DC motor çalışma bölgeleri	126
Şekil 4.41	Asenkron motor sürücü devresi	127
Şekil 4.42	Anahtarlama relüktans motorunun sürücü devresi	129
Şekil 5.1	Çeşitli amaçlarla kullanılan elektrikli araçlar	131
Şekil 5.2	Gerçekleştirilen elektrikli araç projesi	132
Şekil 5.3	Elektrikli yolcu aracındaki sistemin genel şeması	133
Şekil 5.4	Yakıt pili ünitesinin konumlandırıldığı alan	135
Şekil 5.5	Yakıt pili ünitesinin araca yerleşimi	136
Şekil 5.6	Kontrol ünitesi ve araç üzerindeki yerleşim alanı.....	136
Şekil 5.7	Yakıt pili kontrol ünitesinin araç üzerine yerleşimi.....	136
Şekil 5.8	Batarya grubunun araç üzerindeki yerleşimi	137
Şekil 5.9	Tüplerin yerleşim alanı ve modüler mekanizma.....	137
Şekil 5.10	Manifold sistemindeki elemanlar	138
Şekil 5.11	Hidrojen sensörü	139
Şekil 5.12	Güneş panelleri	139
Şekil 5.13	Şarj Regülatörü	140
Şekil 5.14	Kutup değiştirici pako şalter	140
Şekil 5.15	Haberleşme modülü ve buna bağlı diğer modüller	141
Şekil 5.16	Haberleşme modülü ve ana bilgisayar (sunucu-server) arasındaki hiyerarşi..	142
Şekil 5.17	Client (istemci) ile Server (sunucu) arasındaki hiyerarşi.....	142
Şekil 5.18	Projede kullanılan akım sensörlerinden bir tanesi	143
Şekil 5.19	Haberleşme modülüne gelen verileri işleyen programın arayüzü.....	145
Şekil 5.20	Haberleşme modülünün ayarlarının yapıldığı programın arayüzü	145
Şekil 5.21	Haberleşme modülünün genel gereksinimleri.....	145
Şekil 5.22	Komponentlerin kontrol kartı üzerindeki dizilimleri.....	146
Şekil 5.23	Kontrol kartının gerçek hali	146
Şekil 5.24	Örnek gerilim bölücü devre	147
Şekil 5.25	Yakıt pilinin ilk çalışma anında araçtaki güç akış şeması	149
Şekil 5.26	Yakıt pili sisteminin araçta ana güç ünitesi olarak çalışması anında güç akış şeması.....	149
Şekil 5.27	Kritik durumlarda batarya grubunun devreye girmesiyle oluşan güç akış şeması	150
Şekil 5.28	Giriş konektörü (plug-in) üzerinden redresör ile şebekeden batarya şarjı yapılırken güç akış şeması	151
Şekil 5.29	Güneş panelleri üzerinden bataryaların şarj edilmesi durumunda güç alışı şeması.....	151
Şekil 5.30	Elektrikli Aracın Çalışma Algoritması	157

Şekil 5.31	Yakıt pili I-V karakteristiği.....	164
Şekil 5.32	Yakıt piline ait akım (A) – zaman (sn) eğrisi.....	164
Şekil 5.33	Yakıt piline ait güç (W) – zaman (sn) eğrisi.....	165
Şekil 5.34	Yakıt piline ait sıcaklık (K) – zaman (sn) eğrisi	165
Şekil 5.35	Yakıt pilinin MATLAB/Simulink modeli.....	166
Şekil 5.36	Zamana bağlı yakıt pilinden çekilen akım miktarı.....	167
Şekil 5.37	Zamana bağlı sistemdeki gerilim değişimi	167
Şekil 5.38	Zamana bağlı yakıt pilindeki güç değişimi	168
Şekil 5.39	Zamana bağlı değişen güce karşılık hidrojen tüketimi	168
Şekil 5.40	Zamana bağlı bataryadan çıkan akım miktarı	169
Şekil 5.41	Zamana bağlı bataryaya giren akım miktarı	169
Şekil 5.42	Yakıt piline ait zamana bağlı gerilim (V) – akım (A) – basınç (bar) – akış (slpm) değişimleri (Gerçek sonuçlar)	170
Şekil 5.43	Yakıt piline ait zamana bağlı gerilim (V) – motor akımı (A) – batarya çıkışı (A) – yakıt pili akımı (A) – solar panel akımı (A) – toplam akım (A) değişimleri (Gerçek sonuçlar).....	170
Şekil 5.44	Yakıt piline ait zamana bağlı hız (km/s) – gerilim (V) – toplam akım (A) değişimleri (Gerçek sonuçlar).....	171
Şekil 5.45	Güneş panelinin gerilim akım eğrisi	174
Şekil 5.46	Güneş panelinin güç gerilim eğrisi	175

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Yakıt pili çeşitleri.....	7
Çizelge 2.2	Yakıt pillerinin karşılaştırması.....	20
Çizelge 2.3	Değişik tip ve uygulamaya ait yakıt pillerinin uygulamalarını ve avantajlarını özetlenmesi.....	21
Çizelge 2.4	Farklı sıcaklık ve fazda reaksiyonun Gibbs fonksiyonu farkları.	23
Çizelge 2.5	Δg_f , maksimum EMF ve verim limiti (HHV'e göre)	26
Çizelge 2.6	Asit elektrolit içindeki hidrojen elektrotunda oluşan i_0 değerlerinin metallere göre değişimi.....	33
Çizelge 2.7	Düşük akım yoğunlukların pil gerilimleri.....	35
Çizelge 2.8	İki farklı yakıt hücresi için örnek sabit değerler	38
Çizelge 4.1	Batarya tipleri ve genel özellikleri.....	86
Çizelge 4.2	Batarya gerilim değerleri ve kullanılan malzeme cinsleri	87
Çizelge 4.3	MEA bileşenleri ve görevleri.....	89
Çizelge 4.4	Suyun doyma buhar basıncının çeşitli sıcaklıklarda değişimi	98
Çizelge 4.5	Sıcaklığa ve hava fazlalık katsayısına göre bağıl nem değerleri	100
Çizelge 5.1	Aracın modifikasyon öncesi teknik özellikleri	134
Çizelge 5.2	Aracın modifikasyon sonrası teknik özellikleri	134
Çizelge 5.3	Projede kullanılan sensör tipleri ve özellikleri.....	144
Çizelge 5.4	Projede bir takım verilerin elde edilme yöntemleri	144
Çizelge 5.5	Yakıt pilli araçlardaki hidrojen depolama yöntemleri	155

ÖNSÖZ

Dünya nüfusundaki artış ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacındaki yükseliş günümüzde alternatif yakıtlara olan önemin daha fazla artmasına neden olmaktadır. Mevcut fosil yakıt kaynaklarının ortalama 100 yıllık bir ömrü kaldığı göz önüne alındığında alternatif yakıtlara verilen önemin artması kaçınılmazdır. Söz konusu enerji ihtiyacı ise 21. yüz yıl yakıtlarının başında gelen hidrojen ile karşılanabilir. Bu nedenden dolayı hidrojen enerjisini kullanarak elektrik üreten yakıt pili sistemleri büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda otomotiv endüstrisi, içten yanmalı motor teknolojisinden uzaklaşarak yakıt pilli ve batarya sistemli elektrikli araç teknolojilerine doğru hızla ilerlemektedir. Ülkemizde 2004 yılında kurulmuş olan ve hidrojen teknolojileri alanında yapılan AR-GE çalışmalarına ve çeşitli projelere sağladığı destekle adını duyurmuş olan UNIDO-ICHET dünyada fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasında önemli bir rol üstlenmektedir.

Hidrojen ve yakıt pilleri, günümüz araçlarındaki alışılmış içten yanmalı motor teknolojisine göre taşımacılık sektörü için sağladığı bir takım avantajlar bakımından anahtar teknolojilerdir. Merkezde gerçekleştirilen projelerden biri ve aynı zamanda yüksek lisans tez çalışmam olan hibrid yakıt pilli elektrikli yolcu taşıma aracı projesi bu bakımdan ülkemiz içinde ilk ve tek örnek projedir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımından dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Muğdeşem TANRIÖVEN'e en içten dileklerle teşekkür ve şükranlarımı sunuyorum.

Her zaman ve her koşulda yanımda olan, yardım ve desteklerini esirgemeyen başta sevgili aileme ve daha lisans eğitimim sırasında bu alanda büyük tecrübeler kazanmamı sağlayıp, gelecekteki iş hayatıma yön verip, kendime önemli hedefler belirlememe ve bunun ilk adımı olan yüksek lisansa başlamama vesile olan Güneş Enerji Sistemleri Kulübü'ndeki arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu örnek projenin gerçekleşmesine vesile olan UNIDO-ICHET ailesinden başta genel müdürümüz Sn. Dr. Mustafa HATİPOĞLU ile direktörümüz Sn. Dr. M. Süha YAZICI'ya ve çalışma arkadaşlarıma en içten dileklerle teşekkür ve şükranlarımı sunuyorum.

ÖZET

Elektrikli yolcu taşıma araçları çoğunlukla havalimanlarında, halka açık alanlarda yaşlı insanları ve engelli insanları bir noktadan başka bir noktaya taşınmasında kullanılan ve genellikle uzun süre sonunda şarj olabilen batarya sistemiyle çalışan taşıtlardır. Yakıt pili hibrid elektrikli araç projesi, hidrojenli yakıt pili sisteminin bu türden taşıtlara bir takım avantajlarla entegre edilebildiğini gösteriyor. Bu başarılı örnek projenin gelişiminin otomobil firmaları tarafından da desteklenmesi beklenmektedir.

Araç üzerine ana güç ünitelerinin yerleştirildiği sınırlı alan yüzünden enerji yoğunluğu otomotiv endüstrisi için önemli bir noktadır. Bu noktada elektrikli araç teknolojisinde yakıt pili, yeniden dolum yapılana kadar daha uzun yol kat edebilme ve verimlilik gibi unsurlarla bir takım avantajları da beraberinde getiriyor. Yakıt pilleri, güneş panelleri ve bataryalarla birlikte elektrikli araçlarda birim hacimdeki güç yoğunluğunu arttırmak ve bataryalarında ömrünü uzatmak adına birincil ana güç ünitesi olarak kullanılabilir.

Bu projede yolcu aracı, ana güç kaynağı olarak 2kW'lık yakıt pili ünitesine ve yardımcı güç kaynağı olarak 1.5kW'lık batarya grubuna sahiptir. Aracın motor sistemi ve diğer elektriksel donanımları için gereken enerji hidrojen kullanan yakıt pilinden sağlanmaktadır. Bataryalar maksimum 360 watt güç verebilen güneş panelleriyle şarj edilebilmektedir. Yolcu aracı çoğunlukla yakıt pili ünitesinde üretilen elektrik enerjisini kullanmaktadır. Fakat yakıt pili haricinde bataryaların da kullanıldığı bazı özel durumlar mevcuttur. Yakıt pili tarafından sağlanan enerji düşerse veya elektrik motoru 2kW'tan daha fazla bir enerjiye ihtiyaç duyarsa bataryalar ve yakıt pili birlikte enerji sağlamaktadır. Bu sayede yakıt pili yığnında oluşabilecek hasarların önüne geçilmiş olunur. Aksi halde yakıt pili yığını aşırı ısınarak tamir edilemez arızalar oluşabilir. Yakıt pili ünitesi 17 bar basınç altında toplam 5400 sl (%99.99 saflıkta) hidrojen gazı depolayabilen 6 adet metal hidrür tank ile desteklenmektedir.

Bu uygulama projesinden elde edilen gerçek veriler MATLAB ortamında oluşturulmuş modelin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Projede kullanılan yakıt pilinin modeli durum uzay denklemleri kullanılarak, güneş panellerinin modeli ise bir çeşit iterasyon yöntemi olan Newton Raphson yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur.

ABSTRACT

Passenger carts, commonly used in airports and public sites to facilitate the movement of elderly and disabled people, are generally powered by battery packs which feature a long recharging time. FC Passenger Cart prototype demonstrates that hydrogen fuel cells can be advantageously integrated into such vehicles. It is hoped to encourage the development of this successful concept by automotive companies.

The energy density is very important point for automotive industry due to limited free space to mount main power units on vehicles. In this case, the fuel cell system has some important advantages to get over that issue and increase road range without refueling and efficiency of electric vehicles. Accordingly, the fuel cell system can be used as a main power unit beside batteries and solar panels to increase power capability per volume and battery life in electric vehicles.

In this project, the passenger cart has 2 kW FC unit as main electrical source and also has 1.5 kW battery group as auxiliary power unit. The fuel cell unit generates electricity from the hydrogen for electrical motor and other electrical equipments of cart. Batteries can be charged by plug-in or 360 W solar panels. The passenger cart mostly uses electrical energy comes from the FC unit. But there are some special conditions to use battery group apart from FC. If the energy generated by FC drops or motor needs power instantly or more than 2 Kw, the battery group supplies the electrical motor together with FC unit. So damage to Fuel Cell Stack is prevented by means of battery group. Otherwise, it can causes excessive heat and unrepairable damage on the Fuel Cell Stack. The fuel cell unit is supplied by six metal hydride canisters that can store 5400 standard liters hydrogen gas (%99.99 purity) at 17 bar.

Real time results which were obtained from hybrid car project have been compared with the simulation results of MATLAB model. The fuel cell model of the project is created by using State – Space Method and the solar array model of the project is created by using Newton Raphson Method which is a kind of iteration.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında hibrid yakıt pilli elektrikli bir araç (Fuel Cell Hybrid Vehicle – FCHV) uygulaması yapılmıştır. Bu uygulama sayesinde elde edilen gerçek veriler, bilgisayar ortamında MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuş sisteme ait modelin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu sayede sistem bileşenlerinin farklı koşullardaki yükler altında nasıl tepki gösterdiği analiz edilmiş ve bilgisayar ortamında bunun gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Bu model oluşturulurken durum uzay modeli de (State – Space Model) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tez çalışmasında çeşitli bilimsel makale ve araştırmalarda incelenmiştir. Dünyadaki çeşitli hibrid yakıt pilli araç projelerinde uygulanan farklı yöntemler hakkında bilgi edinilmiştir. Bu araştırma makaleleri aşağıda numaralandırılmış konu açıklamalarıyla ve tezin kaynaklar bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

Zhi-ling vd. (2010) ve Ning vd. (2009), elektrikli bir araçta yakıt pili ve batarya sisteminin ortak kullanımı sırasında güç dağılımını izlemiş ve sistemin MATLAB/Simulink yazılımı ortamında modelini oluşturmuştur. Batarya şarj ve deşarjı SOC metodu kullanılarak modellenmiştir. Li vd.’nin (2009), çalışmasında ise yakıt pili ve Ni-Mh batarya kullanan elektrikli aracın bulanık mantık (Fuzzy Logic) yöntemiyle güç yönetimi esas alınmıştır. Geri kazanımlı frenleme (regenerative breaking) yönetimi içinde bulanık mantık kullanılmıştır. Cho vd.’nin (2004) çalışmasında yeni bir güç kontrol stratejisi kullanılarak modellenen hibrit yakıt pilli aracın, yarı hibrit ve hibrit olmayan yakıt pilli araçlara göre enerji verimliliği karşılaştırılmıştır. Meintz vd.’nin (2009) çalışmasında ise yakıt pilli ve plug-in elektrikli bir aracın Powertrain System Analysis Toolkit (PSAT) yazılımı ile gelişmiş kontrol stratejisi modellenmiştir. Bu sayede araç menzillerindeki değişim gözlemlenmiştir. Qiuli vd.’nin (2005) çalışmasında araçlar için PEM yakıt pili güç sisteminin gelişmiş lineer olmayan dinamik modeli ve kontrolü araştırılmıştır. Mauldin vd.’nin (2006) çalışmasında uygulamalı olarak yapılan yakıt pilli ve batarya sistemli araç projesinde iki enerji kaynağının farklı süre ve yüklerde verdikleri tepkiler araştırılmıştır. Bu bakımdan yapılan araştırma tez ile aynı paralelliktedir. İkinci yakın bir çalışma ise Alam vd.’nin (2006) çalışmasıdır. Bu makalede yine yakıt pili ve batarya (Li-on) sistemi kullanan bir golf aracının PSAT yazılımı ile sistem bileşenlerinin analizi yapılmıştır. Zhang vd.’nin (2009) çalışmasında ise merkezi bir kontrolör veya yönetim birimi olmadan “Agent – Based” olarak ifade edilen bir güç yönetimiyle sistemin otonom çalışması sağlanmıştır. Bu sayede yakıt pilinin sınırlarını zorlamayan, daha verimli ve optimum düzeyde çalışma hedeflenmiş ve yakıt pili ömrü de uzatılmıştır. Gerçek

zamanlı dijital simülatör (Real Time Digital Simulator – RTDS) kullanılarak Deng vd.’nin (2009) çalışmasında hibrit yakıt pilli bir aracın güç akış kontrol stratejisi oluşturulmuştur.

Bu tez çalışmasında yakıt pili ve güneş pilinin yapısı, çalışma sistemi ve bu teknolojilerin geçmişten günümüze gelişimi ve kullanım alanları anlatılmaktadır. Kitapçıkta tez çalışmasını yakından ilgilendiren elektrikli araç teknolojileri, kullanılan alt sistemler ve bunların geçmişten günümüze gelişimi de anlatılmaktadır. Ayrıca kitapçığın sonraki bölümünde tez çalışmasının asıl kısmını oluşturan hibrid yakıt pilli araç projesi uygulaması ve sonuçlar gelmektedir.

Bu kitapçığın birinci bölümünü tez çalışmasının giriş bölümü oluşturmaktadır. Burada kısa ve genel olarak tez çalışmasının konusu, yapılan çalışmalar, çalışmalarda kullanılan yöntemler, tezin amacı ve dünyada benzer uygulamalarla ilgili çeşitli literatür araştırmalarına değinilmiştir.

İkinci bölümde ise yakıt pili teknolojileri hakkında bilgi verilmiştir. Bu bölümde dünyada var olan çeşitli yakıt pili türleri, bunların çalışma prensipleri, yapıyı oluşturan bileşenleri, uygulama alanları ve geçmişten günümüze gelişimi hakkında bilgiler yer almaktadır.

Üçüncü bölümde ise güneş pili teknolojisi hakkında bilgi verilmiştir. Yine yakıt pilinde olduğu gibi bu bölümde de güneş pili türleri, çalışma prensibi, yapısı, uygulama alanları ve sağladığı bir takım avantajlara değinilmiştir.

Dördüncü bölümü ise elektrikli araç teknolojisi oluşturmaktadır. Bu bölümde geçmişten günümüze elektrikli araçların gelişimi, çeşitli elektrikli araç sistemleri, bu araçları oluşturan alt sistemler ve bunların özellikleri ile çalışma prensiplerine değinilmiştir.

Beşinci bölümde ise tez çalışmasının en önemli kısmını oluşturan hibrit yakıt pilli elektrikli araç uygulaması yer almaktadır. Bu bölümde ayrıntılı olarak aracın modifikasyon süreci anlatılmış, araç üzerinde kullanılan alt sistemler ve bunların özellikleri ile çalışma prensiplerine değinilmiştir. Ayrıca araçta bulunan bileşenlerin bütün halinde çalışma algoritması da verilmiştir. Bu yapılan uygulama sonunda gerçekleştirilen yol testleri ile araç üzerinden elde edilen gerçek veriler kaydedilmiştir. Araçtaki bir takım sistemlerin bilgisayar ortamında modeli oluşturularak simülasyonu yapılmış ve elde edilen sonuçlar gerçek verilerle bu bölümde karşılaştırılmıştır.

Son bölümü ise tez kitapçığının sonuç kısmı oluşturmaktadır. Bu son bölümde uygulamalı bir proje kapsamında yapılan tez çalışmasının sonunda elde edilen veriler ışığında yapılan değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİ

2.1 Giriş

Günümüzde dünya nüfusundaki artış ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacındaki yükseliş, alternatif yakıtlara daha fazla önem verilmesine ve buna bağlı olarak daha fazla zaman ve para harcanmasına neden olmaktadır. Var olan fosil yakıt kaynaklarının ortalama 100 yıllık bir ömrü kaldığı düşünüldüğünde, verilen önemin artmasının normal olduğu görülmektedir. İnsanoğlunun enerjiyi değerlendirme seçeneklerinin en önemlilerinden biri “Elektrik Enerjisi” şeklindedir. Günümüzde güneş, hidrolik, rüzgar, nükleer, dalga, jeotermik, hidrojen ve biyokütle gibi yeni-temiz-yenilenebilir enerji kaynaklarına, elektrik üretimi için, artan bir ilgi bulunmaktadır. Bu kaynaklar yeni enerji teknolojisi kapsamında, çeşitli enerji dönüşüm yöntem ve/veya sistemleri ile değerlendirilmektedir. Bu kapsamda yakıt pilleri sahip olduğu pek çok olumlu özellik ile ön plana çıkmaktadır.

2.2 Yakıt Pili Nedir?

Yakıt pili sisteme dışarıdan sağlanan yakıt ve elektro kimyasal reaksiyonun ger-çekleşmesi için gerekli olan oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır (Büyüktür, A.R.).

Yakıt pillerinin ;

- Yüksek dönüşüm verimliliği,(kimyasal enerjiyi, elektrik enerjisine çevirirken...)
- Çevresel kirlilik oranının düşük olması,
- Sessiz çalışmaları,
- Farklı yakıt kullanım olanakları,
- Güvenilir ve uzun ömürlü olması,

gibi avantajları yanı sıra,

- Üretim ve araştırmaların pahalı olması,
- Gelişimleri için yüksek teknoloji ihtiyacı,
- Seri üretimlerinin henüz gerçekleştirilememiş olması,
- Ömürlerinin içindeki maddelere bağlı olması,

gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır.

2.3 Yakıt Pili Tarihi

Yakıt pili, tarihi çok eski tarihlere dayanmasına rağmen ilk kullanımı 1958 yılında NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde yakıt olarak kullanılmasına dayanmaktadır.

1838 – İlk yakıt pili çalışmaları Sir William Grove tarafından H₂-O₂ pili üzerinde yapılmıştır. Yaptığı çalışmalar sırasında suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda sabit akım ve gücün üretildiğini fark eden Grove, böylece tesadüfen çok büyük bir buluş gerçekleştirmiştir.

1893 – Friedrich Wilhelm Ostwald, yakıt pili içindeki her elemanın yakıt pili çalışmasındaki görevini ve etkisini araştırmıştır.

1896 – William W. Jacques, eriyik elektrolitli yakıt pillerinin temelini atmıştır. Kömürün elektro kimyasal enerjisinden doğrudan elektrik üretmeyi amaçlamıştır.

1937 – Emil Baur, 1900 yılında, ünlü bilim adamı Nerst'in başlattığı katı oksit elektrolit ile çalışan yakıt hücresi projesinin başarıya ulaşmasını sağlamıştır.

1939 – Belki de yakıt pilinin günümüzdeki yere gelmesini sağlayan en önemli çalışma Thomas Bacon tarafından alkalın yakıt pilleri üzerinde yapılan çalışmalar olmuştur. Bu çalışmanın önemini anlayan Pratt&Whitney şirketi bu projeye lisans vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır.

1950 – Uzay çalışmaları yarışı ile yakıt pillerine ilgi arttı.

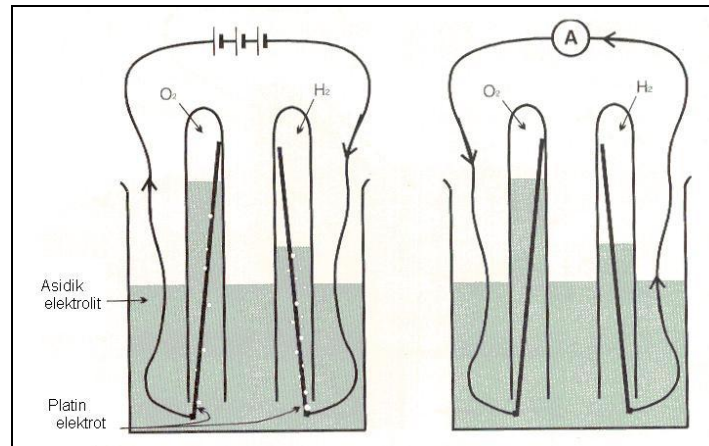
1958 – NASA H₂-O₂ pilini uzay araçlarında kullanmaya başladı.

1980 – Petrol krizleri sonrası hidrojen ve hidrojenli yakıt pilleri önem kazandı.

2000'li yıllar – Kullanım seçeneklerinin arttırılması, maliyetlerin düşürülmesi, yaygın kullanıma geçilmesi, teknoloji geliştirme çalışmaları yoğun olarak sürüyor.

2.4 Yakıt Pillerinin Genel Yapısı ve Temel Prensibi

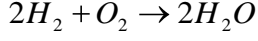
Hidrojen pillerinin çalışması temel olarak elektrolizin ters çalışması olarak algılanabilir.



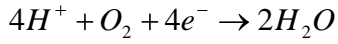
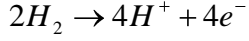
Şekil 2.1 Elektroliz ve yakıt pilinin karşılaştırmalı prensibi

Şekil 2.1 de solda elektroliz işlemi gözükmektedir. Bu şekilde bir ampermetre bağlandığında bir süre sonra ampermetrenin saptığı görülür.

Çalışma Prensibi:

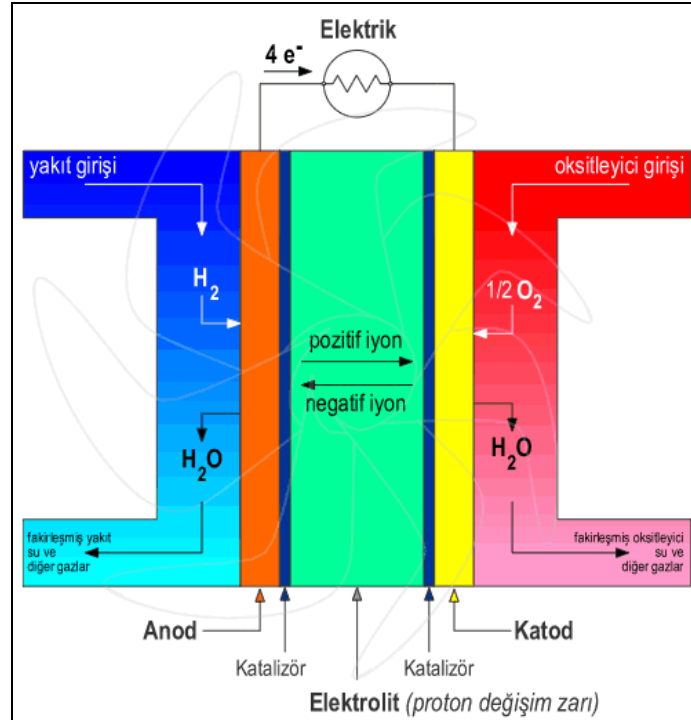


Bu tepkimenin yarı tepkimeleri;



şeklindedir.

Burada ilk problem hidrojen gazının iyonlaştırılmasında yaşanıyor. Bunun için uzun araştırmalar sonucu en uygun malzemenin platin olduğu görülmüştür. Hidrojen pilinin temel prensibi hidrojenin iyonlaştırılmasından sonra açığa çıkan elektronların kablo yardımıyla bir motor üzerinden geçirilerek enerjileri kullanıldıktan sonra Proton Exchange Membrane (PEM) ' den geçen H^+ iyonu, O_2 ve e^- larla birleşerek su oluşturur. İkinci problem elektronların kabloya ulaşmasında yaşanır. Bunu gidermek için iyi bir iletken olan karbon (C) kullanılır. Karbonun tanecikli yapısı sayesinde H^+ iyonunun PEM ' e ulaşması engellenmemiş olur.



Şekil 2.2 Yakıt hücrelerinin genel gösterimi

Şekil 2.2'deki olayların gerçekleşebilmesi için karbon ve platin tozundan oluşturulmuş bir katalizör (catalyst) kullanılır. Bu yüzeyin önünde yine H_2 geçişini ve elektrik akımı oluşumunu kolaylaştırmak için geçirgen bir karbon tabaka kullanılır. Bu tabaka GDL (Gas Diffusion Layer) adını alır.

2 GDL, 2 catalyst ve 1 PEM ' in birleşmesiyle oluşan gruba MEA (Membrane Electrode Assembly) adı verilir. Bu parçalar ayrı olarak alındığı sıcak presle birleştirilmesi gerekmektedir. 1 adet yakıt pili ile yaklaşık 0,7 V gerilim elde edilebilmektedir. Bunu arttırabilmek için pillerin seri bağlanması gerekmektedir. Kablolarla yapılan bağlantı direnci arttırdığından bir pilin anodu ile diğerinin katodunun birleştiği iki kutuplu plakalar (bipolar plate) mevcuttur.

2.5 Yakıt Pili Çeşitleri

Yeni enerji teknolojisi kapsamında, çeşitli enerji dönüşüm yöntem ve/veya sistemleri içinde yakıt pilleri sahip olduğu pek çok olumlu özellik ile ön plana çıkmaktadır. Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin bileşimine, yakıtın dolaylı veya direk yoldan verilmesine, kullanılan elektrot ve elektrolit cinsine, operasyon sıcaklığına bağlı olarak, yakıt pilleri 6 grupta toplanabilir (Büyüktür, A.R.).

Çizelge 2.1 Yakıt pili çeşitleri

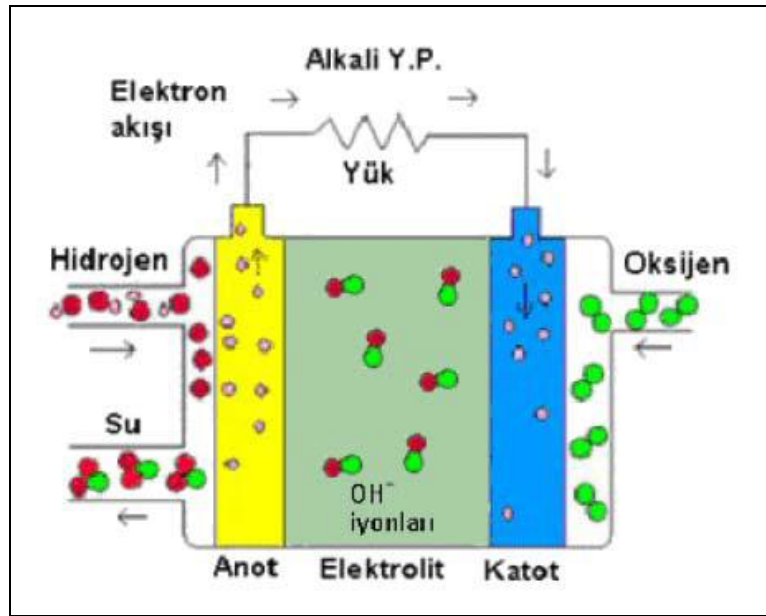
Yakıt Pili Çeşidi	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı, $^{\circ}C$
Alkali Yakıt Pili (AFC)	KOH	50- 90
Proton Değiştiren Membranlı Yakıt Pili (PEM)	Polimer	0- 125
Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)	Sülfürik Asit veya Polimer	50- 120
Fosforik Asit Yakıt Pili (PAFC)	Orto Fosforik Asit	190- 210
Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)	Li/ K Karbonat karışımı	630- 650
Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)	Stabilize Zirkonyum	900- 1000

2.5.1 Alkali Yakıt Pili (AFC)

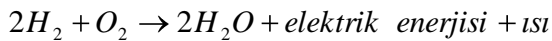
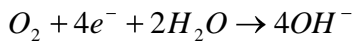
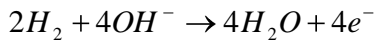
1960 yıllarında üreilmeye başlayan alkalin yakıt hücreleri (AFC) ilk modern yakıt hücrelerinden bir tanesidir. Bu tarihte Apollo uzay mekiğinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılmıştır. Diğer yakıt hücrelerine kıyasla daha geniş ve esnek kullanım alanına sahiptirler ve O₂ ve H₂ iyi bir performans gösterirler (Büyüktür, A.R.).

2.5.1.1 Alkali Yakıt Pili Çalışma Prensipleri

AFC' in uzay uygulamalarında kullanılmasını 1930'lu yıllarda F.T Bacon tarafından yapılan çalışmaları temel alır. H₂ ve O₂ kullanarak 5 kW enerji üreten AFC' nin performans testleri 1952 yılında tamamlanmıştır. Bacon tarafından geliştirilen AFC 200-240°C sıcaklıklarda %45 KOH (potasyum hidroksit) ile çalışıyordu. Bununla birlikte elektroliti kaynamadan korumak için 40-55 atm basınç sağlanıyordu. Bu yüksek sıcaklık ve basınca rağmen yakıt hücresinin performansı oldukça iyi bir mertebeydi (800 mA/cm² de 0.78 volt).



Şekil 2.3 Alkali yakıt pili şematik çalışma prensibi



Bir çok yakıt hücresi dizaynında, oluşan ısıyı ve suyu uzaklaştırmak için elektrolit sirkülasyon yaptırılır (mobil elektrolit). Yüksek Alkalin hidroksit taşıma kapasitesine sahip olması nedeni ile KOH tercih edilir.

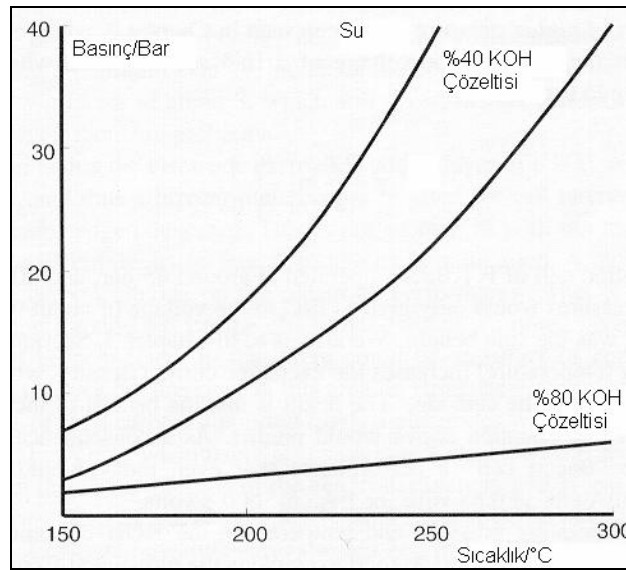
Yüksek sıcaklıklarda (260°C) çalışan bir AFC' in elektrolit sıvısı kütle olarak %85 KOH içerirken, düşük sıcaklıklarda (<120°C) çalışan AFC elektroliti (%35-55) KOH içerir. Elektrolit genellikle asbestostan imal edilmiş matris içerisinde tutulurlar. Elektro katalizör olarak çok çeşitli malzeme kullanılabilir.(Ni, Ag, metal oksit, asal elementler).

AFC 'in performansı 1960'dan bu yana birçok değişim geçirmiştir. İlk AFC'ler istenen gücü elde etmek için görece olarak yüksek sıcaklık ve basınçta çalışıyorlardı. Yeni teknolojilere bağlı olarak geliştirilen AFC'lerde çevre koşullarındaki hava oksidant olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu sayede AFC daha ucuza mal edilmektedir.

AFC içerisinde daha hızlı bir reaksiyonun meydana gelmesi için sistem 100°C sıcaklıktan daha fazla sıcaklıkta ve yüksek basınçta çalıştırılır. Bu durumda voltaj;

$$V_p (mV) = 0,15T \log \frac{P_2}{P_1}$$

ifade edilebilir. Burada P2 ve P1 farklı basınçlardır.



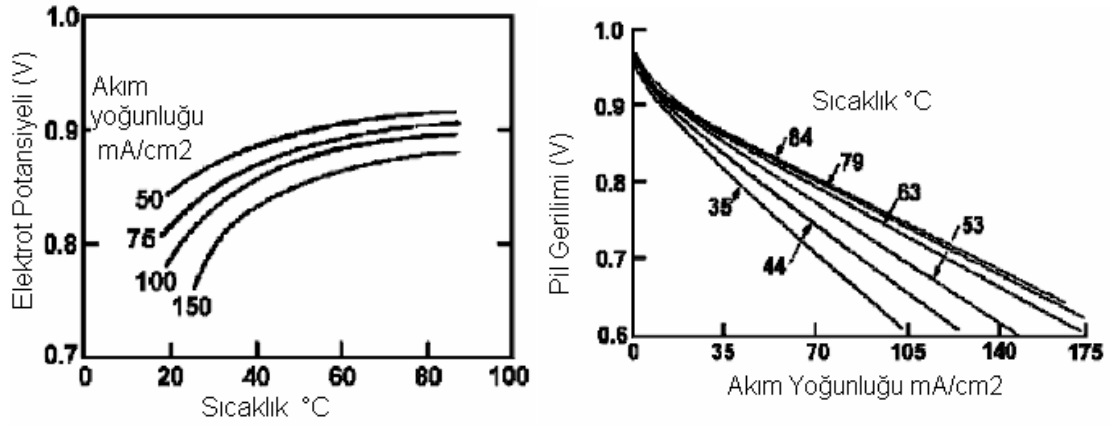
Şekil 2.4 Alkali yakıt pillerinde basınç etkisi

AFC' de sıcaklığın yükselmesi AFC içerisinde aktivasyonu, kütle transferini iyileştirir ve dirençten doğacak kayıpları azaltır. Bu durumda AFC' in performansı yükselir. Bu durum;

$$V_i (mV) = 4.0(T_2 - T_1) \quad T < 63^\circ C \text{ için veya}$$

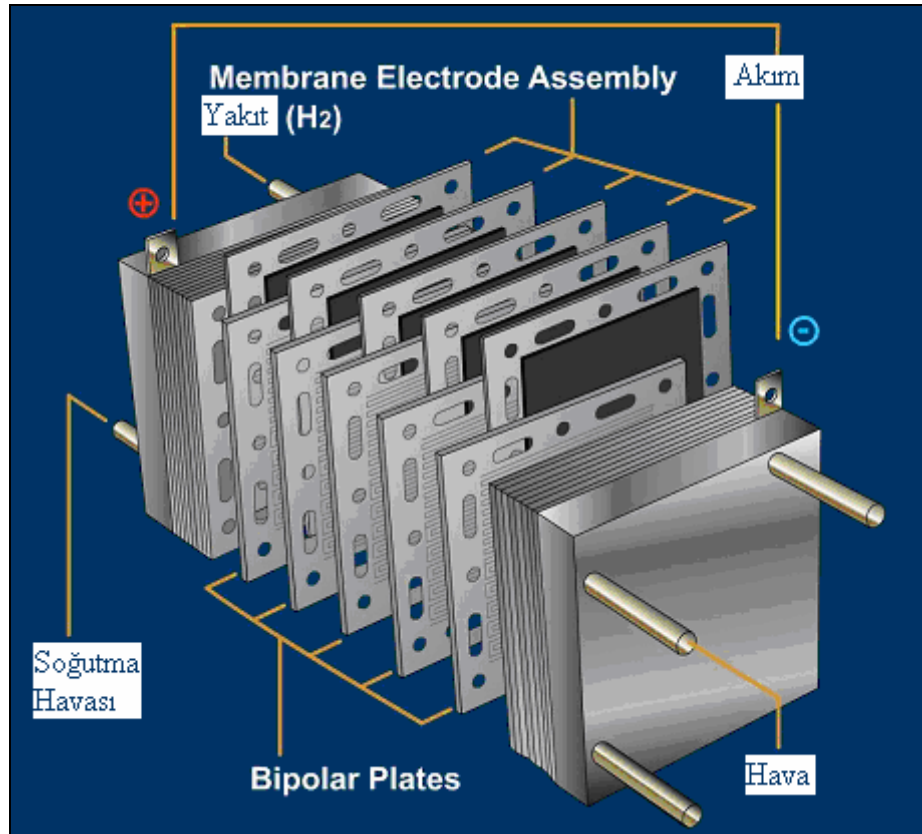
$$V_i (mV) = 0.7(T_2 - T_1) \quad T < 63^\circ C$$

şeklinde formüle edilebilir (Büyüktür, A.R.).



Şekil 2.5 Alkali yakıt pillerinde sıcaklık etkisi

2.5.2 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PEM)



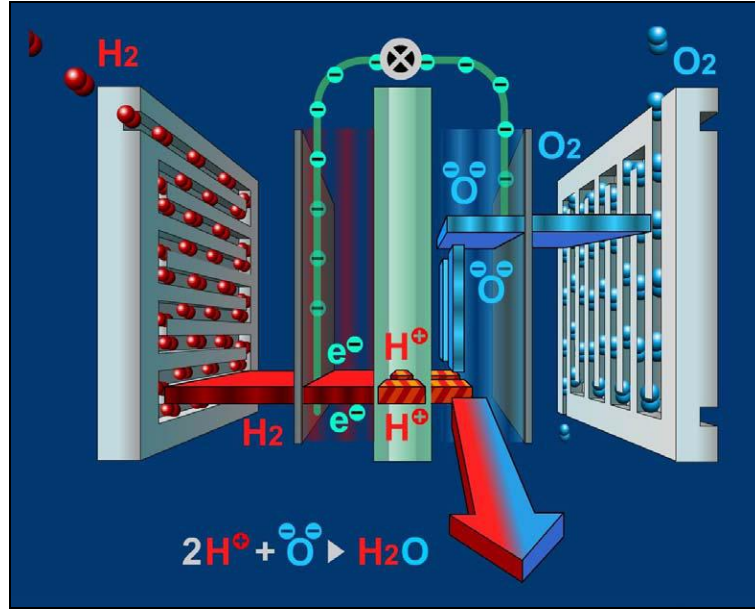
Şekil 2.6 Proton değişim membranlı yakıt pili

PEM tipi yakıt pilleri göreceli olarak daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek güç yoğunluğu ile çalıştırılır. Çıkış güçlerinin gerekli güç miktarına göre ayarlanabilir olması, özellikle hızlı devreye alma işlemi gerektiren araç uygulamaları ve küçük uygulamalarda önemli avantaj sağlamaktadır. Özellikle, bu yakıt pilleri hafif araç uygulamaları, binalar ve küçük

uygulamalarda yeniden şarj edilebilen pillere alternatif olarak düşünülmektedir. Çıkış güçleri genellikle 50 W ile 250 kW arasında değişmektedir.

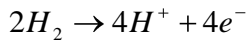
PEM tipi yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Bu yakıt pilinde pilin elektrolit malzemesi perflourosülfonik asit gibi hidrojen iyonunu (proton) geçirebilen polimerik yapıdadır. Korozyon ile ısı, hava, su ve güç şartlandırma yönetimi problemlerinin indirgenmesi açısından, katı elektrolit kullanımı bir avantajdır (TÜBİTAK, 2004)

2.5.2.1 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi

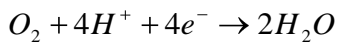


Şekil 2.7 Proton değişim membranlı yakıt pilinin şematik çalışma prensibi

Anot ve katot olarak, gözenekli karbona emdirilmiş platin gibi yüksek elektrokimyasal reaksiyon aktivesi sağlayan katalizörler kullanılmaktadır. Bu katalizör üzerinde anotta hidrojen gazı hidrojen iyonuna dönüşür.

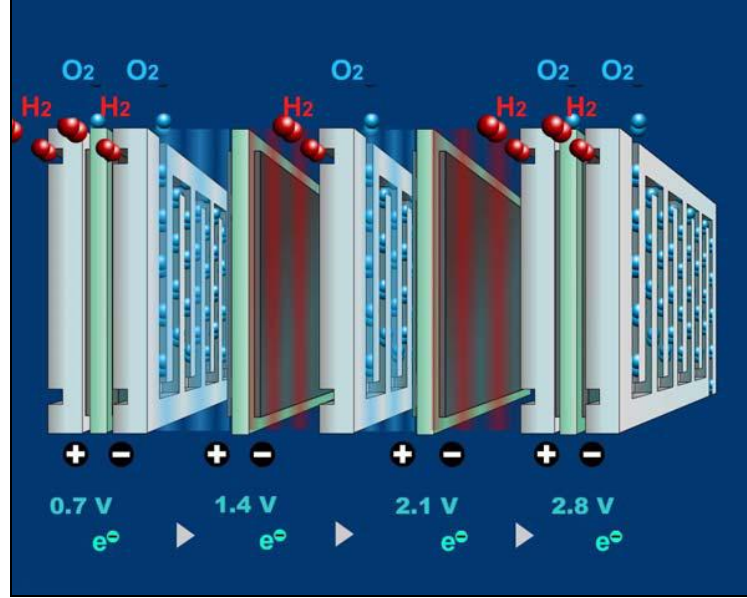


Elektronlar dış devreden elektrik olarak akarken, proton (H⁺) iyonları polimer elektrolit üzerinden katoda ulaşır. Katot tarafında havanın içindeki oksijen polimer elektrolitten geçerek gelen proton ve dış devreyi tamamlayan elektronla birleşerek su oluşturur.



PEM yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 80 ile 120°C arasında değişmektedir. Bu yakıt pilinde, 0.7 Volt gerilimde 600 mili amper/cm² elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Kullanılır gerilim

ve akım değerlerine ulaşabilmek için piller seri ve paralel olarak bağlanarak yakıt pili modülü oluşturulur. Reaksiyonlardan da görüldüğü gibi bu tip yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır. Ancak hidrokarbon yakıtlar, yakıt dönüştürücü adını verdiğimiz sistemlerde hidrojene dönüştürülerek kullanılabilirlerdir.



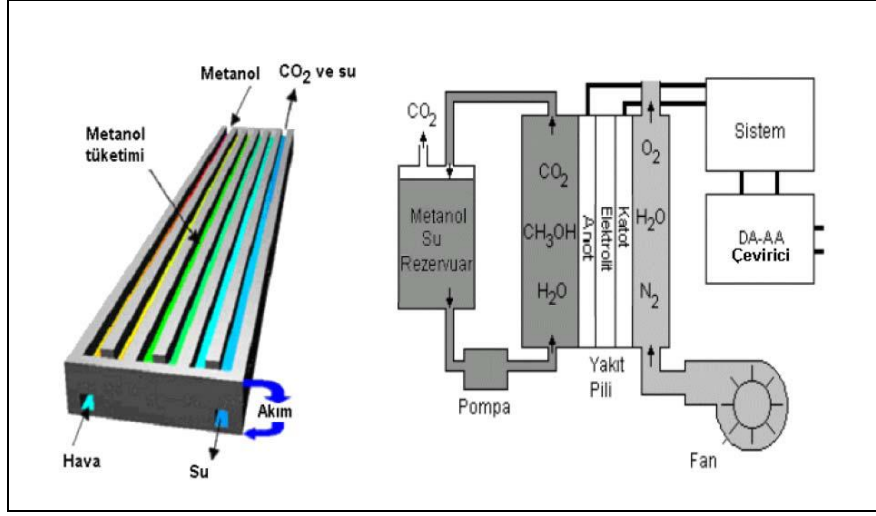
Şekil 2.8 Seri bağlanmış yakıt hücreleri

PEM yakıt pilleri yakıtla beraber gelen safsızlıklara özellikle karbon monoksit ve kükürt bileşiklerine karşı son derece hassastır. Bu nedenle, yakıt piline beslenecek yakıttaki CO ve kükürt bileşenlerinin uzaklaştırılması zorunludur. Karbon monoksit, alümina gibi seçici katalitik yüzeylerde oksijen (veya hava) kullanılarak uzaklaştırılabildiği gibi hidrojenin seçici membranlar kullanılarak karışımdan süzme yoluyla da uzaklaştırılabilir. Kükürt gidermek içinse çinko ve molibden oksit gibi katalizörler içeren kükürt ayrıştırıcılar kullanılır (TÜBİTAK, 2004).

2.5.3 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC)

Polimer membran elektrolit kullanılması nedeniyle PEM yakıt pilleri ile benzerlik göstermektedirler. DMFC'ni PEM yakıt pillerinden ayıran en önemli özellik yakıt dönüştürücü gereksizdir metanol / etanolün doğrudan yakıt olarak kullanılabilmesidir. Metanol anotta meydana gelen reaksiyon sonucu hidrojen açığa çıkarır ve yakıt pilinde bu hidrojen kullanılır. DMFC yakıt pili sistemleri yakıt dönüştürme alt sistemi içermediğinden diğer yakıt pillerine göre daha az karmaşık, daha hafif ve daha ucuzdur. Genellikle 120-190°C arası bir sıcaklıkta çalıştırılan bu yakıt pillerinin elektrik verimi %25-35 civarındadır.

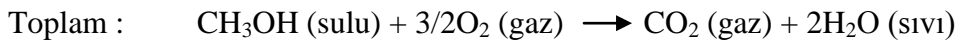
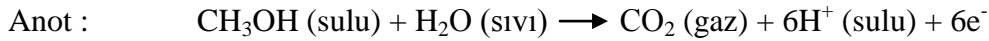
DMFC'leri özellikle askeri ve sivil amaçlı kullanılan küçük elektronik cihazların (cep telefonları ve diz üstü bilgisayarlar gibi) güç ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanmaktadır (TÜBİTAK, 2004).



Şekil 2.9 Doğrudan metanol kullanılan yakıt pillerin şematik çalışma prensibi

2.5.3.1 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi

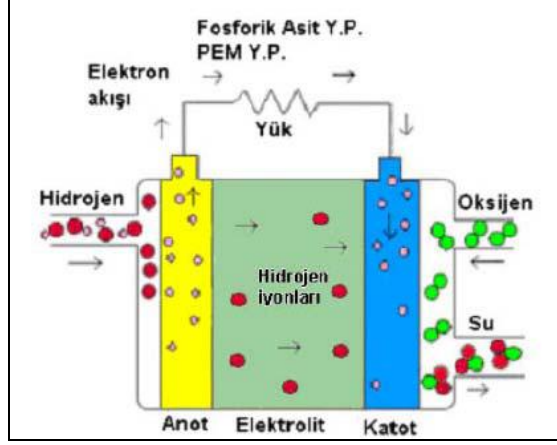
Şekil 2.9'da DMFC'nin çalışma prensibi gösterilmiştir. Yakıt pilinde teorik olarak gerçekleşmesi beklenen reaksiyonlar sırasıyla şu şekildedir; katot üzerinde oluşan su ile sisteme doğrudan beslenen metanol-su karışımı anot üzerinde elektrokimyasal bir reaksiyon meydana getirmekte ve ürün olarak metanolün parçalanması sonucunda protonlar, elektronlar ve karbon dioksit meydana gelmektedir. Oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip polimer elektrolit zardan geçerek katoda göç etmekte ve katot üzerinde, beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek su oluşumunu sağlamaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen termodinamik potansiyeller, iletken tel ile oluşturulan dış devrede gerilimin oluşmasına ve elektrik üretilmesine neden olmaktadır. Gerçekleşen reaksiyonlar;



Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili sırasıyla; anot, katot, sıvı elektrolit ve seçici geçirgenliğe sahip bir zar içermektedir. Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili

çalışmalarında en öncelikli sırayı, kullanılan zarın seçiciliği, elektrolit yapısı ve katalizör seçimi almaktadır (TÜBİTAK, 2004).

2.5.4 Fosforik Asit Yakıt Pilleri



Şekil 2.10 Fosforik asit yakıt pilinin şematik çalışma prensibi

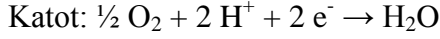
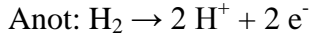
Fosforik asit yakıt pilleri hâlihazırda ticari olarak satılmaktadır. Hastaneler, oteller, ofis binaları, okullar, güç tesisleri, havaalanı terminalleri, atık geri kazanım ve arıtma tesisleri gibi birçok farklı alanda 200'den fazla fosforik asit yakıt pili tesisi kurulu bulunmaktadır. Fosforik asit yakıt pilleri %40'lara varan elektriksel verim değerlerine sahiptir. Toplam verim değeri ise kojenerasyon uygulamalarında % 85'lere ulaşmaktadır. Çalışma sıcaklıkları 300 ile 400°C arasındadır. Düşük sıcaklıklarda fosforik asit zayıf iyon iletkenliği sağlar. Anottaki platinin elektro-katalitik yapısının CO zehirlenme riski de önemli bir problemdir. Yakıt piline beslenen yakıtta %1.5 oranına kadar CO konsantrasyonuna müsaade edilebilmektedir. Bu yakıt pilinde elektrolit olarak ise sıvı fosforik asit matrisi kullanılır.

Fosforik asit yakıt pillerinin % 85'e varan yüksek verimliliğin yanısıra, saf olmayan hidrojeni yakıt olarak kullanabilmesi de önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, eğer yakıt olarak benzin ya da benzeri bir hidrokarbon kullanılacaksa yakıttaki kükürt mutlaka uzaklaştırılmalıdır.

Diğer yakıt pillerine göre düşük akım ve güç üretimi söz konusudur. Büyük hacim ve ağırlık da diğer bir dezavantajdır. Buna rağmen bu teknoloji yeterince gelişmiştir. Çıkış güçleri genellikle 200 W ile 1 MW arasında değişmektedir (TÜBİTAK, 2004). Şekil 2.10'da FAFC'nin çalışma prensibi gösterilmiştir.

2.5.4.1 Fosforik Asit Yakıt Pili'nin Çalışma Prensibi

PAFC lerin çalışma şekli PEM yakıt pillerine benzer. PAFC;



reaksiyonların oluştuğu anot ve katotla proton ileten elektrolitten meydana gelir. Reaksiyonlar yüksek oranda yayılmış elektro katalizör partiküllerin desteklediği karbon üzerinde meydana gelir. Elektrolit inorganik, 100 % yoğunlaştırılmış fosforik asittir.

Fosforik asit tek yaygın inorganik asit olup, yeterli termal stabilite, kimyasal ve elektro kimyasal stabilite ve az uçuculuk – 150°C üstünde – özelliklere sahip olduğundan elektrolit olarak seçilmiştir. En önemli özelliği ise CO₂ ye karşı dayanımı yüksektir. Daha sonra ONSI yakıt pili santralleri için elektrolit olarak fosforik asidi seçmiştir.

PAFC'ler gaz difüzyon elektrotları kullanırlar. 1960'larda PTFE zincirli platin kullanılırdı. Elektrotlardaki platin yükü 9 mg/cm² idi. Platin destekli karbon platin in yerini aldığından, karbona PTFE zinciri takılarak elektrot yapısı oluşturuldu. Karbon un fonksiyonları; Platini yayarak, katalizör maddeden iyi şekilde yararlanmayı sağlamaktadır. Elektrotlarda mikro gözenekler oluşturarak maksimum gaz difüzyonu sağlamaktadır. Katalizörün elektriksel iletkenliğini arttırmaktadır (Büyüktür, A.R.).

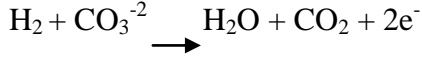
2.5.5 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (MCFC)

Erimiş karbonat yakıt hücreleri (MCFC), proton değiştiren membranlı yakıt hücresi (PEM) ve fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)'lerin sınırlı olan çalışma sıcaklıklarına alternatif olarak geliştirilmiş sistemlerdendir. Bu hücreler 600-650°C arasında çalışmakta olup yüksek verimliliklerinden dolayı diğer sistemler arasında çok önemli bir yer teşkil etmektedir (Büyüktür, A.R.).

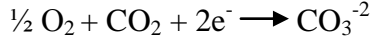
2.5.5.1 Erimiş Karbonat Yakıt Hücreleri Çalışma Prensibi

Bu tür yakıt hücreleri elektrolit olarak karbonat tuzlarını kullanırlar. Bunlar genellikle lityum ve potasyum ikili karışımları ya da lityum ve potasyum karbonatlarıdır. Karbonat tuzları 650°C gibi yüksek derecedeki bir sıcaklıkta sıvı hale geçerler ve CO₃⁻² karbonatıyla iyonik iletim sağlanmış olur.

Erimiş karbonat yakıt hücresinde anotta;



Katotta;



Toplam reaksiyon;

$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2$ (katot) = $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (anot) reaksiyonları gerçekleşmektedir.

Havanın içindeki oksijen ve karbondioksit hava elektrotu da denilen katoda beslenir. Burada karbonat (CO_3^{-2}) üretmek üzere bir dış devre ile sağlanan elektronlar oksijen ile reaksiyona girer. Oluşan CO_3^{-2} yakıt elektrotu da denilen anoda doğru hareket eder. Anoda beslenen yakıt içindeki H_2 , CO_3^{-2} ile reaksiyona girerek su oluşturur. Elektronlar katoda bir dış devre ile taşınır ve reaksiyonun tekrarlanmasıyla sürekli elektrik oluşumu sağlanır.

Değişik sıcaklık ve basınçta denge potansiyeli (E) ile standart potansiyel (E^0) arasındaki ilişki Nernst Denklemi ile ifade edilmektedir:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{\text{CO}_2,k}}{P_{\text{CO}_2,a}} \right)$$

a: anot

k: katot

E: denge potansiyeli

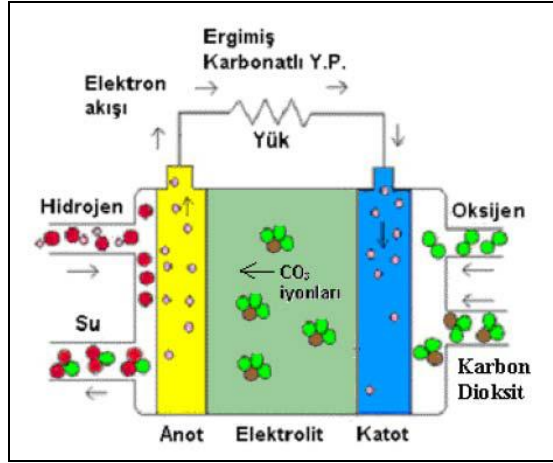
E^0 : standart potansiyel

P: gaz basıncı

R: gaz sabiti

T: sıcaklık

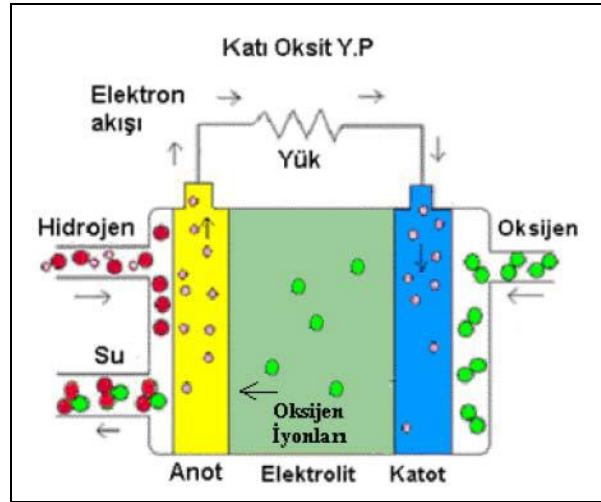
Erimiş karbonat yakıt hücresinin bileşimi ve bileşenlerin akış yönleri ayrıntılı olarak Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11 Erimiş karbonat yakıt pili şematik çalışma prensibi

2.5.6 Katı Oksit Yakıt Pili (SOFC)

Katı oksit yakıt pilleri büyük ve yüksek güç üretimi uygulamaları içeren endüstriyel ve büyük ölçekli merkezi elektrik üretimi istasyonları için kullanılabilir. Bazı üreticiler, SOFC'nin motorlu araçlarda ve yardımcı güç ünitelerinde kullanımını da mümkün görmektedirler. Elektrik verimi %50'lere varan SOFC'leri, kojenerasyon sistemlerinde kullandıklarında toplam verimleri %85'lere ulaşmaktadır. Avrupa ve Japonya'da 25 kW'dan 220 kW'a kadar farklı güçlerde prototipleri mevcuttur (TÜBİTAK, 2004).

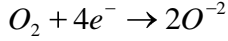


Şekil 2.12 Katı oksit yakıt pili şematik çalışma prensibi

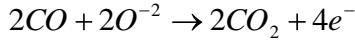
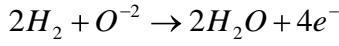
2.5.6.1 Katı Oksit Yakıt Pillerinin Çalışma Prensipleri

Bu yakıt pilinde elektrolit olarak genellikle zirkonyum oksit (ZrO_2) ile kararlaştırılmış itriyum oksit (Y_2O_3) gibi bir katı metal oksit kullanılmaktadır. Bu tür metal oksitler seramik olarak

ifade edildiğinden katı oksitli yakıt pilleri seramik yakıt pilleri olarak da bilinir. Anot, elektrik aktivasyonunu sağlayan nikel karıştırılmış zirkonyum seramiğinden, katot ise $\text{LaCo}_{1-x}\text{MnxO}_3$ ($x = 0.2 - 0.3$) veya LaSrMnO_3 gibi seramik malzemelerden üretilir. Elektrotlar seramik yüzeye ya mürekkep şeklinde uygulanıp, yüksek sıcaklıklarda fırınlanarak, ya da plazma (çok yüksek sıcaklıklı maddenin dördüncü hali) spreyi şeklinde püskürtülerek uygulanır. Oksijen atomu iyonize olduğundan anot tarafında herhangi bir hidrokarbon yakıtı kullanılabilir. Katotta dış devreden gelen elektronla oksijen iyonlaştırılır.



Oksijen iyonu seramik elektrolitten anot tarafına iletilir. Anotta yakıt oksijen iyonuyla birleşir, yanma gazları ve elektron açığa çıkar.



Elektron dış devreden katot tarafına aktarılır. Şekil 2.12'de SOFC'nin çalışma prensibi gösterilmiştir.

SOFC yakıt pilleri 700-1000°C arasındaki yüksek sıcaklıklarda çalışır. Bunun temel nedeni göreceli olarak daha büyük olan oksijen iyonunun katı seramikten yapılmış bir elektrolitten geçirme zorunluluğudur. Geçişini kolaylaştırmak için elektrolit levha mümkün olduğu kadar (50-70 mikron) ince tasarlanarak imal edilir. Çalışma basınçları düşük (atmosferik) veya yüksek olabilir. Bu tasarım şartlarında yakıt pili 0.78 V gerilimde 600 mili amper/cm² civarında elektrik enerjisi üretebilir.

Yüksek basınçta çalışan SOFC sistemlerin gaz türbinleri ile entegrasyonu sağlanarak toplam verim %70'lere kadar artırılabilir. Bu sistemlerin çalışma sıcaklıkları yüksek olduğundan kojenerasyon uygulamalarında kullanımları da daha kolaydır.

2.6 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması

Yakıt pili teknolojisi yüksek verimi ve modüler yapısıyla elektrik enerjisi üretiminde yeni bir dönem başlatacaktır. Yakıt pillerinin kömür dâhil her türlü yakıttan yakıt dönüştürme prosesleri kullanılarak yararlanabilme (hidrojence zengin gaz karışımı üretimi prosesleri) avantajı, birinci derece hidrokarbon yakıtlarının yakıt pilleriyle kullanılabilme olasılıklarını, içten yanmalı motorlara göre cazip kılmaktadır.

Yüksek kapasitede elektrik enerjisi üretimi için de yakıt pili santralleri konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Halihazırda 10 MW kapasiteli yakıt pili santralleri çalışmaktadır, ancak elektrik enerjisi üretim ağında yakıt pillerinin ağırlığını hissettirmesi belli bir zaman alacaktır (TÜBİTAK, 2004). Yakıt pillerinin temel özellikleri, avantajları, dezavantajları ve maliyetleri Çizelge 2.2 de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 Yakıt pillerinin karşılaştırması

Tablo 1.2 Yakıt pillerinin karşılaştırılması

	PolimerElektrolit Membranlı Yakıt Pili (PEMFC)	Doğrudan Metanol Yakıt Pili (DMFC)	Fosforik Asit Yakıt Pili (FAFC)	Ergimiş Karbonat Yakıt Pili (EKFC)	Katı Oksitli Yakıt Pili (SOFC)	Alkali Yakıt Pili (AFC)
Elektrolit	Perfluorin katı polimer İyon Değişim Membran	Perfluorin katı polimer İyon Değişim Membran	Konsantr H ₃ PO ₄ çözeltisi (95-98%)	Alkali karışımı, Ergimiş tuz (Li ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃)	Yttria Stabilize Seramik, ZrO ₂	Konsantr KOH çözeltisi (35-40 wt%)
Çalışma Sıcaklığı, °C	80 - 90	80 - 90	200 - 220	600 - 650	800 - 1,000	80 - 90
İyon	H ⁺		H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	OH ⁻
Elektrolit Durumu	Katı	Katı	Immobilize Sıvı	Immobilize Sıvı	Katı	Sıvı
Pil Donanımı	Karbon yada Metal Bazlı	Karbon yada Metal Bazlı	Grafit Bazlı	Paslanmaz Çelik	Seramik	Karbon Metal Bazlı yada
Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskitler	Pt-Pd
Koijenasyon Isı	Düşük kalite	Düşük kalite	Düşük kalite	Yüksek	Yüksek	-
Yakıt Pili Elektrik Verimi, %	40-45	25-35	40-45	50-60	50-60	55-60
Yakıt Pili Toplam Sistem Verimi, %						
Yakıt Kaynağı	Hidrojen yada yakıt dönüştürücü	Metanol	Hidrojen yada yakıt dönüştürücü	Seçilmiş bir yakıt yada yakıt dönüştürücü	Bütün yakıtlar, direkt besleme	Hidrojen yada NH ₃ parçalayıcı
Uygulama	Küçük üniteler, ulaşım araçları	Taşınabilir cihazlar	Güç üretim Tesisleri 50-200 kW.	Güç Üretim Tesisleri Mega W lar düzeyinde	Küçük ve büyük güç üretim tesisleri	Küçük üniteler, ulaşım araçları
Avantajlar	Düşük sıcaklık, ulaşım araçlarında çalıştırma imkanı, yüksek verim, kompleks ısı değiştirici gerekmemesi	yakıt dönüştürücü gerekmez, daha az karmaşık, daha hafif ve düşük maliyetli çalıştırma imkanı, düşük ısı gerektirmez	Düşük sıcaklıkta çalışma ve ulaşım imkanı	CO'e duyarlı değil en çok geliştirilen tür, gaz türbinlerle birlikte kullanılabilecek enerji ile yakıt iyileştirme	Isı enerjisi kaynağı, yüksek verim, hacim ve düşük ağırlık CO'e duyarlı değil	Yüksek verim, anot ve katotta platine gerek yok,
Dezavantajlar	Isı enerji kaynağı olarak kullanılmaz, CO'e duyarlı ve dinamik su kontrolü gerekli	Membran dan geçiş ve performans düşük	CO'e duyarlı ve H ₂ S seviyesinde ppm olmalı	Güç Üretim Tesisleri Mega W lar düzeyinde	Uzun sürede üretim, uzun sürede devreye alma ve çok ince seramik elektrolit üretimi	Sadece yakıt olarak saf hidrojen ve oksijen kullanımı
Maliyetler	4000-10.000\$/kW	8000\$/kW	2875\$/kW	10000-15000\$/kW	15000\$/kW civarında	500-1000\$/kW

2.7 Yakıt Pillerinde Verim ve Ekserji

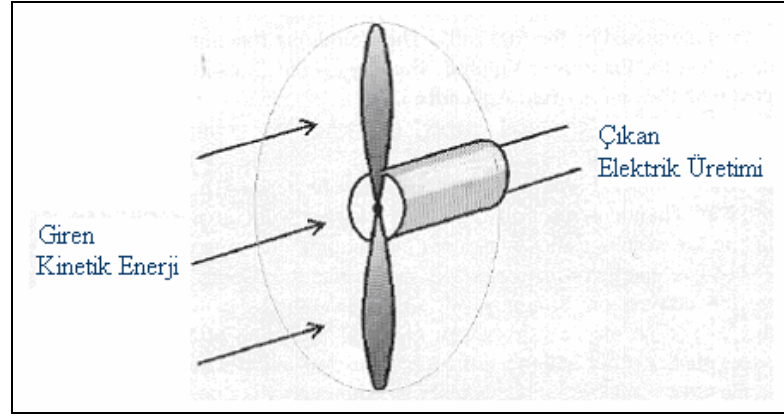
Yakıt pilleri genel olarak türbinli veya pistonlu içten yanmalı motorlardan daha verimlidir. Yakıt pillerinde en küçük sistemin verimi en büyük sistemin verimiyle aynı olabilmektedir. Bu özellik küçük yerel güç istasyonlarının kurulmasında çok önemlidir.

Yakıt pillerinin çok basit yapıları vardır. Diğer sistemlere bağlanması da kolaydır. Yakıt pillerinin temel yapısı da basittir. Bir yakıt pili sisteminin sadece birkaç hareketli parçası vardır. Bu yüzden ileride çok uzun süre dayanabilecek olan piller geliştirilebilecektir. Düşük emisyonlar; temel hücre reaksiyonuna baktığımızda, özde hidrojenin oksijenle birleşmesinin sonucunda sıfır emisyon oluşmaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlarda kaçınılmaz olan, kalıntıları ve üretimi çevreye zararlı olan bakım sarf malzemeleri yakıt pilleri için geçerli değildir. Fakat unutulmamalıdır ki, hidrojen üretimi sonucunda CO₂ gazı açığa çıkmaktadır. Yine de bu tür gazların üretiminin şehir merkezlerinde olmamasından dolayı en azından insan yoğunluğunun fazla olduğu yerler için önlem alınmış bulunmaktadır. Sessizdirler; bir yığın yardımcı ekipmana ve aksesuara rağmen yakıt pilleri çok sessizdir.

Çizelge 2.3 Değişik tip ve uygulamaya ait yakıt pillerinin uygulamalarını ve avantajlarını özetlenmesi.

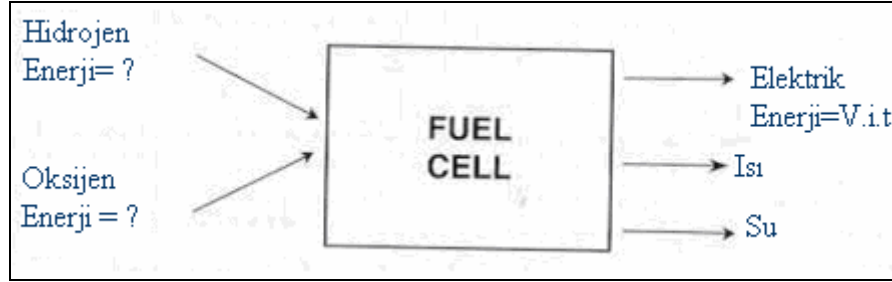
Uygulama Alanları	Taşınabilir Cihazlar						Büyük sistemler ve otobüsler	
Güç (W)	1	10	100	1k	10k	100k	1M	10M
Avantajlar	Yüksek enerji yoğunluğu ve kolay şarj olabilme			0 emisyon ve yüksek verim			Yüksek verim, çevre dostu	
Kullanılabilecek çeşit	PEMFC			ACF		MCFC		SOFC
				PAFC				

Çoğu güç üretim makinelerinin elektrik üretimini ne şekilde gerçekleştirdiğinin anlaşılması kolay olmaktadır. Buna en basit olarak aşağıdaki rüzgar türbini örneğini gösterebiliriz.



Şekil 2.13 Rüzgâr türbini

Yakıt pillerinde ise bu durumun anlaşılması örnekteki kadar kolay değildir. Aşağıdaki şekilde yakıt pilinin enerji ve kütle dengesi gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Yakıt pilinde girişler ve çıkışlar

Elektrik gücü ve enerji çıkışı aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\text{Güç} = I \times V \quad (2.1)$$

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

Burada bilinmeyen olarak H_2 , O_2 ve H_2O 'nun kimyasal enerjileri bulunmaktadır. Kimyasal enerji hesaplamaları yapılırken entalpi dışında Gibbs fonksiyonları kullanılmaktadır.

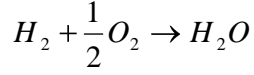
Maddelerin Gibbs fonksiyonunu hacim ve basınçtaki değişimleri ihmal ederek sistem dışında iş yapabilme potansiyeli olarak tanımlayabiliriz. Yakıt pili için dış iş değimi, dış bir devreyi dolaşan elektronlar tarafından yapılan ve pilin iç yapısı içinde kullanılmayan anlamında kullanılmaktadır.

Genel olarak yakıt pillerinde Gibbs fonksiyonları, kimyasal reaksiyonun potansiyelini belirlemek üzere reaksiyona giren ve çıkanların Gibbs fonksiyonları farkı ΔG_f şeklinde kullanılır. Bir kimyasal reaksiyon için bu eşitlik aşağıdaki gibi olur:

$$\Delta G_f = G_f \text{ ürünler} + G_f \text{ girenler} \quad (2.3)$$

Genellikle bu değerler mol başına olarak kullanılır. Yakıt pilindeki temel kimyasal reaksiyonu düşünürsek;

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ bu aşağıdaki denkleme denktir:



Buradan reaksiyonun Gibbs fonksiyonu eşitliğini yazarsak:

$$\Delta \bar{g}_f = \text{ürünlerin " } g_f \text{ " - girenlerin " } g_f \text{ " } = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{O_2} \quad (2.4)$$

Bununla birlikte maddelerin Gibbs fonksiyonu değerleri sıcaklıkla ve maddenin fazıyla değişmektedir.

Çizelge 2.4 Farklı sıcaklık ve fazda reaksiyonun Gibbs fonksiyonu farkları.

Çıkan Suyun Fazı	Sıcaklık (C)	Dgf kJ/mol
sıvı	25	-237,2
sıvı	80	-228,2
gaz	80	-226,1
gaz	100	-225,2
gaz	200	-220,4
gaz	400	-210,3
gaz	600	-199,6
gaz	800	-188,6
gaz	1000	-177,4

Çizelgedeki negatif değerler reaksiyon sonucunda enerji açığa çıktığını göstermektedir. Eğer yakıt pilinde kayıp yoksa yani süreç tersinirse reaksiyonun Gibbs fonksiyonu toplamı tam olarak elektrik enerjisine dönüşür. Bu özellik pillerin teorik açık devre gerilimlerini bulmak için kullanılır.

Hidrojen kaynaklı iki elektronun yer değiştirdiği pil reaksiyonunda elektrik yükü eşitliği aşağıdaki gibi olur:

$$-2Ne \rightarrow -2F \text{ Coulombs}$$

Burada F Faraday sabiti veya bir mol elektronun yükü, $-e$ bir elektronun yükü, N Avagadro sayısıdır. Eğer E yakıt pilinin yüküyse, bu yükün devre üzerinde dolaşmasıyla yapılan elektrik işi aşağıdaki gibidir:

$$\text{Yapılan elektrik ısı} = \text{yük} \times \text{gerilim} = -2 F E \text{ Joules} \quad (2.5)$$

Eğer sistem tersinir çalışıyorsa, bu durumda yapılan elektrik işi reaksiyondaki Gibbs fonksiyonu farkı Δg_f 'e eşit olur;

$$\Delta \bar{g} = -2 F E \quad (2.6)$$

Bu eşitlik hidrojen yakıt pilinin açık devre gerilimini veya Elektro-Motor Kuvvetini (Electro-Motive Force/EMF) vermektedir.

Örneğin; 200 °C' ta çalışan bir hidrojen yakıt pilinde;

$$\Delta \bar{g}_f = -220 \text{ kJ} \text{ olmaktadır. Buradan,}$$

$$E = \frac{220000}{2 \times 96485} = 1.14 \text{ Volt} \quad \text{bulunur.}$$

Bulunan değer pilin tersinir çalıştığı düşünülen durumlar için geçerli olmaktadır. Bu değer, hidrojen yakıt pilinin potansiyelini görmek açısından değerlidir. Belirtilen sıcaklıkta bu değerden daha fazla gerilim elde etmek mümkün değildir (Büyüktür, A.R.).

2.7.1 Verim ve Verimin Limiti

Tersinirlik ve tersinmezlik ile verim limitini anlayabilmek için rüzgâr türbini örneğine geri dönersek; Türbin veriminin %100 verimde çalışabilmesi için türbin kanatlarının çizdiği çizgiden geçen ve hava akımını oluşturan bütün atomlar, tüm kinetik enerjilerini türbin miline

aktarmalıdır. Fakat bu durumda türbin kanatçıklarını geçen bütün atomların hareketsiz kalmaları gerekirdi. Bu durum imkânsız olduğundan %100 verimle çalışan türbin yapmak olanaksızdır. Carnot verimi ilkesine örnek verirsek;

400°C'de çalışan bir buhar türbininin çevrimini 50°C sıcaklıktaki kondenser ile tamamlayabiliyorsa bu durumda Carnot verimi;

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{675 - 325}{675} = 0.52 \quad \text{bulundu.} \quad (2.7)$$

Bu kullanılabilir enerji kaybı, özünde bütün termodinamik sistemlerin daha düşük sıcaklıktaki çevrelerine atık ısı vermek zorunda olmalarından kaynaklanmaktadır.

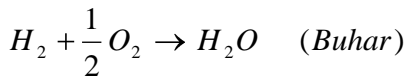
Hidrojen pili için genel verim tanımı aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{\text{Üretilen elektrik enerjisi}}{\text{Gibbs fonksiyonu değęişi}} \quad (2.8)$$

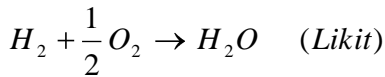
Yakıt pillerinde genellikle yanmaları sonucunda enerji veren maddeler kullanıldığından, üretilen elektrik enerjisini yakıtın yanması sonucu çıkabilecek enerjiyle karşılaştırılması yerinde olur. Bu enerjiye genellikle oluşum entalpisi $-\Delta h_f$ denilmektedir. Enerji çıkışı olan durumlarda $-\Delta h_f$ negatif olur. Buna göre denklemi tekrar yazarsak;

$$\frac{\text{Birim mol başaşı üretilen elektrik enerjisi}}{-\Delta \bar{h}_f} \quad \text{bulunur.} \quad (2.9)$$

Fakat hidrojenin yanması için buhar ve sıvı faz için olmak üzere iki adet $-\Delta h_f$ değeri vardır.



$$\Delta \bar{h}_f = -241.83 \text{ kJ / mol}$$



$$\Delta \bar{h}_f = -285.84 \text{ kJ / mol}$$

İki değerin farkı suyun molar buharlaşma entalpisini vermektedir. Daha yüksek durum üst ısıl değeri, daha düşük değeri alt ısıl değeri olarak tanımlanır. Alt ısıl değere göre yapılan

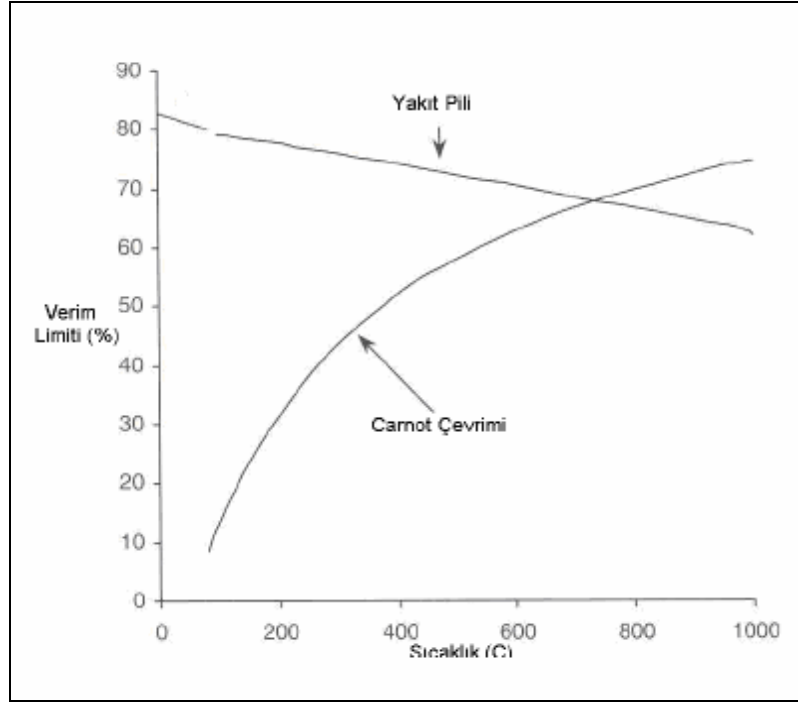
hesaplama daha yüksek çıkacağından verim ifadesinde hangi değerin kullanıldığı belirtilmelidir. Yakıt pilinden elde edilebilecek en büyük elektrik gücü Gibbs fonksiyonu değişimine eşit olduğundan verim eşitliği;

$$\text{Mümkün olan en yüksek verim} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \times \%100 \quad (2.10)$$

şeklini alır. Bu termodinamiksel verim olarak da bilinir. Buradan hesaplanan verim değerleri ve gerekli Gibbs fonksiyonu farkları çeşitli sıcaklıklar için aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 2.5 Δg_f , maksimum EMF ve verim limiti (HHV'e göre)

Üretilen Suyun Fazı	Sıcaklık (C)	Dgf (kJ/mol)	Maksimum EMK (V)	Verim Sınırı %
Sıvı	25	-237,7	1,23	83
Sıvı	80	-228,2	1,18	80
Gaz	100	-225,3	1,17	79
Gaz	200	-220,4	1,14	77
Gaz	400	-210,3	1,09	74
Gaz	600	-199,6	1,04	70
Gaz	800	-188,6	0,98	66
Gaz	1000	-177,4	0,92	62



Şekil 2.15 Maksimum hidrojen yakıt pili veriminin (HHV'e göre) Carnot makinesiyle karşılaştırılması. Carnot verimi (limiti) 50 °C'deki egzost sıcaklığına göre hesaplanmıştır

Çalışan bir yakıt pilinin verimi aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

$$\eta = \mu_f \frac{V}{1.48} \% 100 \quad (2.11)$$

Burada η yakıttan faydalanılabilme sayısı (yaklaşık 0.95) ve V ise tek bir yakıt pili modülünün gerilimidir.

Basınç ve reaksiyona girenlerin konsantrasyonu Gibbs fonksiyonu değişimini ve dolayısıyla elde edilen gerilimi etkiler. Bu, çeşitli biçimlerde yazılabilen Nernst denklemiyle ifade edilebilir. Örneğin reaksiyona girenlerin kısmi basınçları bar ve oluşan su gaz fazında ise denklem aşağıdaki gibi olur (Büyüktür, A.R.) :

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \left[\frac{P_{H_2} x P_{O_2}}{P_{H_2O}} \right] \quad (2.12)$$

2.7.2 Yakıt Pili ve Ekserji

Ekserji, enerjinin kalitesi olarak tanımlanabilir. İşe dönüştürülebilen enerji veya enerji kabiliyeti olarak da söylenebilir. Yakıtların yanma reaksiyonlarının toplam Gibbs fonksiyonu

potansiyel enerji yani ekserjiyi verir. Her proseste enerjinin korunumu geçerlidir fakat ekserjinin korunumu tersinir proseslerin dışında geçerli değildir. Gerçek sistemler de tersinmez olduklarından sahip olunan ekserji kısmi olarak entalpi sağlamada kullanılabilir.

Kimyasal ekserjiyi değerlendirirken (kimyasal kompozisyonu çevresinden farklı olarak ayrılan ekserji komponenti), sistemden ayrılan maddeler çevredeki stabil durumda bulunan uygun eş maddeleri ile karşılaştırılmazdır. Karşılıklı fiziksel veya kimyasal etkileşimlerden doğabilecek iş oluşumları ihtimalini hesaba katmamak için referans maddelerinin dengede karşılıklı denge halinde olmaları gereklidir. Fakat çevremizde böyle bir denge bulunmaz. Kimyasal ekserjiyi değerlendirmek üzere çeşitli öncü alternatif teoriler ortaya çıkarılmıştır. Çevre ortamını termodinamik düşünceden farklılaştırmak üzere ekserji referans çevresi ve termodinamik çevre tanımlamaları kullanılır. Bu yüzden kolaylık açısından standart kimyasal ekserji tanımlamaları, standart bir çevre kabulü üzerine kurulur.

Bir sistemin ekserjisi, termodinamik dengedeki yer değişimiyle ölçülür. Burada;

$$\partial G = V\partial P - S\partial T + \sum \mu_i \partial n_i \quad (2.13)$$

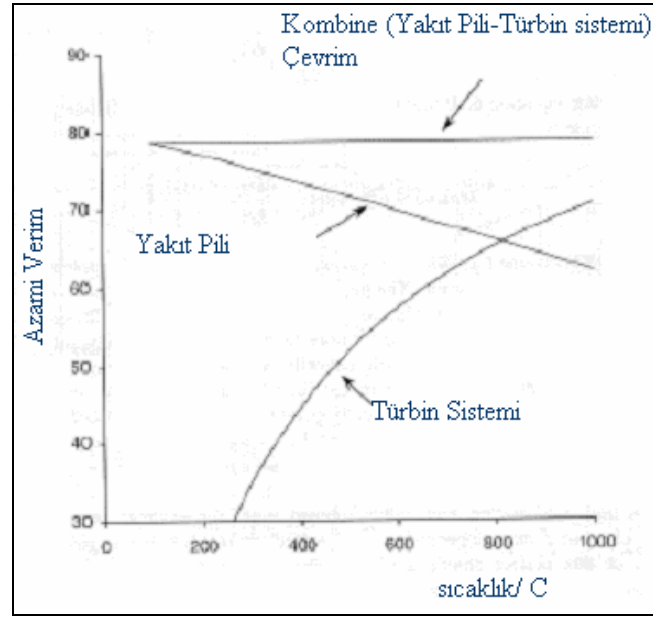
olarak yazılabilir. Denklemden, V hacim, P basınç, μ_i n adet molekülden oluşan i. kimyasal bileşenin kimyasal potansiyeli olmaktadır. Buradan, bir başlangıç ve referans durumları (alt indis 0) ile tanımlanan aralıkta çalışan bir sistemin ekserji değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$E = S(T - T_0) - V(P - P_0) - \sum n_i (\mu_i - \mu_0) \quad (2.14)$$

Burada ekserji E ile gösterilmiştir. T büyüdükçe ekserjinin artacağı görülmektedir.

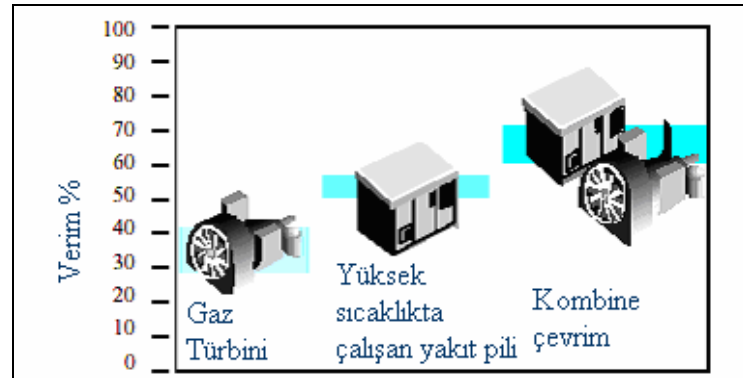
Aynı verimlilikte ve aynı güce sahip SOFC ve PEM sistemlerini ele alırsak, sistemlerde üretilen egzost akımlarının, entalpi kaynağı olan ısıları aynı büyüklükte olacaktır. Fakat SOFC tarafından üretilen gazın sıcaklığı dolayısıyla ekserjisi PEM yakıt pilinde üretilenden daha fazla olacaktır. Yani SOFC'den açığa çıkan ısı daha değerlidir. PEM'den çıkan ısı civarında 80°C sıcaklığa sahiptir ve sistem içinde ve dışında sınırlı kullanım alanı vardır. Bu ısı, ortam ısıtmasında veya örneğin bir absorpsiyonlu soğutma sisteminde kullanılabilir.

Diğer yandan SOFC tarafından üretilen ısı 1000 °C civarındayken diğer yakıt pillerine nazaran çok daha fazla değerlidir. Bu sıcaklıkta çalışan SOFC yakıt pili daha önce teorik verim ifadesinde belirtilen değere çok yaklaşabilmektedir. Yine de bu sıcaklıkta çalışan ısı makineleri de yaklaşık verimlerde çalıştıkları karşılaştırma yaparken unutulmamalıdır.



Şekil 2.16 Isı makinesi, yakıt pili ve birleşik yakıt pili/türbin sistemlerinin verim limitleri. Alt sıcaklık 100 °C'dir. Yakıt pili verimi HHV'e göredir

Özellikle işletme sıcaklığın yüksek olduğu sistemlerde ekserji kayıplarını en azda tutulması için ekserjisi yüksek akım kayıplarını ve özellikle birim ekserji maliyeti yüksek akımları önleyici tasarımlar yapılması uygun olacaktır (Büyüktür, A.R.).



Şekil 2.17 SOFC yakıt pilinin gaz türbiniyle beraber çalıştığı durumdaki enerji veriminin değişimi

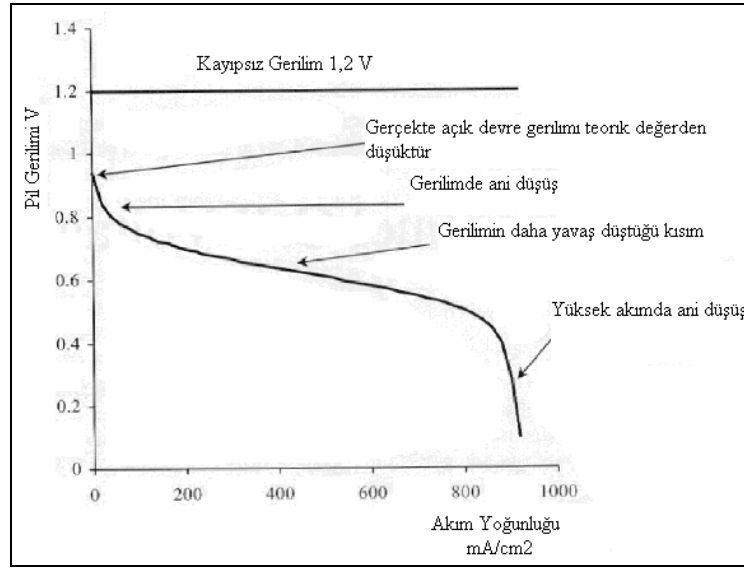
2.8 Yakıt Pillerinde İşletme Gerilimleri

Yakıt pillerinin açık devre voltajının formülünü;

$$E = \frac{-\Delta gf}{2F} \quad (2.15)$$

şeklindedir.

Bu 100°C civarında çalışan bir yakıt pilinden 1,2 V gerilim elde edilir. Fakat uygulamaya geldiğinde bu yaklaşık 0,7 V a düşer.



Şekil 2.18 40 °C de çalışan bir yakıt pilinin grafiği görülmektedir.

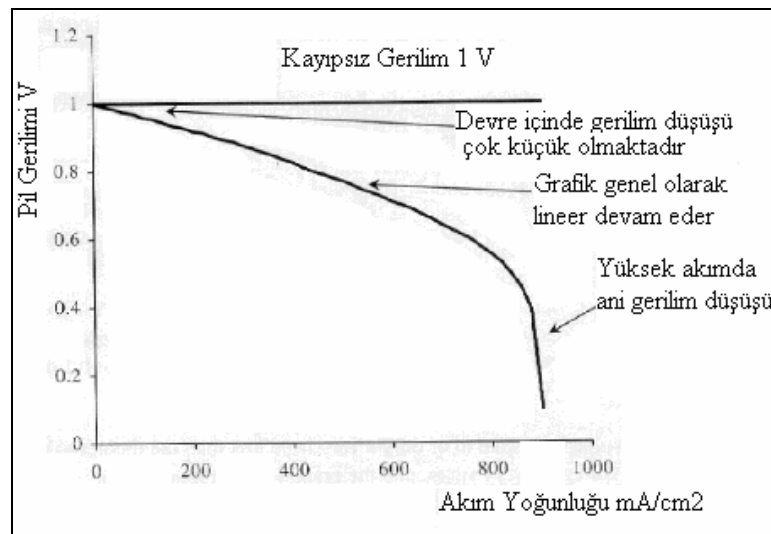
Şekil 2.18 de dikkat edilecek noktalar:

Açık devre voltajı kuramsal değerinin altındadır,

İlk başta ani bir düşüş vardır,

Daha sonra voltaj daha yavaş ve lineer olarak düşer,

Yüksek akım yoğunluğunda gerilim ani düşer.



Şekil 2.19 800 °C de çalışan bir yakıt pilinin grafiği görülmektedir.

Eğer bir yakıt pili yüksek sıcaklıklarda kullanılırsa bu Şekil 2.19 deki grafiğe benzer. teorik maksimum voltaj azalmasına rağmen gerçek voltajla bu değer arasındaki fark düşer. Baştaki düşüş bu durumda daha az olmaktadır. Şekil 2.19 bir katı oksit yakıt pilinin çalışmasını göstermektedir. Burada dikkat edilecek noktalar:

- Açık devre gerilimi kuramsal değere eşit veya çok az düşüktür.
- Başlangıçtaki düşüş çok azdır ve grafik daha lineerdir.

Bu iki grafik karşılaştırıldığında teorik voltajın sıcaklık yükseldikçe düştüğü görülür fakat işletme gerilimi daha yüksektir, çünkü voltaj kayıpları daha azdır (Larminie ve Dicks, 2000).

2.8.1 Yakıt Pili Tersinmezliği (Gerilim Düşüşünün Nedenleri)

Tersinmezlik yani kayıplar 4 temel nedenle olur:

Aktivasyon kayıpları: Bu kayıplar elektrotların yüzeylerindeki tepkimenin yavaşlığından kaynaklanır. Oluşan gerilimin bir kısmı elektroda elektron veren veya elektrottan elektrot alan kimyasal reaksiyona harcanır.

Yakıt kaçıışı ve iç akım: Bu enerji kaybının nedeni elektrolitten geçen yakıt ve elektronlardır. Normalde elektrolit sadece iyonları geçirmelidir fakat her zaman için yakıt difüzyonu ve elektrik akımı oluşur. Yakıt ve gerilim kaybı genelde çok etkili değildir fakat düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde açık devre gerilimini etkiler.

Direnç kayıpları: Burada gerilim kaybı malzemenin elektrik akımına olan direnci ile alakalıdır. Bu kayıp akım yoğunluğu ile orantılı olduğundan direnç ve ohm kaybı adını alır.

Konsantrasyon kaybı: Yakıt kullanıldıkça elektrot yüzeyindeki konsantrasyon azalır bu da gerilim kaybına neden olur (Larminie ve Dicks, 2000).

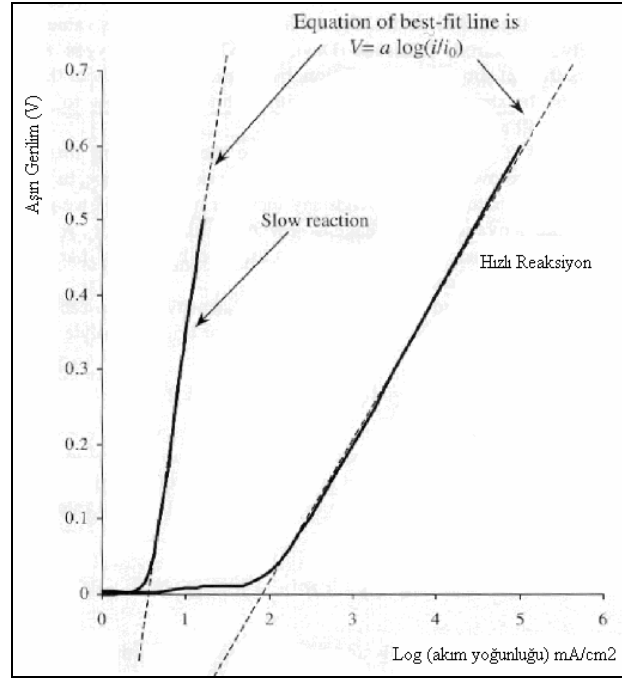
2.8.2 Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıplarının açıklanmasında kullanılan Tafel eşitliğinin incelenmesi ve açıklanması. Aktivasyon kayıplarını azaltmaya yönelik yöntemlerin incelenmesi.

2.8.2.1 Tafel Eşitliği

Yapılan deneyler sonucu teorik işlemlerden farklı olarak elektrot yüzeyindeki aşırı gerilimin elektro-kimyasal reaksiyonlarla ilişki olduğu bulunmuştur. Bu ilişki Tafel tarafından bulunmuş ve aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$V = A \times \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.16)$$



Şekil 2.20 Yavaş ve hızlı elektro kimyasal reaksiyonlarda oluşan Tafel grafikleri

Bu grafik sadece $i > i_0$ olması durumunda geçerlidir. Yukarıdaki diyagramda i_0 aşırı gerilimin '0' olduğu yerdeki akımdır. i_0 büyük olursa reaksiyon büyük olursa reaksiyon hızlı geçer (Larminie ve Dicks, 2000).

2.8.2.2 Tafel Eşitliğindeki Değerler

Tafel eşitliği deneysel olmakla beraber teorik bir temeli de vardır:

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.17)$$

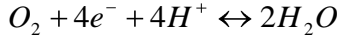
T :sıcaklık

α :yük aktarım katsayısı (elektro-kimyasal reaksiyon sırasında elektrik enerjisinin değişimine bağlıdır.) Bu değer tepkimenin cinsine ve elektrot cinsine göre 0-1 aralığında değişir. Pek çok malzemede 0,5 civarındadır.

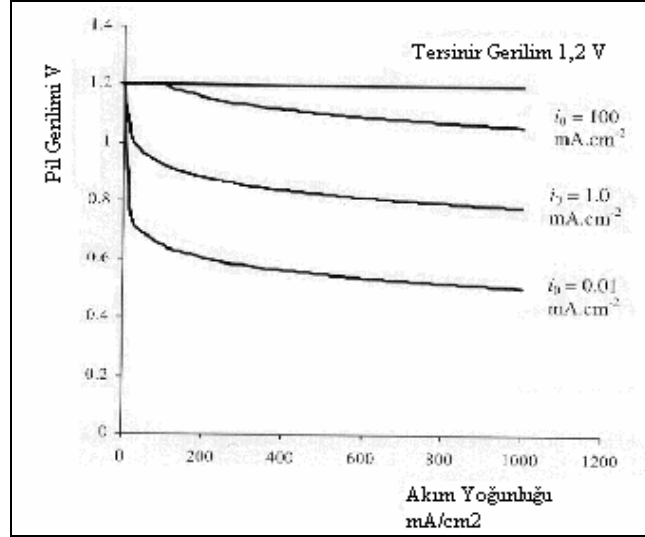
Normalde sıcaklık artışı A değerinin artmasına neden olur. Fakat deneysel sonuçlarda i_0 ve T birlikte arttığında A'nın değişmediği görülmüştür.

i_0 :Değişken akım yoğunluğudur.

Bir PEMFC nin oksijen elektrotundaki tepkime;



Akım yoğunluğu '0' olduğunda elektrotta aktivite olmaz. Ama bu tepkime tersinirdir. Elektrolite sürekli bir elektron girişi ve çıkışı vardır. Bu i_0 değeridir. i_0 değeri yakıt pilinin performansını ölçmede çok önemlidir. i_0 mümkün olduğu kadar fazla olmalıdır.



Şekil 2.21 Akım yoğunluğu-pil gerilimi grafiği (göz önüne alınan kayıplar sadece bir elektrodaki aktivasyon aşırı gerilimine göredir, 3 farklı akım yoğunluğuna göre)

Hiç kaybı olmayan bir yakıt pilinde aktivasyon aşırı gerilimi aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır;

$$V = E - A \ln \frac{i}{i_0} \quad \frac{i}{i_0} > 0 \quad A > 0 \quad (2.18)$$

Şekil 2.21'de i_0 'ın 0,01 , 1,0 ,100 mA ve $A=0,06$ V değeri alınmıştır. i_0 değerinin önemi bu şekilden gayet iyi gözükmektedir. Bu etki akım yoğunluğunun pek çok değeri voltajı büyük miktarda düşürür. i_0 küçüldükçe gerilim düşüşü artar.

Çizelge 2.6 Asit elektrolit içindeki hidrojen elektrotunda oluşan i_0 değerlerinin metallere göre değişimi.

Metal	i_0 (A/cm ²)
Pb	25×10^{-13}
Zn	3×10^{-11}
Ag	4×10^{-7}
Ni	6×10^{-6}
Pt	5×10^{-4}
Pd	4×10^{-3}

Her elektrottaki aşırı voltajı ölçmek için çalışan yakıt pili üzerinden ölçüm almaya gerek yoktur. Çizelge 2.6'da i_0 'ın hidrojen elektrotundaki ve 25 °C deki değerleri verilmiştir. Bu değerler düz plakalar için geçerlidir. Bu malzemelerin ortak özelliği güçlü katalizörler oluşlarıdır. Oksijen elektrotunda ise bu değerler 10^5 oranında düşmektedir. Bu çizelgedeki değerler pil çalışırken daha büyük olur, bunun nedeni elektrotun delikli yapıda oluşudur. Elektrotun yüzey alanı boy x en alanının yaklaşık 10^3 katıdır. Genelde anotta oluşan aşırı gerilim katottakine göre önemsenmeyecek boyuttadır. Açık hava şartlarında çalışan bir hidrojen beslemeli yakıt pilinin katodundaki $i_0=0,1$ mA/cm² ve anodunda $i_0=200$ mA/cm² olur.

2.8.2.3 Aktivasyon Aşırı Gerilimini Düşürmek

Yakıt pili performansını etkileyen en önemli şeylerden biri i_0 değeridir. Performansı arttırmak için:

Yakıt pili sıcaklığını arttırmak bu gerilim/akım yoğunluğu grafiğın düşük ve yüksek sıcaklıklarda farklı çıkmasını açıklar (Larminie ve Dicks, 2000). Bunlar Şekil 2.18 ve Şekil 2.19 de görülmektedir.

- Daha etkili katalizör kullanmak.
- Elektrotun yüzey alanını arttırmak.
- Reaksiyona girenlerin konsantrasyonunu arttırmak.
- Basıncı arttırmak.

2.8.3 Yakıt Kaçışı ve İç Dirençler

Elektroliti seçerken iyon iletim özelliklerinin iyi olmasına dikkat etmiştik. Bu elektrolit çok az miktarda da olsa elektron geçişi olur. Bu çok fazla önemsenmez; asıl önemli olan anottan katoda geçen hidrojen miktarıdır. Bu geçen hidrojen katottaki katalizör nedeniyle orada tepkimeye katılır ve akım üretimine katılmamış olur. Elektrolitten yakıt geçişine yakıt kaçışı adı verilir.

Yakıt kaçma ve iç dirençlerin etkisi yaklaşık olarak eşittir. Yakıt kaçışında 1 H₂ iyonu 2e-anlamına gelir.

Elektron ve H₂ geçişi çok önemli olmamakla birlikte düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerine büyük bir etki yapabilir. Yakıt pillerinden elde edilebilecek gerilimin teorik gerilimden düşük olacağı bilinmelidir. Eğer bu enerji kaybolmasaydı teorik gerilim, gerçek gerilime eşit olurdu. Genelde gerilimde 0,3 V kadar bir düşüş vardır.

Sadece aktivasyon aşırı geriliminden kaynaklanan kayıplar söz konusu olsaydı;

$$V = E - A \ln \frac{i}{i_0} \quad \text{formülü kullanılacaktı.}$$

30°C civarında $E=1,2 \text{ V}$ $A=0,06 \text{ V}$ $i_0=0,04 \text{ mA}$ değerlerini almaktadır.

Bunları bir tablo çizerek kullanırsak Çizelge 2.7 oluşur. İç akım yoğunluğundan dolayı, pilin açık devredeki akım yoğunluğu '0' değildir. Çizelge 2.7 den görüldüğü gibi iç akım yoğunluğu 2mA/cm² ise açık devre gerilimi 0,92 V' tur. Neredeyse akımın %25 i kaybolmaktadır.

Çizelge 2.7 Düşük akım yoğunlukların pil gerilimleri

Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Voltaj (V)
0	1,2
0,25	1,05
0,5	1,01
1	0,97
2	0,92
3	0,9
4	0,88
5	0,87
6	0,86
7	0,85
8	0,84
9	0,83

2.8.4 Ohm Kayıpları

Elektrotların elektrik direncine ve elektrolitteki akan iyonlara direncine bağlı olan kayıplar anlaşılması ve modellenmesi en kolay olanlardır. Voltaj düşmesi basitçe aşağıdaki denkleme bağlıdır;

$$V = I \times R$$

Birçok yakıt hücresinde (fuel-cell) direnç esas olarak elektrolit tarafından oluşturulsa da; hücre ara bağlayıcıları yada iki kutuplu plakalar (tabakalar) de önemli olabilir.

Voltaj kayıplarıyla ilgili diğer eşitliklerde daha tutarlı olabilmek için; eşitlik, özgül direnç şartlarıyla ifade edilmelidir. Bunu yapabilmek için “ r ” ile gösterilen ve hücrenin 1cm^2 sine düşen direnç fikrini oturtmamız gerekir (Alana özel direnç ya da ASR denir.). Voltaj düşüş eşitliği şu şekilde olur;

$$V = i \times r$$

Burada “ i ”, her zamanki gibi, özgül dirençtir. Eğer “ i ”, mA.cm^2 şeklinde verilmişse; alana özel direnç, “ r ”, $\text{k}\Omega.\text{cm}^2$ şeklinde verilmelidir.

Aşağıda Bölüm 2.8.8’de anlatılan tekniklerle bu şekildeki belirli tersinmezlikleri diğerlerinden ayırt etmek mümkündür. Bu teknikleri kullanarak “ohm” voltaj kayıplarının her çeşit hücre ve özellikle de katı oksit yakıt hücresi (SOFC) için önemli olduğunu görmek mümkündür. Hücrelerin iç direncini azaltmanın 3 yolu şu şekildedir:

Elektrotların mümkün olan en yüksek iletkenlikte kullanılması.

İyi tasarım ve iki kutuplu plakaları ve hücre ara bağlayıcıları(interconnects) için uygun malzeme kullanılması. Bu husus Bölüm 2.3’de anlatıldı.

Elektroliti, mümkün olduğunca ince yapmak zira bu çoğu zaman elektrolitin zaman zaman elektrotların üzerine yapılacağından dolayı epey kalın yapılması gereğinden ya da elektrolitin devir daim akışına izin verecek kadar geniş yapılmasından dolayı zordur. Her koşulda, elektrolit üzerinden bir elektrottan diğer elektrota geçişte herhangi bir sıkıntı yapmayacak kadar kalın olmalıdır ki bu da; belirli bir sertlik getirir.

2.8.5 Kütle Transfer ve Konsantrasyon Kayıpları

Hidrojen ve oksijen reaksiyonlarda kullanıldıkça, reaksiyonların gerçekleştiği elektrot yüzeyleri üzerinde konsantrasyonları azalacaktır. Reaksiyon bölgesinde konsantrasyonların düşük olması Nernst eşitliğinden de anlaşılacağı gibi elde edilecek gerilimi dolayısıyla da verimi düşürecektir. Konsantrasyonlarındaki azalma çekilen akım değerinin artması ile artar. Özellikle yüksek akım yoğunluklarındaki verim düşüşündeki temel etken budur. Konsantrasyon azalmasından kaynaklanan kayıplar aşağıdaki eşitlikle gösterilebilir;

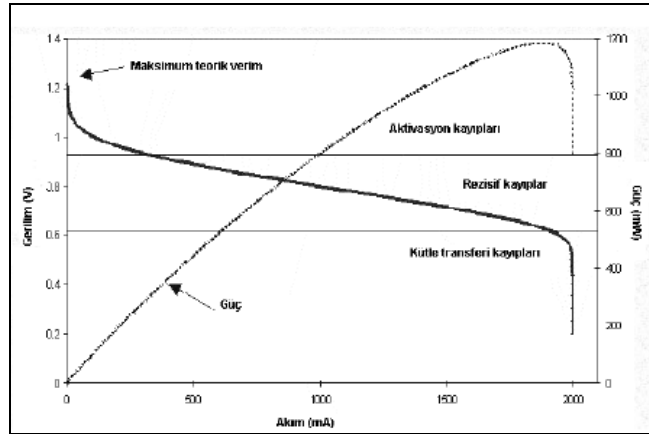
$$\Delta V = -B \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (2.19)$$

Eşitlikte B (V) yakıt piline ve çalışma şartlarına bağlı sabittir. Bütün kayıpları toplar ve ideal şartlarda oluşacak gerilimden çıkarırsak, yakıt pilinin çalışma gerilimini aşağıdaki eşitlikle gösterebiliriz;

$$V = \frac{-\Delta g_f}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} x P_{O_2}}{P_{H_2O}} \right) - \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) + B \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_1} \right) \quad (2.20)$$

Yukarıdaki eşitlikten de anlaşıldığı üzere yakıt pili çalışma gerilimi; sıcaklık, basınç ve yakıt kompozisyonu gibi çalışma koşullarına, yakıt pilinin yapısı ile çalışma koşullarına bağlı sabitlere ve akım yoğunluğuna bağlıdır.

Belirli yapı ve çalışma koşullarında yakıt pili gerilimi, akım yoğunluğunun fonksiyonu olarak gösterilebilir. Bu fonksiyonun PEM yakıt pili için çizilmiş tipik bir grafiği Şekil 2.22'de verilmiştir. Yakıt pillerinin akım-gerilim karakteristiğini gösteren bu tip eğrilere polarizasyon eğrisi denilmektedir.



Şekil 2.22 PEMFC polarizasyon eğrisi

Yakıt pilinden çekilen güç arttıkça, yakıt pilinin akım yoğunluğu artar. Akım yoğunluğu arttıkça, üretilen gerilim dolayısıyla da verim düşer. Bu durumun tersi düşünülürse tasarlandıkları güç seviyelerinin altında çalıştıklarında yakıt pillerinin daha verimli çalışabilecekleri sonucuna varabiliriz. Bu da yakıt pillerine özgü bir durumdur.

Akım yoğunluğu arttıkça kayıpların arttığı dolayısıyla verimin düştüğü daha önce açıklanmıştı. Akım yoğunluğu toplam akımın yüzey alanına oranıdır. Bir yakıt pilinin yüzey alanı arttırıldığında akım yoğunluğu düşecek ve verim artacaktır. Fakat daha büyük yüzey alanları, daha yüksek yatırım maliyeti ve daha büyük hacim gerektirir. Bu nedenle, yakıt pilinin kullanım alanı da dikkate alınarak maliyet ve hacim ile verim arasında bir optimizasyon yapılması gerekmektedir (Larminie ve Dicks, 2000).

2.8.6 Tersinmezliklerin Birleştirilmesi

Bütün tersinmezlikleri bir araya getiren bir eşitlik oluşturmak çok yararlıdır. Bu şekilde bir yakıt hücresinin, “ i ” akım şiddetindeki çalışma voltajını bulabiliriz.

$$V = E - R(i + i_n) - A \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right) + B \ln\left(1 - \frac{i + i_n}{i_1}\right) \quad (2.21)$$

Bu eşitlikte:

E :Dönüştürülebilir açık devre voltajı

i_0 :Bölüm 2.8.3’de açıklanan içsel ve yakıt köprü dengi akım şiddeti

A :Bölüm 2.8.2.2’de anlatılan Tafel çizgisinin eğimi

i_n :Eğer katot aşırı gerilimi anottan çok daha fazlaysa katottaki değişme akış şiddeti ya da her iki değişim akım şiddetini fonksiyonudur.

B :Bölüm 2.8.5’de değinildiği gibi toplu aşırı yüklülük eşitliğinin sabitidir.

i_1 :Bölüm 2.8.5’de değinildiği gibi en düşük sınırlayıcı akım şiddetine sahip elektrotun sınırlayıcı akım şiddetidir.

R :Bölüm 2.8.4’de açıklandığı gibi bölgesel dirençtir.

İki farklı yakıt hücresi için örnek sabit değerler Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Bu eşitlikleri bir hesap çizelgesinde (EXCEL gibi) ya da grafiksel bir hesap makinesinde modellemek mümkündür. Aynı (2.21) eşitliğinin $(i + i_n) \cdot i_0$ olduğunda geçerli olduğu gibi düşük akım şiddetlerinde problemler olabileceği akılda tutulmalıdır.

Çizelge 2.8 İki farklı yakıt hücresi için örnek sabit değerler

Sabit	Düşük sıcaklık yakıt pili PEMFC	Yüksek sıcaklık yakıt pili SOFC
E volt	1,2	1
i_n mA/cm ²	2	2
R kΩ/cm ²	30×10^{-6}	300×10^{-6}
i_0 mA/cm ²	0,067	300
A volt	0,06	0,03
B volt	0,05	0,08
i_1 mA/cm ²	900	900

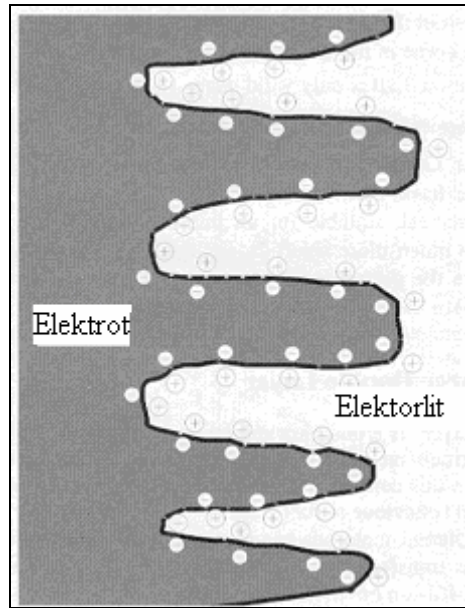
Ayrıca; eşitlik, sınırlayıcı akım şiddeti geçildiğinde de geçerli değildir. Örnek: $(i + i_n) > i_1$ buradan Şekil 2.18 ve 2.19’daki grafikler elde edilir.

Farklı kayıpları anlayabilmek için yaptığımız bu yaklaşımlar olaylar hakkında bir ilk izlenim edinme açısından uygun olacak şekilde oldukça matematikselidir. Bu şekilde gerçek bir yakıt hücresinin performansına dayana titiz bir teorik yaklaşımda bulunabilmek için; Amphlett et al. (1995) incelenebilir (Larminie ve Dicks, 2000).

2.8.7 Yük Çift Katmanı

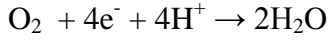
Yük çift katmanı konusu oldukça ilginç ve karmaşık bir elektrot fenomenidir. Burada daha sade bir şekilde bahsedilecektir. Bu konu anlaşıldığında yakıt hücrelerinin elektro dinamik davranışı anlaşılabilir olur.

İki malzeme birbirine temas ettiğinde yüzeyler elektriklenir ve birinden diğerine yük geçişi olur. Örneğin; yarı geçirgen “N” ve “P” tipi malzemeler arasında birleşme yerlerindeki elektronlar ve delikler arasında difüzyon vardır. Bu difüzyon; P tipi bölgesinin elektronları ve N tipinin deliklerinden oluşan ve yarı geçirgen aygıtların üzerinde güçlü bir etkisi olan bir yük çift katmanı oluşturur. Elektrokimyasal sistemlerde aynı yarı geçirgenlerde olduğu gibi yük çift katmanı difüzyon etkilerine göre; elektrotlardaki elektronların ve elektrolitteki iyonların arasındaki reaksiyonlara ve ayrıca uygulanan gerilime göre değişir.



Şekil 2.23 Yakıt hücresi katot yüzeyindeki yük çift katmanı

Örneğin; Şekil 2.23’de ki durum asit elektrolitli yakıt hücresinin katodunda oluşabilir. Elektronlar, elektrotun yüzeyinde toplanırken H^+ iyonları elektrolitin yüzeyine çekileceklerdir. O_2 ile beslendikten sonra bu elektron ve iyonlar, aşağıdaki reaksiyona girerler;



Bu reaksiyonun gerçekleşmesi, yükün yoğunluğuna ve elektrot ve elektrolit yüzeyindeki elektron ve H^+ iyonlarına bağlıdır. Ne kadar yük yoğunluğu varsa o kadar akım şiddeti vardır. Buna rağmen elektrot, elektrolit yüzeyindeki elektron ve H^+ iyonlarından oluşabilecek herhangi bir yük birikmesi, elektrik voltajı üretecektir. Aktivasyon kayıpları bölümünde gördüğümüz aktivasyon aşırı yüklenmesidir. Yani, yük çift katmanı, aktivasyon aşırı yüklenmesinin neden gerçekleştiğini açıklar. Bu durum gösterir ki; bir yük çift katmanı reaksiyonun gerçekleşmesi için gereklidir; akım ne kadar büyükse o kadar çok yüke ihtiyaç vardır, yani akım büyürse aşırı yüklenmede büyür. Ayrıca, etkin bir katalizör reaksiyonun gerçekleşme şansını arttırdığından elektrottun katalizör etkisinin önemli olduğunu görebiliriz. Daha büyük bir akım bir oluşum olmaksızın akabilir. Elektrolit, elektrot yüzeyinin üstünde ya da yanındaki yük katmanı elektrik yükü ve enerjisi için depo özelliği görür ve daha çok bir kondansatör gibi davranır.

Eğer akım değişirse, bu yükün (ve buna bağlı olarak gerilimin) dağılması (akım düşerse) ya da oluşuma uğraması (akımda artış varsa) biraz zaman alacaktır. Yani, aktivasyon alırı yüklenmesi, Ohm kayıplarında olduğu gibi hemen akımı takip etmez. Sonuç olarak, eğer akım aniden değişirse, çalışma voltajı iç dirence bağlı olarak hemen tepki verir fakat son denge değerine kadar nispeten yavaş hareket eder. Bunu modellemenin bir yolu yük çift katmanın bir kondansatörle ifade edildi bir denge devresinin kullanılmasıdır. Kondansatörün kapasitesi;

$$c = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.22)$$

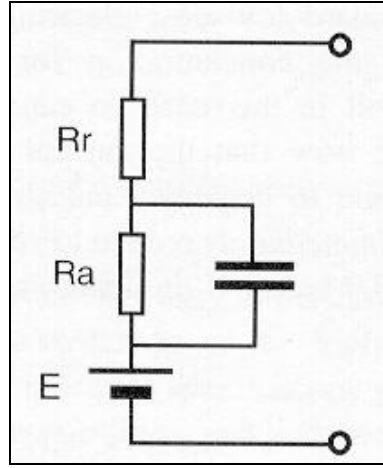
Bu formülde:

ε :Elektriksel geçirgenlik

A :Yüzey alanı

d :Plakalar arası uzaklık

Bu durumda A, uzunluğu olan x den birkaç bin kat kadar daha büyük olan elektrotun gerçek alanıdır. Ayrıca plakalar arası olan d, çok küçük bir değerdir, büyük bir ihtimalle birkaç nanometredir. Bu kondansatörler arasındaki bağlantı, burada depolanmış yük ve sonuç aktivasyon aşırı gerilimi, aşağıdaki gibi denge devresine çıkar.



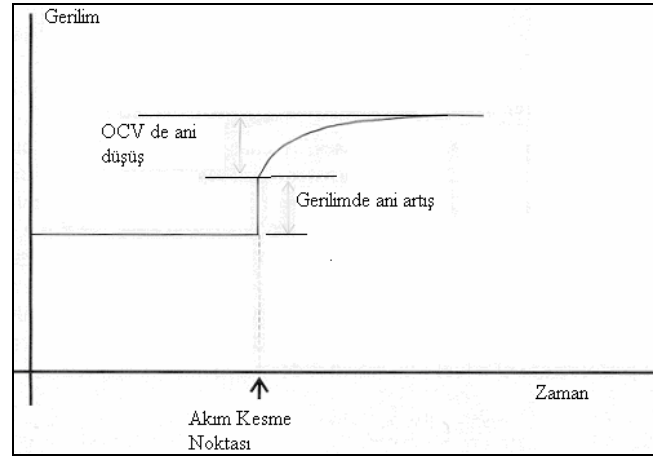
Şekil 2.24 Yakıt pili denge devresi modeli

Genel anlamda yük çift katmanından kaynaklanan bu depolama etkisi, yakıt hücresine iyi bir dinamik bir performans verir. Bu sayede voltaj, mevcut ihtiyaca cevap verebilecek bir değere yavaşça ulaşır. Bu aynı zamanda voltaj düşüş türlerini ayırt etmenin basit ve etkili bir yoluna izin verir ki bu sayede sıradaki bölümde anlatılacağı gibi yakıt hücresinin performansı analiz edilebilir (Larminie ve Dicks, 2000).

2.8.8 Farklı Tersinmezliklerin Ayırt Edilebilmesi

Bu bölümün değişik noktalarında bir takım aşırı yüklenmelerin bazı durumlardaki önemine dikkat çekildi. Örneğin; katı oksit yakıt pilinde (SOFC) ohm kayıplarının aktivasyon kayıplarında daha fazla olduğunu söyledik.

Bunu anlamanın yolu empedans spektroskopidir. Değişebilen frekanstaki bir alternatif akım hücreden geçer, gerilim ölçülür ve empedans hesaplanır. Daha yüksek frekanslarda devredeki kondansatörlerin daha düşük empedansları olacaktır. Frekans – empedans grafikleri çizilerek Şekil 2.24'deki denge devresi değerlerini bulmak mümkündür. Hatta bazı durumlarda anot ve katotlardaki kayıplar ile kütle transferi ve aktivasyon kayıpları ayırt edilebilir. Wagner (1998) yakıt hücrelerine uygulanan deneyleri ile buna iyi bir örnek vermiştir. Buna rağmen, kondansatörler büyük ve empedanslar küçük olduğu için özel sinyal jeneratörlerine ve sistem jeneratörlerine ihtiyaç duyulur. Deneylerin daha yavaş gerçekleşmesi için 10mHz gibi düşük frekanslar kullanılır.



Şekil 2.25 Bir yakıt pili için akım kesintisinden sonra voltaj- zaman grafiği.

Akım kesme tekniği tutarlı sayısal değerlere ulaşmanın diğer bir yoludur ama aynı zamanda çabuk nicelik belirlemek içinde kullanılır. Standart düşük maliyetli elektronik teçhizat kullanılarak uygulanabilir. Bir hücrenin konsantrasyon (yada kütle transfer) aşırı yüklenmesi ihmal edilebilecek şekilde akım ürettiğini düşünelim. Bu durumda; voltaj düşüşü, ohm kayıplarından ve aktivasyon aşırı yüklenmesinden kaynaklanır. Şimdi akımın aniden düşünelim. Yük çift katmanın ve buna bağlı aşırı yüklenmenin dağılması biraz zaman alacaktır. Buna rağmen, ohm kayıpları hemen sıfıra düşecektir. Bu durumda biz, voltajın taşınan yük hücreden ayrılmış gibi değişeceğini bekleriz (Larminie ve Dicks, 2000). (Şekil 2.25)

2.9 Yakıt Pillerinin Kullanım Alanları

Daha önce de belirtildiği gibi hidrojenden, yakıt pili teknolojisi ile elektrik elde edilmektedir. Bugüne kadar, yakıt pillerini çeşitli yönleriyle inceleyen 200'den fazla araştırma NASA tarafından desteklenmiştir. Bugün, Apollo ve Space Shuttle görevlerinde güvenli olarak elektrik ve su sağlamış olmaları nedeniyle, yakıt pilleri uzaydaki rollerini ispatlamış bulunmaktadır [1].



Şekil 2.26 1959 yılında üretilen 5 kW alkalin yakıt hücresi

Bu başarılar, 1960'larda, yakıt pillerinin dünyanın enerji problemlerinin tümüne çözüm olabileceği tahminlerine yol açmış ve 1970'li yıllarda çalışmalara başlanmış, 2000'li yıllarda ülkelerin enerji politikalarında önemli yer tutmaya başlamıştır [3].

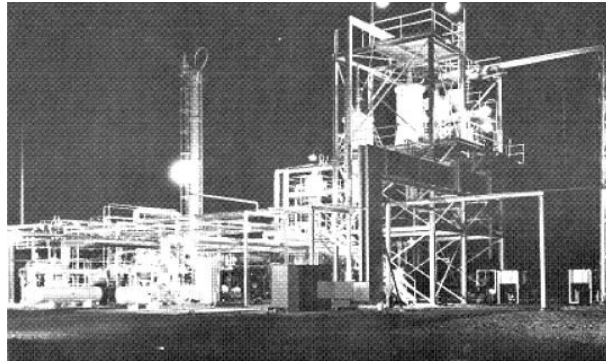
ABD Başkanı G.W. Bush 28 Ocak 2003 tarihinde yaptığı bir konuşmada hidrojen enerjisini hürriyet yakıtı olarak tanımlamış ve bu alandaki çalışmalara destek amacıyla 1.7 milyar dolarlık bir kaynak ayrıldığını söylemiştir. ONSI Corp. adında bir Amerikan firması 200 kW enerji sağlayan fosforik asit tipi (PC25) yakıt pilinin pazarlamasını yapmaktadır [3].



Şekil 2.27 Teksas valisi hidrojen yakıtlı arabaya hidrojen doldururken

Japonya'da WE-NET (World Energy Network) projesi ile Tokyo metropolitan bölgesinde hidrojen kullanımı ile oluşacak azot oksit emisyonundaki azalma potansiyeli araştırılmaktadır. WE-NET Programı Japonya'nın Uluslar Arası Ticaret ve Endüstri Bakanlığınca desteklenmektedir. Bu programda Japonya hidrojen enerji sistemini geliştirmek üzere 2020 yılına kadar 4 milyar \$'lık bir bütçe ayırmıştır. Gelecekte de Pasifik denizinin ekvator bölgesinde yapay bir adada solar radyasyon kullanarak deniz suyundan elektrolizle hidrojen üretmeyi planlamaktadırlar [3].

Halen Japonya'da Tokyo Electric Company tarafından kurulan 11 MW'lık elektrik santrali Rokko adasının elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamakla birlikte, kapasiteleri 50 ile 500 MW arasında değişen yüzlerce yakıt pilli tesis bulunmaktadır. Sadece Tokyo'da şehrin elektrik ihtiyacının 40.000 kW'lık bölümü hidrojen enerji sistemlerinden sağlanmaktadır [3].



Şekil 2.28 1960'larda kurulmuş bir hidrojen güç santrali

Japonya’da Tokyo Electric Company’nin yanısıra Sanyo, Hitachi, Toshiba, Kawasaki, Fuji Electric, Kansai Electric, Amerika’da, Westinghouse, Institute of Gas Technology (IGT), Unocal, San Diego Gas and Electric, Avustralya’da Ceramic Fuell Cell Ltd, Avrupa’da Siemens KWU, Dornier System, Sulter Innotec, dünyada yakıt hücreli sistemleri kullanan ve gelişimi için çalışmalar yapan şirketlerden bazılarıdır [3].

Siemens Kaliforniya’da 200 konutun elektrik ve ısı ihtiyacını karşılamak üzere 250kW’lık gaz türbinli, yakıt hücreli bir kojenerasyon sistemi kurmuştur [3].



Şekil 2.29 Gaz türbinli,yakıt hücreli kojenerasyon sistemi

Avrupa merkezli Alstom, Asya merkezli Japon Ebara firmaları ile ortak çalışan Kanada’nın Ballard firması PEM tipi yakıt pili kullanan, 250 kW elektrik, 230 kW ısısal güce sahip jeneratörleri satışa sunmuştur [3].

Honda araştırma ve geliştirme bölümü doğal gazdan yakıt pilli araçlar için hidrojen üreten, elde edilen elektriğin ve sıcak suyun yine üretildiği evde kullanımını sağlayan “Hidrojen Ev Enerji İstasyonu” (HES) adlı proje başlatmıştır. Proje çerçevesinde California’da deneysel amaçlı kurulan evde çalışmalar hidrojen üretimi, depolanması ve yakıt olarak kullanılması gerçekleştirilecektir [3].

Almanya’da Münih havaalanında çalışan otomobil ve otobüslerin hidrojen enerjisi kullanması yönündeki projenin yanısıra Neurenburg yakınlarında mini bir hidrojen enerji sisteminin kurulduğu bir program yürütülmektedir. Solar-Wasserstoff-Bayern burada güneş hidrojen tesisi, depolama sistemi ve hidrojen kullanma sistemleri kurmuştur. Almanya ayrıca Suudi Arabistan ile ortak yürüttüğü Hysolar programı ile Suudi Arabistan’ın Riyad yakınında güneş hidrojen üretim tesisi kurmayı planlanmaktadır. Suudi Arabistan hidrojeni ihraç edecektir [3].

Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec diğer uluslar arası başarılı programdır.



Şekil 2.30 Hidrojenle çalışan emisjonsuz otobüsler

İzlanda'da hükümet, üniversiteler, taşıma şirketleri, fabrikalar ve çok uluslu otomobil ve petrol şirketleri konsorsiyumu oluşturulmuş ve 2030 yılına kadar İzlanda'nın tamamen hidrojen enerjisine geçmesi planlanmıştır. Dünyanın ilk hidrojen dolum istasyonu Shell tarafından İzlanda'da açılmıştır [3].



Şekil 2.31 Hidrojen Dolum İstasyonu

Bunlara ilave olarak İspanya'da INTA solar hidrojen tesisi, İtalya, Almanya, Norveç'te SAPHYS küçük ölçekli fotovoltaiik-hidrojen enerji sistemi ve Almanya'da PHOEBUS pilot tesisi gibi birçok proje yürütölmektedir [3].

Ayrıca araçların %65'inin scooter (küçük motosiklet) olduğu Tayvan'da yakıt hücreli skoter kullanımı desteklenmekte ve ZES (sıfır emisyonlu scooter) Asya Pasifik Yakıt Pili Teknolojisi Ltd. ve Kwang-Yang Motor Co. işbirliği ile üretilmektedir [3].



Şekil 2.32 Hidrojenle çalışan bisiklet

Ulaşım sektöründe, yakıt pili ile çalışan araçların geliştirilmesi, petrol tüketimini azaltacağı gibi, araçlardan kaynaklanan hava kirliliğini de minimum düzeye indirecektir. Yakıt pilli otobüs üretimini gerçekleştiren Kanada'nın Ballard Şirketinin yanı sıra, General Motors, Ford, Chrysler, Toyota, Honda, BMW, Renault yakıt pilleri ile çalışan otomobilleri ticari anlamda üretmek çabasındadırlar. 1993'ten bu yana çok sayıda prototip araç üretilmiştir. Alman Daimler Chrysler'in ürettiği, yakıt pilini Ballard'dan sağladığı, NECAR4 (sıvı hidrojenle çalışır) ve metanol dönüştürücülü NECAR5, General Motors'un Opel, "Zafira" adı verilen ve 75 kW'lık Ballard "tescilli" yakıt pili taşıyan aracı, Ford tarafından üretilen "Think FC5"ler, Toyota'nın RAV-4 ve Fine-N'i, Nissan Renessa ve Mitsubishi, Daihatsu, Honda ve Mazda ortaklığı Demio FCEV, Renault'un 30 kW Nora cell kullanan Lagunası prototiplere birer örnektir [3].



Şekil 2.33 General Motors firmasının hidrojen yakıtlı otomobili



Şekil 2.34 Hidrojen yakıtlı Opel Zafira'nın yakıt pili, yakıt tankı ve aksesuarları

Taşıtlarda hidrojenin içten yanmalı motorlar veya yakıt pilleri aracılığıyla kullanımı konusunda da, Daimler-Benz şirketinin sıfır emisyonlu minibüs'ü, BMW, Dodge, Buick, Suzuki firmalarının deneme otomobilleri, Macchi-Ansaldo'nun ve MAN firmasının SL202

otobüsleri, Kanada demiryollarının Lokomotifleri ile Almanya, Avustralya ve Kanada donanmaları için imal edilen deniz altları sayılabilir [3].

Mercedes-Crysler firması, büyük şehirlerde çevre kirliliğini önlemek için, 30 adet hidrojen ile çalışan 70 kişilik toplu taşıma araçlarını 10 Avrupa başkentinde, her türlü iklim ve arazi şartlarında denemektedir. Bu araçlarda sistem elektrik motoru ile hareket eder, motor, piston, krank ve şanzıman yoktur [3].



Şekil 2.35 Yakıt olarak hidrojen kullanan denizaltı

General Motor hidrojen enerji teknolojisini kullandığı, 20 cm kalınlığında, 120 cm eninde, 240 cm boyunda bir platform ile dört tekerden oluşan bir otomobil üretimi projelendirmiştir. Projeye göre bu platforma sahip olan kişi istediği kaportayı takarak otomobilini kullanabilecektir. Bu otomobillerde içten yanmalı motor, piston ve krank bulunmadığından bunun yerine her tekerleğin göbeğinde 20 kW'lık müstakil elektrik motorları arabaya gerekli hareketi sağlayıp, yüksek emniyet içinde sistemin süper kompakt bir yapıya kavuşmasına olanak sağlamaktadır [3].



Şekil 2.36 Bir yakıt pilli otomobilin iç yapısı

Bunların dışında, %15-20 hidrojen ve %80- 85 doğal gaz karışımından oluşan hythane adlı yakıt ile çalışan yeni bir otobüs 1993 yılından beri Montreal'de (Kanada) denenmektedir. Hidrojen, uzun yıllardır uzay mekiği ve diğer tüm roketlerde rakipsiz bir yakıt olarak kullanılmaktadır. Ancak, bunların dışında uçaklarda ilk kullanımı 1956 yılında B-57 Canberra deneme uçağında gerçekleştirilmiştir. Sovyetler Birliği de 1988 yılında Tupolev-155 deneme uçağında yakıt olarak hidrojen kullanmıştır. Dünya Enerji Ajansı Hidrojen Programı çerçevesinde yürütülen çalışmalarda, Airbus tipi uçakların yakıt olarak hidrojen kullanması 2007 yılında başlayacaktır. Hidrojenin ticari uçaklarda yaygın kullanımı konusunda Avrupa Airbus konsorsiyumu ile Almanya-Rusya ortak çalışmaları sürmektedir [3].



Şekil 2.37 Hidrojen yakıtlı roket

Sıvı hidrojen doğrudan veya dolaylı olarak motorları ve dış yüzeyi soğutmak için de kullanılabilmesi için, yüksek hızlı supersonic uçaklar için ideal bir yakıt olarak görülmektedir [3].



Şekil 2.38 Hidrojen yakıtlı supersonic uçak

Amerika'nın Duffy Boats firması elektrikle çalışan ilk tekneyi geçtiğimiz aylarda üretmiştir. Her biri 1.5 kW gücünde 4 yakıt piliyle hareketlendirilmiş olan bu tekne yakın gelecekte, sahillerde, nehirlerde, kanal ve boğazlarda yani ulaşımın su üzerinde yapıldığı her yerde taksi görevini görecektir [3].



Şekil 2.39 Hidrojenle çalışan uçak ve yakıt hücresi

Hidrojen enerjisi son yıllarda daha çok taşınabilir cihazlarda yakıt olarak kullanılmak üzere tasarlanmaya başlanmıştır. İlk olarak laptoplar için tasarlanan yakıt hücreleri günümüzde cep telefonlarının da yakıt ihtiyacını karşılayacak kadar minimize edilmiş durumdadır. Minyatür yakıt pilleri henüz prototip aşamasında olup birkaç yıl içerisinde satışa çıkmaları beklenmektedir. Günümüz nikel-kadmiyum pilleriyle en fazla 4-5 gün dayanan cep telefonu yakıt pilleri teknolojisinin piyasaya çıkmasıyla beraber 1 ay şarj edilmeden kullanılabilir hale gelecektir. Ayrıca şu anda ortalama 3-4 saatlik batarya süreleri ile kullanılabilen laptoplar da 2-3 gün kesintisiz olarak hizmet sunabilecek duruma gelecektir. Cep telefonu ve laptoplar için düşünülen yakıt hücreleri tipleri metanol yakıt pilleri ile tasarlanmaktadır [3].



Şekil 2.40 Yakıt pilleri ile çalışan laptop ve cep telefonları

3. GÜNEŞ PİLİ TEKNOLOJİSİ

3.1 Giriş

Güneş panelleri güneş ışığını direkt olarak elektriğe çevirirler. PV (Fotovoltaik) hücreleri daha önce sıkça hesap makinelerinde ve saatlerde kullanılmıştır. Fotovoltaik hücreler bilgisayar çiplerinde kullanılan yarı iletken malzemeden üretilmektedirler. Güneş ışığı bu maddeler tarafından absorbe edildiği zaman, elektronlar buldukları atomlardan ayrılarak madde içinde serbest kalırlar ve böylece bir elektrik akımı oluşur. Işığın (fotonların) elektriğe (voltaj) dönüşümüne fotovoltaik efekt adı verilmiştir.

12-24 panellik bir sistem normal bir evin tüm elektrik ihtiyacını karşılayabilir, endüstri uygulamaları veya elektrik santralleri için binlerce güneş panelinin kullanıldığı büyük sistemler kurulmaktadır.

Güneş hücresinin performansı verimyle ölçülmektedir. Aldığı enerjinin yüzde kaçını kullanılabilir elektriğe dönüştürdüğü verimi belirleyen en önemli parametredir. Ancak belli dalga boylarındaki ışık elektriğe dönüştürülebilir, geri kalan büyük miktar hücreyi oluşturan madde tarafından ya emilmekte ya da yansıtılmaktadır. Bundan dolayı günümüzde tipik bir güneş hücresinin verimi %15 civarındadır.

Düşük verim daha geniş alan ihtiyacı, dolayısı ile daha yüksek maliyet demektir. Bundan dolayı günümüzdeki tüm çalışmalar güneş hücrelerinin verimini arttırmak için yapılmaktadır. 1950 yılında yapılan ilk güneş hücresinin verimi %4 ve Watt başına maliyeti 750 USD civarındaydı.

3.2 Güneş Pili Yapısı ve Özellikleri

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları 100 cm^2 civarında, kalınlıkları özellikle en yaygın olan silisyum güneş pillerinde 0.2 – 0.4 mm arasındadır.

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pillerin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Deniz seviyesinde, parlak bulutsuz bir gündeki ışınım şiddeti maksimum 1000 W/m^2 civarındadır. Yöreğe bağlı olarak 1m^2 'ye düşen güneş enerjisi miktarı yılda 800-

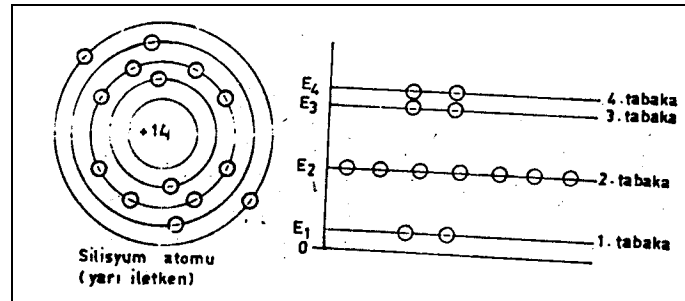
2600 KWh arasında değişir. Bu enerji, güneş pilinin yapısına bağlı olarak %5 - %70 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.

Güç çıkışı artırarak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltail modül adı verilir. Gerekirse bu modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak, fotovoltail bir dizi oluşturabilir.

3.3 Maddenin Yapısı ve Yarı İletkenler

Bilindiği gibi madde, pozitif yüklü çok ağır bir çekirdekle, onun etrafında belirli yörüngelerde dolanan elektronlardan meydana gelmiştir. Bu yükler, dış tesir yoksa birbirini dengeler. Elektronlar, yörüngelerinin bulunduğu yarıçapa, orantılı olarak potansiyel ve kinetik enerji taşırlar. En dış yörünge de maksimum 2, sonrakinde 8 ve üçüncüde 18 elektron bulunabilir. Elektronlar, ard arda gelen ve her biri belli sayıda elektron bulduran enerji bandlarında bulunurlar. Dışarıdan enerji alan bir elektron bir üst seviyedeki banda çıkabilir. Daha düşük banda geçen elektron da dışarı enerji yayar. Son tabaka elektronlarına valans (denge) elektronları denir ve cisimlerin kimyasal bileşikler yapmalarını temin eder. Son tabakası dolmamış bir atomun, bir başka cisme ait komşu atomdan elektron kapmaya yatkınlığı vardır. İç tabaka elektronları ise çekirdeğe çok sıkı bağlıdırlar. Termik enerji verilirse, elektronun yörüngesi etrafında titreşimi artırır. Genellikle atomlarda, ilk tabaka hariç, her yörünge iki alt gruptan oluşur ve bunlardan altta olanı iki elektronla doludur.

Elektron, yörüngesini muhafaza ettiği müddetçe ne enerji yayar, ne de absorp eder. Bir elektron uyarımla, atomu terk edecek enerji kazanıp ayrılabilir. Atom artı (+) iyon şekline geçer (Şekil 3.1).

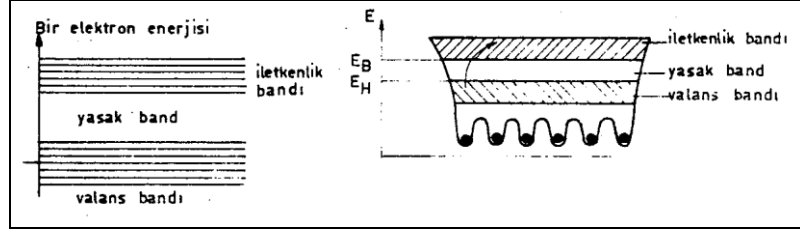


Şekil 3.1 Bir Yarı İletkenin Yapısı

İzoleli atomda (gazlarda) elektronlar, belirli bir enerji bandını işgal ederler. Bir kristalin atomları, kristal içinde muntazam diziler halinde yer alırlar. Atomlar, birbirlerine çok

yakındırlar ve elektronlar, birbirine yakın enerjileri temsil eden enerji bandları üzerinde bulunurlar. Örneğin; bir germanyum atomunda, tek bir atom ele alınırsa atom temel haldedir. Mutlak sıfır, sıcaklıkta, elektron minimum enerji seviyesine sahiptir.

Germanyum kristalinde ise, mutlak sıfır sıcaklıkta, temel seviyenin yerini valans bandı alır. Bundan sonra, hiçbir elektronun bulunmadığı yasak bölge ve sonra da yüksek enerjili iletkenlik bandı bulunur. Bu sıcaklıkta Ge kristalinde iletkenlik bandında hiçbir elektron bulunmaz, yani kristal ideal bir yalıtkandır (Şekil 3.2).



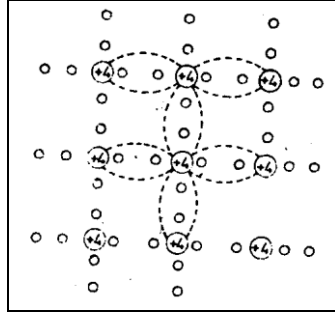
Şekil 3.2 Enerji Bandları

Ge kristalinin iletkenlik kazanabilmesi için, iletkenlik seviyesine elektron temin edilmelidir. Bunun için gerekli enerji 0.7 eV civarındadır. Fotoelektrik olay için E_g , kristalin soğurabileceği minimum enerjisini gösterir.

Buna karşı, bir metalik kristalde yasak band yoktur, iletkenliği temin edecek, iletkenlik bandında çok sayıda elektron bulunur. Elmas için $E = 7 \text{ eV}$ ' luk enerji ile elektron yasak bandı geçilebilir. Bunun için malzemeye büyük elektrik voltajı uygulanması gerekir. Bu ise malzemeyi tahrip eder.

Yarı iletkenlerde, yasak bandı geçmek için (1 eV) yeterlidir, oda sıcaklığında kristal atomlarından birkaç tanesinin elektronları, iletkenlik bandına geçer ve iletkenliği sağlar. Geride bıraktığı boşluğa da başka bir elektron gelir ve o da iletkenliğe katılmış olur.

Bir kristal, ortak elektronla birbirine bağlı atomların düzgün olarak yerleşimiyle meydana gelmiştir. İyonik bağdan farklı olan bu birleşmeye “Kovalant” bağ denir. Valans elektronlar, kovalant bağ içinde, bir atomdakinden daha düşük enerji seviyesindedir. Kristali bozmak için, bu enerji farkı kadar enerji gerekir. Bu kristalin kararlılığını gösterir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Germanyum Kristali Temsili Yapısı

- Bir metal, her sıcaklıkta, aşağı yukarı atom sayısı kadar serbest elektrona sahiptir.
- Bir yarı iletkende ise serbest elektronlar daha azdır.

Deney sonuçlarına göre;

- Mutlak sıfır civarında, yarı iletkenin hiçbir elektronu serbest değildir. Bu sıcaklıkta sadece iletken ve yalıtkan vardır.
- Sıcaklık arttıkça, yarı iletkende serbest elektronlar oluşur ve cisim iletken hale geçer.
- Serbest elektronların yoğunluğu, sıcaklıkla artar. Yarı iletkende öz iletkenlik sıcaklıkla artar.

İki atomu birbirine bağlayan valans elektronların serbest hale geçmesi için gerekli enerji; metaller için sıfır, yalıtkanlar için birçok elektron volt, yarı iletkenler için 1 eV civarındadır.

3.3.1 N Tipi Yarı İletken

İletkenlik tipini değiştirmek için Si ve Ge içine, periyodik cetvelin III ve V. grup elementleri ilave edilir. Bunlar boş valans elektronu bulundurlar (Arsenik, Bor, Fosfor, Antimuan gibi).

Ergimiş halde bulunan Ge'a (milyonda bir) arsenik ilave edilirse, her arsenik atomu, bir Ge atomu yerini alacak ve 4 elektronuyla kovalant bağ teşkil edilecek, 5. valans elektronu serbest kalıp iletkenliği temin edecektir. İletkenlik (-) yükle temin edildiği için N tipi yarı iletken ismini alır. Bu elektronlar, oda sıcaklığında, iletkenlik bandına ulaşır.

3.3.2 P Tipi Yarı İletken

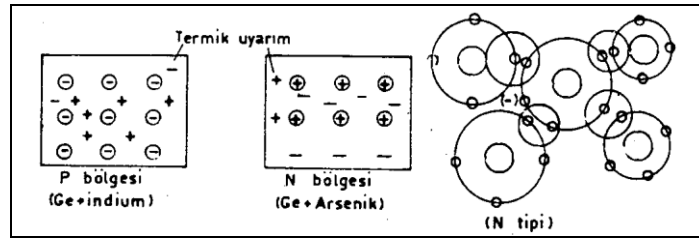
Ergimiş germanyuma, III. gruptan üç valans elektronu bulunduran elemanlar ilave edilerek yapılır (İndium, Galyum...). katılma sırasında indium atomları kristal örgü içinde Ge atomunun yerini alır. Kovalan bağ için 3 elektron mevcuttur ve komşu atomdan bir elektron

kaparak bağ oluşturur. Komşu atomda bir boşluk oluşmuştur. Bu ise elektron hareketine sebep olur.

Bir yarı iletkenin kullanılabilme maksimum sıcaklığı, aktivasyon enerjisiyle artar. Kullanabilme maksimum frekansı, yük taşıyıcıların hareketliliği ile artar.

3.4 PN Kavşağı

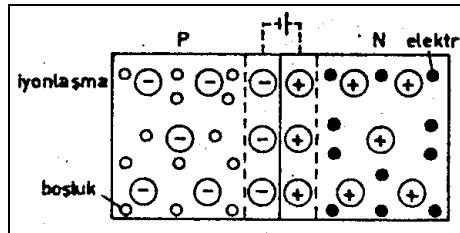
Bir monokristal yarı iletkenliğinin P tipinden N tipine geçiş bölgesidir. Bu bölge kristalleşme sırasında oluşturulur. N bölgesinde, termik uyarımla azınlıkta olan boşluk ve çoğunlukta olan elektron yükleri ve (+) iyonize atomlar vardır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 P – N Kavşağının Oluşumu

P bölgesinde ise, negatif iyonize atom, termik uyarımla bulunabilen azınlık elektron ve çoğunluk elektron boşlukları vardır. İki eleman temasa geçirildiğinde, N bölgesindeki elektrolar (çoğunlukta) P tipi bölgeye hareket eder. P bölgesindeki elektron boşlukları da N bölgesine hareket eder. Böylece N tipi bölgedeki atomlar (+), P tipi bölgedeki atomlar (-) olarak iyonlaşmış olur. Bunlar, kristal içinde sabit yük merkezleri oluştururlar. Kavşağın her iki yüzünde iyonize olmuş atomlar, kristal içinde, yönü N'den P'ye doğru olan bir elektrik alan meydana getirirler.

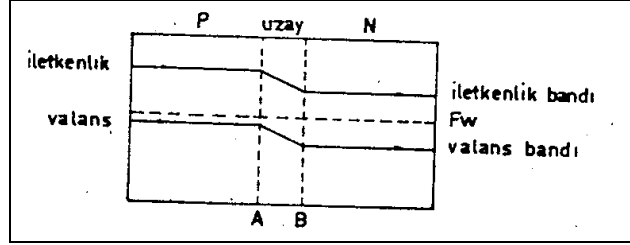
Bu bölge geçiş bölgesidir ve serbest yükler yoktur. Kavşaktaki bu potansiyel farkı, P'den N'ye geçecek boşluklar ve N'den P'ye geçecek elektronlar için bir potansiyel duvarı teşkil eder. N'den ayrılacak bir elektron, arkasında kendini geri çağıran bir boşluk bırakır ve önündeki P tipi bölgedeki (-) yükler elektronu püskürtür (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 P – N Kavşağı ve İç Akım

Özet olarak, P-N kavşağında meydana gelen elektrik alan, kavşak civarındaki elektronu, P'den N'ye doğru iter (N'deki elektronu geri püskürtür, P'deki elektronu N'ye iletir).

Kavşağın enerji bandı, Şekil 3.6'daki gibidir. N bölgesinde, valans ve iletkenlik bandı enerjileri, P'dekilerden düşüktür.



Şekil 3.6 P – N Kavşağında Enerji Bandı

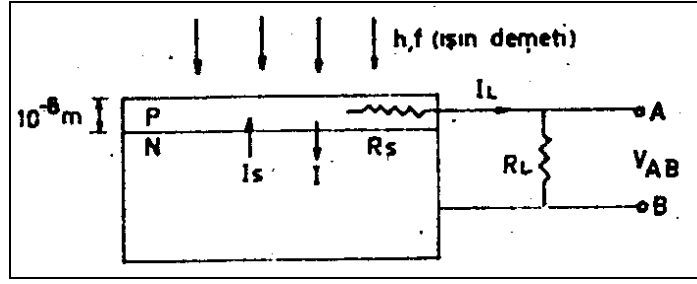
Enerjisi yeterli bir ışık demeti ($h.f > E_g$, E_g Planck sabiti, f frekans), P-N kavşağı üzerine düşürüldüğü zaman, foton elektronlarla karşılaşır ve enerji verebilir. Serbest elektronlar, valans elektronlarının ancak $1/10^4$ kadarı olduğundan, bu ihtimal zayıftır. Foton, muhtemel valans elektronu ile karşılaşır ve ona enerjisini bırakarak iletkenlik bandına çıkarır. Elektron, arkasında bir elektron boşluğu bırakır.

Olay A-B aralığında ise; elektron, oluşan elektrik alanla N bölgesine, boşluk da P bölgesine itilir. Olay kavşağa yakın N bölgesinde oluşmuşsa, boşluk yine P bölgesine götürülür. Kavşaktan uzakta oluşan elektron boşluk, zamanla birbirini bulacaktır. Sonuç olarak P tipi bölge (+), N tipi bölge (-) yüklenmiş ve bir potansiyel doğmuştur.

3.5 Fotovoltaik Pil

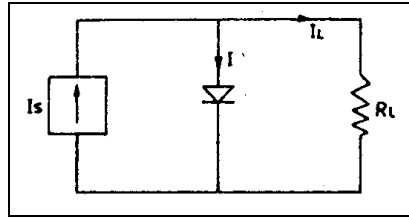
Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, foton absorblanmasıyla yük taşıyıcılar çoğunlukta oldukları bölgelere sürüklenirler. Kavşaktan I_s akımı geçer ve N(-), P'de (+) yüklenmiş olur.

I_s akımı, kavşağın ileri yönde kutuplaşmasına ve kavşak potansiyel duvarının alçalmasına sebep olur. Dış devre açık ise (akım yoksa) P'den N'ye akım geçer ve kavşak potansiyel duvarı tekrar yükselir; P bölgesi (-), N bölgesi (+) yüklenir. Sonra tekrar foton absorblanarak olay devam eder. Bu durumda $I_s = I$ olur.



Şekil 3.7. Fotovoltaik Pilin Yapısı

Dış devreden akım geçerse $I_s = I - I_L$ olacak şekilde dışarıya elektrik enerjisi alınır. Şekil 3.8’de bu pilin elektrik eşdeğer devresi görülmektedir. En yüksek foton enerjisi yeşil ışık için $h.f = 2.5$ eV civarındadır. P-N kavşağındaki temas potansiyeli, elektronları daha yüksek potansiyele çıkaran batarya rolü oynamaktadır.



Şekil 3.8. Fotovoltaik Pil Eşdeğer Elektrik Devresi

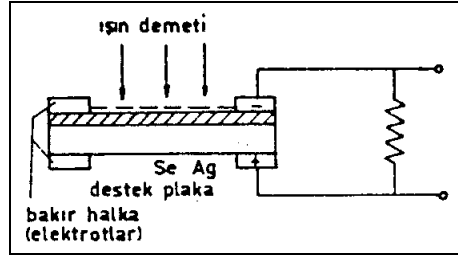
P-N kavşağının doğrultucu olarak kullanılması halinde durum tersinedir. Bu durumda akımın yönü P’den N’ye doğrudur ve dışarıdan uygulanan potansiyel farkı elektronların temas potansiyeline ters yönde tesir eder.

3.6 Güneş Pili Çeşitleri

Bakır – bakır oksit ve gümüş yarı iletkenleri ile yapılan güneş pilleri, selenyum pilleri ve silisyum güneş pilleri en çok kullanılanlarıdır.

3.6.1 Selenyum Güneş Pili

Saf selenyum, alkali metallere veya klor, iyot gibi halojenlerle karıştırılıp P tipi yarı iletken oluşturulur. Bunun üzerine iyi iletken ve yarı iletken / yarı geçirgen bir gümüş tabaka birkaç mikron kalınlığında kaplanarak P-N kavşağı oluşturulur. Şekil 3.9’da bir selenyum güneş pilinin yapısı görülmektedir. Bu pillerin 50°C ‘nin üzerinde kullanılmamaları tavsiye olunur.



Şekil 3.9 Selenyum Güneş Pili Yapısı

3.6.2 Silisyum Güneş Pili

Uzay araştırmalarında kullanılan pillerin çoğu bu türdür. Silisyum SiO_2 halindeki kumdan elde edilir. Küçük bir kristal özünüm, eritilmiş potaya daldırılır. Belli hızda döndürülerek potadan çıkarılırken soğuması temin edilir ve kristalin büyütülmesi ile güneş pili elde edilir. Eriyik içine P tipi yarı iletkenlik malzemeleri katılır. P tipi kristaller dilimler şeklinde kesilir. Sıcaklığı kontrol edilen P_2O_5 'li difüzyon fırınında N tipi yarı iletkenle 10^{-4} - 10^5 m. Derinliğe kadar difüzyon temin edilerek P-N kavşağı oluşturulur.

Silisyum pilleri germanyumla yapılan pillere göre, daha büyük açık devre direnci sağlar. Buna karşı silisyumlu pillerin spektral cevabı daha azdır ve kızılötesi ışınlar kadar uzanmaz. Akkor ışık kaynağı kullanılması halinde, Ge uçlarındaki gerilim küçük olmasına rağmen daha büyük akım sağlar. Güneş ışınları için ise silisyum pil daha uygundur.

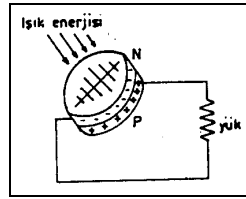
Güneş pilleri, pahalı oldukları için ulaşılması güç yerlerde kullanılmaktadır. Metalik iletkenlerin normal sıcaklıktaki özdirençleri 1.6×10^{-6} - 150×10^{-6} ohm.cm aralığında değiştiği halde iyi bir yalıtkanın özdirenci 10^{12} - 10^{18} ohm.cm arasında değişir. Özdirençleri 10^{-3} - 10^7 ohm.cm arasında olan elemanlar da yarı iletkenlerdir. yarı iletkenlerin özdirençleri çok düşük sıcaklıklarda yalıtkanlarınkine yakındır. metallerin aksine, yarı iletkenler sıcak bir ortamda, soğukta olduklarından daha iletkenlerdir. başka bir deyişle yarı iletkenlerin özdirençleri sıcaklık arttıkça azalır ve değişim katsayısı metallerinkinden 10 kat daha büyüktür.

Güneş pillerinin çalışmaları ile ilgili teoriyi kısaca şu şekilde özetleyebiliriz. Metallerde atom sayısı kadar serbest elektron iletkenliği temin eder. Yalıtkan kristallerde ise elektronlar düşük enerjili valans bandında bulunur. Bunları iletken hale getirmek için elektron bulunmayan yasak enerji bantlarını geçecek şekilde elektronlarına enerji verilmelidir. Bu enerji 5-9 eV civarındadır.

Birbirleriyle kovalant bağ teşkil ederek bağlanmış yalıtkan kristal atomları içine (milyonda birkaç değerinde) III veya V. grup elementlerden katılırsa bazı kristal atomlarının yerini bu elementler alacaktır. V. grupta oluşan yapıda, katkı elemanlarının 4 elektronu, yalıtkan kristal atomunun 4 elektronunu müşterek kullanarak, dış devresini tamamlayıp kovalant bağ oluşturacak ve bir elektronu açıkta kalıp iletkenliğe katılacaktır. Yarı iletken N tipidir ve elektronun iletkenlik bandına geçmesi için gerekli enerji bir elektron volt civarındadır. Kristalleşme III. grup elemanları ile yapılırsa elementin 3 elektronu yalıtkan kristal atomunkilerle müşterek bağ kuracak ve yakın komşu atomdan bir elektron kapıp 4.cü bağını tamamlarken orada bir elektron boşluğu bırakacaktır. Bu da P tipi yarı iletkendir ve iletkenlik için 1,2 – 1,5 eV enerji gerekir.

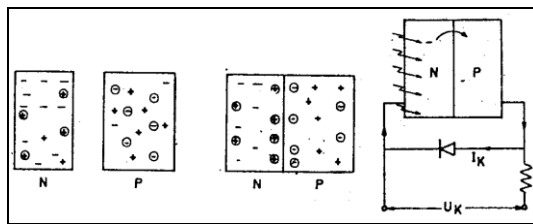
3.7 Güneş Pili Eşdeğer Şeması ve Güneş Panelleri

Bilindiği gibi, güneş pili bir yarı iletken düzenektir. Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardan oluşan N tipi ile çoğunluk yük taşıyıcıları oyuklardan oluşan P tipi yarı iletken yan yana getirilir. Işık enerjisi bu birleşme noktasına düşürülürse dış devreden bir akım geçebilmektedir (Şekil 3.10).



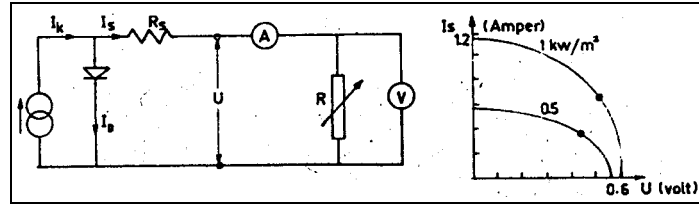
Şekil 3.10 Güneş Pili

P-N yarı iletken kavşağında, elektronlar P tipi bölgeye geçerek birleşme yüzeyine yakın bölgelerde boşluk yük taşıyıcıdaki elektron eksikliğini tamamlayıp (-) iyonlar oluştururken N tipi bölgede de (+) iyon duvarı oluşacaktır. Dış tesir olmazsa bu enerji duvarı akımın geçmesini önleyecektir. Işın demeti bu bölgeye düşerse, yük taşıyıcı elektronlar çok az oranlarda olduğundan, muhtemelen bir valans elektrona enerjisini bırakacak ve onu P tipi bölgeye doğru itecektir. Dış devre akımı ise P'den N'ye doğru olacaktır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 P – N Kavşağına Düşen Foton Enerjisi ile İletkenlik Temini

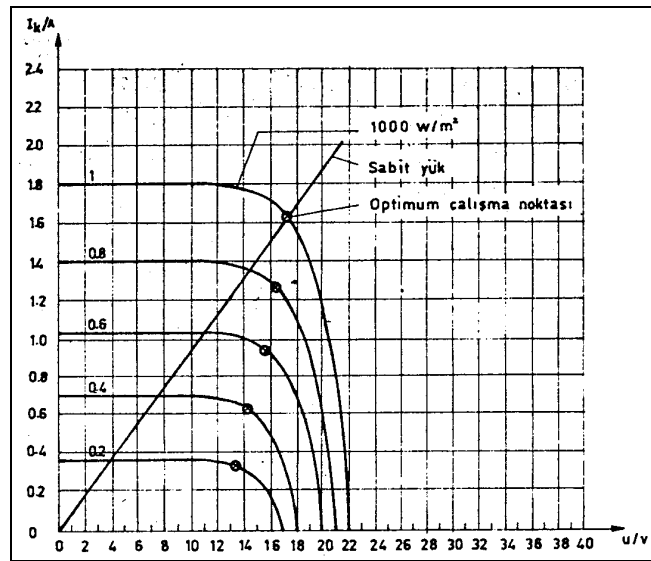
Bir güneş pilinde N tipi bölgede elektron üreten bir elektromotor kuvveti düşünülebilir. Şekil 3.12 'de fiziksel eşdeğer devre görülmektedir. Devre elemanları bir elektromotor kuvvet, bir iç diyot ve bir iç direnç şeklinde sembolize edilebilir.



Şekil 3.12 Güneş Pili Eşdeğer Elektrik Şeması

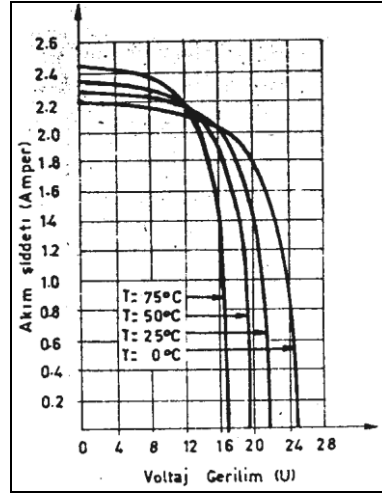
Güneş pilleri, belli güneşlenme şartlarında, birim alan başına belirli bir akım ve voltaj üretirler. İstenen bir enerji için birçok pili seri ve paralel olarak bağlamak gerekir. Böylece güneş panelleri oluşturulur. Şekil 3.12 'de eşdeğer şeması verilen güneş pilinde dış devre akım şiddeti ve uçlardaki gerilim ölçülebilir. Ayarlanabilir bir dış dirençle, gerilim ve akım açık devreden kısa devreye kadar değiştirilerek Şekil 3.13'deki gerilim akım şiddeti eğrileri elde edilebilir. 1 cm² 'lik pil güneşlenme alanı için ışınım şiddeti 0.5 – 1.0 kw/m² arasında değişirken, optimum çalışma noktaları ve sabit yük eğrisi bu şekilde gösterilmiştir.

Ölçümler 27 °C sıcaklıkta yapılmış olup yüzey sıcaklığı arttıkça gerilim düşer. Akım şiddeti, güneş ışınım yoğunluğu ve pil ışınım alanı ile orantılı olarak değişir. Sıcaklığın voltaja tesiri 0.022w/ °C oranında olmaktadır. Şekil 3.13'de 40 adet seri bağlanmış 10x10 cm ebadında pilin, 1 kw/m² ışınım şartlarında akım şiddeti gerilim karakteristiği değişik sıcaklıklar için verilmiştir.

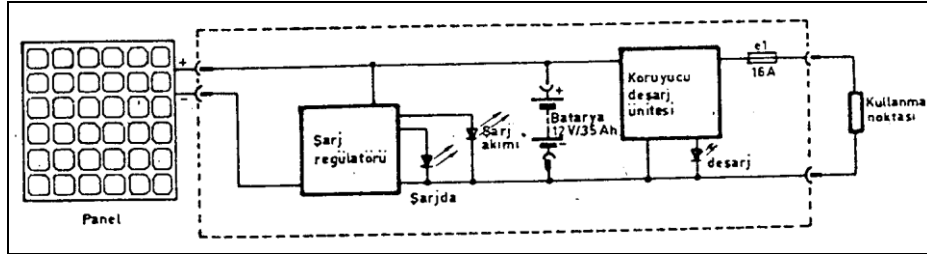


Şekil 3.13 34 Wattlık Bir Güneş Pili Akım-Gerilim Eğrileri (Yüzey Sıcaklığı 27 °C İçin)

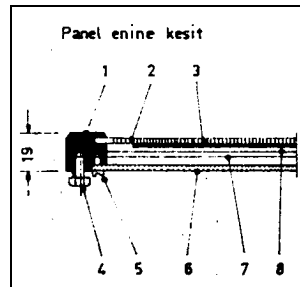
Bir güneş panelinde güç adaptasyonunun optimizasyonu için şarj ve kullanma devresine, ayarlanabilen dirençler eklenmelidir. Güneş pili iç direnci uygun olmalı, aşırı güneşlenme halinde fazla enerji kullanan ikinci bir devre bulunmalıdır. Yük direnci veya şarj regülatörü giriş direnci, ışınımına göre değişebilmelidir. 12 volt, 35 ampersaat kurşun aküler, sıvı kayıpları ve kendiliğinden deşarjları az olduğundan bu amaçla kullanımları uygundur. Şekil 3.15’de bir güneş paneli ile şarj sistemi, Şekil 3.16 ‘da da güneş panelinin kesiti görülmektedir. Panelde, 10x10 cm ebadında seri bağlanmış 40 adet silisyum pili $1\text{kw}/\text{m}^2$ güneş ışınımı için, 23 volt açık devre gerilimi ve 2.3 amp. kısa devre akımı verebilmektedir. Bu panelin gücü 36 watttır.



Şekil 3.14 Güneş Panelinde Karakteristiklerin Sıcaklıkla Değişimi



Şekil 3.15 Otomatik Ayarlı Güneş Paneli Şarj Sistemi



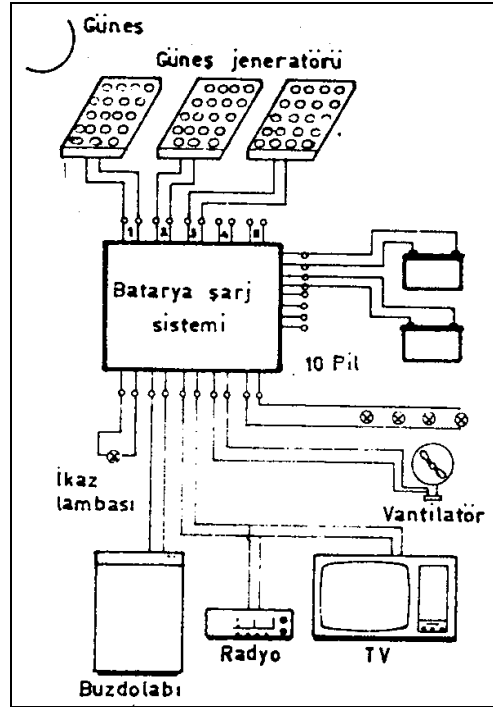
Şekil 3.16 Güneş Panelinin Enine Kesiti

Güneş pillerinin kullanılma alanları aşağıda belirtilmektedir.

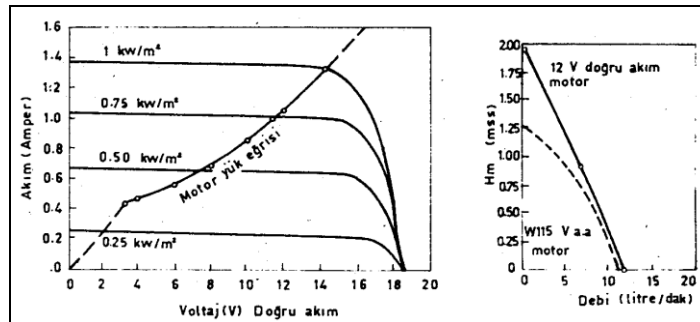
- Uzay araçlarında.
- Küçük güç ünitelerinde (saat, hesap makinesi vb.)
- Trafik sistemi için güç temin etmede.
- binalarda aydınlatma, soğutma ve küçük güç temininde.
- Su pompalarında.
- Askeri amaçlarda.

Güneş pillerinin kullanılma alanları toplu halde Şekil 3.17 'de görülmektedir.

Güneş pili ile çalıştırılan bir su pompasının denenmesinde, güneş pili ve pompanın karakteristiklerinin değişimleri Şekil 3.18'de görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, ışınım şiddeti arttıkça pilde üretilen güç de artmaktadır. Bu artış, gerekli yük eğrisi değişimine uygun olduğundan ayrıca bir diferansiyel kontrol gerekmez. Bu pompa, güneş kolektörü sirkülasyon pompası olarak kullanıldığında amaca daha iyi hizmet etmiş olacaktır.



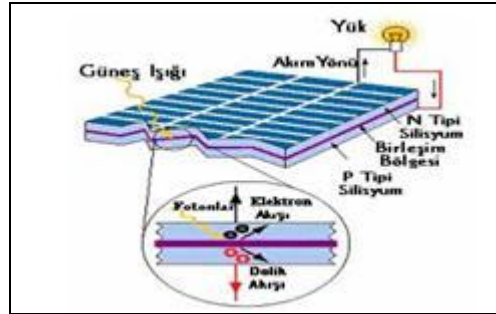
Şekil 3.17 Güneş Pillerinin Konutlarda Çeşitli Kullanım Yerleri



Şekil 3.18 Güneş Pili ve Sirkülasyon Pompası Karakteristikleri

3.8 Güneş Pillerinin Çalışma İlkeleri

Başka malzemeler kullanılıyor olsa bile, günümüzde, pek çok güneş pili silisyumdan yapılmaktadır. Güneş pilinin üzerine güneş ışığı düştüğünde, silisyum atomunun son yörüngesindeki valans elektronu negatif yükler. Işık foton denilen enerji partiküllerinden oluşmuştur. Fotonları saf enerjiden oluşmuş bilardo toplarına benzetmek olasıdır ve bunlar bir atoma çarptıklarında tüm atom enerjilenir ve en kolay kopabilecek durumda olan son yörüngedeki valans elektronu kopar. Serbest kalan bu elektronda, voltaj veya elektriksel basınç olarak isimlendirebileceğimiz potansiyel enerji ortaya çıkar. Bu enerji, bir aküyü şarj etmek veya bir elektrik motorunu çalıştırmak için kullanılabilir. Önemli olan nokta, bu serbest elektronları pil dışına alabilmektir. Üretim sırasında, pilin on yüzeyine yakın yerde bir iç elektrostatik bölge oluşturularak, bu elektronun serbest duruma geçmesi sağlanır. Silisyum kristali içine diğer elementler yerleştirilmiştir. Bu elementlerin kristal içinde bulunması, kristalin elektriksel olarak dengede olmasını önler. Işıkla karşılaşan malzemede, bu atomlar dengeyi bozar ve serbest elektronları diğer pile veya yüke gitmeleri için pilin yüzeyine doğru süpürürler. Milyonlarca foton pilin içine akarken, enerji kazanıp bir üst seviyeye çıkar, elektronlar da pil içindeki elektro-statik bölgeye ve oradan da pil dışına akarlar. İşte bu oluşan akış elektrik akımıdır.



Şekil 3.19. Güneş Pili Yapısı

3.9 Güneş Pillerinin Yapısı

Tek kristalli silisyum güneş pilinin rengi koyu mavi olup, ağırlığı 10 gramdan azdır. Pilin üst yüzeyinde, pil tarafından üretilen akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olan ön kontaklar vardır. Bunlar negatif kontaklardır. Kontakların altında 150 nm kalınlığında, yansımaya özelliği olmayan bir kaplama tabakası vardır. Bu tabaka olmazsa, silisyum, üzerine düşen ışınımın üçte birine yakın kısmını yansıtacaktır. Bu kaplama tabakası, pil yüzeyinden olan yansımayı önler. Pilin on yüzeyi, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla, piramitler ve konikler şeklinde dizayn edilmiştir. Yansıtıcı

olmayan kaplamanın altında, pilin elektrik akımının ortaya çıktığı yapı bulunur. Bu yapı, iki farklı katman halindedir. N-katmanı, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan oluşan ve pilin negatif tarafını oluşturan katmandır. P-katmanı ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, pilin pozitif tarafıdır. İki katman arasında, P-N kavşağı denilen, pozitif ve negatif yüklü elektronların karşılaştığı bir bölge bulunur. Pilin arka yüzeyinde, elektronların girdiği pozitif kontak görevi gören arka kontak yer alır.



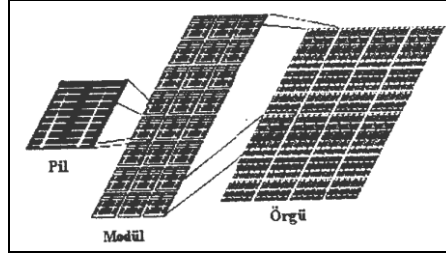
Şekil 3.20 Tipik Bir Silisyum Güneş Pilinin Ön Yüzü

Üretilen piller, standart test koşullarında test edildikten sonra, tüketiciye sunulmaktadır. Ortam sıcaklığı 25°C ortalama ışınım şiddeti 1000 W/m^2 ve Hava-Kütle oranı 1,5 olarak test koşulları belirlenmiştir. Hava-kütle oranı, güneş ışınımının geçirilme oranını gösteren atmosfer kalınlığıdır. Güneşin tam tepede olduğu durumda, bu oran, 1 olarak alınır. Atmosfer tarafından emilen ışınımın oranına bağlı olarak, pilin üreteceği elektrik miktarı da değişeceğinden, bu oran önemli bir parametredir.

Tipik bir silisyum güneş pili, 0.5 volt kadar elektrik üretebilir. Pilleri birbirine seri bağlayarak üretilen gerilim değerini arttırmak olasıdır. Genellikle, 30-36 adet güneş pili, 15-17 voltluk bir çıkış gücü vermek için birlikte bağlanabilir, ki bu voltaj değeri de, 12 voltluk bir aküyü şarj etmek için yeterlidir. Farklı çıkış güçleri verecek şekilde imal edilmiş, farklı büyüklüklerde güneş pilleri bulmak olasıdır. Silisyum pillerin seri bağlanması ile modüller, modüllerin birbirine bağlanması ile örgüler oluşur. Her modül, paralel veya seri bağlanabilmesine olanak verecek şekilde, bağlantı kutusuyla birlikte dizayn edilir.

Güneş pilinin kolayca kırılabilmesi ve ürettiği gerilimin çok düşük olması gibi, sakıncalarının giderilmesi gerekir. Pillerin birbirlerine bağlanması ile oluşan modüller koruyucu bir çerçeve içine alınmışlardır ve kullanılacak düzeyde gerilim üretirler. Modülde bulunan pil sayısı, çıkış gücünü belirler. Genellikle, 12 voltluk aküler şarj etmek için 30-36 adet silisyum güneş

pilinın bağlanması ile bir modül oluşsa bile, daha yüksek çıkış güçleri için daha büyük modüller yapılabilir. En basit sistem, bir modül ve buna bağlı bir ak veya elektrik motorundan oluşmuş bir sistemdir.



şekil 3.21 Bataryalardan Modül ve rglerin Yapılması

Modüllerin fiziksel ve elektriksel olarak bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya panel adı verilir. Bir modülden elde edilen gücü arttırmak için başvurulan bir yapılanma biçimidir. Bu şekilde, çıkış gücü, 12,24,48 V veya daha yüksek olabilir. Birden fazla panelin kullanıldığı bir sistemde, paneller, kontrol cihazına veya ak grubuna, birlikte bağlanabilecekleri gibi, her panel tek olarak da bağlanabilir. Bu durumda, bakım kolaylığı olacaktır.

Sistemde kullanılan, fotovoltaik üreteçlerin tümünün oluşturduğu yapıya ise örgü denilmektedir. rgnn çok büyük olduğu uygulamalarda, daha kolay yerleştirme ve çıkış kontrolü için sistem, alt-örgü gruplarına ayrılabilir. Örgü, bir modülden oluşabileceği gibi 100.000 veya daha fazla modülden de ulaşabilir.

3.10 Güneş Pillerinin Türleri

Güneş pili teknolojisi, kullanılan maddeler ve yapım türleri açısından son derece zengindir. Güneş pili yapımı için şu anda kullanılmakta olan bir düzineden fazla maddenin yanı sıra, yüzlerce maddenin de üzerinde çalışılmaktadır. Belli başlı güneş pili türleri aşağıda anlatılmaktadır.

3.10.1 Kristal silisyum güneş pilleri

Silisyum yarı iletken özellikleri tipik olarak gösteren ve güneş pili yapımında en çok kullanılan bir maddedir ve uzun yıllarda bu konumunu koruyacak gibi görünmektedir. Fotovoltaik zellikleri daha üstün olan başka maddeler de olmakla birlikte, silisyum hem teknolojisinin üstünlüğü nedeniyle hem de ekonomik nedenlerle tercih edilmektedir.

3.10.2 Monokristal silisyum güneş pilleri

İlk ticari güneş pillerinde, CHROZALSKÍ kristal çekme tekniği ile büyütölen tek kristal yapılı silisyum kullanılmıştır. Fotovoltaik endüstride hala en çok kullanılan yöntem olan bu teknikte öncelikle ark fırınlarında silisyum oksit çeşitli kimyasal ve termal reaksiyonlardan geçirilerek saf silisyum elde edilir. Daha sonra silisyum eriyiğe çekirdek denen tek kristal yapılı bir silisyum parçası batırılır. Bu çekirdek eriyikten çıkarıldığında soğuyan silisyum eriyik, çekirdeğin üzerine külçe şeklinde yığılmış olur. Bu silisyum külçe olmaz bir keski ile dilimlere ayrılır. Bu, iki aşamada olur. Önce külçe dikdörtgen bloklar şeklinde kesilir. Daha sonra bu bloklar dilimlere ayrılarak pil şeklinde işlenir. Verimleri %15 civarındadır. Yapım sırasında malzeme kaybının çok fazla olması bu pillerin dezavantajıdır.

3.10.3 Yarı kristal silisyum güneş pilleri

Bu tip piller, sıvı silisyumun soğutulmasıyla elde edilen kümelenmiş küçük silisyum kristallerinden oluşur. Bu pillerin verimleri %14 civarında olup, kümelenmiş silisyum taneciklerinin sınırlarındaki kayıpları bağlıdır.

3.10.4 Ribbon silisyum güneş pilleri

Bu piller, malzeme kaybının azaltılması amacıyla levha halinde silisyum tabakalarından yapılırlar. Çeşitli yöntemlerle (Efg, Dendritik ağ) elde edilen bu piller, halen geliştirme aşamasındadır. Verimleri laboratuar şartlarında %13-14 arasındadır.

3.10.5 Polikristal silisyum güneş pilleri

Bu piller de ribbon silisyum teknolojisiyle yapılıp, yapıları polikristal özellik gösterir. Halen laboratuar aşamasındaki bu pillerin verimleri %10'dur.

3.10.6 İnce film güneş piller

Bu teknikte, absorban özelliği daha iyi olan maddeler kullanılarak daha iyi olan maddeler kullanılarak daha az kalınlıkta (tek kristalin 1-500'ü kalınlığında) güneş pilleri yapılır. Örneğin amorf silisyum güneş pillerinin absorpsiyon katsayısı kristal silisyum güneş pillerinin katsayısından daha fazladır. Dalga boyu katsayısı 0.7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığında amorf silisyum ile absorblanabilirken, kristal silisyumda ise aynı radyasyonu absorblamak için 500 mikron kalınlıkta malzeme kullanılması

gerekmektedir. Bu yüzden amorf yapılı güneş pillerinde daha az malzeme kullanılır ve montaj kolaylığı nedeniyle bir avantaj sağlar.

3.10.7 Amorf silisyum güneş pilleri

Amorf silisyum güneş pilleri (a-Si), ince film güneş pili teknolojisinin en önde gelen örneğidir. İlk yapılan a-Si piller Schottky bariyer yapısında iken, daha sonraları p-i-n yapıları geliştirilmiştir. P-i-n yapısındaki pillerin fabrikasyonu kalay oksitle kaplı iletken bir yüzeyin üzerine çöktürme yöntemi ile yapılır, bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Verimleri %5-8 arasındadır. Ancak bu piller, kısa zamanda bozunuma uğrayarak çıkışları azalır.

3.10.8 Diğer yapılar

Bakır indiyum diselenit (CuInSe) maddesinden yapılan ve verimleri %13 civarında olan piller halen gelişme aşamasındadır ve daha kararlı çıkışa sahip olduğu için absorban özelliği yüksek, verimleri de %12 civarındadır. Bu güne kadar elde edilen en yüksek verime (%24) galyum arsenitten yapılan piller ulaşmıştır. Bu madde ile çeşitli türde piller elde edilebilmekle birlikte, pahalı olduğu için pillerin, güneş spektrumunun daha büyük bir bölümünden yararlanabilmesi amacı ile denenen bir yöntem ise, birden fazla ince film yapısının üst üste konmasıyla elde edilen çok eklemli film yapılarıdır.

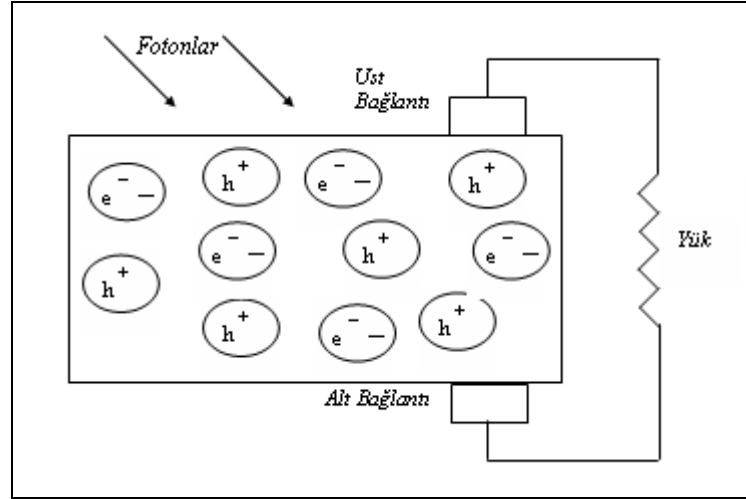
Bunların dışında, güneş ışınımının yüksek verimli pillerin üzerine optik olarak yoğunlaştıran sistemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür sistemlerde güneşin hareketini izleyen düzeneklerin yanı sıra, güneş ışığını kıran (mercek) ya da yansıtan (ayna) eleman kullanılır.

3.11 Güneş Pili Nasıl Çalışır

Yarı iletken bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bandlar valans bandı ile iletkenlik bandı adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton yarı iletken tarafından soğrulduğu zaman, enerjisi valans banttaki bir elektrona vererek elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece elektron-hol çifti oluşur. Bu olay, PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili elektronları N bölgesine, holleri de P bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarı iletkenin iç

kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.

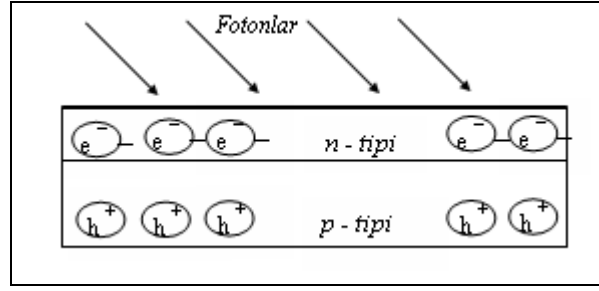
Güneş hücrelerinin üzerine düşen fotonların enerjileri ile yapılarında serbest halde bulunan elektronların ve elektron boşluklarının (hole) kontrol edilmesi sağlanır ve bunların düzenlenmesiyle elektrik gücü üretecek bir potansiyele sahip olurlar. Şekil'de gösterildiği gibi güneş hücreleri alt ve üst kısmına bağlanan iletkenlerin bir yüke bağlanması sonucu belli miktarda güç üretirler.



Şekil 3.22 Bağlantıları Birleştirilmiş Elektron-Boşluk Çifti

Fazlalık elektronlar üst temas noktasına, boşluklar da alt temas noktasına yaklaştığında bazı elektronlar, aslı elektriksel güç olan yüke doğru akım oluşturarak üst temas noktasına doğru akar. Aynı şekilde fazlalık elektronların alt kısma, boşlukların da üst kısma yakın olması ters yönlü bir akımın akmasına sebep olur. Bu durumda yüke doğru akan akım çok düşük ve rastgele bir yönde olacaktır. Böyle bir düzenek güç üretmede kullanışsızdır. Gerekli olan gücü üretmek için önemli olan malzemelerin organize bir şekilde kullanılmasıdır.

Birçok malzeme (genel olarak silisyum, aslında silisyum dioksit), malzemenin n-tipi ve p-tipi sürümlerini oluşturmak için safsızlıkla katkılanabilir. n-tipi malzeme elektronlar açısından zengin, p-tipi malzemeler ise boşluklar açısından zengindirler. Her zaman n-tipi malzemede biraz boşluk, p-tipinde de biraz elektron bulunmaktadır; fakat serbest elektronların çoğunluğu n-tipi malzemeye doğru, boşlukların çoğunluğu da p-tipi malzemeye doğru akacaktır. Şekil 3.23'de gösterildiği gibi bir güneş hücresi, bir n-tipi tabakanın p-tipi tabakanın üzerine koyulmasıyla elde edilir.

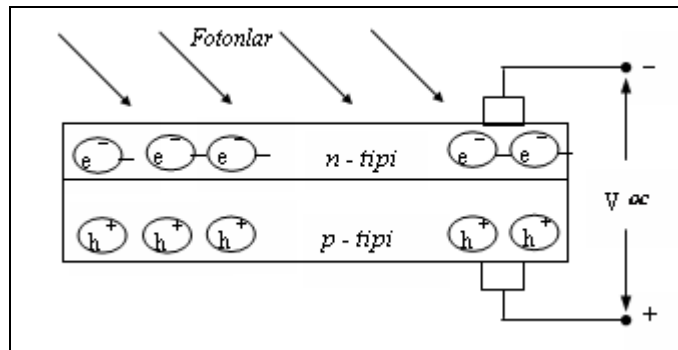


Şekil 3.23 Güneş Pili Şeması

Bir foton bir elektronu serbest bıraktığında, elektron üstteki n-tipi malzemenin içine doğru, boşluk da p-tipi malzemenin içine doğru hareket etmek isteyecektir. Fakat hücrenin diyot yapısı n ve p tipi bölgelerin arasında elektronları ve boşlukları birbirinden uzak tutacak bir eklem (junction) oluşturur. Elektronlar benzer yüke sahiptirler ve birbirlerini iterler. Aynı şey boşluklar için de geçerlidir. Eklemi aşacak ve tekrar bir araya getirecek sürücü kuvveti ile güneşin elektron-boşluk çiftlerini serbestleştirecek sürücü kuvveti eşit olana kadar güneş hücresi serbest elektron-boşluk çiftlerinin denge yoğunluğuna ulaşacaktır. Denge halinde, elektron-boşluk çiftleri yaratıldıkları hızla tekrar bir araya gelirler.

3.11.1 Açık Devre Gerilimi

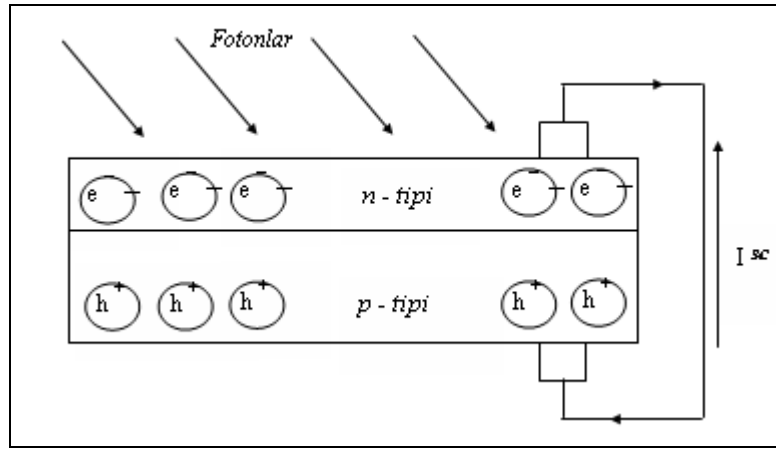
Üst kısımda fazlalık elektronlar, alt kısımda da fazlalık boşluklar olması sebebiyle hücrenin altı ve üstü arasındaki voltaj oranında yük farkı oluşur. Üst ve alt kısımlar arasında Şekil 3.24’de gösterildiği gibi bir voltmetre bağlayarak, hücrenin açık devre voltajı V_{oc} ölçülebilir. V_{oc} hücrenin yapıldığı maddeye ve güneş ışığının şiddetine göre değişebilir. Yüksek şiddetli güneş ışığı, yüksek yoğunlukta serbest elektron-boşluk çiftleri oluşturur ve bu da açık devre voltajını yükseltir.



Şekil 3.24 Açık Devre Voltajı

3.11.2 Kısa Devre Akımı

Üst kısım ile alt kısım direnci sıfır olan bir tel ile bağlandığında elektronlar telin içinden akacak ve alt kısımda Şekil 3.25’de gösterildiği gibi boşluklarla birleşecektir. Hücre üzerindeki voltaj sıfıra düşer ve tel üzerinden akan akım kısa devre akımıdır. Kısa devre akımı I_{sc} kullanılan maddeye, güneş ışığının şiddetine ve uç kısımların nasıl tasarlandığına bağlıdır. Elektronlar ve boşluklar uçlara doğru kendi yollarını bulmalıdırlar. n-tipi ve p-tipi malzemelerdeki iç direnci hücrenin iç direnci olan R_{sc} ’dir. I_{sc} , hemen hemen güneş ışığı şiddeti ile doğru orantılıdır, çünkü fotonlar elektron-boşluk çiftlerinin elektronların telin içinden akması ve alt kısımda boşluklarla birleşmesiyle aynı hızda oluşur. I_{sc} ayrıca hücrenin büyüklüğü ile de doğru orantılıdır.



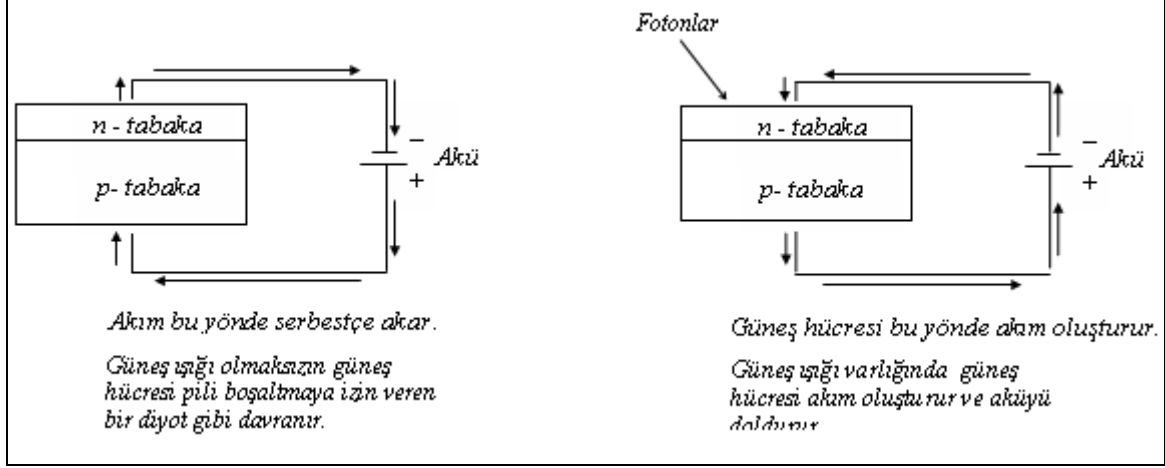
Şekil 3.25 Kısa Devre Akımı

Güneş hücreleri hem n-tipi üstte p-tipi altta, hem de p-tipi üstte ve n-tipi altta olacak şekilde yapılabilir. Her iki durum da çalışacaktır ama hücrelerin çoğu n-tipi üstte olacak şekilde yapılır. Elektronlar boşluklardan daha çok hareket edebilme yeteneğine sahiptir; kristalde boşluklara göre daha kolay ve daha serbest hareket edebilirler. Güneş hücresi üstündeki uçlar güneş ışığını engeller, bu yüzden üst kısımda olabildiğince az ve küçük akü başı kullanılması tercih sebebidir. Hücrenin alt kısmı geniş bir akü başı yapmak için tamamen gümüş ile kaplanabilir. Eğer p-tipi üstte yerleştirilirse, boşluklar üstteki akü başlarına doğru hareket etmek zorunda kalacak ve güneş hücresi üst kısımda n-tipi malzemenin kullanıldığı duruma göre daha fazla iç dirence sahip olacaktır.

3.11.3 Güneş Hücresi Modeli

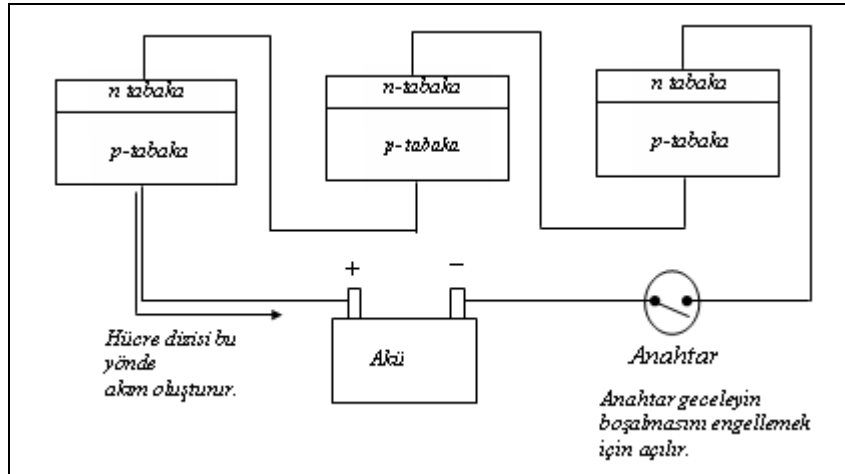
Bir güneş hücresi p-n ekleminden (junction) oluşmuş olan ve yüzeyi özel olarak arttırılmış bir diyottur. Eğer hücreye hiç güneş ışığı gelmezse, hücre tamamen Şekil 3.26’da gösterildiği

gibi akımın aküden dışa doğru serbestçe akmasına izin veren ve diğer yönde akmasını engelleyen bir diyot gibi davranacaktır. Güneş hücresinin akımı ters yönde oluşturduğuna ve bu yüzden hücrenin akımı diyot gibi serbest olarak geçireceğine dikkat etmek gerekir. Tasarım açısından bakılacak olursak bu durumun iki sonucu vardır.



Şekil 3.26 Güneş Hücresi – Diyot Modeli

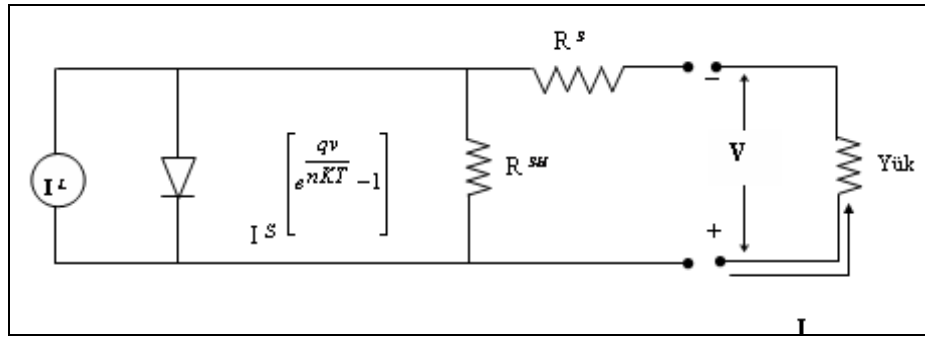
Birincisi, eğer güneş hücresi aküyü şarj ediyorsa devreye bir anahtar eklenmelidir. Hücrelerin gün ışığı gelmediği zaman akülerin boşalmasını önlemek için kullanılan bu anahtar geceleri açık tutulmalıdır ki akü boşalmasın (Şekil 3.27). İkincisi ise bir hücre düzeneğindeki herhangi bir hücrenin gölgede kalması bu hücrenin akım üretememesine ve diğer hücrelerin akımını engelleyecek şekilde diyot gibi davranmasına neden olacaktır. Bu durumda “by-pass” diyotları kullanılmalıdır.



Şekil 3.27 Pillerin Boşalmasını Engelleyen Anahtar

3.11.4 Pillerin Boşalmasını Engelleyen Anahar

Bir güneş hücresinin eşdeğer devresi Şekil 3.28’de verilmiştir. Burada I_s hücre tamamen gölgedeyken ki diyot doyum akımı ve I_L güneş ışığının yarattığı potansiyel farkından oluşan akıma benzer bir akım kaynağıdır. R_{SH} şönt direncidir. Bazı elektron-boşluk çiftleri bağlantı üzerinde tekrar birleşecekler. R_{SH} bu “akım akışına” karşı oluşan dirençtir. İdeal olarak bir güneş hücresinin sonsuz şönt direncine sahip olması beklenir, yani $R_{SH} = \infty$ fakat gerçek hücreler için bu mümkün değildir. R_S hücrenin iç seri direncidir. Hücreler kendilerinin ürettiği enerjiyi soğuran iç dirence sahiptirler.



Şekil 3.28 Güneş Hücresinin Elektriksel Modeli

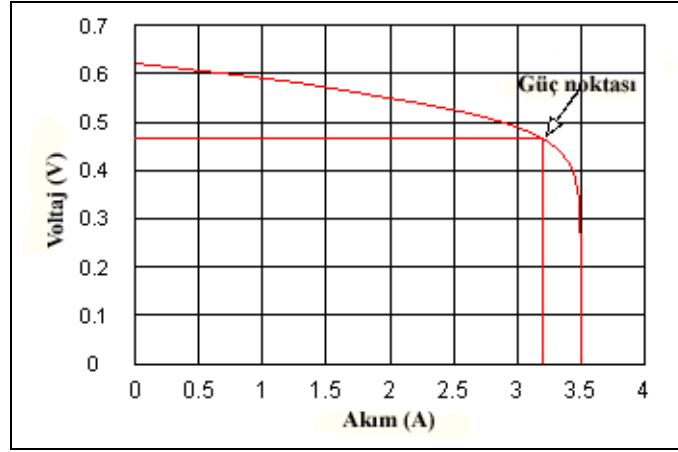
Bu devrede I : Hücresinin çıkış akımı, V : Hücresinin çıkış voltajı, q : Bir elektronun yükü olmak üzere $1.6021773 \times 10^{-19}$ C, K : Boltzmann sabiti (1.380658×10^{-23} J/K), T : Mutlak sıcaklık ve n model parametresidir (silikon için 1.5). Hesaplanan 3.1’de böyle bir devrenin oluşturacağı çıkış akımı gösterilmiştir:

$$I = I_L - I_S \left[e^{\frac{q}{nKT} (V + IR_S)} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki model (3.2)’de hesaplanan açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} bilgileri kullanıldığında bir güneş hücresi için uygun bir veri haline gelir.

$$V = V_{oc} ; I = 0 \text{ iken}$$

$$I = I_{sc} ; V = 0 \text{ iken} \quad (3.2)$$

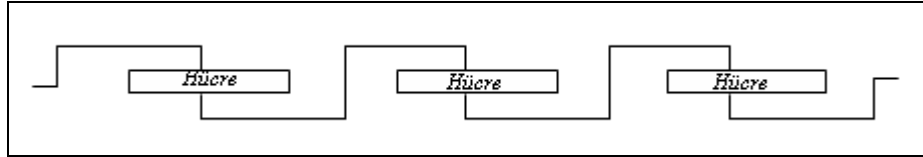


Şekil 3.29 Tipik Güneş Hücresi V – I Eğrisi

Hücre için $I = 3.20 \text{ A}$ ve $V = 0.468 \text{ V}$ olduğu durumda maksimum çıkış gücü 1.5 W 'tir. Bu model güneş hücreleri ve hücre dizileri ile ilgili birçok konuda kullanılır.

3.11.5 Güneş Hücresi Dizilerinin Bağlanması

Hücreleri dizi şeklinde dizerken dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar vardır. Dizi voltajı, akü sistem voltajı ve güç düzenleyiciler ile uyuşmalıdır. İdeal olarak dizi voltajı akü sistem voltajından biraz daha yüksek olmalıdır. Bu yükseltici trafodan daha verimli olan düşürücü trafonun kullanımına olanak sağlar. Tipik bir akü sistem voltajı olan 100 V 'a ulaşmak için birçok hücre Şekil 3.30'da olduğu gibi seri olarak bağlanmalıdır.



Şekil 3.30 Güneş Hücrelerinin Seri Bağlanması

Seri bağlanan bir devrede bütün güneş hücrelerinden aynı akım geçer. Burada önemli olan dizide bulunan bütün hücrelerin yaklaşık olarak aynı güç akımına sahip olmalarıdır. Örneğin, farklı güç akımına sahip iki seri bağlı hücreyi ele alalım:

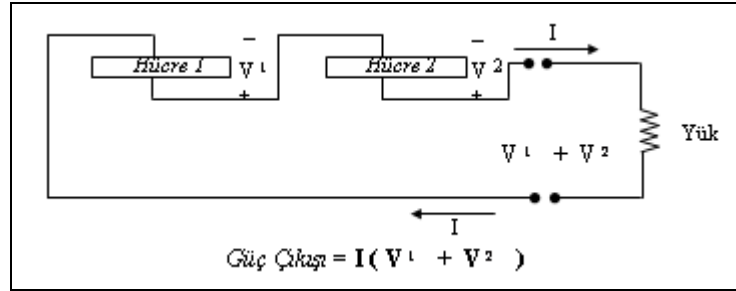
1 nolu hücre 0.468 V ve 3.199 A 'de 1.497 W güce sahip olsun.

2 nolu hücre de 0.470 V ve 2.244 A 'de 1.0546 W güce sahip olsun.

Eğer bu iki hücre bu güçlerde çalışırlarsa, iki hücrenin kendi aralarında üreteceği toplam güç;

$1.497 + 1.0546 = 2.5516 \text{ W}$ olur.

Ancak bu iki hücre seri olarak bağlanacak olursa, ikisi de aynı akımı taşımak zorunda kalacak ve kendi güçlerinde çalışamayacaklardır. Eğer iki hücrenin taşıdığı akım I , sağladıkları voltaj V_1 ve V_2 ise bağlantı şeması Şekil 3.31'deki gibi olur.



Şekil 3.31 Yanlış Eşleşmiş Hücrelerin Bağlantı Şeması

3.11.6 Dizinin Gölgeleme Durumu

Eğer dizi içindeki bir hücre gölgede kalırsa, aydınlatma seviye akımı (I^L) hızlı bir şekilde düşecektir. Gölgede kalan herhangi bir hücre hızla azalan kısa devre ve güç akımına sahip olacaktır ve dizideki diğer hücrelerin akımını sınırlandıracaktır. Eğer tamamen gölgede kaldıysa, hiç güneş enerjisi alamıyorsa, bu hücre akımı engelleyen bir diyot gibi davranacak ve hücre dizisinden geçen akım sıfır olacaktır. Bu durumda bütün dizinin çıkış gücü de sıfır olacaktır. Zarar görmüş veya zayıf hücreleri baypas etmek için baypas diyotları kullanılabilir ancak, baypas diyotlarıyla bile dizinin çıkış gücünü azaltmak için fazla gölgeleme oluşturulmaz.

3.12 Güneşten Elektrik Üretiminin Yararları

Elektrik üretimi için pek çok yöntem olmasına karşılık, güneş pilleri ile elektrik üretiminin bazı yararları vardır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Mevcut sistemlerden farklı olarak en büyük yararı, Herhangi bir fosil yakıt veya bağlantı gerektirmeden bağımsız olarak elektrik üretebilmesidir.
- Kullanılan yakıtı, her yerde ve bedava bulmak mümkündür. Taşıma ve depolama gibi sorunlar yoktur.
- Sistemde kullanılan hareketli parçalar çok az olduğundan çok az bakım gerektirirler. Elektrik üretiminde kullanılan diğer sistemler (jeneratörler, rüzgâr veya hidroelektrik türbinleri vs) düzenli olarak bakıma gerek duyarlar. Eğer, pv sisteminiz kompleks ise, bir parça bakım gerekebilir; ancak, genel olarak, bu sistemler için "bakımsız" demek yanlış olmayacaktır.
- Diğer elektrik üretim sistemleriyle karşılaştırıldıklarında, belki de en büyük yararları güvenilir olmalarıdır. Hareketli parçaları ya çok azdır; ya da yoktur. Şimşekler, güçlü rüzgarlar veya kum fırtınaları, nem ve ısı, kar veya buz gibi doğa olaylarına

dayanıklılırlar.

- Enerjiyi kullanmak istendiği yerde üretmek olasıdır. Böylece enerjiyi taşımak gerekmez. Şebekenin ulaşmadığı, örneğin, GSM vericilerinin yerleştişildiği yerlerde, bu sistemi kullanmak olasıdır.
- Enerji kaynağı ile kullanım yeri arasında, uzun kablolar ve bağların elemanları olmadığından arada oluşabilecek güç kaybından kaçınılmış olur. Bu sistemle, çok sayıda tüketim noktası beslenmek istendiği zaman bile yerel kayıplar yok denecek kadar azdır.
- Modüler bir sistem olduğu için güç çıkışı kolaylıkla arttırılabilir. Mevcut modüllere yenilerinin eklenmesi ile sistem, artan güç gereksinimini karşılayabilecek duruma getirilebilir.

4. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ

4.1 Giriş

Petrol tüketiminin artması ve buna bağlı olarak dünyadaki rezervlerin orta vadede sıkıntı yaratabilecek düzeyde azalacak olması insanları yeni arayışlar içersine itmektedir. Bu durum petrol türevi yakıtlar ile çalışan günümüz araçlarının da ortak sorunu olmuştur. Bilim insanları ve otomotiv sektörü bu alanda bir takım çalışmalar yapmaktadır. Bunların en başında öne çıkan çözüm ise elektrikli araç teknolojisidir. Son zamanlarda daha da ön planda olan elektrikli araç teknolojisi giderek yaygınlaşmakta ve gelecekte yollarda görmeye alışacağımız bir teknoloji olma yolunda hızla ilerlemektedir. Bunun öncesinde bu teknolojinin gereksinimi olan bir takım alt yapı çalışmalarının da önceden halledilmesi gerekiyor. Araçlar için şarj veya dolum istasyonları ve bu araçların yine bakımları için kalifiyeli servis elemanları, donanımlı servisler bunlardan bazılarıdır. Bu alt yapıyı hazırlama görevi başta ülke yöneticileri olmak üzere özel sektöre düşmektedir. Bu yeni teknoloji araçların kullanımının yaygınlaştırılması için hem üretici firmalar hem de tüketiciler için bir takım teşviklerinde yapılması olumlu bir adım olacaktır.

Elektrikli araç (EA) kavramı geçtiğimiz on yılda otomobil sektörünün ArGe bölümlerinden prototip atölyelerine doğru yolculuğunu bitirmiştir. Seri üretim hatlarına doğru olan yolculuğu ise kısmen tamamlanmıştır. Bilhassa hibrid (karma) elektrikli araçlar (HEA), önümüzdeki on yıl içerisinde tüm araç sınıflarında ağırlıklı tercih edilecektir. Başlangıçta konvansiyonel araçlarda bulunan birçok ekipmanı da bünyesinde bulunduran HEA'lar, bir çok kesimde tüketicilerin beğenisine sunulmaktadır. Bu arada uzun yıllardır özel kullanımlar için geliştirilmiş bataryalı araçlar, batarya ve güç elektroniği teknolojilerinin gelişimine paralel olarak, kullanıcılarına daha yüksek menzil ve kullanım rahatlığı sağlamaktadır. HEA'ların en önemli özellikleri, sabit şarj sistemlerinden bağımsız, konvansiyonel araçlara benzer şekilde menzile sahip olmalarıdır (TÜBİTAK, 2003).

Konvansiyonel araçlar ile elektrikli araç tipleri arasında, aynı şartlarda verim ve emisyonlar açısından farkları incelendiğinde özetle şu sonuçlara ulaşılmaktadır:

Benzinli konvansiyonel araç (100 km de 8.4 litre ortalama yakıt tüketimi):

- Verim: %28
- Sera gazı ve çeşitli kitleciler yüksek, menzil yakıt deposunun kapasitesine oranla değişmektedir.

Tümü elektrikli araç:

- Verim: %32
- Sera gazları ve kirleticiler elektrik santralleri tarafından üretilmekte, menzile sınırlı/düşük ve şarj sistemlerine bağımlılığa sahiptir.

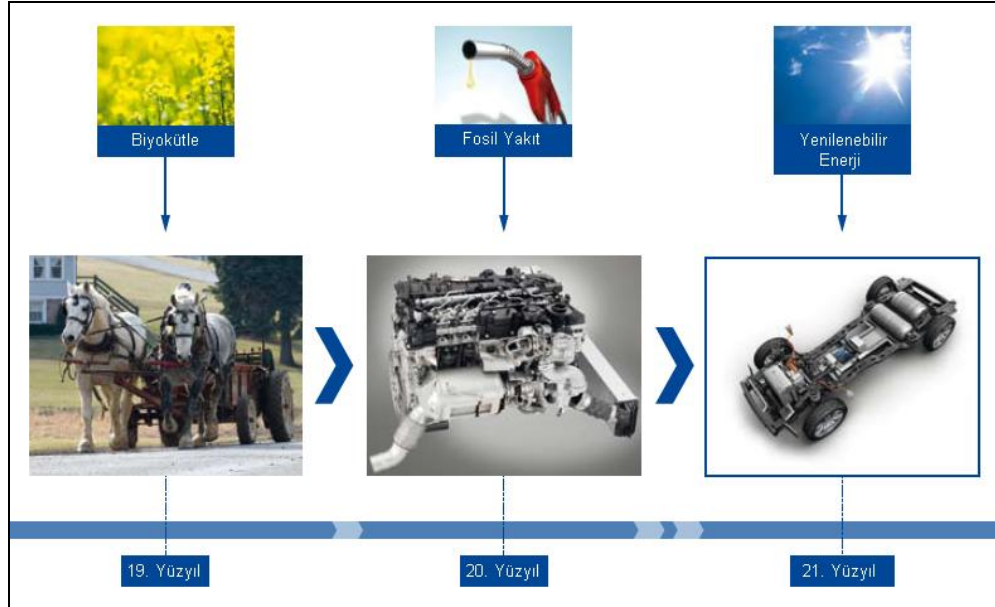
Hibrid elektrikli araç:

- Verim: % 41
- Konvansiyonel araca göre sera gazları ve kirleticiler %55 ve yakıt tüketimi %30 oranında daha düşük ve menzile aynıdır.

Yakıt pilli araç:

- Verim: %43 (On yıl içerisinde %48)
- Konvansiyonel araca göre sera gazları ve kirleticiler %90 ve yakıt tüketimi %40 oranında daha düşük ve menzile aynıdır.

Fosil kökenli yakıtların azalması ve çevresel beklentilerin artması ile önümüzdeki 10 yıl otomobil kavramında ve sanayisinde yeni tanımlar ile birlikte yeni oyuncular yerlerini alacaktır (TÜBİTAK, 2003).



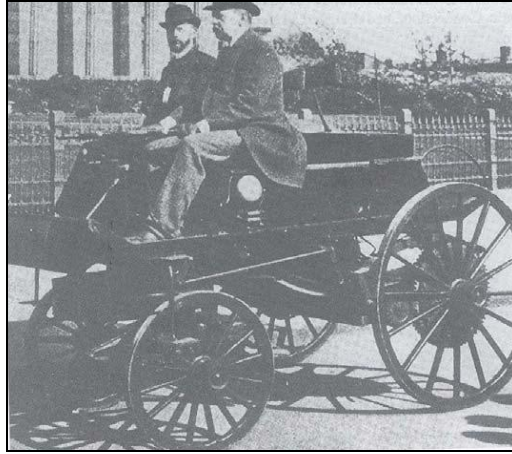
Şekil 4.1 Araç teknolojisinin yüzyıllara göre gelişimi

4.2 Elektrikli Araçların Tarihçesi

İlk EA modeli 1835 yılında Profesör Stratingh tarafından Hollanda'da yapılmıştır. 1834-1836 yılları arasında Thomas Davenport tarafından ABD'de elektrikli yol aracının geliştirildiği ve uygulamasının yapıldığı raporlanmıştır. Bu araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilmeyen bataryalarla tahrik edilmiştir. 4 yıl sonra Robert Davidson şarj edilemeyen batarya ile tahrik edilen elektrikli lokomotifini geliştirmiştir. 1859 yılından sonra kurşun-asit bataryaları geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

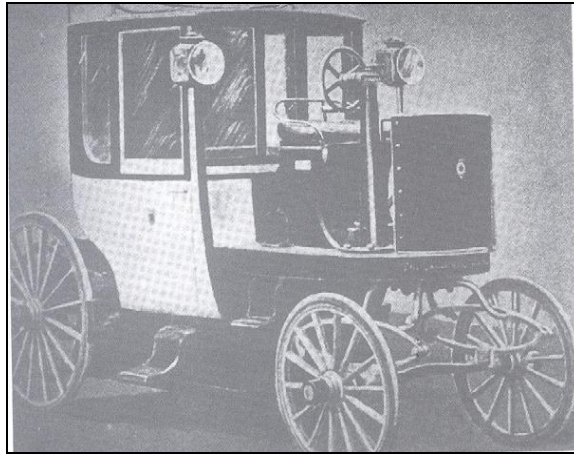
1882 yılında İngiltere’de Prof. William Ayrton ve John Perry elektrik tahrikli 3 adet tekerlekli aracın uygulamasını yapmıştır. Bu araçların her birinde 10 tane kurşun-asit batarya kullanılmıştır. Aracın menzili araziye bağlı olarak 16-20 km arasında olup azami hızı ise 14 km/saattir. Bundan 3 yıl sonra Carl Benz İYM ile 3 tekerlekli aracı geliştirmiştir.

19. yüzyılın son dönemlerine doğru Amerika, İngiltere ve Fransa’da bir çok şirket elektrikli araç üretmeye başlamıştır. Bu üreticilerden en önemlisi Morris ve Salomon’un sahibi olduğu Electric Carriage and Wagon Company adlı şirkettir. Morris ve Salomon 1895 yılında 2 oturma koltuğu olan Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 1895 yılında yapılan Electrobats isimli elektrikli araç

EA’larla ilgili bu gelişmeler olurken, İYM’larda hızla gelişmeye başlamıştır. 1900 yılında Amerika’da üretilen araçların 1684 tanesi buhar tahrikli, 1575 tanesinin elektrik tahrikli ve 963 tanesinin de İYM’lu olduğu belirtilmektedir. Amerika’da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere’de “Londra Elektrikli Taksi Şirketi” (London Electrical Cab Company) tarafından 15 tane taksi kullanıma alınmıştır. (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Londra elektrikli taksi aracı

1900-1912 arası dönemde menzil ve performansı artırma düşüncesi oluşmaya başlamıştır. Bu amaçla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları geliştirmiştir. Bu araçta elektrik motor, benzinli motor ile birlikte kullanılmış ve ilk defa hibrid konfigürasyonu denenmiştir.

Bu dönemlerde Ferdinand Porsche ilk deneysel hibrid elektrikli aracın tasarımını yapmıştır. Mixt Wagen olarak adlandırılan bu araçta yardımcı bir benzinli motor kullanılmıştır. İYM bataryaları şarj eden generatörü tahrik etmektedir ve daha sonra elektrik motorunu döndürmektedir.

1916 yılında Woods hibrid elektrikli araç üretilmiştir. Bu araçta 4 silindirli küçük benzinli motor direkt olarak elektrik motoru/generatör grubuna ve daha sonra konvansiyonel itici şaftıyla ön tahrik aksına bağlanmıştır. Bu düzenleme ile paralel hibrid elektrikli araç geliştirilmiştir.

1920'lerin başında ise hemen tüm elektrikli araç üreticileri İYM kullanarak üretimlerini sürdürmüşlerdir. 1920'lerin ortasından itibaren 1960 yıllara dek İYM'lu araçlar tüm dünyada tamamen üstünlük kurmuştur.

1960'lı yıllarda EA'lara duyulan ilgi yeniden artmaya başlamıştır. İYM'lardan kaynaklanan hava kirliliği bu araçların üretimine geçiş düşüncesini oluşturmuş ve bazı küçük üreticiler hava kirliliğine karşı EA'ların üretimine geçmiştir. Üretilen çoğu elektrikli araçlar, konvansiyonel araçların elektrikli hale dönüştürülmüş şeklidir. Örneğin 1960'da Illinois'deki Eureka Williams Şirketi 4 kapılı Renault Dauphine'i elektrikli versiyona dönüştürmüştür.

İYM'lu araçları elektrikli versiyona dönüştüren bazı önemli otomotiv firmaları, bu dönemlerde elektrikli aracı baştan sona tasarlamak üzere harekete geçmiştir. Buna bir örnek, İngiltere'deki Ford Motor firmasıdır. 1966 yılında bu firma aşağıdaki gereksinimleri yerine getirebilecek bir elektrikli aracın tasarlanmak üzere işe koyulmuştur:

- En düşük kirlilik,
- Kolay Çalışma,
- Düşük ilk satın alma ve kullanım maliyeti,
- En düşük yol ve park alanı kaplayacak kadar küçük olmasıdır.

1967 yılında ilk prototip yapılmış ve Comuta adı verilmiştir. Bu araç Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

Comuta her biri ön tekeri tahrik eden 2 tane DC motoruna sahiptir. Her motor 18 kg ağırlığında ve 14 cm çapındadır. Motorun titreşimini kontrol eden bir sistem geliştirilmiştir.

Aracın gücü, toplam ağırlığı 170 kg olan 4 adet kurşun-asit bataryasından sağlanmaktadır. Araç 40 km/saat hız ile 64 km menzile sahip olup; azami hızı 64 km/saattir.



Şekil 4.4 1967 yılında Ford tarafından Comuta model ilk prototip çalışma

1968 yılında General Electric GE Delta aracının uygulamasını ortaya çıkartmıştır. Bu aracın menzili 64 km, azami hızı da 89 km/saattir. Bu araçta nikel-demir bataryaları kullanılmıştır. Aynı yıl Ford nikel-kadmiyum bataryaları kullanarak deneysel E-Car aracının prototipini yapmıştır. Bu dönemde, AC tahrikindeki çok önemli gelişme olmadığı takdirde kabul edilebilir menzil ve performansa sahip EA'ların üretiminin zor olduğu görülmüştür.

1970'lerin ortalarına doğru petrol krizi ile birlikte başta Amerika, İngiltere, Fransa, Almanya, İtalya ve Japonya gibi bir çok ülke, elektrikli araç araştırmalarına tekrar hız vermişlerdir. Amerika'daki bazı küçük firmalar konvansiyonel araçları elektrikli hale dönüştürme çabalarına girmiştir. Avrupa'da 1970'li yıllar çok aktif bir dönemdir. 1973'de Electricite de France 80 tane konvansiyonel aracı elektrik tahrikli hale dönüştürmüştür. Almanya'da Daimler – Benz ve Volkswagen ise deneysel EA'lar yapmışlardır. 1975 yılında İtalya'da Fiat X1/23 B isimli deneysel bir prototip geliştirmiştir. Bu araç 2 kişilik olup kurşun-asit bataryaları içermekte ve DC elektrik motoru tarafından tahrik edilmektedir. Menzili 48 km ve azami hızı 64 km/saatin altındadır.

Japonya'da 1970'li yıllar boyunca Daihatsu, Toyota, Mazda ve Mitsubishi birlikte prototip EA'lar üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma için Japonya hükümeti 1971-1976 yılları arasında 20 milyon dolarlık destek sağlanmıştır. İlk araçlarda kurşun-asit bataryalarıyla birlikte DC tahriki kullanmıştır ve 1980'lerden itibaren AC tahrikinin kullanılmaya başlandığı görülmektedir.

1980'li yıllarda hükümetler EA'ların çevresel avantajları nedeniyle bu araçlara karşı ilgi duymaya ve elektrikli araç programları için resmi kaynaklardan parasal destek vermeye başlamışlardır. Böylece 1980 yılların ortalarında ABD Enerji bakanlığının sponsorluğu ile Ford/GE tarafından ETX-1 aracının geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu araçta ileri AC tahrik sistemi kullanılmıştır. 200 V'luk kurşun-asit bataryaları, 300A AC güç üreten Darlington transistör bazlı evirici ile birlikte 37 kW'lık 2 kutuplu indüksiyon motorunu tahrik etmek için kullanılmıştır.

1988 yılında Ford ve GE birlikte ETX-1 isimli aracın AC tahrikli sistemini geliştirmiş ve sodyum-sülfür bataryaları kullanmışlardır. Temel olarak Ford Araştırma Laboratuvarlarında geliştirilen evirici, senkron kalıcı manyetik motoru sürmektedir. Bu motor, 2 kademeli entegre dişli kutusu ile, taşıtın ön aksına monte edilmiştir. 160 km menzile sahip ve 96 km/saat hızı olan ve sodyum-sülfür bataryaları da içeren 2 tane ETX-2 prototipi üretilmiştir. Bu 2 araç 1988 yılı Aralık ayında ABD Enerji bakanlığına teslim edilmiştir.

Fransa'da 1988 yılında 500 kadar elektrikli araç deneysel olarak kullanılmıştır. Bu araçların çoğu Peugeot 205 ya da Citroen C15 modellerinin dönüşümleridir. Almanya'da 1970'lerin sonlarındaki deneysel araçlar daha geliştirilmiştir ve 1988 yılında GES City Stromer isimli aracın dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Taşıt, o dönemin Avrupa Güvenlik Standartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

Aynı dönemde İtalya'da Fiat Panda Elettra modelinin dönüşümü olan elektrikli aracı geliştirmiştir. 1988' de Japonya'da DC tahriki AC'nin yerini almış hem kurşun-asit hem de nikel-demir bataryaları ile senkron ve indüksiyon tahrik motorları kullanılmıştır.

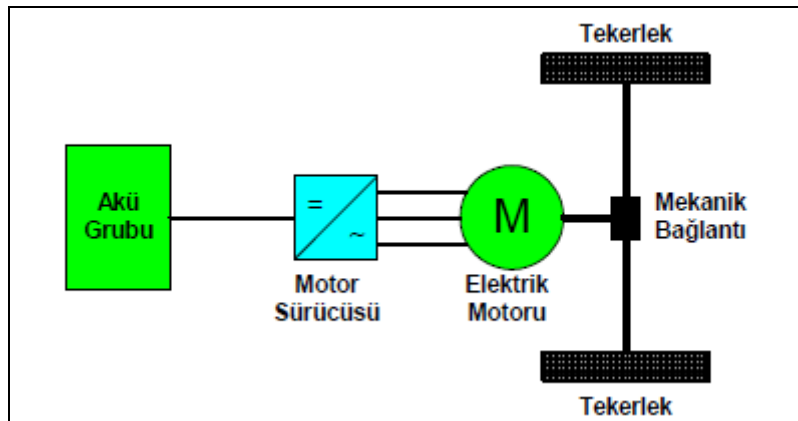
1990 yılından sonra birçok araç üreticisi elektrikli araç geliştirmeye başlamıştır. Hali hazırda bulunan bazı EA'lara örnek olarak GM EV1, Ford Think City, Toyota RAV4, Nissan Hipermini ve Peugeot 106 Electric gösterilebilir. Bunlarla birlikte prototip ve deneysel amaçlı üretilmiş birçok elektrikli araç daha bulunmaktadır. Bu araçların çoğu AC indüksiyon motor veya sürekli mıknatıslı (SM) senkron motor kullanmışlardır. 1990'larda büyük araç üreticileri EA'ların gelişmesi için batarya teknolojisinin de gelişmesi gerektiğini belirtmekte, bu amaçla da tümü-EA'ların batarya ve menzil kısıtlarını gidermek için hibrid elektrikli araç geliştirme çalışmaları başlatılmıştır. Özellikle Japon endüstrisi Toyota Prius, Honda Insight ve Nissan Tino modellerini geliştirmiştir.

4.3 Elektrikli Araç Sistemleri

Elektrikli araçlarda, araç içerisine yerleştirilmiş enerji üretim, dağıtım ve tahrik sistem elemanları birlikte çalışmaktadır. Sistem içerisindeki elemanların birbirlerine bağlanma şekilleri, enerji akışındaki tercihleri ve farklılıklarına göre tahrik sistem konfigürasyonları tanımlanmıştır. Elektrikli araç teknolojisinde kullanılan konfigürasyon ve temel bağlantı şekilleri hakkında bilgi aşağıda sunulmuştur.

4.3.1 Sadece Elektrikle Çalışan Araçlar

Tümü-Elektrikli Araçlar (tümü-EA), depolanan ya da üretilen tüm itici gücü elektrik olarak kullanmaktadır. Bu tip araçlarda ana güç kaynağına ek olarak yardımcı güç kaynakları da bulunmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi elektrik motorunun dönmesi için gerekli olan elektrikselsel enerji bataryalardan elde edilmektedir. Bunun yanında tümü-EA'larda ana bataryaya ilave yardımcı güç kaynağı olarak ikinci bir batarya veya süperkapasitör kullanılabilir. Bu yardımcı güç kaynakları pik çalışma şartları altında örneğin bir yokuşu tırmanırken veya ivmelenirken kısa periyotlar için yüksek güç sağlayabilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu uzun sürüş menzili, yüksek güç yoğunluğu ise ivmelenme ya da yokuş tırmanma ihtiyacını karşılayan dizayn parametreleridir. Bu durumun etkisi öncelikle yüksek enerji, düşük güç yoğunluğuna sahip batarya tipleri için önemlidir. Örneğin alüminyum-hava bataryalar 220 Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğunun yanında, 30 W/kg gibi düşük güç yoğunluğuna sahiptirler. İyi bir ivmelenme veya tırmanma performansı için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulması durumunda yüksek güç yoğunluğuna sahip yardımcı güç kaynağına gereksinim duyulmaktadır. Şekil 4.5'de tümü-EA akış şeması görülmektedir.



Şekil 4.5 Tamamen elektrikle çalışan araç sistemi

Yüksek bir ivmelenme için son yıllarda prototip tümü-EA'larda yardımcı güç kaynağı olarak süperkapasitörler de kullanılmaktadır. Mevcut süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu yaklaşık

15 Wh/kg civarında olmasına rağmen güç yoğunluğu 1 kW/kg dır. Yürütülen çalışmalarda önümüzdeki yıllarda bu değerin 4 kW/kg değerine yükseltilmesi hedeflenmektedir.

Tümü-EA'ların şarj edilebilir bataryalarında depolanmış bulunan elektrik enerjisi motor kontrolörüne güç sağlamaktadır. Motor kontrolörü gaz pedalının pozisyonuna bağlı olarak elektrik motoruna gidecek gücün miktarını ayarlamaktadır.

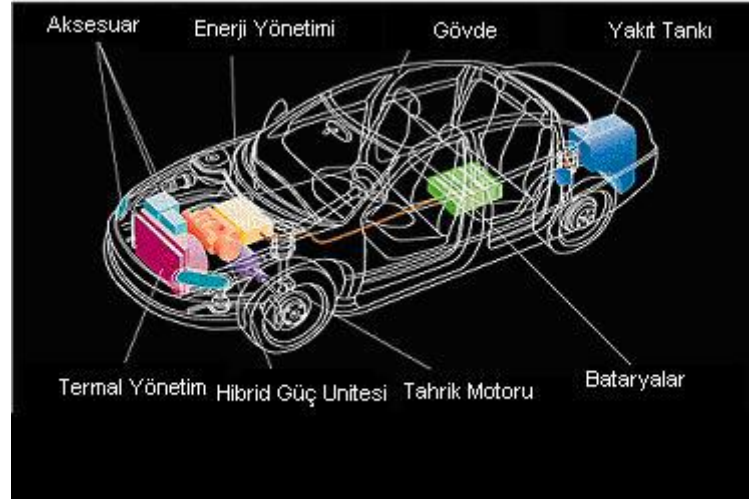
Tümü-EA'lar konvansiyonel araçlara göre daha verimlidir. Bir bataryalı elektrikli araç yaklaşık % 46 verimle çalışmasına karşın, konvansiyonel araçlar %18-25 arasında çalışmaktadırlar. Bir başka deyişle elektrikli araç bataryalarının şarjı için prizden çekilen enerjinin % 46'sı tekerleklerde kullanılabilir işe dönüştürülmektedir. Bunun tersi, konvansiyonel araçlarda yakıt tankında bulunan sıvı yakıtın % 18–25 kadarı tahrik tekerlerinde işe dönüştürülebilmektedir. Ancak bu durumda elektriğin santrallerde üretilmesi sırasında oluşan kayıpla dikkate alınmalıdır.

4.3.2 Hibrid Elektrikli Araçlar

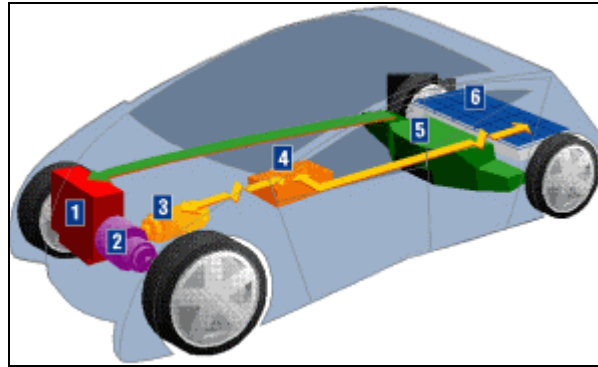
Daha önceden de bahsedildiği gibi HEA'lar birden fazla güç sistemine sahip araçlar olarak ifade edilebilmektedir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonunun Teknik Komitesi (Elektrikli yol araçları) tarafından verilen tanıma göre hibrid elektrikli araç, enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir. Bu genel ifadeye bağlı olarak, batarya-yakıt pili, batarya-kapasitör ya da batarya - batarya gibi bir çok çeşit hibrid elektrikli araç versiyonları vardır. Bununla beraber yukarıdaki ifade geniş çevrelerce tam olarak kabul görmemiştir. Bir diğer tanımlamada ise hibrid elektrikli araç daha çok hem İYM'unun hem de elektrikli motorun kullanıldığı araç olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle daha kolay anlaşılabilmesi açısından bu kitapta batarya+yakıt pilli EA'lar ayrı bir bölümde incelenmiştir.

Bir hibrid elektrikli araç enerji dönüşüm sistemi, enerji depolama sistemi, güç ünitesi ve taşıtı itici sistemden oluşmaktadır. Enerji depolama için başlıca seçenekler bataryalar, süperkapasitörler ve volanlardır. Bataryalar kullanılan en yaygın enerji depolama sistemi olmasına rağmen, diğer enerji depolama alanlarında da araştırmalar devam etmektedir. Hibrid güç ünitesi olarak da otto motorlar, dizel motorlar, gaz türbinleri ve yakıt pilleri kullanılmaktadır. İtici kuvvet ise seri hibrid sisteminde olduğu gibi elektrik motorundan, ya da paralel hibrid de olduğu gibi elektrik motoruna ek olarak İYM'undan sağlanabilmektedir.

Çünkü paralel hibrid sistemde İYM, itici gücü mekaniksel olarak tekerlere vermektedir. (Şekil 4.6 ve 4.7)



Şekil 4.6 Hibrid elektrikli araç sistemi



Şekil 4.7 Hibrid aracın enerji sistemini oluşturan başlıca bileşenler

Şekil 4.7'ye göre hibrid elektrikli aracın alt elemanları aşağıda belirtilmiştir.

- İYM
- Transmisyon
- Elektrik motoru
- Güç elektroniği
- Yakıt tankı
- Bataryalar

4.3.3 Yakıt Pili Elektrikli Araçlar

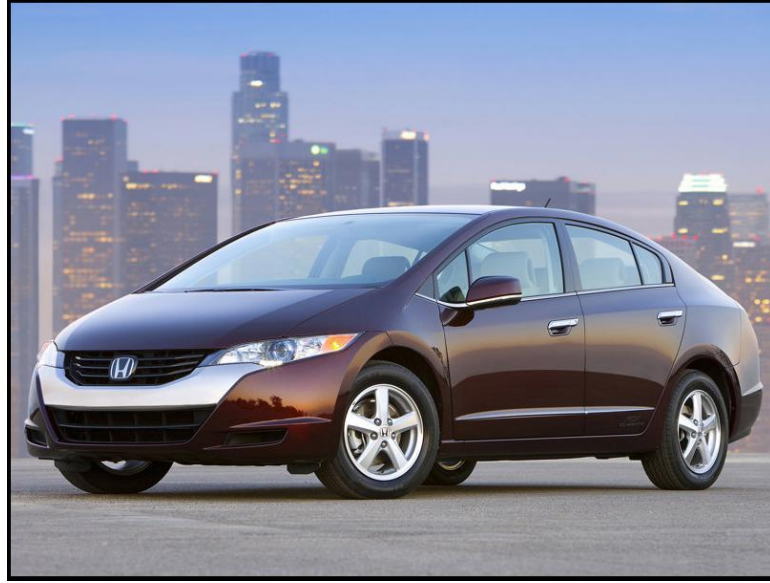
Bir yakıt pilli EA; yakıt depolama sistemi, yakıt pili-kontrol ünitesi, güç işlemci ünitesi-kontrolü ve tahrik sisteminden (elektrik motorları, vb) oluşmaktadır. Yakıt depolama sisteminde depolanan hidrojen direkt olarak veya fosil kökenli yakıtların, yakıt işleme

prosesine tabi tutulması ile elde edilen hidrojen yakıt piline beslenir. Bir yakıt pil biriminin çıkış gerilim değeri 0,7 Volt mertebesindedir. Bu nedenle birkaç yakıt pil birimi seri olarak bağlanarak çıkış gerilimi arttırılır. Yakıt pilli bir aracın resmi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Yakıt pili ve elektrik motoru arasındaki güç elektroniği devresi, gerilim değerinin yükseltilmesi amacı ile için DC motorlarda DC/DC çeviricisine, AC motoru için DC/AC eviricisine, kontrol için mikroişlemci/dijital sinyal işlemcisin, aşırı yüklenme şartları ve rejeneratif frenleme için batarya depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt pilli elektrikli bir araçta batarya yerine süperkapasitörler de kullanılmaktadır. Fakat mevcut teknoloji daha süperkapasitörlerin bataryaların yerini alabilmesi için maliyet ve güvenilirlik açısından geliştirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Yakıt pilinin performansı gerilim ve akım çıkış karakteristikleri nedeniyle yük değişimlerine karşı duyarlıdır. Yakıt pilinin kontrol ünitesi, gerilim ve akım bilgilerini düzenleyerek istenilen güce göre yakıt piline girecek hidrojenin miktarını ayarlar.

Proton elektrolit membranlı yakıt pilleri (PEMYP) uygulamalarında yakıt saf hidrojendir. Bu durumda, hidrojen sıvı fazda basınçlandırılmış şekilde tankta veya metal hidrürlerle üzerine depo edilir. Hidrojeni depo etmenin en kolay ve en ucuz yolu sıkıştırılmış hidrojeni paslanmaz çelik veya alüminyum alaşımlı tanklarda depo etmektir. Yeterli miktarda hidrojeni depolayabilmek için gerekli 400 atm veya üstüne sıkıştırma işlemi sırasında yüksek miktarda enerjiye gerek duyulmaktadır. Hidrojeni bu basınçlara yükseltmek için, depolanmış hidrojenin yaklaşık %20'si harcanmaktadır. Bu yöntemle gerekli olan basınç tankı araçta fazla yer tutmaktadır. Hidrojenin depolandığı yakıt tankının hacmi aynı enerjiyi içeren benzin tankının hacminden yaklaşık 4 katı kadar daha fazladır.

Hidrojenin depolanmasında kullanılan bir diğer yöntem ise hidrojenin metal hidrür yataklar içinde düşük sıcaklıklarda metalik bileşiklerle bağ yapmasıdır. Metal hidrür ile depolama tekniğinde, sıcaklık arttıkça hidrojen serbest kalmaktadır. Sıcaklık hidrojenin serbest kalma oranını belirlediği için patlama riski sınırlanmaktadır. Bununla birlikte taşıta istenilen menzili verebilecek hidrojenin depolanması için gerekli metal hidrür ağırlığı optimize edilmekten uzak görünmektedir. Hidrojenin depolanmasında alternatif çözümlerden biri, grafit nano-fiberin kullanımınıdır. Bu fiberler ile ilgili bir çok araştırma devam etmek ile birlikte ve yüksek miktarda hidrojen depolama imkanı sağlayabileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.8 Yakıt pili ile çalışan Honda FCX

4.4 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bileşenler

Elektrikli araçlarda çeşitli alt sistemler kullanılmaktadır. Bunlar sırası ile güç üretim sistemleri, enerji depolama sistemleri, güç kontrol sistemleri, tahrik sistemleri ve enerji yönetim sistemlerdir. Güç üretim sistemi olarak tanımlanan alt sistem elemanları, aracın elektrik dağıtım şebekesini tek başına veya farklı enerji üreticileri ile birlikte beslemektedir. Güç üretim sistemleri hakkında detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur.

4.4.1 Bataryalar

Elektrikli ve hibrid elektrikli araç uygulamalarında bataryaların yüksek özgül güç, yüksek özgül enerji ve uzun çevrim ömre sahip olması beklenmektedir. Özgül enerji yoğunluğu enerji kaynağının birim kütlesinde depolanan enerji miktarını göstermektedir. Özgül güç ise yine enerji kaynağının birim kütlesinin verdiği güç olarak ifade edilmektedir.

Çizelge 4.1'de EA'larda kullanılan ve gelişme altındaki bataryaların listesi verilmektedir. azami enerji yoğunluğu; batarya ağırlığının her bir kilogramından, 3 saatlik deşarj döngüsü boyunca elde edilen enerji miktarını belirtmektedir. Bu gösterge batarya tamamen deşarj olmadan ne kadar kullanılabilceğini ifade etmektedir.

Azami güç yoğunluğu depolanan enerjinin bataryadan ne kadar hızla çekilebileceğini göstermektedir. Tablo 16'da ayrıca her bataryanın çalışma sıcaklıkları verilmiştir. Çalışma sıcaklığı hangi bataryanın kullanılacağına karar verilmesi aşamasında çok önemli bir

faktördür. Sodyum-sülfür, sodyum nikel klorür, lityum –demir sülfür gibi daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bataryalar için özel sistemlerin kurulmasına ihtiyaç duyulur.

Batarya ömrü de bir diğer önemli faktördür. Bir batarya için hedef 1000 çevrim ömre sahip olmasıdır. Bu yaklaşık olarak 3-4 yıllık bir kullanım ömrüne karşılık gelmektedir. Birçok batarya çeşidinde derin deşarj çevrimi bataryanın hem enerji hem de güç yoğunluğunu bir miktar azaltmaktadır. Bu nedenle bataryanın ömrü azalmaya yakın performansı da önemli ölçüde azalmaktadır.

Günümüzde EA'lar için maliyet açısından bir değerlendirme yapıldığında enerji depolama konusunda en uygun batarya teknolojisinin kurşun-asit olduğu ifade edilmektedir. Ancak kurşun-asit bataryaların aracın menzilini doğrudan etkileyen enerji yoğunluğu oldukça düşüktür. Gelişmekte olan batarya tiplerinden nikel kadmiyum, nikel metal hidrür, lityum iyon yüksek enerji yoğunluğu ile öne çıkmaktadır. Diğer yandan sodyum sülfür gibi yüksek sıcaklık bataryaları da elektrikli araç uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadırlar. Çizelge 4.2'de kullanılan anot, katot ve elektrolit malzemeleri ile birlikte bataryanın hücre voltajları gösterilmektedir. Yüksek hücre voltajı ile istenilen gerilimdeki bataryayı sağlamak için daha az sayıda hücre gerekir. Böylelikle bataryanın karmaşıklığı azalır ve güvenilirliği artar.

Çizelge 4.1 Batarya tipleri ve genel özellikleri

Batarya Tipi	Azami Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Azami güç yoğunluğu (W/kg)	En hızlı %80 tekrar şarj zamanı (dakika)	Çalışma Sıcaklığı	Çevrim Sayısı (%80 Deşarj durumu)	Maliyet (\$/kWh)
Kurşun-asit	35	150	Veri yok	Ortam	1000	60
Nikel-demir	50	100	Veri yok	Ortam	2000	150-200
Nikel-çinko	70	150	Veri yok	Ortam	300	150-20
Nikel-kadmiyum	50	200	15	Ortam	2000	300
Nikel-metal hidrür	70	200	35	Ortam	2000+	250
Sodyum-sülfür	110	150	Veri yok	350 °C	1000	150
Sodyum-nikel klorür	100	150	Veri yok	300 °C	700+	250
Lityum-demir sülfat	150	300	Veri yok	450 °C	1000	200
Lityum-katı polimer	200	350	Veri yok	80-120 °C	1000	150
Lityum-iyon	120-150	120-150	<60	Ortam	1000+	150
Alüminyum-hava	220	30	Veri yok	Ortam	Veri yok	Veri yok
Çinko-hava	200	80-140	Veri yok	Ortam	200	100

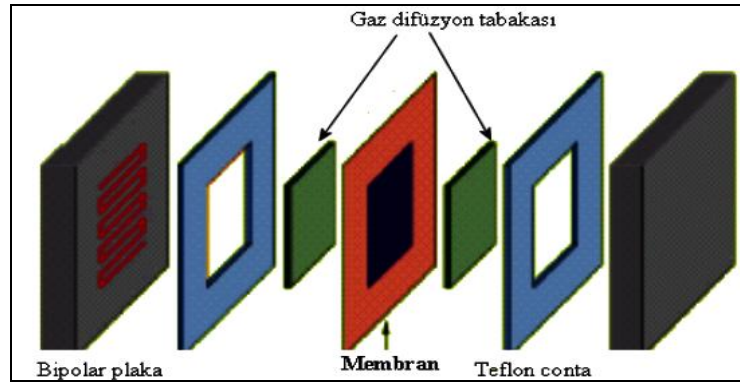
Çizelge 4.2 Batarya gerilim değerleri ve kullanılan malzeme cinsleri

Batarya Tipi	Açık devre Hücre Gerilimi	Anot malzemesi	Katot malzemesi	Elektrolit kompozisyonu
Kurşun-asit	2.1	PbO ₂	Pb	H ₂ SO ₄
Nikel-demir	1.2	Ni	Fe	KOH
Nikel-çinko	1.7	Ni	ZnO ₂	KOH
Nikel-kadmiyum	1.2	Ni	Cd	KOH
Nikel-metal hidrür	1.23	Ni	Metal hidrür	KOH
Sodyum-sülfür	2.1	S	Na	βAl ₂ O ₃
Sodyum-nikel klorür	2.1-2.2	NiCl	Na	βAl ₂ O ₃
Sodyum-demir sülfür	1.75-2.1	FeS ₂	LiAl ya da LiSi	LiCl/KCl
Lityum-katı polimer	2.-2.5	Li	V ₆ O ₁₃ ⁺ siyah asetilen	(PEO*) ₁₂ LiClO ₄
Lityum-iyon	3.6	Karbon ilavesi	LiCoO ₂	Organik
Alüminyum-hava	1.5	Al	O ₂	KOH
Çinko-hava	1.65	Zn	O ₂	KOH

4.4.2 Pem Yakıt Pilleri

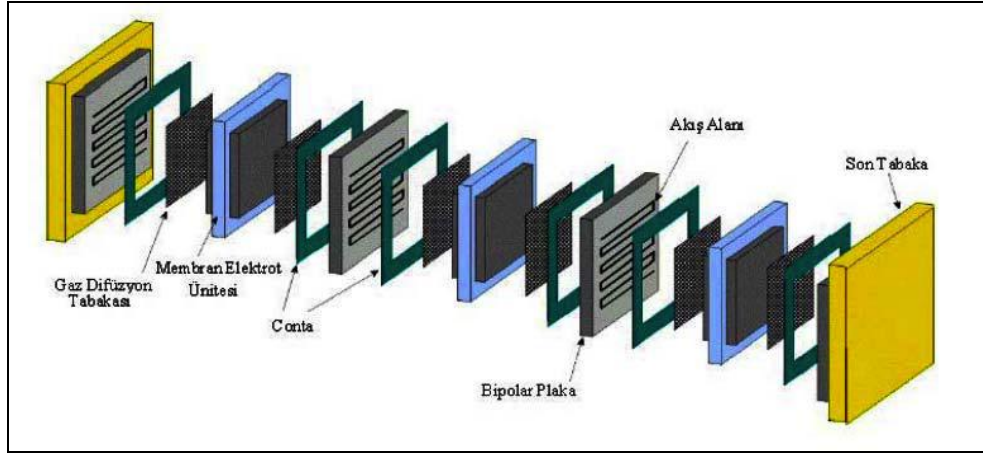
4.4.2.1 Giriş

PEM Yakıt pili hücresi 3 ana bileşenden oluşur. Bunlar membran elektrot ünitesi (MEA), 2 adet gaz difüzyon tabakası (GDL, destek tabakası olarak da adlandırılır) 2 adet bipolar tabaka (akış alanı) dır. Ayrıca hücre içindeki sızdırmazlık 2 adet teflon conta kullanılarak sağlanmaktadır. Şekil 4.9’da tek bir yakıt pili hücresini oluşturan bileşenler görülmektedir.



Şekil 4.9 PEM yakıt pili hücresini oluşturan bileşenler

Tek bir PEM yakıt pili hücresi teorik olarak yaklaşık 1V civarında gerilim üretir. Daha yüksek gerilimlerin sağlanması için bağımsız hücreler bir araya getirilerek yakıt pili modülü oluşturulur (Şekil 4.10).

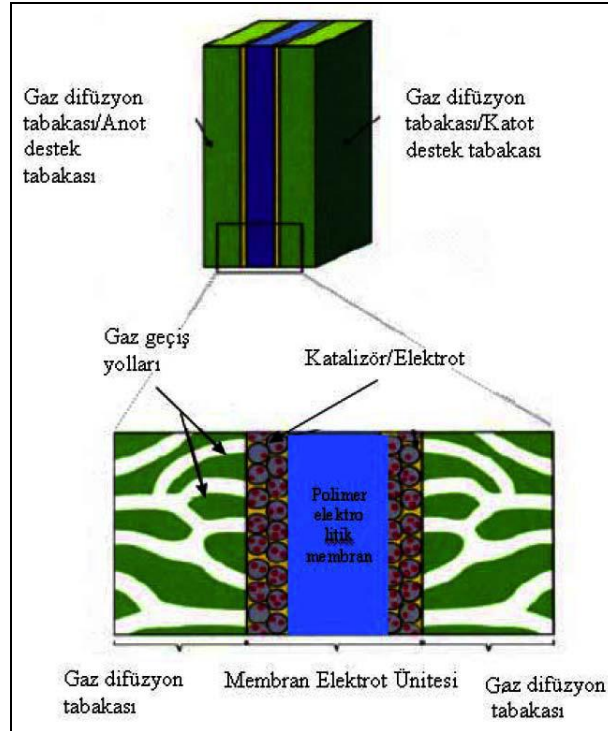


Şekil 4.11 PEM yakıt pili modülü

Modülün oluşturulması için son tabakalar (end plates) ve cıvatalar, giriş çıkış boruları vb. bağlantı elemanları (fuel cell hardware) kullanılır. Yakıt pili modülü oluşturulurken hücreler seri ya da paralel olarak bağlanabilir (TÜBİTAK, 2004).

4.4.2.2 Membran Elektrot Ünitesi

Yakıt pili hücresindeki en küçük yapı birimi olan membran elektrot ünitesi en basit formda şekilde görüldüğü gibi bir polimer elektrolit membran, katalizör tabakaları (anot ve katot) ve 2 adet gaz difüzyon tabakasından oluşmaktadır.



Şekil 4.12 Katalizör tabakaları, gaz difüzyon tabakaları ve proton değişimli membrandan oluşan membran elektrot ünitesinin şematik bir gösterimi

Anot tarafındaki gaz difüzyon tabakası yada diğer bir ifade ile anot destek tabakası, hidrojenin, elektro kimyasal reaksiyonun meydana geldiği katalizör tabakasına ulaşmasını sağlar. Reaksiyon sonucu oluşan protonlar, membrandan katot tarafına geçerken elektronlar destek tabakası tarafından modülün elektrik devresine iletilir. Bu yüzden anot destek tabakası elektronik olarak iletken ve gözenekli bir yapıda olmalıdır. Ayrıca reaksiyon sonucu oluşan ısıyı da reaksiyon bölgesinden uzaklaştıran gaz difüzyon tabakaları, yakıtın ve oksitleyicinin akış kanallarından tüm katalizör yüzeyine dağılımını sağlarlar. Membran elektrot ünitesinin bileşenlerini ve bu bileşenlerin görevlerini özetleyen bilgi Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 MEA bileşenleri ve görevleri

MEÜ bileşenleri	Görevleri
Anot Destek Tabakası	Yakıt temini ve dağıtımı Elektron iletimi Isının reaksiyon bölgesinden uzaklaştırılması Katalizöre buharın ulaştırılması
Anot Katalizör Tabakası	Anot reaksiyonunun katalizlenmesi Membrana proton iletimi Destek tabakasına elektron iletimi Su transferi Isı transferi
Proton değişimli membran	Proton iletimi Su transferi Elektriksel yalıtkanlığın sağlanması
Katot Katalizör Tabakası	Katot reaksiyonunun katalizlenmesi Reaksiyon merkezine oksijen transferi Membrandan reaksiyon merkezlerine proton iletimi Destek tabakasından reaksiyon merkezine elektron iletimi Suyun reaksiyon bölgesinden destek tabakasına iletimi Isı üretimi ve uzaklaştırma
Katot Destek Tabakası	Oksitleyici(hava/oksijen) temini ve dağıtımı Reaksiyon bölgesinden elektron uzaklaştırma Isı uzaklaştırma Sıvı yada buhar fazda su transferi

PEM yakıt pillerinde membran elektrot ünitesi alanında sağlanacak gelişmeler yakıt pillerini laboratuarlardan ticari pazarlara taşıyacaktır. Çünkü yüksek bir performansa sahip membran elektrot ünitesi sadece modülün performansı ve ömrü üzerinde değil aynı zamanda maliyet üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Birim alan başına yüksek güç yoğunluğuna sahip olan MEA, PEM yakıt pili modülünün küçük, hafif ve daha ucuz olmasını sağlar. Bu yüzden yüksek performansa ve ömre sahip ucuz membran elektrot ünitelerinin üretim teknolojisinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

1960'lı yılların ortalarında NASA'nın uzay programlarında kullanılan membran elektrot ünitelerindeki katalizör miktarı 4mg/cm² (hidrojen yakıt pilleri için) iken günümüzde bu oran 0.2mg/cm² ye kadar düşmüş buna karşın 15 amp/mg platin olan akım miktarı 30 kat artmıştır.

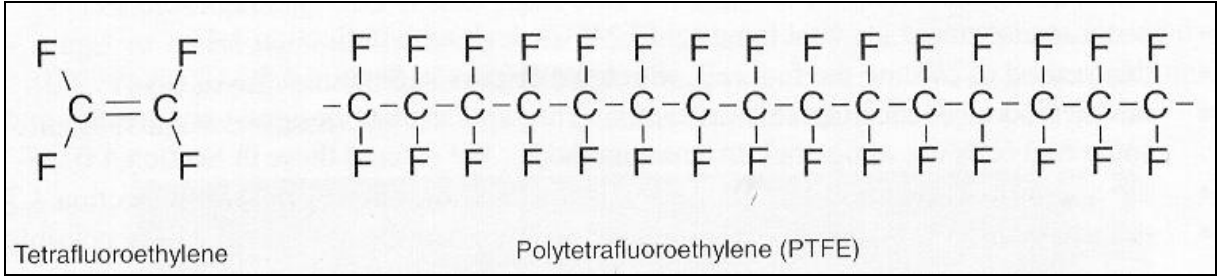
Membran elektrot ünitesinin kalınlığı elektrotlarda kullanılan platin miktarına göre belirlenir. 0.2mg/cm² katalizör miktarı yaklaşık 10 mikron kalınlığında tabakalar oluşturur. Bunun sonucu olarak 0.7 V gerilimde 1amp/cm² akım üreten 0.2mm kalınlığında membran elektrot ünitesi elde edilir (TÜBİTAK, 2004).

4.4.2.3 Polimer Elektrolitin Çalışması

Farklı firmaların ürettiği polimer elektrolit membranlar kendine özgü özellikler taşırlar. Ama genellikle floroetilen kullanılır. Dünya üzerinde en çok bilinen ve kullanılan Dupont'un ürettiği Nafion modelleridir. Bu malzeme hala diğerlerine üstün olarak neredeyse bir endüstri standardı haline gelmiştir. Diğer elektrolitler de benzer olarak çalışır.

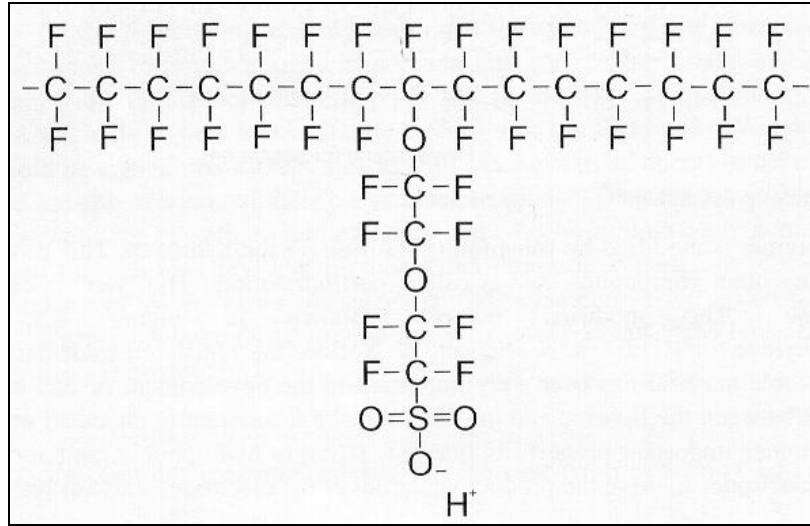
Elektrolit malzemesinin yapısı aşağıdaki gibidir. Kullanılan malzeme suni bir malzeme olan polymer-polyethylene'dir.

Bu polimer yapı içine hidrojen yerine flor yerleştirilir. Bu işleme perflorasyon adı verilir. Bu köke ise terafloroetilen adı verilir. Bu gelişmiş polimer Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Bu köklerin birleşmesiyle oluşan malzemeye politetrafloroetilen (PTFE) adı verilir. Buna aynı zamanda ICI firmasının ürettiği bir malzeme olan Teflon adı verilir. Bu malzeme yakıt pillerinin gelişiminde çok önemli bir yere sahiptir. Flor ile karbon arası kuvvetli bağlar kimyasal etkilere dayanım sağlar. Bir diğer özelliği ise hidrofobik yani suyu itme özelliği olmasıdır. Böylece üretilen suyun dışarı atılması kolaylaşmış olur. Bu malzeme aynı zamanda fosforik asit ve alkali yakıt pillerinde de kullanılır.



Şekil 4.13 Politetrafloroetilen'in yapısı

Fakat bir elektrolit yapabilmek için Teflon malzemesi yeterli değildir. PTFE polimerine sülfürik asit içeren bir kök ilave edilir. Bu yöntem kimya sanayinde sıkça kullanılır. Şekil 4.14'te olası bir yan zincir görülmektedir bu zincir her üreticide farklıdır.



Şekil 4.14 Nafion membranının yapısı

Eklenen H_2SO_4 grubu iyon bağı ile bağlı olduğundan son kısmında iyonu vardır. Bu sebeple bu yapıya iyonomer adı verilir. SO_3^- ve H^+ iyonları arasındaki güçlü çekim kuvveti vardır. Sülfürik asidin temel özelliği hidrofilik yani suyu çekiyor olmasıdır. Bu nedenle deterjanlarda da kullanılır. Nafion 'da ise suyu iten bir kısım ile çeken bir kısmın birleşmesi ilginç sonuçlar vermektedir. Sülfürlenmiş yan bağlar büyük miktarda suyu absorbe eder ve malzemenin kuru ağırlığının %50 sine kadar yükselir. Bu su ortamında SO_3^- ve H^+ iyonları arasındaki bağ çok az olduğundan çok kolay ayrılabilirler. Burada seyreltik bir çözelti oluşur sonuç olarak farklı iki faz oluşur, güçlü hidrofobik yapı içerisinde seyreltik çözelti bulunan bir alan. Bunun mikro yapısı Şekil 4.15'deki gibidir. Bu sayede H^+ iyonlarının hareket kolaylıkla sağlanabilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi suyun yüzeylere teması mümkün olduğu kadar çok olmalıdır. Bu noktalara dikkat ettiğimizde Nafion ve diğer florosülfanat iyonomerlerinin genel özellikleri (TÜBİTAK, 2004) :

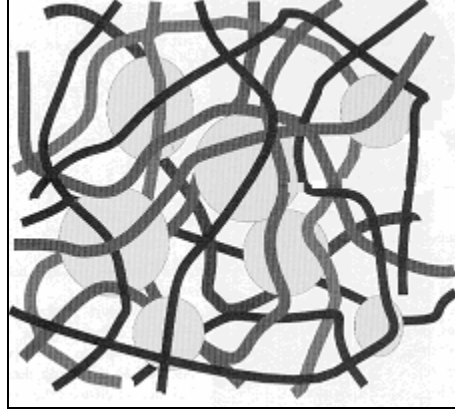
Yüksek kimyasal dayanım,

50 mm civarında olmasına rağmen mekanik dayanım çok yüksektir,

Asidiktirler,

Büyük miktarda su absorbe ederler,

İyi hidratlanmış olduğunda çok iyi bir H⁺ iletimi sağlar.

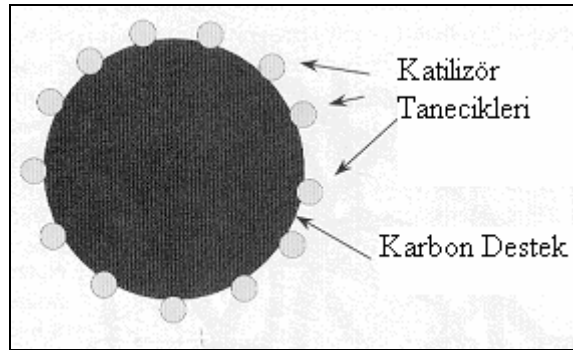


Şekil 4.15 Nafion malzemesinin mikro yapısı

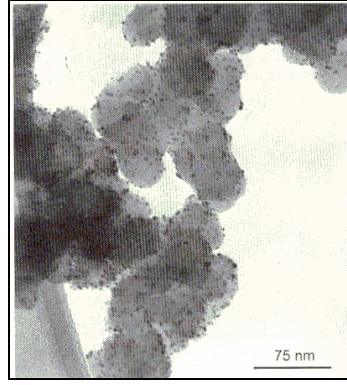
4.4.2.4 Elektrotlar ve Elektrot Kavramı

Anot ve katot için en iyi katalizör platindir. PEMFC 'nin ilk zamanlarında 28 mg/cm² platin kullanılmaktaydı. Bu yüksek oranlı kullanımdan dolayı PEMFC 'nin maliyetinin büyük kısmı platinden kaynaklanmaktaydı. Günümüzde PEMFC içerisindeki platin miktarı 0,2 gr/cm² ye düşmüştür. Şu anda 1 kW lık bir yakıt pilinin içindeki platin miktarı 10 \$ civarındadır, ki bu da toplam maliyetin çok altındadır.

Elektrotun temel yapısı pek çok PEMFC 'de aynıdır, sadece ayrıntılarda farklar olur. Anot ve katot genelde aynı olur.



Şekil 4.16 Elektrot içindeki karbon ve platin dağılımının ideal hali



Şekil 4.17 Elektrot içindeki karbon ve platin dağılımının gerçek hali

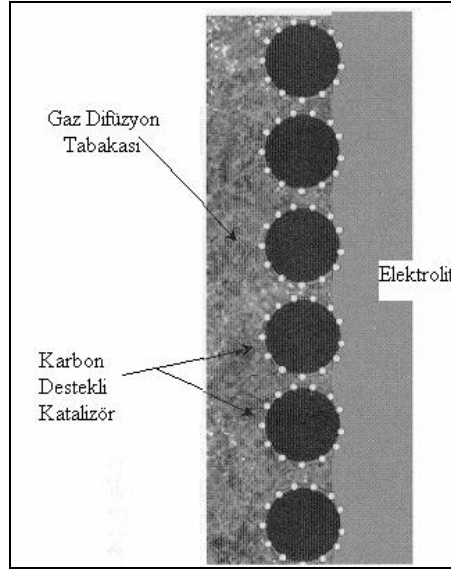
Platin katalizör çok ufak parçalara bölünür ve daha büyük parçacıklar halinde bulunan karbon tozları üzerine yerleştirilir. Bunun için XC72 adı verilen bir karbon tozu kullanılabilir. Bu parçacıkların ideal hali Şekil 4.16'daki gibidir. Gerçek görünüm ise Şekil 4.17' de mevcuttur. Böylelikle reaksiyona girenler daha yüksek bir alanla temas ederek daha kolay aktive olurlar.

Ayrı elektrot yönteminde karbon taneciklerine sabitlenmiş katalizör geçirgen ve iletken olan karbon kağıdı ile birleştirilir. Bir miktar PTFE eklenir, bunun amacı bu yüzeylerden uzaklaştırabilmektir. Burada karbon kağıdı geçirgen ve iletken olması nedeniyle işlevini çok iyi yerine getirebilmektedir. Bu karbon kağıdına gaz geçiş tabakası adı verilir. Daha sonra bu elektrotlardan iki tanesi polimer elektrolit membranın önüne ve arkasına sabitlenir. Bu işlem için elektrolit membran içinde %3 hidrojen peroksit bulunan kaynar su çözeltisi içinde 1 saat bekletilir, sonra kaynar sülfürik asit içinde 1 saat bekletilir. Bunun amacı mümkün olduğu olduğunca çok sülfat sülfanat grubu olmasını sağlamaktır. Ardından membran 1 saat boyunca deiyonize su içinde bekletilir. Bunun amacı yüzeyde asit kalmasını engellemektir. Daha sonra elektrotlar membranın iki yanına 140°C de 3 dakika boyunca preslenir. Bunun sonucunda MEA (membran-elektrot birleşimi) oluşur.

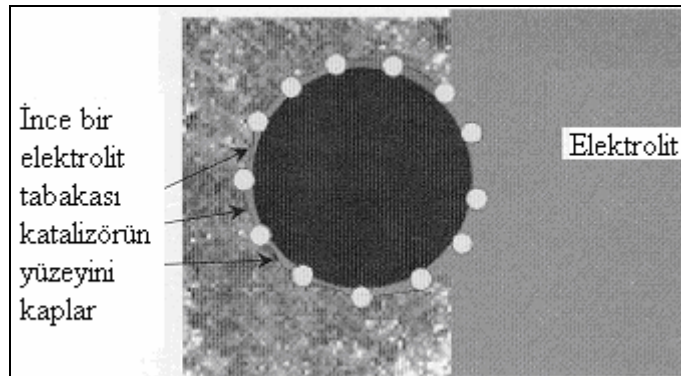
İkinci yöntem ise elektrotu doğrudan elektrolitin üzerine yapmaktır. Platin bağlı karbon katalizör doğrudan elektrolitle birlikte üretilir. Katalizör genellikle PTFE ile karıştırılarak haddelenerek, püskürtmeyle birleştirilir. Bu birleştirme yöntemlerinden bir diğeri ise geliştirilmiş baskı yöntemidir. Böyle üretilen parçalarda dış yüzeye bir de gaz geçiş tabakası kullanılır. Bu isim bu parçanın işlevini açıklamada biraz yetersiz kalmaktadır. Bu parça aynı zamanda katalizör ile iki kutuplu plakalar arası elektrik bağlantısını sağlar. Ayrıca açığa çıkan suyun elektrolit yüzeyinden uzaklaştırılması görevini de üstlenir ve çok ince olan katalizör tabakasını korur. Gaz geçirme tabakası membran ile birleşik veya ayrı olabilir.

Bu iki yöntemden hangisi seçilirse seçilsin temel prensip Şekil 4.18'deki gibidir. Karbon katkılı katalizör parçalarının bir tarafında elektrolit, diğer tarafında ise gaz geçiş tabakası vardır. Hidrofobik olan PTFE suyu uzaklaştırmak için resimde gözükmemekle birlikte mevcuttur.

İki ayrı noktayı daha vurgulamakta fayda vardır. İlk nokta elektrot malzemesinin elektrolit malzemesine emdirilmesidir. Şekil 4.19'da elektrot ve elektrolit birleşiminin büyütülmüş bir resmi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi elektrolit malzemesi katalizörün yüzeyini kaplamaktadır. Katalizörü tamamen kaplamaz fakat katalizörle elektrolit arasında direkt bir temas oluşmasını sağlar. Bu membran elektrot birleşiminin performansını artırır. Bu elektrot yüzeyinin elektrolit malzemesi çözeltisi ile yıkanması ile sağlanabilir. Katalizörün elektrolitle sonra birleştirildiği yöntemde bu işlem presleme işleminden önce yapılır. Birleşik üretim halinde ise gaz geçiş tabakası takılırken uygulanır.



Şekil 4.18 PEM yakıt pili elektrotunun basit ve ideal yapısı



Şekil 4.19 Şekil 4.18'in büyütülmüş görüntüsü

İkinci nokta ise gaz geçiş tabakasının seçimidir. Bu genelde bir karbon kağıdı veya karbon kaplama malzemesidir. İnce yakıt pillerinde Toray adı verilen karbon kağıdı kullanılır. Karbon kaplama ise daha kalın olur, ama daha fazla su tutar ve iki kutuplu plakalarda kalan boşlukları doldurur. Çok küçük güç üreten PEMFC'ler de daha kalın malzemeler kullanılabilir bunun amacı hava dolaşımı için daha çok yüzey oluşturmaktır. Şu ana kadar PEMFC 'nin kalbini gördük bu kısma membran-elektrot birleşimi yani MEA adı verilir. Hangi firmanın, hangi yöntemle yaptığı görüntüsünü çalışma şeklini veya koruma ihtiyacını etkilemez. Bundan sonraki kısımlarda mühendislik yaklaşımı gerektirmektedir (Larminie ve Dicks, 2000).

4.4.2.5 PEMFC'de Su Yönetimi

3.4.2.5.1 Problemin Çözümü

Daha önce de anlatıldığı gibi PEM 'de yeterli miktarda su bulunmalıdır yoksa iletkenlik azalır. Fakat çok fazla su bulunması da gazların elektrolite ulaşmasını engeller. İstenilen gücü sağlamak için denge sağlanmalıdır.

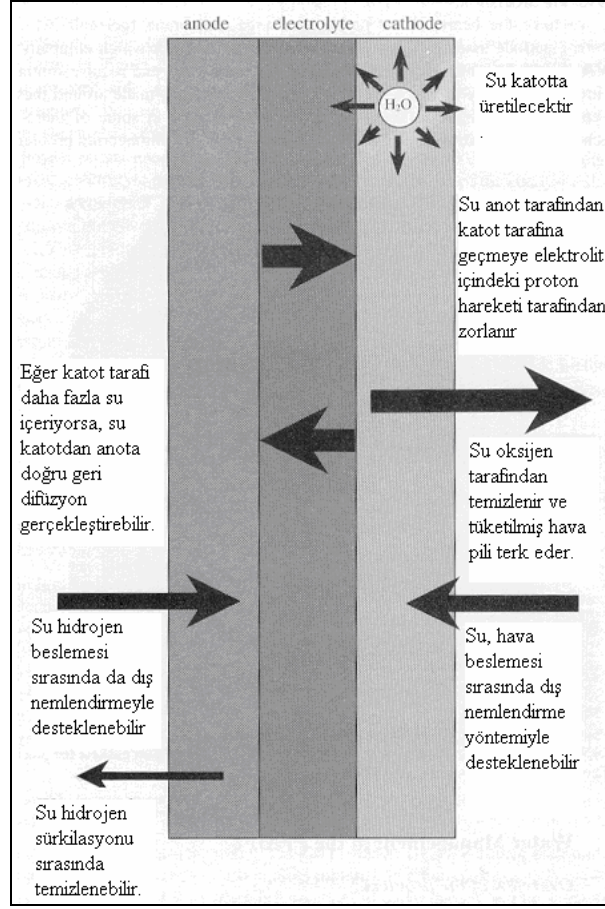
PEMFC 'nin katodunda su üretimi olduğunu daha önce görmüştük. İdeal şartlarda bu su yakıt pilinin ihtiyacı olduğu düzeyde kalır. Havanın katoda gönderilmesi ile hem gerekli oksijen sağlanacak hem de suyu kurutma görevini de görecek. Elektrolit membranın çok ince olması nedeniyle suyun katottan anoda geçmesi söz konusu olabilir. Bu sayede iki tarafta da uygun ortam oluşturulur. Bu bazen gerçekleştirilebilir fakat mühendislik tecrübesi çok önemlidir.

Burada çeşitli zorluklar ortaya çıkar. Bunlardan ilki pilin çalışması sırasında oluşan H^+ iyonlarının anottan, katoda geçerken beraberinde su molekülü götürmesidir. Bu prosese elektro-osmos kuvveti denir. Proton başına 1 ile 2,5 molekül arasında bir su geçişi olur. Bu yüksek akım yoğunluklarında anodun kurumasına neden olur. Bir diğer etki ise havanın yüksek sıcaklıklardaki kurutma etkisidir.

60°C üzerinde havanın elektrotu kurutma etkisi, H_2 ve O_2 'in su üretim hızından fazla olduğundan havanın ve hidrojenin nemlendirilmesi gerekebilir. Bunun membranarı ise bazı gereksiz tepkimelerin oluşup enerji kaybına neden olabileceğidir. Fakat bazı durumlarda bu yakıt pilinin performansının artmasına neden olabilir.

Bütün su hareketleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Neyse ki bu su hareketleri önceden tahmin ve kontrol edilebilir. Şekil 4.20'de su üretimi ve su sürükleme akım ile doğru orantılıdır.

Suyun katottan anoda geri difüzyonu ise elektrolit membranının kalınlığı ve iki tarafın bağıl nemine bağlıdır (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 4.20 MEA deki su hareketlerini gösteren şematik şekil.

3.4.2.5.2 Hava Akımı ve Suyun Buharlaştırılması

Saf oksijenle çalışan özel durumlar dışında PEMFC 'de oluşan su yakıt pili içinden geçen su ile taşınır. Tabii ki hava miktarı pilin ihtiyacı olan oksijen miktarından daha fazla olacaktır. Eğer stokiyometrik verimden hesaplanan hava miktarı gönderilirse büyük konsantrasyon kayıpları olurdu. Bunun nedeni çıkış havasının içindeki O₂ 'nin tamamen tükenmiş olmasıdır. Yapılan deneyler sonucu hava fazlalık katsayısının (λ) en az 2 olması gerektiği görülmüştür. Problemin temel nedeni havanın kurutma etkisinin sıcaklıkla değişiminin çok düzensiz oluşudur. Burada değerlendirme yapabilmek için bağıl nem, su miktarı ve doymuş hava basıncı terimlerinin anlamını bilmek gerekir.

Özgül nem;

$$w = \frac{m_w}{m_a} \quad (4.1)$$

Burada;

m_w :Havadaki su miktarı

m_a :Kuru hava kütlesi

Yani;

$$m_T = m_w + m_a \quad (4.2)$$

Fakat bu havanın kurutma etkisi hakkında çok iyi bir fikir vermez. İçinde bir miktar su olan havanın sıcaklığı arttıkça kurutma etkisi de artar. Diğer açıdan bakarsak soğuk hava içinde çok az miktarda su varken çok nemli hissi verebilir. Bunun nedeni havanın doyma basıncındaki değişme ile açıklanabilir. Doyma basıncı, sıvı suyun buharlaşma oranının yoğuşma oranına eşit olması halinde su buharının hava içindeki kısmi basıncıdır. Hava bu durumda daha fazla su tutmaz, su doymuştur.

Kurutma etkisi olmayan yani daha fazla su tutamayacak havaya doymuş hava denir. Havanın içindeki su buharının kısmi basıncı P_w ' in, doymuş havanın içindeki su buharının kısmi basıncına oranıdır. Yani;

Bağıl nem,

$$\phi = \frac{P_w}{P_{doyma}} \quad (3.3)$$

Bağıl nem Sahra çölünde 0,3(%30); bir şehir merkezinde ise 0,7(%70)'tir. Bizim için önemli olan havanın kurutma etkisidir veya buharlaştırma oranıdır.

$$P_T = P_a + P_w \quad (4.4)$$

Su buharının kısmi basıncı doyma buhar basıncına eşittir. Hava içindeki su miktarı değişmez, hava doymuştur.

Su buharının kısmi basıncı doyma buhar basıncından daha düşüktür. Suyun buharlaşma miktarı yoğuşma miktarından çok büyüktür. Buharlaşma miktarı $P_{doyma} - P_w$ ile orantılıdır.

Su buharının kısmi basıncı doyma buhar basıncından büyüktür. Suyun yoğuşma hızı, buharlaşma hızından büyüktür. Yoğuşma miktarı $P_w - P_{doyma}$ ile orantılı olacaktır.

Bunun karmaşık olmasının sebebi doyma buhar basıncının sıcaklığa göre değişiminin lineer olmamasıdır. Suyun doyma buhar basıncının çeşitli sıcaklıklarda değişimi Çizelge 4.4'dir.

Çizelge 4.4 Suyun doyma buhar basıncının çeşitli sıcaklıklarda değişimi

T (C)	Kısmi Buhar Basıncı kPa
15	1,705
20	2,338
30	4,246
40	7,383
50	12,35
60	19,94
70	31,19
80	47,39
90	70,13

P_{doyma} 'daki bu ani yükseliş kurumayı da doğrudan etkiler. %70 bağıl nem oranındaki hava 20 °C'den 60 °C'ye kadar ısınır. Burada su buharının kısmi basıncı;

$$P_w = 0.7 \times P_{doyma} = 0.7 \times 2.338 = 1.64 \text{ kPa}$$

Havanın sıcaklığı sabit basınçta 60 °C'ye çıkarıldığında P_w değeri değişmez. Sonuç olarak;

$$\text{Bağıl Nem } \phi = \frac{P_w}{P_{doyma}} = \frac{1.64}{19.94} \approx 0.08 = \%8$$

Bu çok kuru bir şarttır. Daha önce de söylediğimiz gibi Sahra çölünde bile $30\% \approx \phi$ 'dur. Bu şartlar PEM'e çok büyük membran verir çünkü ani kurumlara karşı çok hassastır.

Su miktarını tarif etmenin bir diğer ifade şekli ise çığ noktasıdır. Bu doyma için düşülmesi gereken sıcaklıktır. Mesela suyun belli bir miktar hava içindeki kısmi basıncı 12,35 kPa ise Çizelge 4.4'e göre çığ noktası 50 °C 'dir.

Girecek gazlara ne kadar su katılması gerektiğine karar vermek için yakıt pilinin ne kadar su ürettiğini bilmemiz gerekir. Suyun havanın nemi üzerine etkisini bulmak için kullanılacak eşitlikler:

$$w = \frac{m_w}{m_a}$$

$$\text{Su üretim miktarı} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_c} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (4.5)$$

$$\text{Çıkan hava miktarı} = \left[3.57 \times 10^{-7} \times \lambda - 8.29 \times 10^{-8} \right] \times \frac{P_e}{V_c} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (4.6)$$

λ :hava fazlalık katsayısıdır.

Eğer giren havadaki su miktarını ihmal edersek ve üretilen su miktarının 1 saniye içinde çıktığı düşünülürse:

$$w = \frac{9.34 \times 10^{-8}}{(3.57 \times 10^{-7} \times \lambda - 8.29 \times 10^{-8})}$$

Su buharının ideal gaz olduğunu kabul edersek;

$$w = \frac{18.016}{28.97} \times \frac{P_w}{P_a} = 0.622 \times \frac{P_w}{P_a}$$

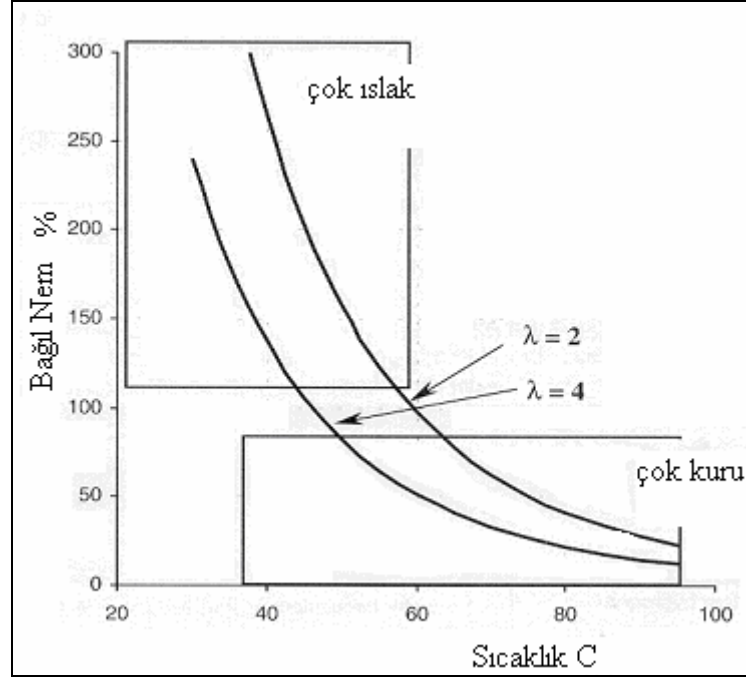
$$P_t = P_a + P_w \quad \rightarrow \quad P_a = P_t - P_w$$

$$w = 0.622 \times \frac{P_w}{P_t - P_w} \quad P_w = \frac{w P_t}{w + 0.622}$$

iki ifade birleştirilirse;

$$P_w = \frac{0.421}{\lambda + 0.188} P_t \quad (4.7)$$

Buradan da anlaşılacağı gibi su buharı basıncı, hava fazlalık katsayısı (λ) ve çalışma basıncı (P_t)'ye bağlıdır. buna giriş havası içindeki suyun kısmi basıncını da eklememiz gerekebilir. Fakat λ nın küçük değerleri için çok fazla etki yapmayacağından hesaba katılmadı. Çalışma basıncı P_t çok önemlidir, yüksek basınçlarda daha yüksek bir nem elde edilir.



Şekil 4.21 Bağlı nem – sıcaklık grafiğine hava fazlalık katsayısının etkisi

Yukarıdaki denklem Çizelge 4.4 ile kullanıldığında çıkan havanın çeşitli sıcaklıklardaki nem miktarı bulunabilir. Hava içindeki nemin, hava fazlalık katsayısı 2 ve 4 olduğunda aldığı değerler Şekil 4.21'de görülmektedir. Bazı değerler Çizelge 4.5'de görülmektedir.

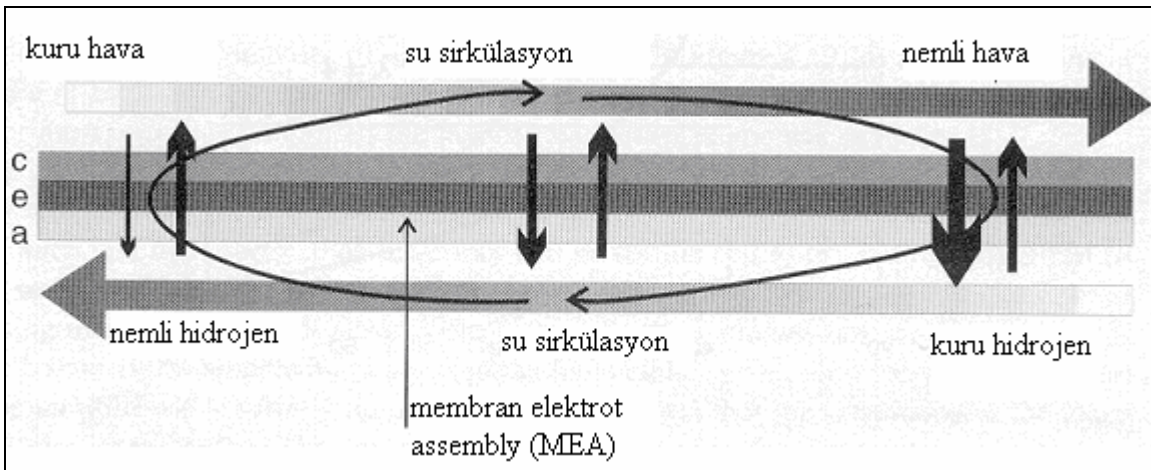
Çizelge 4.5 Sıcaklığa ve hava fazlalık katsayısına göre bağlı nem değerleri

Temp/ $^{\circ}$ C	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					218	145
30				199	120	79
40		282	201	114	69	46
50	215	169	120	68	41	27
60	133	104	74	42		
70	85	67	48			
80	56	44	31			
90	38	30				

Tahmin edildiği gibi λ değerleri büyüdükçe nem düşmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda bağıl nemde büyük düşüşler görülür. Eğer çıkış havasının bağıl nemi %100 den çok düşük ise bu bu pilin kurummasına yani PEMFC nin kullanılamaz hale gelmesine neden olur. Yinede bu çok gerçekçi sonuç vermez çünkü oluşan suyun tamamının buharlaştığını düşünüyoruz. Bu şartlar göz önüne alındıktan sonra sonra bile bağıl nem %100 ün üzerinde ise buradan çıkan sonuç yakıt pilinin bütün suyu verdiği ve kurumaya yöneldiğidir. Burada dikkat edilmesi gereken diğer nokta ise giriş havasının daha kurutucu olabileceğidir. Bu problemin çözümü giren gazların nemlendirilmesidir. Diğer taraftan bağıl nem %100'ün üzerinde olamaz. Eğer teorik nem %100 ün üzerinde ise elektrotlar çok sulu ortamda kalır bu ise çalışmada çeşitli zorluklar çıkartır. Çalışma 60°C civarında ise uygun hava debisi sağlanarak istenen nem oranı elde edilir.

Bu grafik ve çizelgeye bakarak iki önemli sonuç çıkar 60°C civarındaki sıcaklıklarda, hava fazlalık katsayısının tüm değerleri için bağıl nem %100 e yakın değerler almaktadır. Fakat $\lambda < 2$ durumunda tepkimelerin gerçekleşmesi için gerekli oksijen miktarı karşılanmaz. Buradan çıkan sonuç 60°C civarında çalışan PEM yakıt pillerinde gazların nemlendirilme ihtiyacından bahsedilir.

Yukarıdaki sebeplerden dolayı PEMFC' de optimum çalışma basıncını seçmek oldukça zordur. Sıcaklık arttıkça, katotta aşırı gerilim azalacağından performans artar fakat sıcaklık 60°C nin üzerine çıktığında nemlendirme problemleri ortaya çıkar ki nemlendirme cihazları ek ağırlık ve masrafa neden olur (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 4.22 Nemlendirmeyi yaymak için reaksiyon gazlarının zıt yönlü akışı

Bir yakıt pilini nemlendirme yapmadan kullanmak için hava fazlalık katsayısı çok iyi seçilmeli ve çıkış havasının bağıl nemi %100'e yakın olmalıdır. Yakıt pilini iç dizaynı yakıt

pili içindeki su dengesini sağlayacak şekilde olmalıdır. Bunu yapmanın yolu Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Pil içindeki hidrojen ve hava akışı ters yönde verilir. Anottan katoda su geçişi bütün kısımlarda aynıdır çünkü elektro-osmos kuvvetidir ve akım ile doğru orantılıdır. Katottan anoda olan gaz geçişi ise değişkendir, gaz dolaşımı ile orantılıdır. Burada olabilecek diğer çözümler elektrotu dar tutup gaz geçiş tabakasını kalın tutmaktır. Böylece yüksek su tutma oranından yararlanır. Çizelge 4.5’e bakarak 60°C’de nemi %100 yapabilecek hava fazlalık katsayısı bulunur. Düşük sıcaklıklarda $\lambda = 24$ civarında değerler bulunur. Bu çok büyük hava debisi demektir. Burada bir örnek vermek gerekirse küçük bir yakıt pilinin bu yöntemle çalıştığını düşünürsek kataloglara bakıldığında en küçük fan debisi 2,2lt /s olarak bulunmuştur. Katottan geçen debini 1 lt/s ve ortalama gerilimin 0,6 V olduğu düşünülüp bu değerler kullanılırsa;

$$P_e = \frac{m_a x V_c}{3.57 x 10^{-7} x \lambda} \quad P_e = 70W \text{ bulunur.}$$

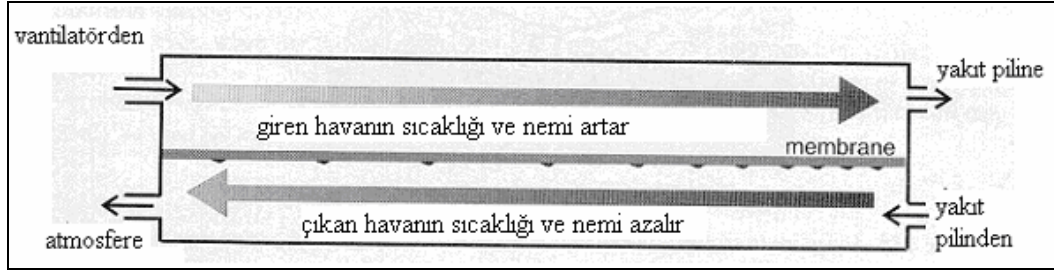
Fan için harcanan elektrik gücü sadece 0,7 W tır. Bu üretilen enerjinin %1 ine karşılık gelir. Bu oldukça düşük bir rakamdır (Larminie ve Dicks, 2000).

3.4.5.2.3 Dışarıda Nemlendirme

Küçük yakıt pillerinin ek nemlendirmeye gerek kalmadan kullanılabilirdiğın gördük fakat büyük pillerde bu pek tercih edilen bir şey değildir. Çalışma sıcaklığının 60°C üzerinde olması kayıpları azaltmak açısından önemlidir. Bu maksimum güç yoğunluğunun elde edilirken, ağırlığa etki, maliyet ve karmaşıklık, büyük yakıt pillerinde daha az önemsenebilecek etkilerdir.

Laboratuarlarda yapılan testlerde hava, sıcaklığı kontrol edilen su üzerinden geçirilerek nemlendirilir. Fakat bu kullanımda yapılması zor bir uygulamadır. Bunun için genel olarak klima sistemlerinde kullanılan yöntemler kullanılır. En kolay yöntem suyun hava içine püskürtülmesidir. Bu aynı zamanda gazı soğuttuğundan faydalı bir işlemdir. Yakıt pilinde kullanılacak gazların nemlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken suyu mümkün olduğu kadar saf olmasıdır. Suyun safsızlığı proton geçiş membranının performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Burada tercih edilmesi gereken distile su kullanmaktansa çıkan suyu kullanarak nemlendirme yapabilmektir.

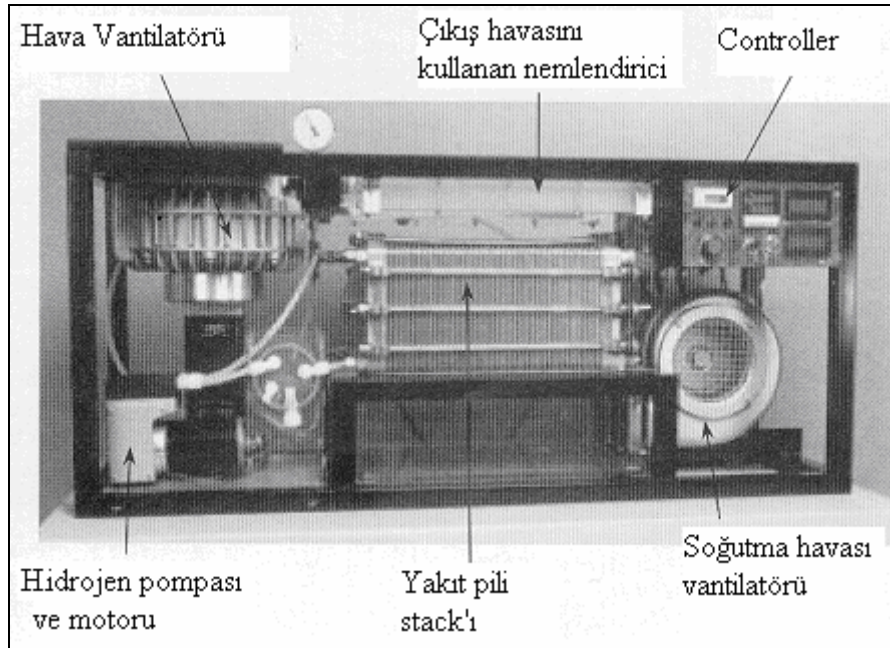
Bazı nemlendirme dış nemlendirme sözü pek uygun olmayabilir, bunun yerine süper nemlendirme daha doğru olur. Burada kullanılan nemlendirme yöntemlerinden 3 tanesi anlatılacaktır.



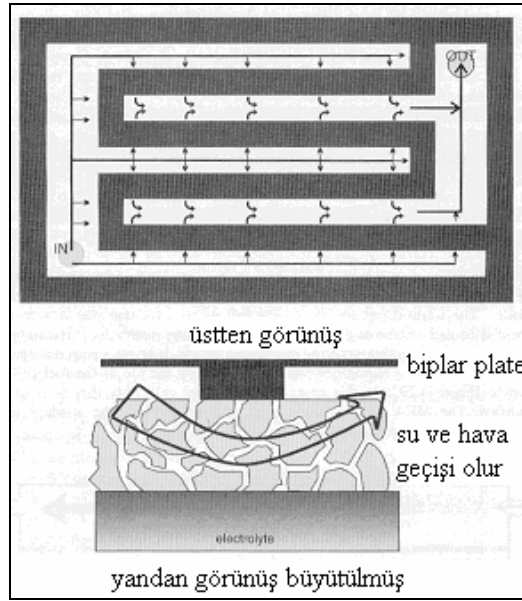
Şekil 4.23 Atık gazların nemlendirmede kullanılması

İlk olarak İsviçre’de bulunan çok basit bir sistem anlatılacak. Bu yöntemin prensibi Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Pili terk eden sıcak ve nemli hava tek tarafa geçiş imkanı veren membran üzerinden geçirilerek soğutulur. Suyun bir miktarı yoğuşur. İçeri verilecek hava bu membranın üst kısmından geçirilir ve membran yüzeyindeki suyu buharlaştırır. Bu genelde yakıt pilinin üzerine monte edilir. Şekil 4.24’te görülmektedir.

Bir diğer yöntem ise suyu doğrudan yakıt piline püskürtmektir. Normalde bu elektrotun sulanmasına neden olur. Fakat bu iki kutuplu plakalarla desteklenip giren gazların bu suyu buharlaştırarak nemlenmesi sağlanır. Bu prensipte Şekil 4.25’de açıklanmıştır. Bu sisteme ‘arası perdeli akış yolu’ adı verilir. Akış yolları olarak söylenen kısım iki kutuplu plaka içinde tepkimeye giren gazların dolaştığı kanallardır. Şekil 4.25’de ki akış alanı çıkışı olmayan bir labirent gibi gözükmemektedir. Gaz iki kutuplu plakadan dışarı yani elektroda doğru itilir. Eğer akım yolları iyi dizayn edildiyse bu elektrotun tamamına eşit olarak yayılır. Bu yöntemle sonuç alınabilmesi için gazların yakıt piline basınçlı olarak gönderilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.24 Çıkış havasını kullanarak nemlendirme yapılan bir yakıt hücresi örneği



Şekil 4.25 Birbirine bağlı akış yollarıyla nemlendirme

Kendi kendine nemlenme: Burada elektrolit geliştirilmiştir. Sadece su tutmaz aynı zamanda su üretir. Su tutma elektrolit malzemesine silika (SiO_2) ve titania (TiO_2) ilave edilerek sağlanır. Bu malzemelerin kullanılmasının nedeni su tutucu malzemeler olmalarıdır. Daha önce de söylediğimiz gibi platin parçacıklarından bir miktar da elektrolit içine girmişti. Bir miktar hidrojen ve oksijen elektroda doğru difüze olur ve platinin katalizör etkisiyle su üretilir. Bu kıymetli hidrojen gazını kullanmak anlamına gelir fakat elde edilen kazanç yakıt kaybını gidermektedir.

Kullanılacak nemlendirme yöntemi pilin büyüklüğüne, çalışma basıncı, performans ve basitlik arası değere, yakıt kaynağına göre tercih edilir. Büyük sistemlerde dış nemlendirme çok önemlidir (Larminie ve Dicks, 2000).

4.4.2.6 PEMFC’de Soğutma ve Hava Kaynağı

PEM FC tabii ki %100 verimli değildir. Hidrojen enerjisini elektriğe dönüştürürken verim %50 civarında olur. Buradan anlaşılabilir ki X W elektrik üreten bir yakıt pilinin X W ısı ürettiğidir.

$$\text{Isıya dönüşen} = n x I x (1.25 - V_c) \quad W \quad (4.8)$$

n : Pil sayısı

V_c : 1 pilin gerilimi

I : Akım

$$\text{Isıya dönüşen enerji} = \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) x P_e \quad W \quad (4.9)$$

Üretilen ısının dışarı atılması yakıt pilinin boyutlarını önemli ölçüde etkiler. 100W civarındaki yakıt pillerinin kullandığı hava miktarı hem soğutma suyun uzaklaştırılması için yeterlidir. Burada bir fan kullanımına gerek kalmaz, gerekli boşluklar bırakılarak doymuş havanın özkütlesinin kuru havanın özkütlesinden büyük olduğundan sirkülasyon sağlanır. Daha ufak yakıt pillerinde ufak bir fan kullanılabilir. Daha önce yaptığımız örnekte görüldüğü gibi fan enerjisi pil enerjisinin %1 i kadardır.

Fakat yakıt pillerinin enerjisi arttıkça radyasyon ve konveksiyonla transfer olan ısı miktarı azalmaktadır. Burada problemler ortaya çıkmaktadır.

3.4.2.6.1 Reaksiyona Giren ve Soğutma Havaasının Ayrılması

P_c gücünde ve çalışma sıcaklığı 50°C olan bir yakıt pilinde ortalama gerilim $0,6 \text{ V}$ olsun. Soğutma havaasının 20°C de girip 50°C de çıktığı kabul edilip; pilde üretilen ısının %40'ının havaya transfer olduğu kabul edilirse;

$$\text{Dışarı verilen ısı} = P_e \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \quad (4.10)$$

Havanın bu ısının %40'ını aldığı düşünülür ve enerji dengesi yazılırsa;

$$0,4 x P_e \left(\frac{1,25}{V_c} - 1 \right) = m x c_p x \Delta T \quad (4.11)$$

$$c_p = 1004 \text{ J / kgK} \quad \Delta T = 30\text{K} \quad V_c = 0,6\text{V}$$

alındığında;

$$m = 1,4 x 10^{-5} x P_e \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Reaksiyona girecek hava hızı ise;

$$m = 3,57 x 10^{-7} x \lambda x \frac{P_e}{V_c}$$

Reaksiyona giren hava ile soğutma havaasının aynı ve eşit olduğu düşünülür ve iki denklem eşitlenirse

$\lambda \cong 24$ olarak bulunur.

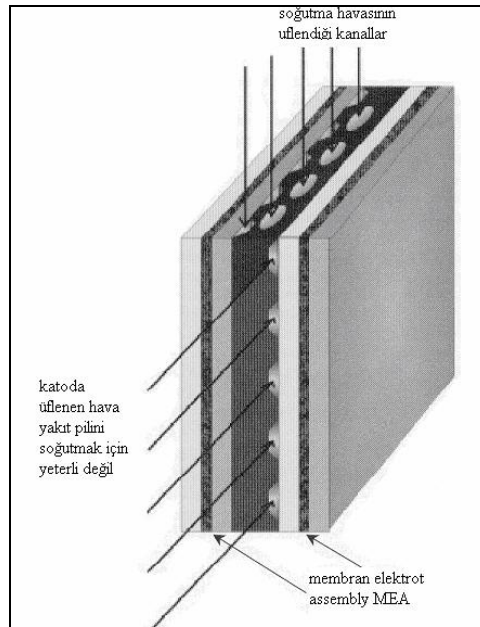
Çizelge 4.5'e baktığımızda 50°C de havanın neminin %27 olduğu görülmektedir. Ki bu da sahra çölünden daha kuru bir ortam anlamına gelmektedir. Giriş havasının neminin %70 olduğu düşünülürse bağılnem düşecek ve PEMFC kuruyacaktır.

λ yı 3 ve 6 arasında tutup 50°C çalışma sıcaklığı elde edebilmek için üretilen ısının %25 i soğutucu akışkanla alınır. Pratik te bu 200 veya 300 W civarında gelir. 250 ile 2500 W arası yakıt pillerinde soğutma iki kutuplu plakalarda açılan ek kanallarla sağlanır. Bu sistem Şekil 4.17 de görülmektedir. Ayrıca ek soğutma plakaları da kullanılabilir (Larminie ve Dicks, 2000).

3.4.2.6.2 Su Soğutmalı PEMFC

Hava soğutmalı sistemden su soğutmalı sisteme dönüleceğine karar vermek için diğer makine ve motorlara bakmak gerekir. Tabi ki hava ile soğutma daha basittir, fakat pil büyüdükçe her yerin eşit şekilde soğutulması zorlaşmaktadır. 1 kg suyun geçebileceği kanal ile 1 kg havanın geçebileceği kanaldan büyük olacağından su soğutmalı sistemler hava soğutmalı sistemlere göre daha büyük olur. Ama soğutma da daha fazla olur.

Su soğutmalı sistemler de genel olarak Şekil 4.26'dakine benzer sadece kanallara pompalanan sudur. Pratikte soğutma kanalları bütün iki kutuplu plakalarda olmak zorunda değildir (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 4.26 Reaksiyon gazlarını ve soğutma havasını ayırmak için tasarlanmış MEA ve iki kutuplu plakalar

4.4.2.7 Pem Tipi Yakıt Pillerinin Konstrüksiyon Yöntemleri

Birçok PEM tipi yakıt pili, birçok yakıt hücresinin yan yana getirilerek iki kutuplu plakalar yardımıyla seri bir şekilde bağlanmasıyla oluşur. Buna rağmen iki kutuplu plakaların sıralanmasında ve iki kutuplu plakaların imal malzemeleri konusunda birçok seçenek mevcuttur. Bu oldukça önemli bir konudur çünkü; PEM pillerinin MEA kısımları oldukça ince olmasına rağmen iki kutuplu plakalar yakıt pili kütlelerinin %80 ini oluşturmaktadır.(Murpy-1981). Bunun yanı sıra bilindiği gibi platinyum kullanılması da gerekmektedir ve bu gereklilik yakıt pilinin maliyetini küçük bir oranda arttırmaktadır. Sonuç olarak; iki kutuplu plakalar PEM yakıt pili yığınlarının maliyetinin önemli ölçüde arttırmaktadır.

Diğer bir önemli nokta ise, özellikle küçük PEM yakıt pillerinin yapılmasında tamamı ile farklı bir çok yol vardır ki bunlar iki kutuplu plakalara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Bu bölüm içerisinde bu yöntemler ele alınacaktır.

3.4.2.7.1 PEM Yakıt Pilleri İçin İki Kutuplu Plakalar

Yakıt amaçlı kullanılan gaz anot yüzeyinden, hava/oksijen katot yüzeyinden geçerken, iki kutuplu plakalar elektrik akımını, bir hücrenin anodundan yandaki hücrenin katoduna, toplamak ve taşımak zorundadır. Bunun yanı sıra, genellikle yığın içerisinde geçen soğutucu akışkanı da bünyesinde taşıması gerekmektedir. Reaksiyonda kullanılacak gazların dağıtımını yüzey üzerine işlenen akım kanalları sayesinde gerçekleştirilir.

İki kutuplu plakaların bu şekilde şekillendirilmesi en çok bilinen, en yaygın ve aşağıda anlatıldığı gibi geleceği en parlak yöntemdir.

İki kutuplu plakaların yapımı için en iyi yöntem grafitin makinelerde işlenmesidir. Grafit iletken bir malzemedir ve makine şekillendirilmeye uygundur. Ayrıca bipolar yapımına uygun olduğu düşünülen herhangi bir metale göre yoğunluğu oldukça düşüktür. Soğutma kanallarını yapmak için en iyi yöntem iki kutuplu plakaları birbirinin aynı iki parça halinde üretmektir. Her parçanın arka tarafı soğutma kanalı olarak, ön tarafı ise reaksiyona girecek gazların akışı için şekillendirilir. İki parça soğutma kanalları olacak yüzeyleri üst üste getirilerek iki kutuplu plakanın yapımı tamamlanmış olur. Yakıt pili yığınları bu şekilde yüksek kuvvet dayanımına sahip olmalarına rağmen, 3 büyük dezavantajları vardır;

Grafit yüzeyine şekil verilmesi makinede otomatik bir şekilde gerçekleştirilebilir ancak oldukça pahalı bir makine bile oldukça uzun bir zaman almaktadır.

Grafit oldukça kırılıgandır ve dikkatli olunması gerekmektedir ve montajı zordur.

Son olarak grafit gözenekli bir yapıya sahiptir, iki kutuplu plakaların mm inceliğinde olması gerekmektedir. Bunun anlamı malzeme düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen, grafitten tam anlamıyla istenilen incelikteki bir yapıya sahip iki kutuplu plakalar yapılamamaktadır.

Uygulanabilir ancak kullanımı fazla yaygın olmayan diğeri bir yöntem ise karbon-karbon kompozitleridir. Bu proses fosforik ait yakıt pillerinin prosediründen gelmektedir. Kompozit parça karbondan üretilmektedir ve grafitlik özelliğine sahip reçine enjeksiyonu kalıplama yöntemi ile yapılmaktadır. Grafitleştirme prosesi parçanın 250°C ye kadar ısıtılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Kalıplama işlemi ucuz olabilir ancak ısıtma işlemi pahalıdır. Bunun yanı sıra proses dikkatli bir şekilde kontrol altında tutulmalıdır, aksi takdirde sonuçta ortaya çıkacak plaka büyük oranda eğilmiş veya boyutları yanlış olacaktır (murpy-1998). Ölçülerin kesinliğinin(kararlılığının) ısıl prosese bağılı olması yapılacak imalatın belirli bir milimetrik kalınlığın aşağısına inilmesini de engellemektedir.

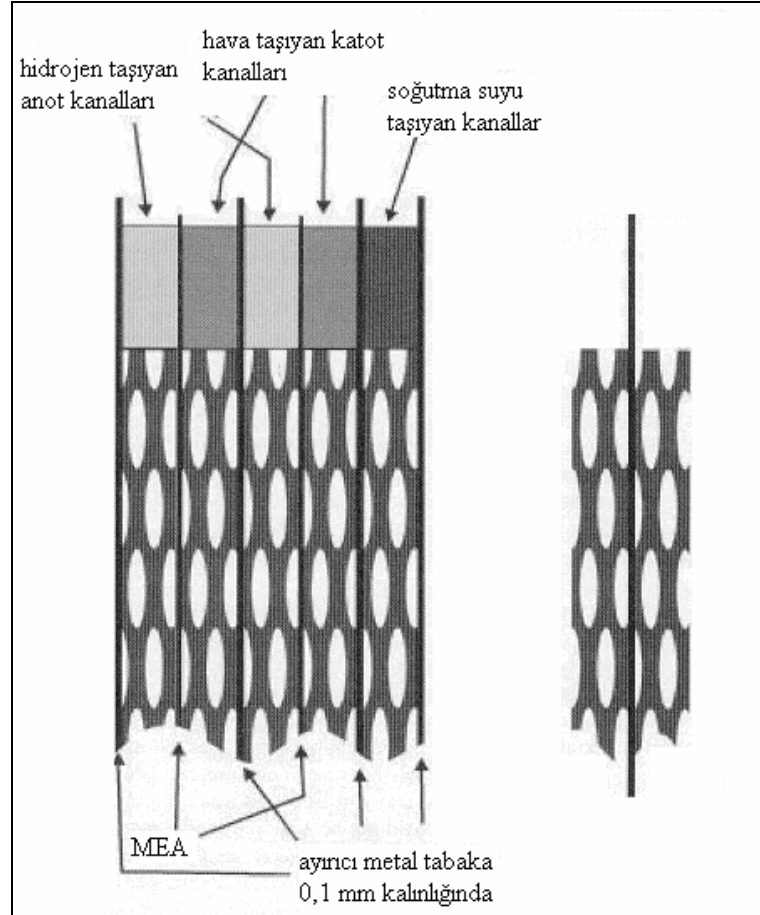
Kesinlikle ucuz olan bir proses ise grafit doldurulmuş polimerin enjeksiyon kalıplanmasıdır. Ancak en iyi şartlar altında bile iletkenliğinin düşük olması bu şekilde imal edilen iki kutuplu plakaların geleceğin yakıt pilleri içerisinde kullanımını büyük ölçüde kısıtlamaktadır.

Alternatif başka bir enjeksiyon kalıplama yöntemi ise, kendiliğinden bipolar şekline alan sıkıştırarak kalıplama yöntemidir. Bu malzemenin akışkan olmasına nerdeyse gerek yoktur- aslında sıkıştırılmış bir parça metal doğru şekildedir. Bu, karbonun polimer-karbon karışımı içerisinde daha mükemmel bir şekilde kullanılmasına izin verir ve uygun geçirgenlik değerine ulaşılabilir. Üretilen şekiller çok karışık olmayabilir. Örnek olarak; soğutma kanallarının yapılması tek bir parçada başarılabilir. Buna rağmen bu sorun plakanın iki parça halinde yapılması ile çözülebilir. Gaz akış kanalları önde, soğutucu kanallar arkada. Tamamlanmış iki kutuplu plaka bu iki parçanın araka kısımlarının bir araya getirilmesi ile meydana gelir.

Bu yöntemlerin yanı sıra metallerde iki kutuplu plaka olarak kullanılabilir. Bunun avantajları; iyi iletkenlerdir, kolay işlenebilirler, gözenekli bir yapıları yoktur bu özellikleri sayesinde ince bir şekilde imal edilebilir ve reaksiyona girecek gazları birbirinde ayrı tutabilir.

Metallerin en büyük dezavantajı yüksek yoğunlukları ve korozyona uğramalarıdır. PEM yakıt pillerinin içi kesinlikle korozyona neden olacak bir ortamdır; su buharı, oksijen ve sıcaklık vardır. Bunun kadar etkili diğeri bir problem ise bazen MEA'ler den dışarıya asit süzülmesidir.

Metal parçalar grafit plakalarla kullanılan yöntemle şekillendirilebilir. Metal kullanılması ile kırılma sorununun üstesinden gelinmiş olur ve gözenekli yapıda olmamasından dolayı daha ince bir yapıda üretilebilir. Buna karşın akış kanallarının açılması çok pahalıya mal olacaktır. Akış kanallarını yapmak için daha iyi bir yöntem olarak kesilmemiş veya foam metaller kullanılabilir. Bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanışı MURPHY at al(1998) anlatılmıştır.



Şekil 4.27 Foam metal kullanılarak yapılan iki kutuplu plaka yapısı

Akış alanı foam metalden yapılır ki burada kastettiğimiz; süngerimsi bir yapıya sahip, küçük boş gözeneklerin kütlesinin %50'inden fazlasını kapsayan malzemedir. Bu malzeme testere ile ince plakalara dilimlenebilir. sonuç ekme dilimlerine benzetilebilir ancak kalınlığı yalnızca 1-2 mm kadardır. İşlevsel olarak benzer materyaller yapmanın alternatif bir yolu ise; katı bir levha almak ve boşluklarını yarmak ve gerdirmektir. Metal seçilirken bu hale geldiğinde güçlü ve hafif kalacak bir metal seçilmelidir. Bu problemi çözebilecek tek metalde titanyumdur. Metaller arasında en iyi geçirgenliğe sahip olmasa da titanyumun öz direnci grafitten 30 kat daha azdır. Bunun yanı sıra titanyum nitrit koruması ile kaplandığında korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu aynı zamanda titanyuma elektrik iletkenliği verir ve bu işlem geniş yüzeylere çok düşük bir maliyetle uygulanabilir.

İki kutuplu plaka arasında katı bir metal tabaka buluna iki parça foam metalden yapılabilir. Aradaki metal katmanın sağ tarafından gaz difüzyonu gerçekleşecek çünkü ekmek gibi dilimlenmiş metal; yüzeyinde bir çok hol var ve gaz buralardan geçerek elektrot yüzeyine ulaşabilir. Reaksiyona girecek gazlar metalin kenarı doğru toplanır. Plastik tutucular iki metalinde tüm kenarını çevreler ve onları bir arada tutar ve gaz kaynağına bağlantı için olanak sağlar. Yığın içerisindeki sıralama şu şekilde olur; metal levha-foam metal-MEA-foam metal-metal levha-foam metal-MEA-foam metal...

Hücre yığınının (stack) soğutma mekanizması aynı teknoloji kullanılarak sağlanabilir. Bunun için bir metal foam iki tane ince solid metalin arasında yer alır. Su foam metalin içinden geçirilir ve ısı dışarıya alınır.

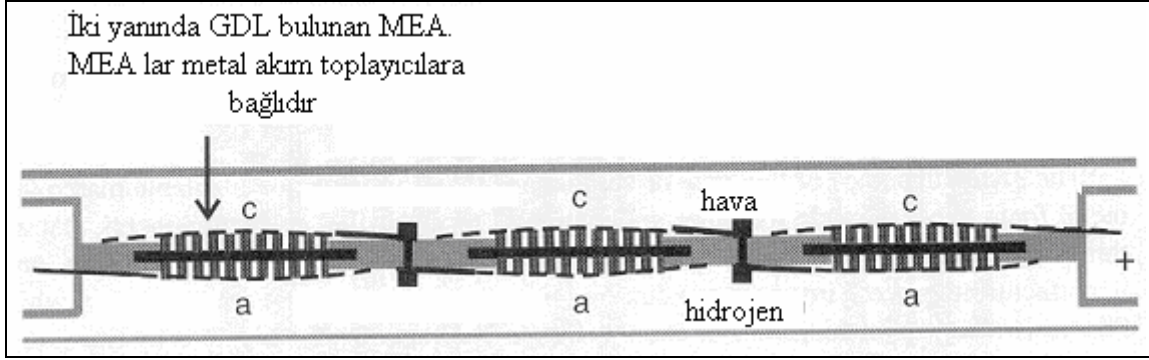
Bu yöntemin en büyük avantajı foam metal tabakaların yakıt pilinin diğer kısımlarını yapmak içinde kolayca kullanılabilir olmasıdır. İncedir, hafiftir, yüksek iletkenlik değerine sahiptir ve gazları ayırmada kullanışlıdır. Buna ek olarak tek imalat prosesi kesme ve kalıplamadır. Bunu gerçekleştirmek için bir basit yol kullanılabilir. Örneğin; foam metalin yerini üstüne bir çok delik açılmış iki parça metal levha alabilir. Bu levhalar delikleri birbiri üstüne gelmeyecek şekilde yerleştirilebilir ve böylece reaksiyona girecek gazların geçişine hızını azaltacak ve reaksiyona girmelerine zaman bırakacak şekilde izin verir (Larminie ve Dicks, 2000).

3.4.2.7.2 Diğer Bağlantı Geometrileri

Yakıt pili hücre yığınlarının yapısında iki kutuplu plakaların kullanılması hücreler arasında iyi bir elektrik iletimi sağlar. Buna rağmen birçok bağlantı problemi ve reaksiyon gazları ve soğutma suyunun sızması konusunda potansiyel problemlere sahiptirler. Reaksiyon gazları her bir iki kutuplu plakaya ulaşır ve her anot diğer anottan ve katottan ayrı tutulmalıdır. Her anot ve katottun giriş noktaları sızıntı potansiyeli taşır. Bu problem çözülebilir ancak çok dikkat gerektirir ve uygulaması pahalıdır. Yakıt pilinin uygun derece düşük akım değerine yakın şartlarda çalıştırıldığı durumlardır; bu bazen yakıt hücrelerinin bağlantısında direnci azaltmakta basit ve ucuz bir imalat için yardımcı olabilir. MEA in PEM pillerinde ki esnek ve rahat kullanımı bir çok yığın yapısına izin verir.

Bunu yapmanın bir yolu Şekil 4.28 'da gösterildiği gibidir. Bu şekil üç hücreden oluşan bir sistemi göstermektedir. Ünitenin ana gövdesi(açık gri gösterilen) genellikle plastikten yapılır. Buradaki püf nokta; sadece bir oda hava içermektedir ve sadece biri hidrojen içerir. Buradaki hücreler katodun bir kenarı diğer hücrenin anodunun kenarına bağlanması suretiyle seri

bağlanmışlardır. Bu reaksiyon gazlarının geçeceği separatörler metalden yapılarak gerçekleştirilmiştir. Burada dışarıya daha az bir sızıntı şansı vardır ve akım yüzeyini artırır.



Şekil 4.28 Yakıt hücrelerini seri bağlamak için basit bir yöntem

Potansiyel sızıntı riski daha çok azaltılmış olur, tabii ancak MEA tüm kenarları düzgün bir şekilde kapatılır ve iki gaz odası arasında sızdırmazlık sağlanırsa ki bunu yapmak o kadar zor değildir, hiçbir problem kalmaz. Bunun yanı sıra bu dizayn hücrenin nemlendirme sorununu da azaltır, bu olay gazların serbest dolaşıma başlamasından itibaren gerçekleşir. Buna karşın, kompakt bir tasarım değildir ve sadece düşük güçteki sistemler için uygundur.

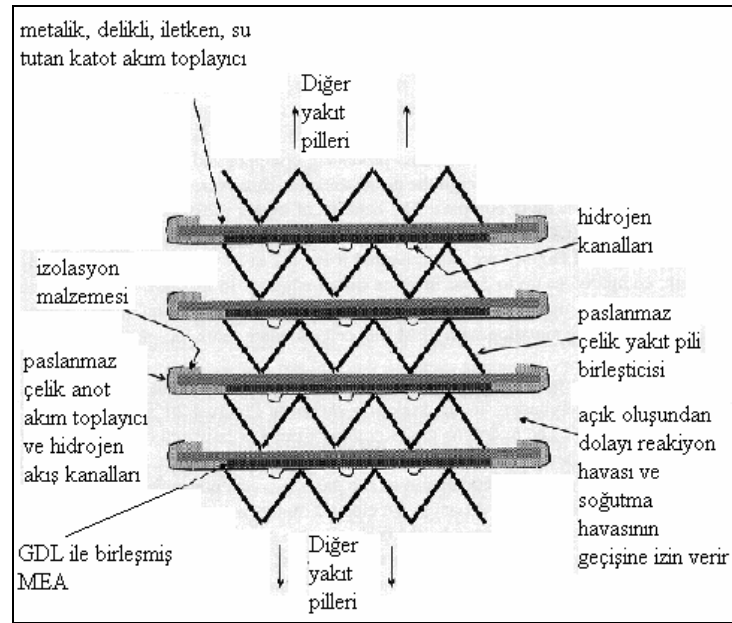
Küçük bir PEM yakıt pili yapmanın diğer bir yolu, elektrotların tamamıyla havaya maruz kaldığı dikkate değer silindirik dizayn. Basit olarak bir önceki dizaynın bir hidrojen silindiri ile çevrelenmiş hali olarak açıklanabilir; Anot ve katot çevresinde hidrojen sirkülasyonu için ekstra boşluklar bırakılmış şekilde. Böylece hidrojen deposu ile yakıt pili bir araya getirilmiş olur. Hava ihtiyacı basit olarak hücrenin dış çevresindeki doğal hava sirkülasyonu ile sağlanır. Akım kolektörü katodun üstünde sağlam bir şekilde uygulanır; delikler delinmiş paslanmaz çelik uygun bir malzeme seçimi olabilir.

Teorik olarak bir hücrenin diğerlerinden daha sıcak olacaktır. Bu durumun sonucu olarak daha fazla soğutma suyuna ihtiyaç duyacaktır. Bu da iç direnci arttıracak ve daha fazla ısınmaya neden olacaktır. Daha fazla soğutma suyu daha fazla ısı, bu bir kısır döngüdür. Bu bir hücre tamamen kuruyuncaya ve diğerlerinden daha yüksek dirence ulaşana kadar sürer. Bunun gerçekleşmesi bütün yakıt pilinin çalışmasını durdurur ki tüm hücreler birbirine seri bağlı olduğundan ve aynı akımı taşıdıklarından bu normal bir sonuçtur. Bunun olma olasılığını azaltmak için bir tek yol vardır; sistemi optimum sıcaklığın altında çalıştırmaktır. Böylece küçük bir alanda yükselen sıcaklık aşırı bir su kaybı olmasına yol açmayacaktır. Fakat bu önlem kesinlikle ideal değildir. Buna karşın, fazladan bir sebep daha vardır ki o da bu tasarımın neden sadece küçük sistemler için uygulanabilir ve pratik olduğudur.

Başka bir yakıt pili hücre yığını yapma yöntemi daha vardır ve bu yöntem metal iki kutuplu plaka yöntemine oldukça yakındır. Bu yöntem İngiltere deki “advanced power sources ltd of loughborough” tarafından geliştirilmiş ve uygulanabilirliği kanıtlanmıştır.

Her bir hücrenin yapısı; paslanmaz çelik iskelet, MEA ve son olarak katot üzerindeki gözenekli metalden akım toplayıcısından meydana gelmektedir. Bu akım toplayıcısı patentli ve tescilli teknikler kullanılarak sinterlenmiş paslanmaz çelik tozunun dikkatli bir şekilde kademeli olarak uygulanmasıyla yapılmıştır. Sonuç olarak materyal; metal, korozyon korumalı, gözenekli, güçlü, iletken ve sudan alıkonulmuştur.

Yakıt pili hücre yığını; kaba bir şekilde yerleştirilmiş ve kendin başına sağlam bir yapıya sahip hücrelerin üst üste konulması ile oluşturulmuştur. Burada basit bir paslanmaz çelik yapı bir hücrenin anodunu diğerinin katoduna bağlamaktadır. Hidrojen her bir anoda ince plastik borular yardımıyla ulaştırılmaktadır. Hücrelerin açık yapısı serbest hava sirkülasyonuna izin vermektedir. Bu ayrıca bir fan yardımıyla da desteklenebilir. Burada hücreler arasında, iyi bir termal ve elektriksel iletim vardır. Böylece hücrenin dengesizlik sorununun üstesinden olası olmayan bir yöntemle gelinmiş oldu (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 4.29 Hatlar şeklinde bir yapıya sahip PEM pili

4.4.2.8 İşletme Basıncı

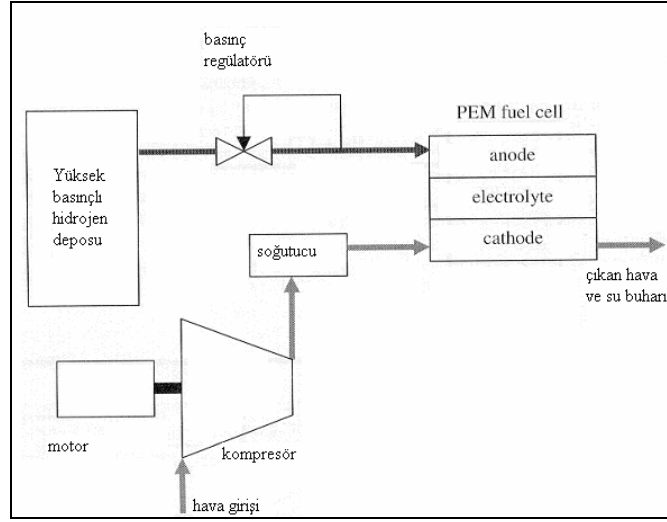
Küçük PEM pilleri normal hava basıncında çalışmasına rağmen büyük yakıt pilleri (10KW veya daha büyük olanlar) genellikle daha yüksek basınçlar altında çalışırlar. Yüksek basınçta

çalışmanın avantajları ve dezavantajları konusu karışık bir konudur ve tartışmalarda kesin olarak ortaya konabilen bir durum yoktur ve iki taraf içinde söylenmesi gereken çok şey vardır.

Yüksek basınçlarda çalışma içten yanmalı benzinli ve dizel motorların turboşarj ve süperşarj üniteleri için de temel bir problemdir. Yüksek basınç değerlerine erişmek için kullanılan teknoloji tamamı ile benzerdir.

Bir motorda basıncı arttırmanın amacı aynı motordan alınan gücün arttırılmasını sağlamaktır. Burada umulan sıkıştırma ekipmanları için harcanacak yer, ağırlık ve ekstra paranın daha fazla güç üretecek bir motor için harcanacak yer, ağırlık ve paradan daha az olmasıdır. Bu olgu doğrultusunda dizel motorların büyük bir kısmı atmosfer basıncının üzerinde çalıştırılır. Bu işlem turbo şarjler yardımıyla gerçekleştirilir. Sıcak egzost gazı giriş havasını motora veren kompresörü kontrol eden türbini çalıştırmak için kullanılır. Böylece kompresör için kullanılan enerji tamamıyla bedavadır ve turboşarj üniteleri seri üretilen, kompakt ve dayanıklı cihazlardır. Yüksek basınçlarda çalışmak bu noktaya kadar çok avantajlı gözükse de benzinli araçlarda durum oldukça karışıktır. Yüksek basınçlarda çalışmanın faydaları dizel motorlarda olduğu kadar açık değildir. Çünkü; giriş havasını yüksek basınçta göndermek erken ateşleme ve vuruntu gibi problemlere neden olabilir. Bu yüzden dizel motorlarla 3 bara kadar süperşarj edilirken benzinli motorlar 1.6 bar civarındadır. PEM pillerinde durum dizel motorlardan çok benzinli motorlardaki gibidir.

Basıncı çalışan en basit sistem Şekil 4.30'de gösterildiği gibi hidrojenin basınçlı bir tanktan geldiği sistemdir. Burada sadece hava sıkıştırılmaktadır. Hidrojen basınçlı bir kaptan geldiği için hidrojenin sıkıştırılmasına gerek yoktur. Hidrojen anodu dead-ended denilen bir yolla besler. Burada herhangi bir vana ve gaz sirkülasyonu yoktur, gaz sadece hücre tarafından kullanılır. Havayı sıkıştırmak için kullanılan kompresör bir elektrik motoru tarafından tahrik edilmelidir. Bu motor tabii ki hidrojen pili tarafından üretilen elektriğin bir kısmı ile çalışacaktır. Burada kullanılan enerji miktarı 100kw lık bir sistem için yaklaşık %20 oranındadır. Buradaki başka bir konuda sıkıştırılmış havanın pile girmeden önce soğutulmasının gerekliliğidir. İçten yanmalı motorlarda bu amaç için kullanılan ekipmana intercooler denir (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 4.30 Motor sürümlü bir kompresör ve PEM yakıt pili

4.4.2.9 Yüksek Basınç Altında Çalışan Sistemlerin Kazanç-Maliyet Faktörlerinin Basit Olarak İncelenmesi

Yakıt pilinin yüksek basınçta çalışması güzü artırır ancak bu aynı zamanda güç kaybını da beraberinde getirir ve bu bir maliyettir. Sıkıştırma elemanları yer kaplayacaktır ve ağırlığı arttıracaklardır. Yüksek basınçta çalışmanın avantaj ve dezavantajlarını daha iyi bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

PEM pilinin yüksek basınç ile çalıştırıldığında gücünün artması; genel olarak katot aktivasyon aşırı voltajının indirgenmesinden kaynaklanmaktadır. Aktivasyon kayıpları bölümünde anlatıldığı gibi, yüksek basınç akım değiştirme yoğunluğunu artırır. Akım yoğunluğunun artması açık çevrim voltajı üzerinde görünür bir etkiye sahiptir. Açık çevrim voltajı Gibbs serbest enerji prensibinden dolayı artış gösterir. Bu faydaları olduğu gibi, bazı durumlarda indirgeme reaksiyonlarında kütle kayıpları da olabilir. Bu olgu yüksek akım değerinde voltajın düşmeye başlamasına neden olur. Basınç artışının etkisi, yakıt pili hücresinin voltajı-akım şiddeti grafiğinde kolayca görülebilir. Basit olarak, akımın bir çok bileşeni için; voltaj sabitlenmiş bir değer için artar.

Bu grafikte gösterilmeyen, voltajın maksimum değeri, DV'nin basınç yükselmesinin logaritmasına oranlı olmasıdır. Bu deneysel ve teorik bir gözlemdir. Açık devre geriliminin Gibbs serbest enerjisine göre değişimi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\Delta V = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12’de gördük ki; aktivasyon aşırı gerilimi değişim akımının logaritmik fonksiyonudur. Yani söylebiliriz ki eğer basınç P1 den P2 ye artmışsa voltajda da aşağıdaki formüle bağlı olarak bir artış gerçekleşir;

$$\Delta V_{kaz} = C \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad Volt \quad (4.13)$$

C :Değişken akım yoğunluğunun basınca göre değişim sabiti.

Ne yazık ki C ne değer alacağı kesin değildir. Hirschenhofer at al (1995) ‘da bu değer 0.03 den 0,06 V a kadar verilmiştir. Şu kesinlikle bilinir ki kazanç nemiendirme miktarına bağlıdır. 0,10 V a kadarki yüksek değerler değişik sonuçlardan çıkartılabilir. Buna rağmen her sistem tasarımı kendi değerine sahiptir ve bu bulunmalıdır.

Basınca ilişkin kazanç/maliyet analizine çıkarmak için Şekil 4.30 iyi bir başlangıç noktasıdır. Güç terimleriyle maliyet direk olarak kompresörü çalıştırmak için gereken güçtür. Kazanç, yakıt hücresinden gelen daha büyük elektrik gücüdür. Görüldüğü gibi stacktaki her hücre için voltajdaki artış yani ΔV (4.13) ile bulunur. Güç kazancını belirlemek için I akımı ve n hücreli bir yığında aşağıdaki denkleme başvurulur;

$$\text{Power Gain} = C \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) In \quad Watt \quad (4.14)$$

Buna rağmen görüldüğü gibi güçteki bu artış maliyetsiz değildir. Şekil 4.30’daki basit sistemimizde, güç kaybı kompresörü çalıştırmak içindir. Kompresör tarafından harcana güç aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$\text{Kompresör Gücü} = \text{Güç Kaybı} = c_p \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{r-1}{r}} - 1 \right] \dot{m} \quad Watt \quad (4.15)$$

Bu eşitlikte; m: havanın debisidir (kg / sn)

Buna rağmen bu güç kaybı tam olarak kompresörün rotoruna giden güçtür. Bu güç, verimi birden düşük olan bir elektrik motorundan gelir ve aynı zamanda bağlantı şaftında ve yataklarda olan kayıplardır. Eğer motorun ve sürüş sistemin bileşke verimini η_m ile gösterilirse, kullanılan elektrik gücü kompresör gücünden $1 / \eta_m$ kadar fazla olur. Böylece aşağıdaki eşitlikte verildiği elektrik gücü kaybı bulunur.

$$\dot{m} = 3,57 \times 10^{-7} \times \lambda \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s}$$

(4.15) 'de elektriksel güç yerine “ $P_e = n \times I \times V_c$ ” ve havanın cp ve g değerleri de yerine konursa eşitlik aşağıdaki hali alır;

$$\text{Güç Kaybı} = 3,58 \times 10^{-4} \times \frac{T_1}{n_m \eta_c} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,286} - 1 \right) \lambda \text{ ln Watt}$$

(4.16)'yı (4.14) ile karşılaştırabiliriz. Eşitlik 4.9, gücü bulmak için akımla ve hücre sayısı ile çarpılır. Bu ifade kompresörü çalıştırmak için kullanılan her bir hücrenin voltajını temsil eder. Daha da ileri giderek basıncın P1 den P2 ye gitmesinden kaynaklanan gerilim kayıplarını formülize edebiliriz.

$$V = 3,58 \times 10^{-4} \times \frac{T_1}{n_m \eta_c} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,286} - 1 \right) \lambda \text{ Volt} \quad (4.17)$$

Şu anda bir yakıt hücresi sisteminin net performansının basınç artışına göre nasıl nicel görebilecek durumdayız. (4.13) ile voltaj artışını basitçe formülize edebiliriz.

Tüm bunların sonucunda basınç artışına göre voltaj kayıplarının bulmamızı sağlayan cebirsel bir eşitliğe ulaşırız. Değişik P2 / P1 değerleri için;

$$\Delta V_{\text{net}} = \Delta V_{\text{kazanç}} - \Delta V_{\text{kayıp}} \quad \text{grafikleri çizilebilir.}$$

Buna rağmen, bunların hepsini yapmadan önce (4.13) ve (4.17) deki sabitler için uygun değerler verilmelidir. Şekil 4.31 de gerçekçi ve iyimser yaklaşımla iki değer verilmiştir. Bu değerler aşağıda verilmiştir:

Voltaj kazanç sabiti C daha önce açıklanmıştı. 0,06 V gerçekçi bir değer olabileceği gibi 0,10 V da iyimser bir değer olarak kullanılabilir.

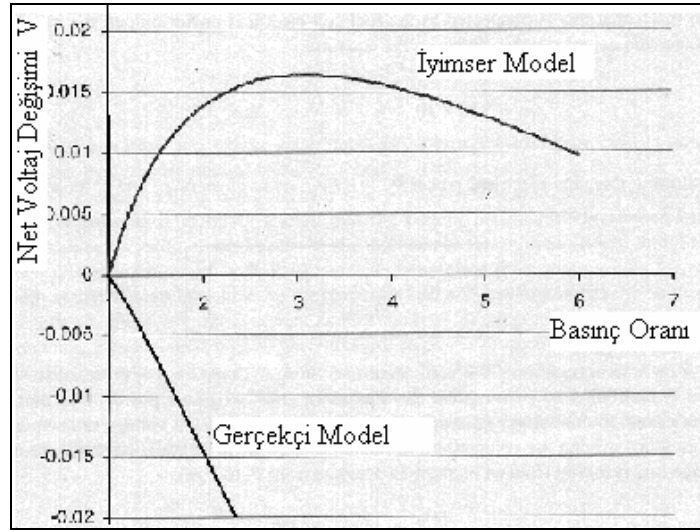
Giriş gazı sıcaklığı T1, 15 °C (288 K) olarak iki durumda da kullanılabilir.

Kompresörün elektrik sürücü sisteminin verimliliği η_m gerçekçi olarak 0,9 , iyimser olarak 0,95 alınabilir.

Kompresörün verimliliği η_c ; iyimser olarak 0,75, gerçekçi olarak 0,70 alınır.

En az etkisi olan değişken hava fazlalık katsayısı l ; iyimser olarak 1,75, gerçekçi olarak 2 alınır.

Bu değerler Şekil 4.22 de görüldüğü gibi (4.13) ve (4.17)'nin net voltaj değişimi grafiklerini çizmek için kullanılır. İyimser modelde basınç oranı 3 katına çıktığında net kazanç pil başına 17 mV artar, fakat daha yüksek basınç oranlarında bu rakam düşer. Buna rağmen gerçekçi modelde her zaman daha yüksek basınçtan kaynaklanan bir net kayıp vardır. Kazanılan güç her zaman kompresörü çalıştırmak için gereken güçten daha azdır. Daha büyük PEMFC lerle bile atmosfer basıncından yüksek basınçlarda hiçbir şekilde evrensel bir sonuca ulaşamayacağımız görürüz. 5 kW dan küçük yakıt pillerinde kompresörler genellikle daha az verimli ve daha pahalıdır (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 4.31 İki farklı PEM tipi yakıt pili için yüksek basınçta net voltaj değişiminin sonucu

4.4.3 Ultra Kapasitörler

Kapasitörler enerjiyi pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla depo eden cihazlardır. Kapasitör iki tane plaka olarak adlandırılan iletkenle, bunları ayıran ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtıktan oluşmaktadır. Konvansiyonel kapasitörlerin güç yoğunlukları çok yüksektir ($\sim 10^{12} \text{ W/m}^3$) fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür ($\sim 50 \text{ Wh/m}^3$). Konvansiyonel kapasitörler genellikle elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Depolanan yük miktarı yani enerji miktarı plakaların alanına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Yüksek kapasite için alan büyük ve plakaların arasındaki boşluk az olmalıdır.

Ultra kapasitörler konvansiyonel kapasitörlerin geliştirilmiş halidir. Ultra kapasitörlerin güç ve enerji yoğunlukları sırayla yaklaşık olarak 10^6 W/m^3 ve 10^4 Wh/m^3 mertebesindedir. Enerji

yoğunlukları bataryalara göre daha azdır. Ancak deşarj süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha fazladır.

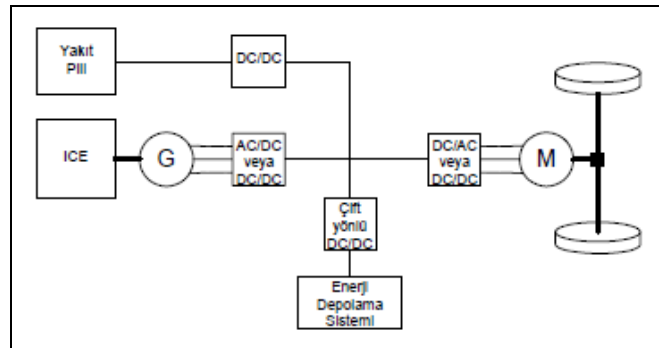
Bir ultra kapasitörde plakaların arasındaki boşluk katı polimerden oluşan elektrolitle doludur. Burada plakalar bataryada olduğu gibi elektrottur. Ancak kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmez, sadece elektrot yüzeylerinde iyonlaşma olur. Elektrotlar çok yüksek yüzey alanına sahip delikli malzemeden yapılmıştır ($>2000 \text{ m}^2/\text{g}$). Ultra kapasitörlerde elektrostatik yükler iyonlar şeklinde elektrolitte depolanmaktadır.

Devam eden araştırmalar 4000 W/kg ve 15 Wh/kg civarında kapasiteye sahip kapasitörlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Ultra kapasitörlerin primer enerji kaynağı olarak HEA'larda kullanılması için enerji yoğunluklarının artırılması gereklidir.

Ultra kapasitörler halihazırda ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinmelerinde bataryalara ya da yakıt piline yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

4.4.4 Güç Elektroniği Sistemi

Elektrikli araç teknolojileri içerisinde güç elektroniği devreleri önemli bir yer tutmaktadır. MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (Insulated gate bipolar transistor), IGCT (Insulated gate controlled thyristor) ve MCT (mos controlled thyristor) gibi yarı iletken anahtarların geliştirilmesi ile elektrik sistemlerinin kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Tahrik sisteminin kontrolü, üretilen AC gerilimin DC'ye çevrilmesi, yakıt pili çıkış geriliminin düzenlenmesi, akü şarjının uygun yöntemlerle sağlanması vb., klasik güç elektroniği devrelerinin çeşitli kontrol yöntemleri kullanılarak kontrol edilmesiyle başarılmaktadır.



Şekil 4.32 Bir elektrikli araçta kullanılabilir dönüştürücü türlerinden bazıları

Elektrikli araçlarda kullanılan güç kontrol sistemleri, klasik güç elektroniği devrelerinden oluşmaktadır. Bu devreler 4 ana başlık altında incelenebilir;

- Doğrultucular (AC/DC)
- Çeviriciler (DC/DC)
- Eviriciler (DC/AC)
- Kıyıcılar (AC/AC)

AC/AC kıyıcılar, elektrikli araçlarda uygulama alanına sahip olmadığından bu bölümde incelenmeyecektir.

4.4.4.1 Doğrultucular

Alternatif gerilimin doğru gerilime dönüştürülmesinde doğrultucular kullanılmaktadır. Doğrultucular kontrollü ve kontrolsüz olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadırlar. İsimlerinden de anlaşılacağı gibi kontrolsüz doğrultucularda çıkış gerilimi kontrol edilmemekte ve ortalama çıkış gerilimi AC kaynaktaki gerilim değişimlerinden ve yükten etkilenmektedir. Kontrollü doğrultucularda ise kullanılan yarı iletken anahtarların anahtarlama açılarının kontrol edilmesiyle çıkış gerilimi ayarlanabilir sabit değerlerde tutulabilmektedir.

HEA'larda doğrultucular, AC generatör kullanılması durumunda, çıkış geriliminin DC baraya bağlanmadan önce doğrultulmasında kullanılır. Bu doğrultucuların AC/DC dönüşümünün yanında bir diğer önemli özelliği enerji yönetim (energy management) sistemi olarak ta görev yapmasıdır.

Pek çok uygulamada DC baraya bağlı olan akülerin şarj ve deşarjının kontrolünde DC/DC çevirici kullanmak yerine, çıkış gerilimi değiştirilebilir doğrultucular kullanılmaktadır.

4.4.4.2 Kıyıcılar

DC-DC çevirici olarak da tanımlanan çeviriciler çoğunlukla regüle edilmemiş DC gerilim kaynağının, kontrollü bir biçimde sabit DC gerilime dönüştürülmesi için kullanılırlar. Regüle edilmemiş DC gerilim, genellikle bir kontrolsüz doğrultucu ile sağlanır. Aküler ve yakıt pilleri de regüle edilmemiş DC gerilim kaynağıdır.

Çeviricilerin genel çalışma prensibi belirli bir periyot içerisinde yarı iletken anahtarın iletime ve kesime geçmesi ve sonucunda da ortalaması giriş geriliminden farklı bir çıkış geriliminin sağlanmasıdır.

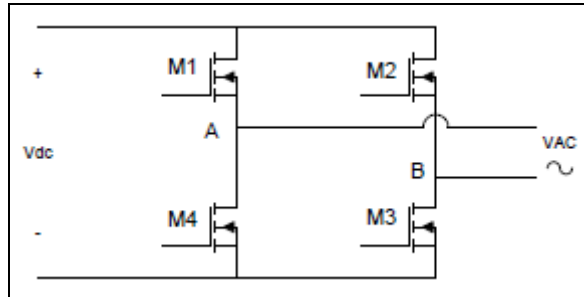
DC-DC çeviriciler anahtarlama güç kaynakları ve DC motor sürüş sistemlerinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Hibrid elektrikli araç uygulamalarında genellikle farklı gerilim seviyesine sahip DC sistemlerin birbirlerine bağlanması amacıyla kullanılırlar.

Literatürde alçaltıcı (buck) ve yükseltici (boost) olmak üzere 2 temel çevirici topolojisinden söz edilmektedir. Alçaltıcı-yükseltici, flyback, forward çeviriciler, cuk çevirici, yarım köprü çevirici, tam köprü çevirici ve sepic çevirici bu iki temel devrenin kombinasyonları ile türetilmiştir. Bahsi geçen tüm çeviricilerin tek, çift ve dört bölgede çalışan varyasyonları bulunmaktadır.

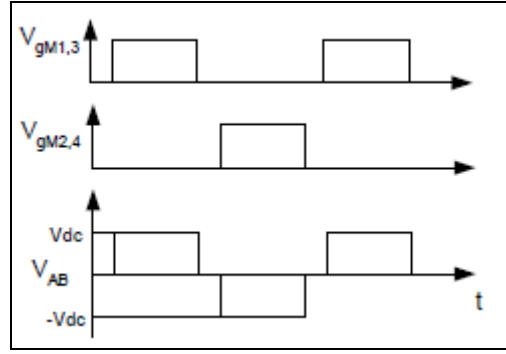
4.4.4.3 İnvörtörler

Eviriciler DC giriş gerilimini AC'ye çeviren güç elektroniği devreleridir. Elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde, 3 fazlı gerilim beslemeli PWM (Darbe genişlik modülasyonu) eviriciler asenkron, sürekli mıknatıslı motor kontrollerinde kullanılmaktadır. Günümüzde anahtarlama elamanı olarak çoğunlukla IGBT'ler tercih edilmektedir. Genel olarak tüm güç elektroniği devrelerinde kullanılan anahtarların nominal gerilimi, anahtarlama sırasında oluşan gerilim yükselmeleri nedeniyle, bara geriliminin iki katı kadar seçilir.

İdeal eviricinin çıkış gerilimi sinüzoidal dalga şeklinde olmalıdır. Ancak uygulamada tam olarak sinüzoidal değildir ve harmonikler içerir. Çıkış gerilimindeki bu harmonikler, yüksek hızlı yarı iletken anahtarların çeşitli anahtarlama teknikleri kullanılarak kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Bunun yanında, bazı uygulamalarda, çıkışı kare dalga olan eviricilerde kullanılmaktadır. Anahtarlama için kullanılan çeşitli PWM tekniklerinden bazıları, sinüzoidal PWM, histerisiz bant PWM ve uzay vektörü PWM'dir. Şekil 4.33'de bir fazlı evirici devresinin şematik resmi görülmektedir.



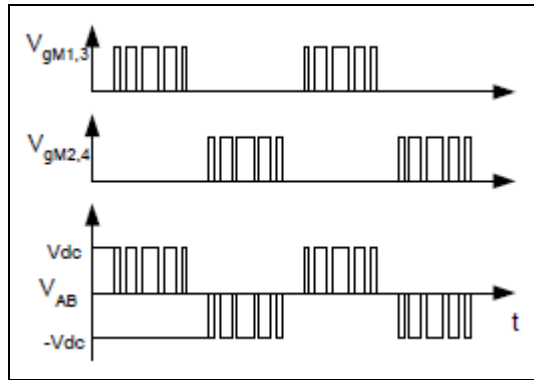
Şekil 4.33 Bir fazlı invertör



Şekil 3.34 Kare dalga invertör kontrolü ve çıkış gerilimi

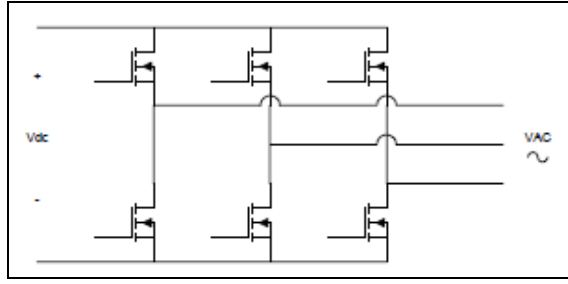
Bir fazlı eviricideki anahtarların kontrol girişlerine (Gate) uygun işaretler uygulanarak sırayla ilettime geçirilirler. Kare dalga eviriciye ilişkin kontrol işaretleri ve evirici çıkışı Şekil 4.34’de gösterilmiştir. 1 ve 3 numaralı anahtarlar ilettime geçtiğinde A-B noktaları arasında pozitif doğru gerilim uygulanır. 2 ve 4 numaralı anahtarlar ilettime geçtiğinde ise negatif doğru gerilim A-B noktaları arasında görülür. Dolayısıyla bir periyodun yarısında pozitif, diğerinde ise negatif gerilim uygulanarak, harmonikler içeren AC gerilim evirici çıkışında görülür.

Harmonikleri daha az ve sinüzoidal AC gerilime daha yakın dalga şekilleri üretebilmek için farklı PWM teknikleri kullanılır. Şekil 4.35’de evirici kontrol ve çıkış gerilimlerinin ve Şekil 4.36’da üç fazlı eviricinin şematik resimleri görülmektedir.



Şekil 4.35 İnvörtör kontrol ve çıkış gerilimi

Çıkışın pozitif olduğu sürede ilettime olan 1 ve 3 numaralı anahtarlar, bu yarı periyotta da ilettime ve kesime geçirilirler. Negatif periyotta aynı yöntem 2 ve 4 numaralı anahtarlara da uygulanır. Bu yöntemde çıkış gerilimi kare dalga çıkışa göre daha az harmonik içermekte ve daha çok AC gerilime benzemektedir. İdeal AC gerilime yaklaşabilmek için pek çok farklı PWM yöntemi geliştirilmiştir.



Şekil 4.36 Üç fazlı invertör

Eviriciler asenkron, senkron, sürekli mıknatıslı senkron motor hız kontrolünde kullanılabilir. Bu makinaların kontrolünde evirici çıkışı sinüzoidaldir. Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım makinası kontrolünde ise fazlar kare dalga ile beslenir. EA'larda motor hız kontrolü için kullanılan eviriciler genellikle kullanılan motorun faz sayısına bağlı olarak 3 fazlıdır. Bu konular tahrik sistemleri bölümünde ele alınmıştır.

4.4.5 Motor Sistemi

Tümü-elektrikli ve HEA'larda kullanılan tahrik sistemleri elektrik motoru, güç elektroniği ve kontrol ünitelerinden oluşur. Güç elektroniği ve yeni manyetik malzemelerdeki hızlı gelişmeler nedeniyle, bu sistemler her geçen gün yenilenmektedir. Daha önceden de değinildiği gibi paralel hibrid elektrikli taşıtlarda bunlara ek olarak, İYM'de tahrik sisteminin bir parçasıdır.

Bugüne gelene kadar farklı elektrik motor tipleri tümü-elektrikli ve HEA'larda denenmiştir. Tümü-Elektrikli ve hibrid elektrikli araç motorlarında beklenen özellikler şunlardır:

- Yüksek anlık güç ve yüksek güç yoğunluğu,
- Kalkış ve yokuş tırmanma durumları için düşük hızlarda yüksek moment,
- Normal seyir sırasında yüksek hızlarda yüksek güç,
- Sabit moment ve sabit güç bölgelerini içeren çok geniş hız aralığı,
- Moment ihtiyacına hızlı cevap verebilme,
- Geniş hız ve moment aralıklarında yüksek verim,
- Geri kazanımlı frenleme için yüksek verim,
- Aracın değişik çalışma koşulları için yüksek güvenilirlik ve sağlamlık,
- Kabul edilebilir seviyede maliyet.

HEA'lardaki elektrik tahrik sistemlerinin seçimi, esas olarak üç faktöre bağlıdır. Bunlar; sürücünün beklentileri, araç kısıtları ve enerji kaynaklarıdır. Sürücünün beklentileri; ivmelenme, en yüksek hız, tırmanma kabiliyeti, frenleme ve menzil özelliklerini içeren sürüş profili ile tanımlanır. Araç kısıtları aracın çeşidine, araç ağırlığına ve aracın taşıdığı yüke

bağlıdır. Enerji kaynakları ise aküler, yakıt pilleri, ultra kapasitörler, volanlar ve değişik hibrid kaynaklarla ilgilidir.

Geçmişte kontrolünün kolay olması nedeniyle tercih edilen DC motor türleri, günümüzde güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler sonucunda yerlerini AC motorlara bırakmaktadır. Fırça-kolektör bakım gereksinimi DC motor kullanımının azalmasındaki en önemli faktördür.

Güç elektroniği ve kontrol teknolojilerinde gelinen noktada, asenkron motor hız kontrolü problem olmaktan çıkmış ve endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan bu motor EA'larda kullanım imkanına kavuşmuştur. Özellikle kısa devre kafesli asenkron motorlar, üretimin kolaylığı, maliyet avantajı ve sağlam yapısı nedenleri ile tercih edilmektedir.

Günümüzde hali hazırda üzerinde çalışılan EA'ların çoğunda vektör kontrollü asenkron motor kullanılmaktadır. Ancak, sürekli mıknatıslı elektrik motorları da gelecek vaat etmektedir.

Elektrikli araç tahrik sistemlerinde başlıca 4 elektrik motoru kullanılmaktadır.

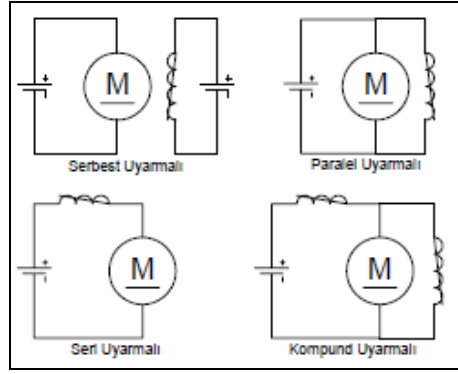
- DC motor
- Asenkron motor
- Sürekli mıknatıslı motor
- Anahtarlamalı relüktans motoru

4.4.5.1 Doğru Akım Motorları

DC motorlar, bir manyetik alan içerisinde bir iletkenin akım geçirilmesi sonucunda, o iletkene kuvvet etki etmesi prensibiyle çalışırlar. DC motorlarda manyetik alanın oluşturulması için statorda bir alan sargısı ve rotorda da dönme hareketinin sağlanması için bir endüvi sargısı bulunur. DC gerilim dönen kısma da uygulandığından fırça kolektör düzeneği kullanılmaktadır. Bu düzenek DC motorun bakım gereksinimini arttırmakta ve sanayide olduğu gibi EA'larda da kullanımının azalmasına neden olmaktadır.

DC motorlar alan sargısının türüne göre serbest uyarımalı, seri uyarımalı, paralel uyarımalı ve kompond uyarımalı olmak üzere 4'e ayrılırlar. Şekil 4.37'de DC motor türlerinin şematik resimleri görülmektedir.

Serbest uyarımalı DC motorlarda, uyarma sargısı ve besleme sargısı elektriksel olarak birbirinden bağımsız olan iki kaynaktan beslenir. Seri uyarımalı DC motor da uyarma sargısı ve endüvi sargısı birbirine seri, paralelde ise paralel olarak bağlanmıştır. Kompund motor bu iki türün birleştirilmesiyle elde edilir.



Şekil 4.37 DC motor çeşitleri

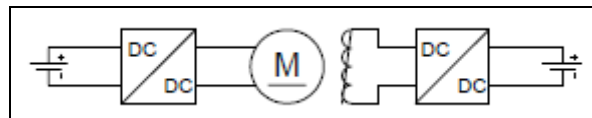
Seri uyarmalı motorlarda uyarma sargısından akan akım, endüvi sargısı ile aynıdır. Üretilen moment akımın karesi ile orantılı olması, elektrikli araç uygulamalarında seri uyarmalı DC motorların tercih edilmesine neden olmuştur. Buna karşın yüksüz çalışma durumunda çekilen akımın çok düşük olması motorun çok yüksek devirlere çıkmasına ve sonucunda da mekanik olarak zarar görmesine neden olur. Bu nedenle motor sürekli yüklü halde çalıştırılmalıdır.

Paralel uyarmalı DC motorda uyarma sargısına ve endüviye aynı gerilim uygulanmaktadır. Üretilen moment endüvi akımıyla lineer olarak orantılıdır, dolayısıyla seri uyarmalıya göre daha azdır.

Kompund motorlar ise seri ve paralel motorun kombinasyonudur. Uyarma sargılarının birbirine göre ters veya düz sarılması ile farklı karakteristikler gösterirler. Hız kontrolü, endüviye uygulanan gerilimin artırılması veya uyarma sargısından akan akımın azaltılması ile sağlanır. Ters yönde çalışma için ise endüvi sargısı ya da uyarma sargısından birine uygulanan gerilim yön değiştirilmektedir.

Seri, paralel ve kompund DC motorlarda ters yönde çalışma için ilave mekanik veya elektronik bağlantılar kullanılır. Bu anahtarlar sargılardan birine uygulanan gerilimin yönünün değiştirilmesini sağlar.

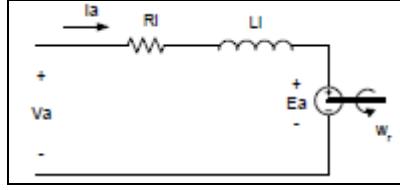
Serbest uyarmalı DC motorlarda her iki sargıya uygulanan gerilimin ayrı ayrı kontrol edilebilmesi, hız ve moment kontrolü açısından üstünlük sağlamaktadır. Motorun ters yönde dönmesi için, uygulanan gerilimlerden birinin yön değiştirmesi yeterlidir. Şekil 4.38'de serbest uyarmalı DC motor kontrol sisteminin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 4.38 Serbest uyarmalı DC motor kontrol sistemi

DC makineler kolay kontrol edilebilmesi, moment ve akı kontrolünün bağımsız olarak sağlanabilmesi ve yerleşmiş üretim teknolojisi gibi üstünlüklerine rağmen, yüksek bakım gereksinimine yol açan fırça aşınmaları, düşük nominal hız, komütatör nedeniyle oluşan yüksek elektromanyetik girişim, düşük özgül güç oranı (W/kg) ve düşük verimlilik gibi dezavantajları vardır.

Şekil 4.39’da DC motor endüvi eşdeğer devresi görülmektedir. Devre, iç direnç R_i , endüvi sargı endüktansı (L_i) ve rotorda endüklenen gerilimden (E_a) oluşmaktadır.



Şekil 4.39 DC motor eş değer devresi

DC motor devre eşitlikleri aşağıdaki gibidir;

$$V_a = E_a + R_i \cdot I_a + L_i \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (4.38)$$

$$E_a = K \cdot \phi \cdot w_r \quad (4.39)$$

w_r : motor hızı

ϕ : akı

K: makinanın yapısına bağlı olan bir sabit

J: motor eylemsizliği

TI: yük momentini

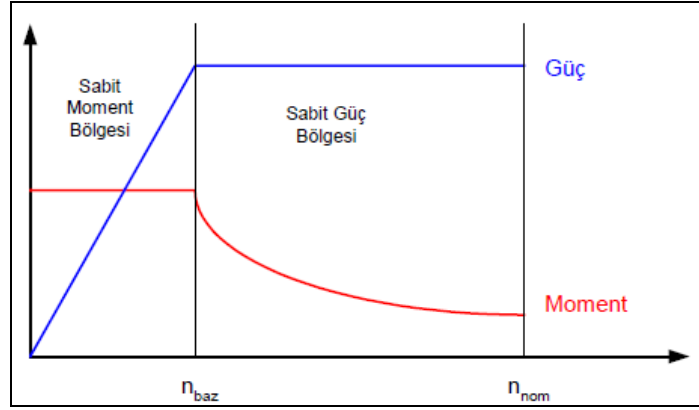
(4.39) eşitliği (4.38) eşitliğinde yerine konulur ve ifade düzenlendiğinde,

$$w_r = \frac{V_a - R_i \cdot I_a - L_i \cdot \frac{dI_a}{dt}}{K \cdot \phi} \quad (4.40)$$

(4.40) eşitliğinde görüldüğü gibi DC motor hız kontrolü, rotora uygulanan gerilim veya akının kontrol edilmesiyle sağlanabilir.

Endüviye uygulanan gerilim V_a 'nın yükseltilmesi akımın artmasına neden olur. Bunun sonucunda elektriksel momenti yükselir ve motor hızlanır. Endüviye uygulanan gerilim nominal değerine ulaştığında, motor baz hızına ulaşmıştır. Bu durumdagerilimin daha fazla arttırılması mümkün değildir. Bu noktadan sonra motorun hızlanabilmesi için sabit gerilimde,

uyarma devresi gerilimi düşürülerek akı azaltılmaya başlanır. Azaltılan akı endüvide endüklenen gerilimin düşmesine neden olur. Ea düştüğünde endüviden akım artar. Bu artış alan akısındaki azalmadan çok daha fazla olduğundan motor momenti artar ve sonucunda motor hızlanır. Motorun baz hızına ulaşana kadarki çalışma bölgesine moment bölgesi, alan zayıflatılarak hızın arttırıldığı bölgeye ise sabit güç bölgesi adı verilir. Şekil 4.40'da DC motor çalışma bölgelerinin şematik resmi görülmektedir.



Şekil 4.40 DC motor çalışma bölgeleri

EA'larda tahrik için DC motor kullanılması durumunda, hız kontrol bölgesinin arttırılabilmesi için endüvi kontrolü ve alan kontrolü birleştirilmelidir.

4.4.5.2 Asenkron Motorlar

Asenkron motorlar basit ve sağlam yapısı nedeniyle endüstride olduğu gibi EA'larda da en çok tercih edilen motor türüdür. Tek ve üç fazlı olarak üretilebilmekle beraber, yüksek güç gerektiren elektrikli araç uygulamalarında üç fazlı asenkron motor kullanılmaktadır.

Dışta AC gerilimin uygulandığı stator sargıları, içte ise akım taşıyan iletkenlerin bulunduğu rotordan oluşur. Stator sargısına uygulanan 3 fazlı AC gerilim döner manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan rotorda gerilim endükler ve rotor sargılarından akım akmaya başlar.

Asenkron motorun iki türü bulunmaktadır:

- Kısa devre kafesli asenkron motor
- Bilezikli asenkron (rotoru sargılı) motor

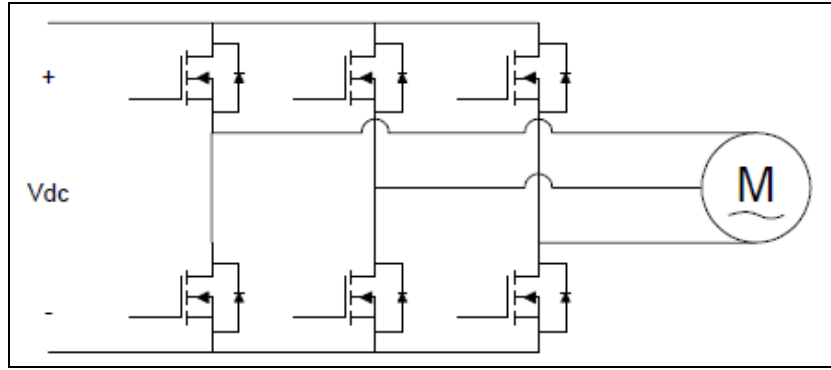
Bilezikli asenkron motorun rotorunda endüvi sargıları bulunmaktadır. Üç fazdan oluşan sargılar yıldız şeklinde bağlanmış ve faz uçları bilezik olarak tanımlanan iletkenlerle dışarıya çıkarılmıştır. Dışarıya çıkarılan fazlar, isteğe bağlı olarak değişken dirençler ile kısa devre

edilerek devre tamamlanır. Direnç değerinin değiştirilmesi ile motor hız kontrolü sağlansa da elektriksel verimliliği düşüreceğinden bu yöntem EA'larda başvurulmaz.

Elektrikli araç uygulamalarında sağlam yapısı nedeniyle kısa devre kafesli asenkron motorlar tercih edilmektedir.

Asenkron motorlarda hız kontrolü, DC motorlara göre daha karışıktır. 3 fazlı eviriciler farklı kontrol stratejileri ile birleştirilirler. Asenkron motor kontrolünde kullanılan eviricilerde, DC gerilimin anahtarlanarak AC'ye dönüştürülmesi çoğunlukla MOSFET veya IGBT'ler ile yapılmaktadır. Bu anahtarlar çeşitli PWM teknikleri kullanılarak kontrol edilir. Şekil 4.41'de asenkron motor sürücü devresinin şematik resmi görülmektedir.

Kısa devre kafesli asenkron motorun rotoru, mıknatıslanmayı sağlayacak silindir şekline demir malzemeden oluşur. Bu malzemenin çevresi, uçları birbirine halkalarla kısa devre edilmiş iletken çubuklarla kaplanır.



Şekil 4.41 Asenkron motor sürücü devresi

Statora uygulanan 3 fazlı gerilimin neden olduğu döner alan hızına, senkron hız adı verilir. Stator senkron hızı ile rotor hızı arasındaki fark kayma hızıdır ve rotorun stator senkron hızından farklı bir değerde döndüğünü ifade eder. Kayma hızının, senkron hız cinsinden ifadesine kayma adı verilir.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.41)$$

n: Motor hızı

n_s : Döner alan senkron hızı

s: Kayma

Kayma ifadesinin düzenlenmesiyle asenkron motor hız kontrolü için temel eşitliğe ulaşılır;

$$n = n_s (1 - s) = \frac{120f}{p} (1 - s) \quad (4.42)$$

p: kutup sayısı
f: besleme frekansı

Görüldüğü gibi kutup sayısı ancak üretim anında değiştirilebileceğinden, asenkron motor hız kontrolü stator besleme frekansı veya kaymanın değiştirilmesi ile sağlanır. Kaymanın değiştirilmesi için statora uygulanan gerilim kontrol edilmelidir.

Gerilim/frekans (V/F) oranının sabit tutulması prensibine dayanan klasik asenkron motor hız kontrol yöntemine skalar kontrol adı verilir. Asenkron motor sürekli hal devre eşitlikleri temel alınarak geliştirildiğinden, dinamik durumlarda ve düşük hızlarda zayıf performans gösterir. EA'larda motor sürücü performans gereksinimleri, skalar kontrol yönteminin ile sağlanamayacak kadar zorludur. Bunun yerine çoğunlukla vektör kontrol yöntemi kullanılır. Vektör kontrol yöntemi, motora uygulanan gerilimin genliği ve faz açısının kontrolünü içerir.

Bu kontrol stratejilerinin yanında uyarlamalı kontrol, optimal kontrol gibi daha gelişmiş kontrol yöntemleri de hızlı cevap süresi ve yüksek verim sağlamak amacıyla kullanılabilmektedir.

4.4.5.3 Sürekli Mıknatıslı Motorlar

Manyetik alan yaratmak için uyarma sargılarının yerine mıknatıs kullanılan motorlardır. Bu yöntem, rotor bakır kayıplarını ve uyarma devresi bakım gereksinimini ortadan kaldırır. Sürekli mıknatıslı motorlar (SM) genellikle 2 gruba ayrılırlar:

- SM Senkron makineler: Bu makineler, asenkron makinelerdeki gibi düzenli olarak dönen stator alanına sahiptir.
- Kare Dalga SM makineler: Fırçasız DC makine olarak da adlandırılırlar. Stator sargıları ayırık zamanlarda kare dalga ile beslenirler.

Uyarma için kullanılan mıknatıslar, rotor ve stator arasındaki hava boşluğunda akı yoğunluğunun artmasına neden olur. Buna bağlı olarak güç yoğunluğu (W/kg) ve eylemsizliğe göre moment (Nm/kgm^2) oranları yüksektir.

Sürekli mıknatıslı makinelerde çoğunlukla ferritler, samaryum kobalt (SmCo) ve neodmiyum-demir boron (NdFeB) olmak üzere 3 tip mıknatıs kullanılır. SM makineler için en büyük tehlike, yüksek ısı ve yük koşullarının, mıknatısların özelliklerini kaybetmelerine neden olabilmesidir. Bunu için SM makine tasarımında mıknatıs korunmasına yönelik uygun önlemler alınır.

Asenkron motorlara göre kayma açısı hesaplamasının olmaması nedeniyle sürekli mıknatıslı motor kontrolü daha kolaydır. Rotorunda kafes bulunmaması eylemsizliği düşürerek elektriksel cevap süresinin azalmasını sağlar. Ancak daha düşük zaman sabitine sahip asenkron motorun cevap süresi daha kısadır. Aynı güç oranında, sürekli mıknatıslı motorun boyutları asenkron motora göre daha küçüktür. Rotor bakır kayıpları olmaması soğutma açısından SM motorlara avantaj sağlamaktadır. Buna karşın asenkron motor fiyat açısından SM motora üstünlük sağlamaktadır.

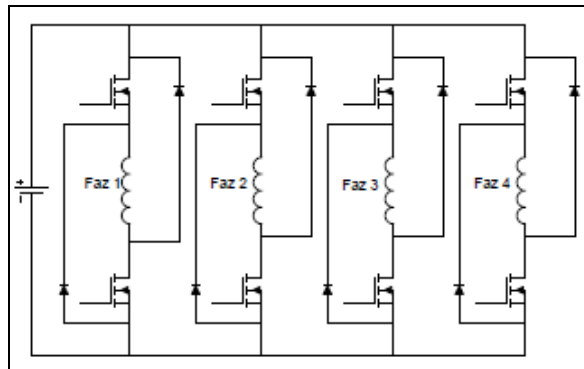
Sürekli mıknatıslı senkron motorun hız kontrolünde vektör kontrol yöntemi kullanılabilir. Motor sürekli senkron hızda döndüğünden vektör kontrolün uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Ancak SM senkron motor hız kontrolünde yüksek çözünürlüklü pozisyon sensörü kullanılmalıdır.

Fırçasız doğru akım motor hız kontrolü ise daha kolaydır. Fazlara uygulanan gerilimler kare dalga şeklindedir ve konum belirlemek için yalnızca 3 adet akım sensörü kullanmak yeterlidir. Üç fazlı kare dalga evirici hız kontrolü sağlar.

4.4.5.4 Anahtarlama Relüktans Motoru

Anahtarlama relüktans makinesinin (SRM) en belirgin özelliği rotorunda mıknatıs veya sargı olmaması ve statorunda bağımsız faz sargılarının olmasıdır. Rotor ve stator, ince manyetik çelik tabakaların üst üste konulmasıyla oluşturulur.

SRM stator faz sargıları birbirinden bağımsız olarak sırayla DC gerilimle beslenir. Dört fazlı bir SRM'nin hız kontrolü için kullanılacak devre Şekil 4.42'de görülmektedir.



Şekil 4.42 Anahtarlama relüktans motorunun sürücü devresi

Diğer motorlardan farklı olarak SRM motorlarının dönüş yönü fazların beslenme sırasına bağlıdır. Örneğin 1-2-3-4 besleme sırası uygulandığında motor saat yönünde dönüyorsa, 4-3-2-1 besleme durumunda ters yönde dönecektir.

Anahtarlamalı relüktans motorları basit yapı ve düşük üretim maliyeti avantajlarına sahiptirler ve elektrikli araç tahrik sistemi için moment-hız karakteristiğini karşılamaktadırlar. SRM kayıplarının çoğunun statorda oluşması, soğutma açısından kolaylık sağlamaktadır. Birbirinden bağımsız stator fazları, fazlardan birinde sorun oluşması durumunda bile çalışmanın devam etmesine olanak sağlar.

Yapısındaki basitliğine karşın, tasarım ve kontrolünde basitlik içermez. Kutup uçlarındaki şiddetli doyma ve kutupların saçak etkisinden dolayı, tasarım ve kontrolü zor ve karmaşıktır. Aynı zamanda, genellikle akustik gürültü problemi gösterirler. SRM'nin en önemli dezavantajlarından biride moment karakteristiğindeki dalgalanmadır.

5. YAKIT PİLLİ HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇ PROJESİ

5.1 Giriş

Otomotiv endüstrisi, içten yanmalı motor teknolojisinden uzaklaşarak yakıt pilli ve batarya sistemli elektrikli araç teknolojilerine doğru ilerlemektedir. Bu doğrultudaki çalışmalar son zamanlarda daha da yoğunlaştı. Yakıt pilinde hidrojenin kullanılarak elektrik üretilmesinin en büyük avantajı yüksek verimlilikte birincil enerji kaynağından (hidrojen) direkt olarak elektrik enerjisinin elde edilebilmesidir. Bu durum özellikle taşımacılıkta değişik birincil enerji kaynaklarının ve hatta yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına da imkan sağlayacaktır.

Hidrojen ve yakıt pilleri, günümüz araçlarındaki alışılmış içten yanmalı motor teknolojisine göre taşımacılık sektörü için sağladığı bir takım avantajlar bakımından anahtar teknolojilerdir. Bu teknolojiler yüksek sistem verimi, enerji yoğunluğu (energy density) ve sıfır karbon emisyonu gibi unsurlarla ön plana çıkmaktadır.

Uluslar arası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü'nün bünyesinde 2004 senesinde İstanbul'da kurulmuştur ve Enerji Bakanlığı tarafından desteklenmektedir. Merkezin amacı gelişmekte olan dünyada fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasında rol almaktır. Merkez kuruluşundan bu yana hidrojen teknolojileri alanında yapılan AR-GE çalışmalarına ve çeşitli projelere destek vermektedir. Bu projelerden bir tanesi de ana güç kaynağı yakıt pili olan Elektrikli Yolcu Taşıma Aracı projesidir.



Şekil 5.1 Çeşitli amaçlarla kullanılan elektrikli araçlar

Yolcu taşıma araçları (Şekil 5.1) genellikle insanların yoğun olarak bulunduğu (havalimanları, alışveriş merkezleri, kampüsler, oteller gibi) alanlarda bir noktadan başka bir noktaya taşımacılık amaçlı kullanılan araçlardır. Yapılan elektrikli araç projesinde amaç bu tür araçlarda güneş pili ve batarya teknolojisine ek olarak ana güç ünitesi olarak yakıt pili

kullanımının avantajlarını göstermektedir. Bu gerçekleştirilen proje, otomotiv endüstrisi açısından da önemli bir çalışmadır.

Enerjinin sağlandığı sistemlerin kapladığı hacim ve ağırlık otomotiv endüstrisi için önem arz etmektedir. Bu noktada elektrikli araç teknolojisinde yakıt pili, tek dolunda daha uzun yol kat edebilme ve yüksek verimlilik gibi unsurlarla bir takım avantajları da beraberinde getiriyor. Yakıt pilleri, bataryalarla birlikte elektrikli araçlarda birim hacimdeki güç yoğunluğunu arttırmak ve bataryalarında ömrünü uzatmak adına birincil ana güç ünitesi olarak kullanılabilir. Gerçekleştirilen elektrikli araç projesi (Şekil 5.2) bu açıdan bu tekniğe iyi bir örnek oluşturmaktadır.



Şekil 5.2 Gerçekleştirilen elektrikli araç projesi

5.2 Projeye Genel Bakış

Proje öncesinde yapılan planlamaya göre projenin süreci birkaç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar birer başlık halinde sıralanırsa,

- Projenin teknik planlaması
- Modifikasyon
- Testler ve Ölçümler
- Optimizasyon
- Sonuçlar

şeklindedir.

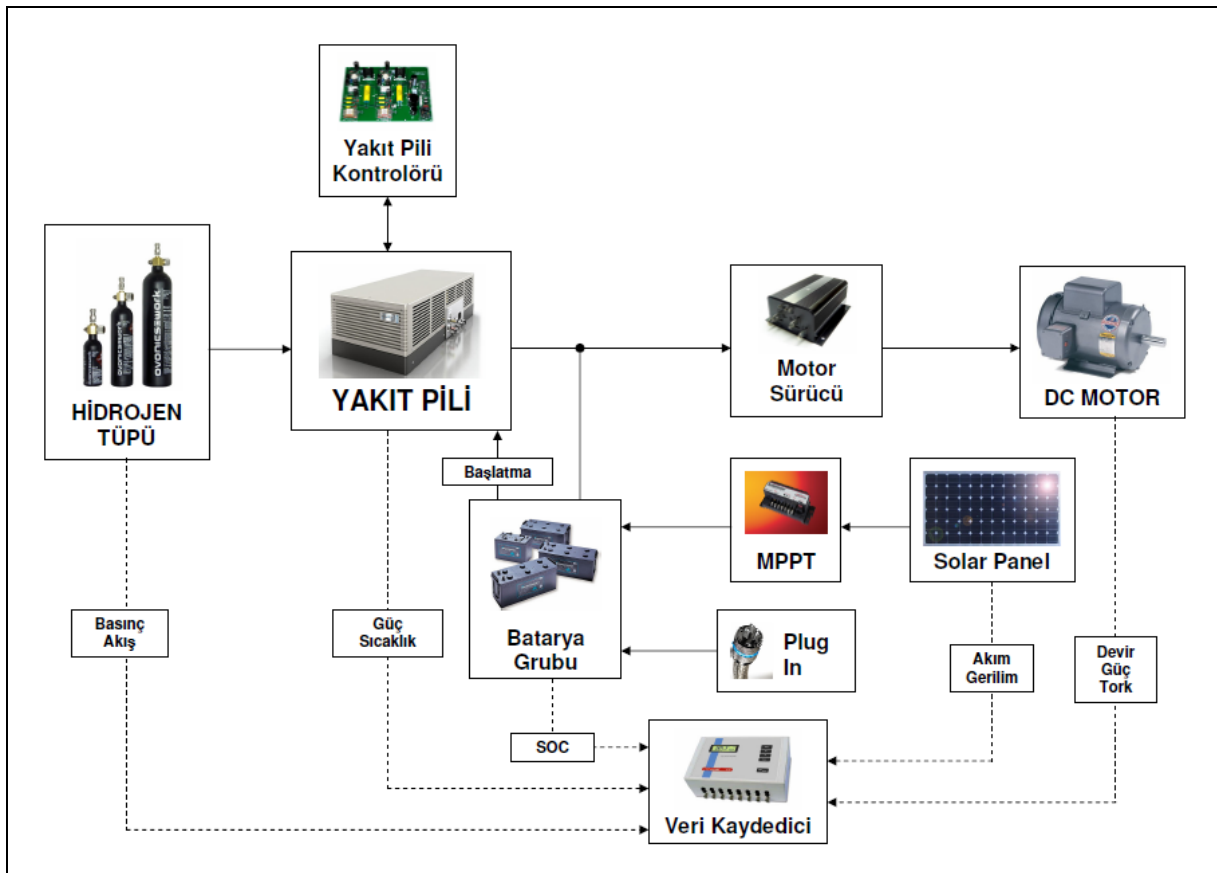
Modifikasyon süreci ise kendi içinde birkaç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar,

- Yakıt pili ve hidrojen manifold sisteminin araca entegrasyonu
- Güneş pili ve ekipmanlarının araca entegrasyonu
- Veri toplama sistemi ve çeşitli sensörlerin araca entegrasyonu

şeklinde sıralanabilir.

Gerçekleştirilen elektrikli yolcu aracı projesinde ana güç ünitesi olarak 2 kW lık bir yakıt pili sistemi ve yardımcı güç ekipmanı olarak elektrikli araçlar için özel üretilmiş (EV serisi)


toplam 1,5 kW lık jel bataryalar kullanılmıştır. Ayrıca maksimum 360 watt enerji üretebilen güneş panelleri de sisteme bağlı bulunmaktadır. Şehir şebekesini kullanarak bataryaların şarj edilebilmesine imkan sağlayan bağlantı noktası da araç üzerinde mevcuttur. Araçta redüktör üzerinden arka şafta akuple bir adet 2.6 kW güce sahip fırçalı doğru akım motoru bulunmaktadır. Hidrojen depolama kısmı ise her biri 17 bar basınç altında 900 sl hidrojen depolama kapasitesine sahip toplam 6 adet metal hidrür tüpten oluşmaktadır. Elektrikli yolcu aracında yer alan çeşitli sistemler üzerinden veri toplamak amacıyla sensörler kullanılmıştır. Bu sensörlerin bağlı olduğu ve sensörlerden gelen verilerin aracın dışındaki bilgisayara gönderilmesini sağlayan bir adet telemetri modülü bulunmaktadır. Şekil 5.3’de elektrikli yolcu aracındaki sistemin genel şeması verilmiştir.



Şekil 5.3 Elektrikli yolcu aracındaki sistemin genel şeması

Elektrikli aracın modifikasyon öncesi ve sonrası teknik özellikleri alttaki Çizelge 5.1 ve 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Aracın modifikasyon öncesi teknik özellikleri

Motor	48 Volt, 2.6kW (3.5 HP), DC Fırçalı Motor	
Motor Sürücü	Maksimum 270 amper armatür ve 20 amper alan beslemeli	
Batarya	12 Volt, 75 Ah, kurşun-asit (sulu) tip, 4 adet	
Batarya Şarj Cihazı	48 Volt, 17 A maksimum çıkış	
Hız	24 km/h	
Ağırlık	410 kg	
Taşıma Kapasitesi	2 kişi	

Çizelge 5.2 Aracın modifikasyon sonrası teknik özellikleri

Motor	48 Volt 2.6kW (3.5 HP) DC Fırçalı Motor	
Motor Sürücü	Maksimum 270 amper armatür ve 20 amper alan beslemeli	
Yakıt Pili	2 kW, 48 Volt PEM tipi	
Güneş Paneli ve Ekipmanı	90 watt, 21.4 V _{oc} , 5.5A I _{sc} , %19.7 verim, monokristal, toplam 4 adet panel ve 48 Volt, 40 amper maksimum çıkış verebilen güneş pili batarya şarj regülatörü	
Batarya	12 Volt, 33 Ah, EV (Electrical Vehicle) Jel tip, 4 adet	
Batarya Şarj Cihazı	48 Volt, çıkış akımı ayarlanabilir, 3 değişik şarj özelliği	
Hidrojen Manifold Sistemi	900sl@17 bar, 6 adet metal hidrür tüp ve 316 paslanmaz çelik bağlantı parçaları ve hidrojen hattı	
Veri Toplama Sistemi	GPRS haberleşme modülü ile bu modüle bağlı birer adet, 8'er kanal akım ve gerilim sinyal alıcı modül	
Hız	24 km/h	
Ağırlık	550 kg	
Taşıma Kapasitesi	4 kişi	

5.3 Modifikasyon Süreci

Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi'nin çatısı altında gerçekleştirilen projede modifikasyon süreci genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama yakıt pili sisteminin ve hidrojen manifold sisteminin araca entegre edilmesidir. İkinci aşama ise güneş panelleri ve ekipmanlarının araca entegre edilmesidir. Son aşamayı veri toplama sistemi ve diğer elektronik kartların araca entegrasyonu oluşturmaktadır.

Modifikasyon sürecinde elbette ki teknik anlamda bir takım sorunlarla da karşılaşmıştır. Bu süreçte karşılaşılan sorunların nedenleri belirlenip en uygun teknik çözümlerle sorunlar aşılmıştır. Sonraki bölümlerde modifikasyon süreçleri daha ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

5.3.1 Yakıt Pili ve Hidrojen Manifold Sistemi Entegrasyonu

Araçta yapılan ilk değişiklik mevcut sulu akülerin çıkartılarak yerlerine 2 kW'lık yakıt pili ünitesi ve kontrol ünitesinin yerleştirilmesi olmuştur. Bu aşamada aracın sağladığı mevcut hacmin kısıtlı olması biraz sıkıntı yaratmıştır. Özellikle stack (hücre yığını) kısmının bulunduğu yakıt pili ünitesinin büyük hacme sahip olması araca konumlandırılmasını zorlaştırıyordu. Araç üzerinde yapılan değerlendirmeler ve ölçümler sonunda en uygun alanın çıkartılan eski bataryalardan kalan boşluğun, yani Şekil 5.4'de gösterilmiş olan ön koltuğun alt bölümü olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.4 Yakıt pili ünitesinin konumlandırıldığı alan

Yapılan bir takım çalışmalar sonucu araçta kalbini oluşturacak olan yakıt pili sistemi aracın ön koltuğunun altına başarılı bir şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 5.5'te bu yerleşim çok daha net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 5.5 Yakıt pili ünitesinin araca yerleşimi

Yakıt pili ünitesinin yerleşiminden sonra yakıt pilini kontrol edecek ünitenin yerleşimine sıra geldi. Bu kontrol ünitesinin yakıt pili ünitesine göre kapladığı hacim bakımından daha küçük olması bir avantaj sağlıyordu. Kontrol ünitesi için en uygun yerin araç üzerinde arka kısmının olduğu belirlendi. Kontrol ünitesi ve bu alan Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Kontrol ünitesi ve araç üzerindeki yerleşim alanı

Yakıt pili kontrol ünitesinin aracın arka kısmına yerleştirilebilmesi için bir takım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda Şekil 5.7’de gösterildiği şekilde yerleşim gerçekleştirilmiştir. Yakıt pili ünitesi ve kontrol ünitesi arasındaki haberleşme ve güç kabloları aracın içersinden geçirilerek ve dışarıdan fark edilemeyecek biçimde döşenmiştir. Yakıt pili sistemine ait teknik özellikler Ek 1’de tablo olarak verilmiştir.



Şekil 5.7 Yakıt pili kontrol ünitesinin araç üzerine yerleşimi

Yakıt pili sistemini ilk çalıştırma esnasında ihtiyacı olan gücün karşılanabilmesi için toplam 1.5 kW'lık güce sahip her biri 12 volt, 33 Ah, 4 adet aküden oluşan seri bağlı batarya grubu kullanılmıştır. Bataryalar, Şekil 5.8'de gösterildiği gibi yakıt pili kontrol ünitesinin altında konumlandırılmıştır.



Şekil 5.8 Batarya grubunun araç üzerindeki yerleşimi

Yakıt pili ünitesinin asıl ihtiyacı olan hidrojeni sağlayabilmek için 6 adet metal hidrür tank kullanılmıştır. Bu tankların her biri 17 bar basınç altında doldurulduğunda 900sl (standart litre) hidrojen gazı depolama kapasitesine sahiptir. Buna göre 6 tüpten oluşan depolama sisteminin toplam kapasitesi 5400sl gibi bir değere ulaşabilmektedir. Tüplerin araç içinde konumlandırıldığı nokta, tüplerin deşarj işlemi sırasında dışarıdan ihtiyaç duyacağı ısı enerjisi de göz önünde bulundurularak yakıt pili sıcak hava çıkışının önüne yerleştirilmiştir. Bu sayede yakıt pilinin ürettiği sıcak havada kullanılarak bir döngü halinde tüplerden daha verimli bir gaz akışı sağlanması hedeflenmiştir. Tüpler araç içersinde bulunan quick-coupling (hızlı geçme) sayesinde dışarıdan dolum tüpüne bağlantı ile yerlerinden çıkartılmadan doldurulabildiği gibi, modüler olarak tasarlanmış ve her biri iki tüp taşıyabilen üç adet birbirinden bağımsız taşıyıcı mekanizma sayesinde araç dışına çıkartılarak ta dolum işlemi gerçekleştirilebiliyor. Genel olarak Şekil 5.9'da tüplerin yerleşimleri verilmiştir.



Şekil 5.9 Tüplerin yerleşim alanı ve modüler mekanizma

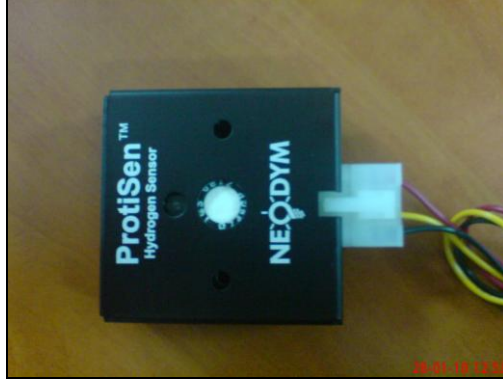
Manifold sisteminde kullanılan boru ve ara bağlantı parçalarının standart ölçüleri ¼” olarak belirlenmiştir. Yakıt pili ve tanklar arasındaki manifold sistemi 316 SS olarak ifade edilen paslanmaz çelik malzeme kullanılarak yapılmıştır. Bu sayede daha stabil, sağlam ve güvenli bir gaz sistemi oluşturulmuştur. Bu manifold sistemine, yakıt piline giden gazın akışını kontrol etmek için gaz akış ölçüm cihazı (flowmeter) ile hattaki gazın basıncını ölçmek için basınç ölçüm cihazı (pressure transducer) bağlanmıştır. Bu cihazlar direkt olarak veri toplama sistemine bilgi gönderimi yapmaktadır. Sistemdeki gazın basıncını dışarıdan her zaman kontrol etmek için ayrıca bir adet manometrede (gauge) bulunmaktadır. Gaz hattında güvenlik amacıyla gazın geri kaçmasını engelleyen çek-valf (alev kapanı) ve gaz hattının basıncındaki aşırı artışlarda sistemin basıncını güvenli seviyede kalmasını sağlayan basınç emniyet vanası (relief valve) gibi elemanlar kullanılmıştır. Tüp tarafından gelip yakıt pili içine girerek gaz akış yollarının tıkanmasına ve yakıt pilinin arızalanmasına sebep olabilecek olan partikülleri engellemek için filtre elemanı bağlanmıştır. Acil durumlarda veya aracın kullanılmadığı durumlarda hattı kapatmak için bir adet küresel vana konumlandırılmıştır. Sistemdeki elemanların konumları Şekil 5.10’de gösterilmiştir. Ayrıca gaz manifold sisteminin şeması Ek 2’de verilmiştir.



Şekil 5.10 Manifold sistemindeki elemanlar

Yakıt pili manifold sistemi dışında yakıt pili ünitesinin bulunduğu bölümün hidrojen seviyesini her zaman kontrol eden bir adet hidrojen sensörü (Şekil 5.11) bulunmaktadır. Ortamda düşük patlama seviyesi olarak ifade edilen LEL (Low Explosion Limit) seviyesinin %25 üzerinde hidrojen gazı algıladığı an aracın elektronik kontrol kartına bunu bildirerek yakıt pili sisteminin kapanmasını ve aracın elektriksel gücünün kesilmesini sağlıyor. Hidrojenin tehlike oluşturabilmesi için havadaki konsantrasyon oranının %4’den fazla ve %70’den az olması gerekmektedir. Bu aralıkta hidrojen ve oksijen konsantrasyonu patlama riski oluşturuyor. %4’den daha düşük durumda yeterli hidrojen bulunmadığından, %70’den

fazla durumda ise aşırı hidrojen sonucu yanma için ortamda yeterli oksijen bulunmadığından risk oluşmuyor.



Şekil 5.11 Hidrojen sensörü

5.3.2 Güneş Paneli ve Ekipmanlarının Entegrasyonu

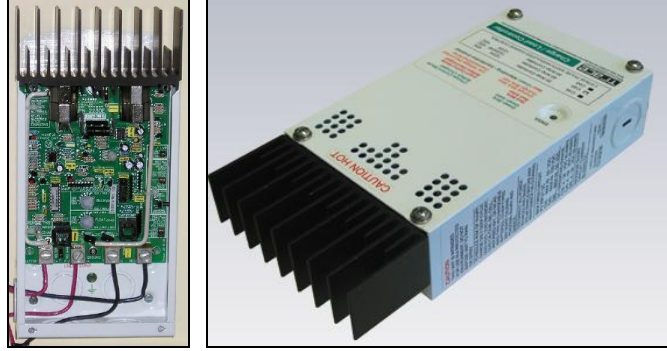
Araç için uygun boyutta ve maksimum 90 watt enerji üretebilen yaklaşık %19 hücre verimine sahip 4 adet panel seçilmiştir. Panellerde yer alan hücreler monokristal yapıya sahiptir. Bu paneller kendi arasında seri bağlıdır. Güneş ışınlarını $1000\text{W}/\text{m}^2$ gibi bir değerde alırsa sistemin açık devre gerilimi 80 voltun üzerinde bir gerilim seviyesine ulaşabiliyor. Panellerin teknik özelliklerini içeren ayrıntılı bilgi Ek 3’de verilmiştir. Panellerin (Şekil 5.12) toplam gücü maksimum 360 watt değerindedir. Güneş panelleri aracın üstüne yapılan bir iskelete monte edilmiştir.



Şekil 5.12 Güneş panelleri

Panellerde üretilen enerjinin regüle edilmesi için sistemde bir adet güneş pili şarj regülatörü (Şekil 5.13) bulunmaktadır. Bu şarj regülatörünün çıkışı bataryalara bağlıdır. Güneş panellerinde üretilen enerji regüle edilip gerilim seviyesi bataryaların gerilim seviyesine

düşürülerek bataryaları şarj etmek için kullanılmaktadır. Güneş panelleri yaklaşık 360 watt gibi bir güç değerine ulaşırsa, araç içinde bulunan toplam 48 volt, 1.5kW'lık batarya grubunu en fazla 4 saat gibi bir sürede şarj edebilmektedir. Bu süre bataryanın şarj seviyesine göre değişiklik gösterirken 4 saatlik süre tamamen deşarj edilmiş batarya grubu için verilmiştir.



Şekil 5.13 Şarj Regülatörü

Güneş panellerinin kendi arasındaki kablolama ve regülatörle olan elektriksel bağlantıları araç dışından görünmeyecek biçimde gizlenerek yapılmıştır. Kullanılan kablo çok damarlı, 10 mm² kesit alanına sahip bakır kablodur. Panellerden gelebilecek maksimum akım 5 amper gibi bir değer olduğundan, elektrik akımı bu kesitteki bir kablodan rahatlıkla ısınmadan geçebilir.

Güneş panellerinde üretilen elektrik enerjisiyle bataryalar şarj edilebildiği gibi güneşin yeterli olmadığı durumlarda veya geceleri aracın bataryalarını şarj etmek için özel bir konektör girişi (plug-in) kullanılmaktadır. Bu konektöre bağlanan özel bir batarya şarj cihazı sayesinde bataryalar ayrıca şebekeden direkt olarak şarj edilebilmektedir.

Güneş panellerine bağlı şarj regülatörü ile plug-in bağlantısı bir biriyle paralel bağlı gibi olsa da elektriksel bağlantıyı kutup değiştirici bir pako şalter (Şekil 5.14) ayırmaktadır. Bu sayede güneş panellerinden bataryalar şarj edilirken plug-in girişi devre dışı oluyor. Şebekeden sistem şarj edilmek istenirse bu sefer güneş pili şarj regülatörü tarafı devre dışı edilmiş olunuyor.



Şekil 5.14 Kutup değiştirici pako şalter

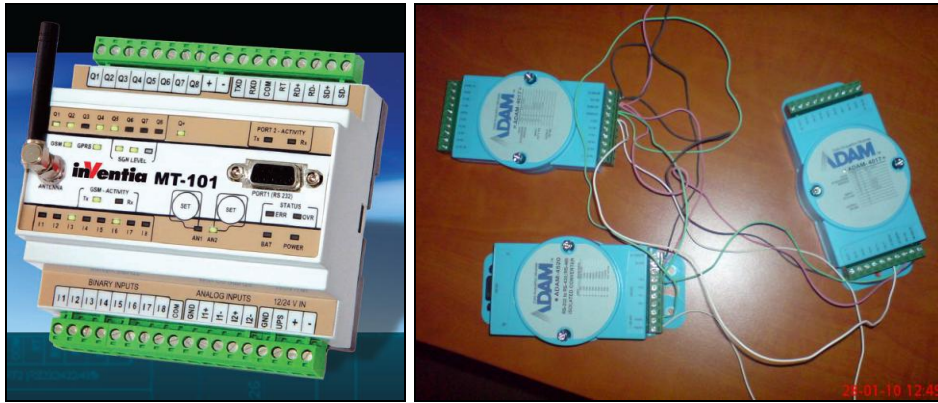
Böyle bir ihtiyacın ortaya çıkmasındaki sebep, bataryalar şebekeden şarj edilirken aynı anda bataryalara bağlı güneş pili şarj regülatörünün olumsuz etkilenmesi ve içindeki mosfetin bir süre sonra yanmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda ilk olarak şarj regülatörünün önüne bir güç diyotu konarak problem çözülmeye çalışıldı. Fakat diyot konduktan sonra şarj regülatörü bataryaları tanımlayamadığı için cihaz çalışmadı. Bu durumda pako şalter çözümü ortaya çıktı. İhtiyaç duyulduğunda her iki kaynaktan bağımsız olarak bataryalar şarj edilebilmektedir. Böylece sistemde oluşabilecek muhtemel arızaların da önüne geçilmiş olundu.

5.3.3 Veri Toplama Sistemi ve Kontrol Kartının Entegrasyonu

5.3.3.1 Veri Toplama Sistemi

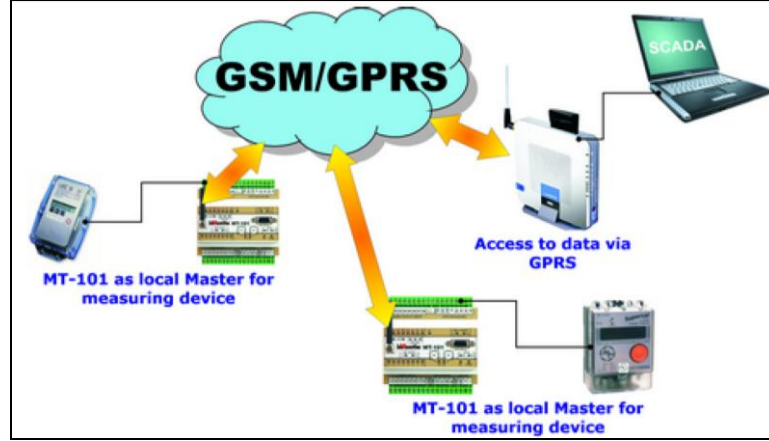
Projede entegrasyon sürecinin son basamağını oluşturan bu kısım en çok problemle karşılaşılan fakat sonunda bir çok tecrübe de kazandıran kısım olmuştur. Veri toplama sistemleri günümüzde birçok alanda çeşitli türden teknik bilgileri depolayıp (veya kaydedip) sonrasında analiz yapma imkanı sağlayan vazgeçilmez sistemlerdir. Bu sayede veri toplanan sistem üzerindeki problem veya eksikler ortaya çıkartılarak sistemin en iyi şekilde optimize edilmesine önemli katkı sağlamaktadır.

Bu projede aracın içersinde bulunan birçok bileşenden gerekli verilerin alınıp sonrasında bunların teknik yönden değerlendirilebilmesi için veri toplama sistemi (datalogger) kullanılmıştır. Bu veri toplama sistemi (Şekil 5.15) bir ana modül (haberleşme modülü) ve bu ana modüle bağlı üzerinde 8'er analog giriş kanalı bulunan iki adet modülden oluşmaktadır. Bunların dışında analog kanallı modülleri istendiğinde programlamak için kullanılan bir tane programlama modülü bulunmaktadır.



Şekil 5.15 Haberleşme modülü ve buna bağlı diğer modüller

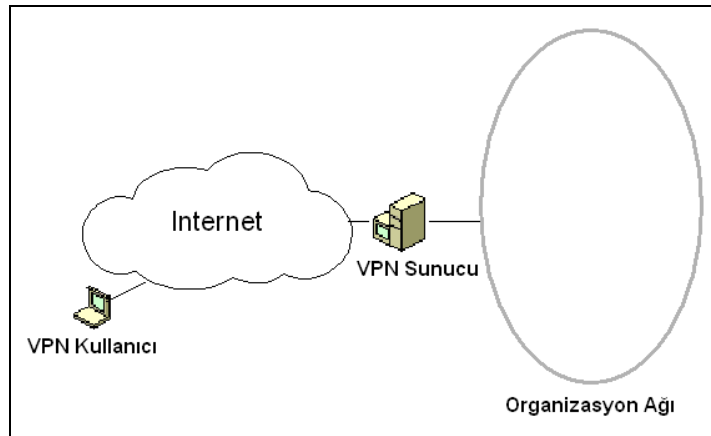
Haberleşme modülünün fonksiyonu, 2 analog veri toplama modülünden aynı anda gelen çeşitli verileri kendi üzerinden GPRS kanalıyla ana bilgisayara iletmektir. Ana bilgisayar (server veya sunucu) aracın dışında olan ve araçla fiziksel hiçbir bağı olmayan bir bilgisayardır. Telsiz haberleşme (telemetry) sayesinde araç nerede olursa olsun ana bilgisayar üzerinden aracın anlık verilerine ulaşmak mümkündür.



Şekil 5.16 Haberleşme modülü ve ana bilgisayar (sunucu-server) arasındaki hiyerarşi

Ana bilgisayar üzerinden veriler elde edilebildiği gibi ana bilgisayara dışarıdan herhangi bir bilgisayar ile bağlanılarak (VPN-Virtual Private Network) aracın verilerine ulaşmak yine mümkündür. Bunun için bir takım ön ayarların ana bilgisayara bağlanacak olan bilgisayar (client veya istemci) üzerinde yapılmış olması gerekmektedir. Bu ayarlar VPN bağlantı ayarları ve haberleşme modülüne bağlandıktan sonra bilgisayarda verilerin düşeceği programın ayarlarıdır.

Şekil 5.17’de “Organization Network” olarak gösterilen alan Şekil 5.16’daki hiyerarşidir. VPN Server (Şekil 5.17) olarak gösterilen bilgisayar Scada (Şekil 5.16) olarak gösterilen bilgisayar ile aynıdır.



Şekil 5.17 Client (istemci) ile Server (sunucu) arasındaki hiyerarşi

Sistemin genel anlamda çalışması bu şekildedir. Fakat bu verilerin bilgisayarlara gönderilmesinden önce ilk etapta bu verilerin algılandığı noktalar var. Bu noktalarda algılamayı yapan cihazlara sensör denmektedir. Çeşitli türleri olan bu sensörlerin bu projede kullanılan türleri,

- Akım (Current Transducer)
- Gerilim (Voltage Transducer)
- Sıcaklık (Thermocouple)
- Basınç (Pressure Transmitter)
- Akış (Mass Flowmeter)
- Pals Sayıcı (Encoder)

olarak sıralanabilir.

Transducerler (çevirici), ölçülen bir elektriksel parametrenin değişim eğrisini düşük elektriksel sinyallerin değişimi olarak simüle eden, ya da diğer bir deyişle, ölçmüş oldukları elektriksel sinyalleri diğer ölçüm cihazlarının (datalogger, PLC, pano göstergeleri vb...) algılayabileceği düşük elektriksel sinyallere çeviren yardımcı donanımlardır. Böylece sinyalin iletildiği ölçüm cihazı primer taraftaki sinyalin gerçek değerini algılayabilir.

Transmitterler de esas itibari ile transducer ile aynı işi yapmakla beraber ölçüm parametreleri ısı, basınç, nem gibi çevresel değişkenler veya 0-60 mV gibi farklı sinyal seviyelerini dönüştürmek veya diğer çeviricilerden gelen sinyali izole etmek için kullanılırlar.

Analog çıkış sinyalleri genellikle -20..0..20 mA veya -10..0..10 V arasında bir değerdir. Fakat çok nadir olarak farklı bir sinyal değerine de ihtiyaç duyulabilir (0-60 mV vb.). Şekil 5.18'de örnek bir akım dönüştürücü verilmiştir.



Şekil 5.18 Projede kullanılan akım sensörlerinden bir tanesi

Sistemde kullanılan sensörlerin listesi ve bu sensöre ait sinyal türleri ile hangi modüle bağlı oldukları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Projede kullanılan sensör tipleri ve özellikleri

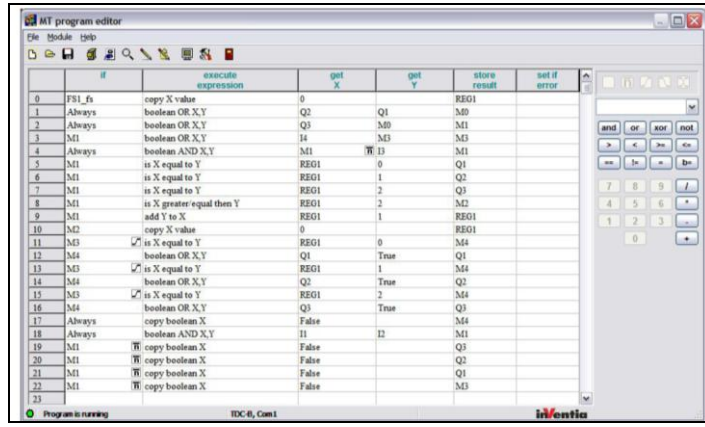
Modül	Sensör	Gerçek Değer	Ölçüm Sinyali
ADAM MODULE 1	Tüp Sıcaklığı	(-20 +100) celcius	4-20 mA
	Gaz Basıncı	0-25 bar	4-20 mA
	Gaz Akısı	0-22 slpm	4-20 mA
	Batarya Çıkış Akımı	0-75 Amper	4-20 mA
	Batarya Giriş Akımı	0-50 Amper	4-20 mA
	Güneş Paneli Akımı	0-10 Amper	4-20 mA
	Motor Akımı	0-75 Amper	4-20 mA
ADAM MODULE 2	Batarya Gerilimi	0-60 volt	0-5 volt
	Yakıtpili Gerilimi	0-60 volt	0-5 volt
	Güneş Paneli Gerilimi	0-90 volt	0-5 volt
	Motor Gerilimi	0-60 volt	0-5 volt
MT-101	Proximity Sensor (Hiz)	max 30 pulse/second	5 volt digital

Bu sensörlerin gönderdiği verilerden yararlanılarak Çizelge 5.4'te "hesap" adı altında gösterilmiş olan bir takım verilere matematiksel hesaplarla ulaşmak mümkün olabiliyor.

Çizelge 5.4 Projede bir takım verilerin elde edilme yöntemleri

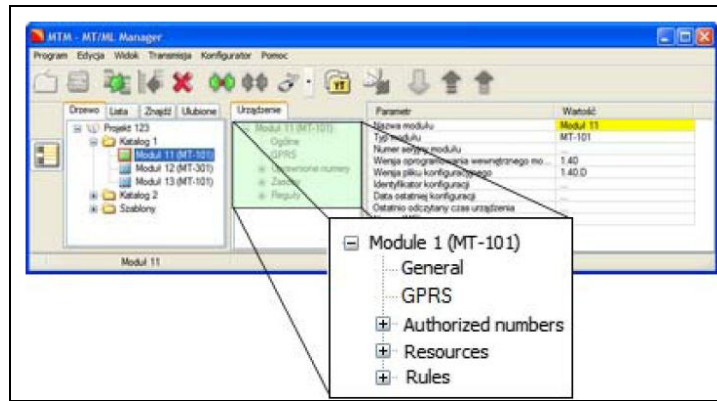
	Gerilim	Akım	Güç	Basınç	Akış	Hız	Tork	Sıcaklık
Yakıt Pili	sensör	sensör	hesap					sensör
Tüp				sensör	sensör			sensör
Batarya	sensör	sensör	hesap					
Motor	sensör	sensör	hesap			sensör	hesap	
Güneş Pili	sensör	sensör	hesap					

Sensörler sayesinde elde edilen bu veriler 8 kanallı modüllere gönderilmekte ve sonra bu modüller üzerinden haberleşme modülüne gönderilmektedir. Bu gönderim milisaniyeler içerisinde ve defalarca gerçekleşmektedir. Haberleşme modülüne gelen verilerin işlenip ana bilgisayara gönderilebilmesi için içerisindeki bir takım ayarların önceden yapılmış olması gerekmektedir. Gelen verilerin işlenmesi Şekil 5.19'da ara yüzü (interface) gösterilen program aracılığıyla yapılmaktadır.



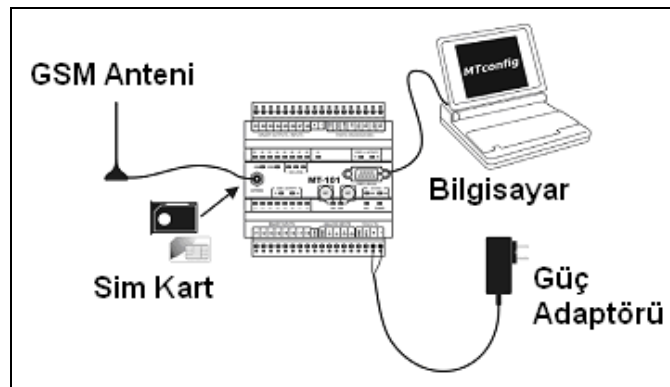
Şekil 5.19 Haberleşme modülüne gelen verileri işleyen programın arayüzü

Gelen veriler işlendikten sonra haberleşme modülünden ana bilgisayara gönderilmektedir. Bu gönderimin yapılabilmesi içinde yine bir takım ayarların bir program (Şekil 5.20) aracılığıyla yapılması ve modüle yüklenmesi gerekmektedir.



Şekil 5.20 Haberleşme modülünün ayarlarının yapıldığı programın arayüzü

Bu ayarlar yapıldıktan sonra cihaz GPRS kanalı ile verileri ana bilgisayara aktarır. Bu işlem herhangi bir cep telefonu operatörünün SIM kartı ve data hattı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Sistemin genel hali Şekil 5.21'de görülmektedir.



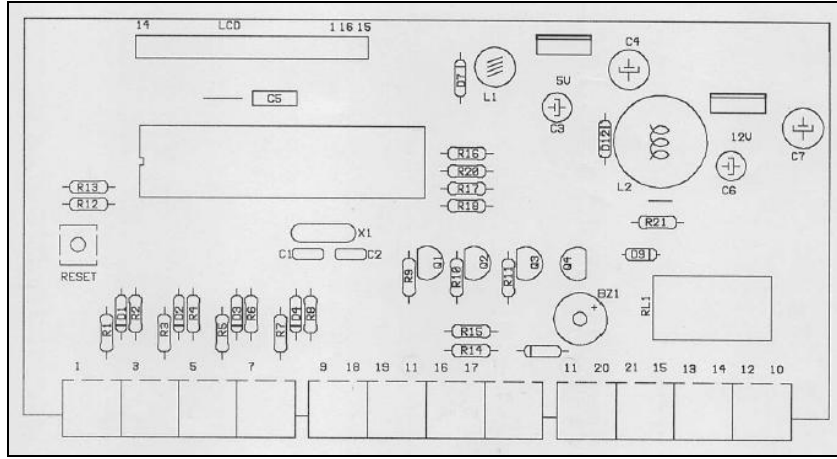
Şekil 5.21 Haberleşme modülünün genel gereksinimleri

Elektrikli araç projesinde kullanılan haberleşme modülü ile 8 kanallı analog modülün teknik özellikleri Ek 4’te ayrıntılı olarak verilmiştir.

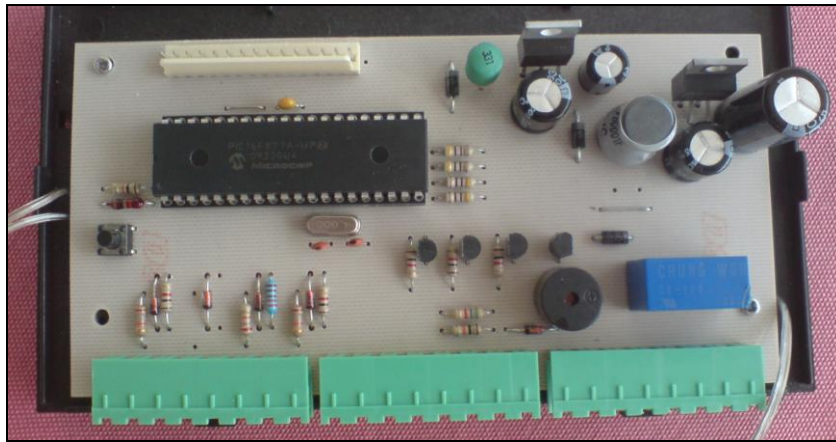
5.3.3.2 Kontrol Kartı

Kontrol kartı aracın bir takım anlık verilerini (batarya şarj seviyesi gibi) izlemek, yine bir takım verilerin analog modüllere girmeden önce düzenlemek, acil durumlarda araçta bulunan belli başlı sistemleri emniyete almak ve sürücüye bunu haber vermek için geliştirilmiştir.

Bu işlemlerin her birini kontrol eden bir adet mikroişlemci kullanılmıştır. Bu mikroişlemci, ihtiyaca uygun olarak tasarlanmış bir elektronik kart üzerinde konumlanmıştır. Bu mikroişlemcinin düzgün ve istenilen şekilde çalışmasını sağlayacak C dilinde bir program yazılmıştır. Kartın şeması Ek 5’de, komponentlerin kart üzerindeki dizilimi Şekil 5.22’de, kartın kendisi ise Şekil 5.23’de gösterilmiştir.



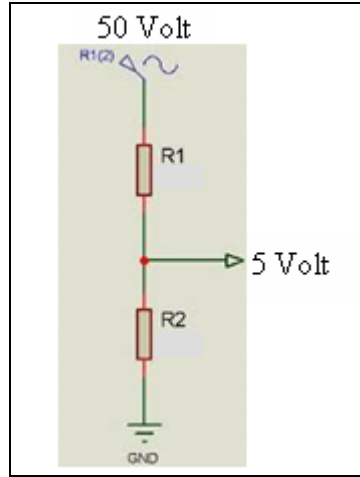
Şekil 5.22 Komponentlerin kontrol kartı üzerindeki dizilimleri



Şekil 5.23 Kontrol kartının gerçek hali

Araçta bulunan sensörlerden gelen bazı verilerin sürekli gözlem altında tutulması

gerekmektedir. Bunların başlıcaları anlık batarya şarj seviyesi ve ortamdaki hidrojen konsantrasyonu olarak ifade edilebilir. Bunlarla birlikte analog modüllere gönderilen çeşitli gerilim sinyallerinden bazılarının belli bir seviyeye kadar düşürülüp gönderilmesi gerekmektedir. Bunun sebebi ise gelen gerilim sinyallerinin seviyesinin analog modül ve mikroişlemcinin okuyabileceği gerilim aralığından fazla olmasındandır. Aksi halde okumayı yapacak analog modül ve mikroişlemci bacağı yanarak arızalanabilir. Bu işlem bir gerilim bölücü devresiyle rahatlıkla yapılabilmektedir. Örneğin 50 voltluk bir batarya geriliminin 5 volt değerine düşürülerek sinyalin mikroişlemci ve analog modüle gönderilmesi mümkündür. Bu işlem için gelen gerilimi istenilen seviyede bölmek için belli oranda iki direnç seçilir. Şekil 5.24’de örnek bir devre gösterilmiştir. Direnç değerleri $R2/(R1+R2)=5/50$ oranını verecek şekilde seçilmelidir. Bu sayede 50 voltluk gerilim bölünerek R2 direnci üzerinden istenen seviyedeki 5 voltluk gerilim sinyali mikroişlemci ve analog modüle gönderilir.



Şekil 5.24 Örnek gerilim bölücü devre

Gerilim bölücü devreler bu iş için basit bir uygulama olsa da her zaman kesin bir ölçüm veremeyebiliyor. Bu durumda opamp elemanın kullanıldığı biraz daha karışık bir elektronik devre ile istenen kesin ölçüm alınabiliyor.

Elektrikli araçta kontrol kartına gelen gerilim sinyalleri şunlardır:

- Batarya gerilimi
- Yakıt pili Gerilimi
- Güneş Paneli Gerilimi
- Motor Gerilimi
- Hidrojen Sensörü

Araçta bulunan bu bileşenlerden gelen sinyaller belli seviyeye dönüştürüldükten sonra mikrodenetleyiciye ve analog modüle gönderilmektedir. Analog modüle giden sinyal veri olarak kaydedilirken, kontrol kartı üzerindeki mikroişlemciye giden aynı sinyal aracın ön

konsolunda bulunan bir LCD'ye aktarılarak sürücüye o sistem hakkında bilgi vermektedir. Bu sayede sürücü; batarya, yakıt pili, güneş paneli ve motorun anlık gerilimini görüyor ve ayrıca havadaki hidrojen oranından haberdar olabiliyor.

Kontrol kartına gelen batarya gerilimi belli bir seviyenin altına düştüğünde kart, hem ön konsola yerleştirilmiş kırmızı ışıkla hem de kontrol kartı üzerindeki buzzer ile uyarı veriyor. Aynı durum hidrojen oranı belli bir seviyeyi aştığında da (yani kaçak durumunda) gerçekleşiyor. Buna ek olarak hidrojen sensörü kaçığı algılandığı an kontrol kartı, yükler ile kaynak arasındaki elektrik enerjisini kesip, yakıt pilini de kapatarak aracı ve insanları emniyete alıyor.

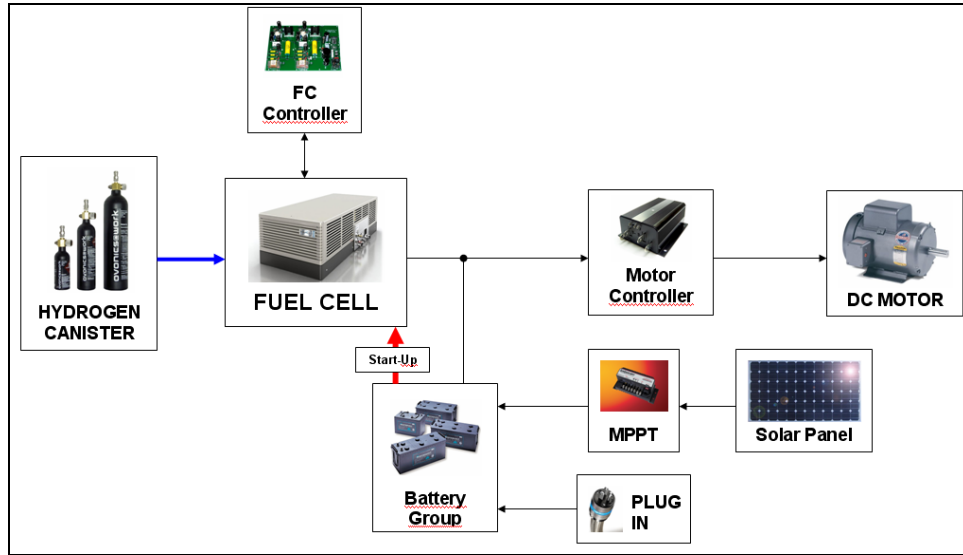
Bunun haricinde araç üzerinde kolaylıkla görülebilecek ve ulaşılabilecek biçimde konumlandırılmış acil stop mantarı bulunmaktadır. Acil bir durum söz konusu olduğunda mantar butona basılarak aynı şekilde hem yükler ve kaynak arasındaki elektrik kesiliyor hem de yakıt pili durdurularak elektrikli araç ve insanlar emniyete alınmış olunuyor. Bu uygulanan sistemler güvenlik açısından önemli bir gerekliliktir.

5.4 Elektrikli Aracın Çalışma Sistemi

5.4.1 Elektrik Sisteminde Enerjinin Depolanması ve Akışı

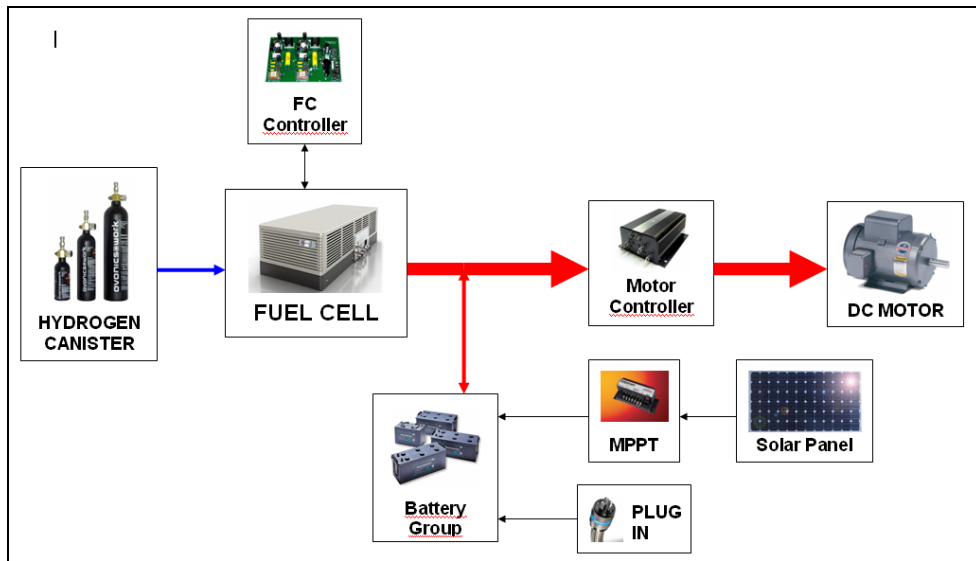
Enerjinin en verimli ve etkin şekilde kullanılması günümüzde çok daha fazla önem arz ediyor. Bu doğrultuda projede, elektrikli araç üzerindeki bileşenlerin bu amaca uygun en iyi şekilde çalışması hedeflenmiştir. Elektrikli araç projesinde elektrik üreten iki kaynak bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ve araçta ana güç ünitesi olarak görev yapan yakıt pilidir. İkincisi ise çoğunlukla aracın bataryalarını şarj etmek için kullanılan güneş panelleridir. Bu sistemlerin bir arada çalışma şekli bir takım şartlara göre değişmektedir. Şimdi bunlara daha detaylı bir biçimde değinilecektir.

Yakıt pili ünitesi elektrikli aracın ana güç ünitesi olarak görev yapmaktadır. Maksimum 2.6 kW'lık güce sahip olan fırçalı DC motoru besleyen bu üniteye yardımcı güç sistemi olarak bataryalar kullanılmaktadır. Yakıt pilinin ilk çalıştırılması esnasında (start-up) elektriksel güce (Şekil 5.25) ihtiyaca duyulmaktadır. Bu ihtiyaç duyulan güç bataryalar tarafından karşılanmaktadır. Yakıt pili sistemi çalışmaya başladıktan bir süre sonra bataryalardan enerji almayı keserek kendi üzerinden çevrimle üzerindeki bileşenleri (soğutma fanı, hava pompası vs.) ve araçtaki yükleri (motor vs.) beslemeye başlar. Bu işlem, içten yanmalı motorları çalıştırmak için ilk anda gerekli olan gücün bataryalardan sağlanmasıyla benzerdir.



Şekil 5.25 Yakıt pilinin ilk çalışma anında araçtaki güç akış şeması

Yakıt pili çalışmaya başladıktan kısa bir süre sonra araçtaki yükleri kendi üzerinden beslemeye başlar. Ayrıca batarya grubu tam dolu değilse yakıt pili ünitesi bunları da şarj eder. Şekil 5.26'da sistemin akış şeması gösterilmiştir.

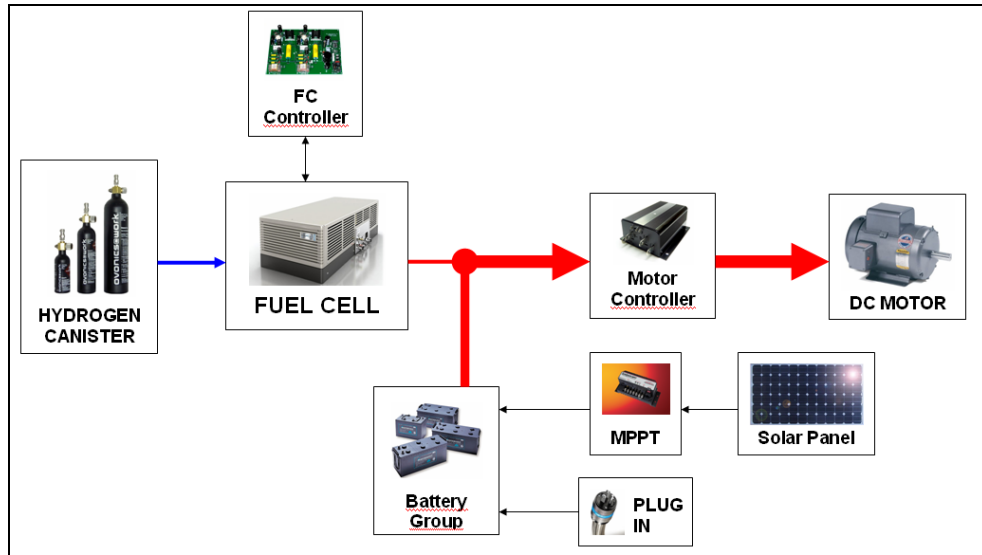


Şekil 5.26 Yakıt pili sisteminin araçta ana güç ünitesi olarak çalışması anında güç akış şeması

Fakat yakıt pillerinin anlık ve maksimum kapasitelerine yakın güç ihtiyaçlarını hemen karşılayamaması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu projede yakıt pili sistemi araçta her ne kadar ana güç ünitesi olarak görev yapsa da bazı durumlarda bataryalarda yardımcı güç ünitesi olarak yükleri beslemek için devreye girmektedir. Bu durumlara örnek birkaç senaryodan bahsedilebilir.

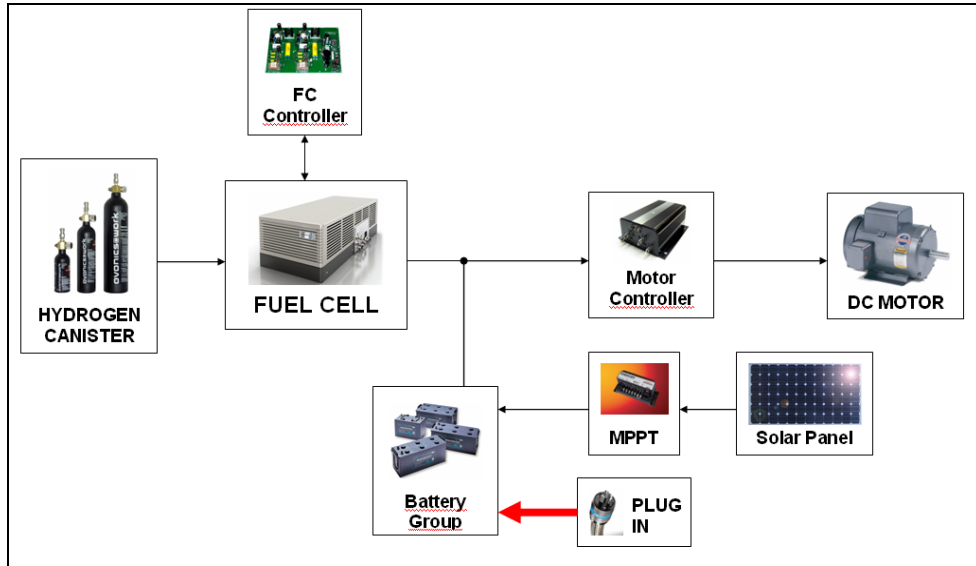
İlk senaryoda elektrik motoru genellikle aracın kalkış anında yakıt pilinin karşılayamayacağı anlık bir güç çekebilir. İkinci senaryoda ise elektrik motoru, araç yokuş çıkarken yakıt pilinin sağlayabileceği 2 kW'tan daha fazla bir güce ihtiyaç duyulabilir. Başka bir senaryoda ise eğer yakıt piline hidrojen sağlayan tankların basıncı düşmüşse yakıt pili ihtiyaç duyulan gücü üretmekte zorlanabilir. İşte bu gibi durumlarda yakıt pili sistemine paralel bağlı olan EV Gel tipi 1.5kW'lık batarya grubu devreye girerek yükleri besler ve aracın hareketini sorunsuz devam ettirmesini sağlar (Şekil 5.27). Bu projede kullanılan batarya gücü 1.5 kW olsa da kullanılan batarya tipinin elektrikli araçlar için özel üretilmiş jel batarya olmasından dolayı anlıkta olsa bataryalardan nominal akımlarının iki katını çekmeye imkan sağlıyor. Gel batarya tiplerinin dip deşarja dayanıklı olması bu projede kullanılmasının başka bir önemli sebebidir.

Bu sayede yakıt pili için güç sevki zor durumlarda yakıt piline çok fazla yüklenilmeyerek yakıt pili yığılmasında (stack) fazla ısınmasından dolayı oluşabilecek onarımı zor arızalarında önüne geçilmiş olunuyor.



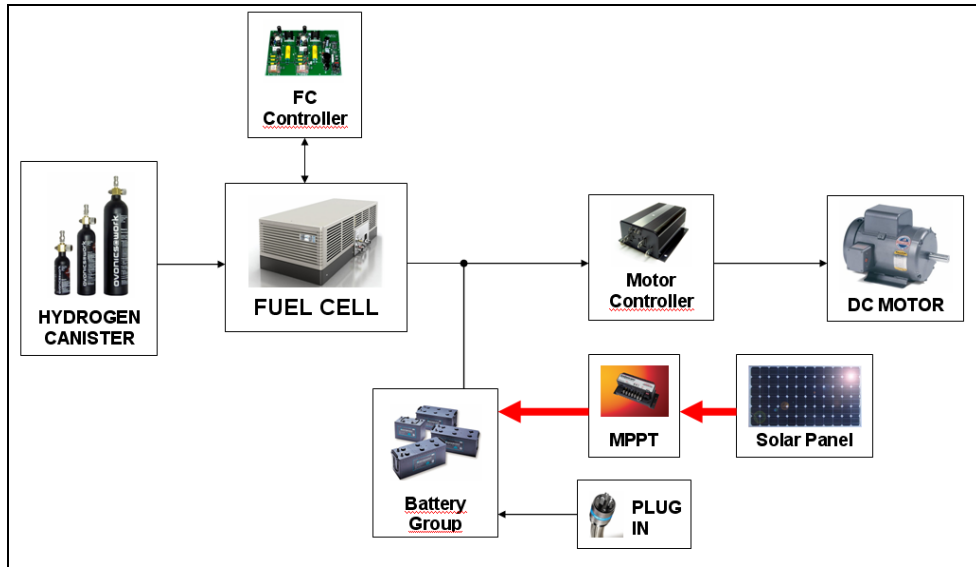
Şekil 5.27 Kritik durumlarda batarya grubunun devreye girmesiyle oluşan güç akış şeması

Batarya grubu araç kullanılmadığı zamanlarda her zaman redresöre bağlı tam şarjlı olarak hazır bekletilir (Şekil 5.28). Bu sayede yakıt pili çalıştırıldığında bataryaları şarj etmek için hidrojen harcamasının da önüne geçilmiş olunur. Batarya grubunu redresör yardımı ile şebeke üzerinden şarj edebilmek için öncelikli olarak araç içersinde bulunan ve güneş pili şarj regülatörü ile redresör girişini (plug-in) birbirinden ayıran kutup değiştirici pako şalteri redresör konumuna almak gerekmektedir. Bu işlemden sonra giriş konektörüne (plug-in) redresör bağlanarak batarya şarj işlemine başlanabilir. Redresör ile şarj işlemi bataryanın şarj seviyesine göre değişkenlik gösterirken yaklaşık olarak maksimum 3 saat sürmektedir.



Şekil 5.28 Giriş konektörü (plug-in) üzerinden redresör ile şebekeden batarya şarjı yapılırken güç akış şeması

Batarya grubu redresör ile şebeke üzerinden şarj edilebilirken, aracın üzerinde bulunan güneş panelleri sayesinde ortalama 4 saat gibi bir sürede bataryaları tam şarj etmek mümkündür. Bu süre, panellere düşen ışığın dalga boyu, parlaklığı, geliş açısı ve ortam sıcaklığı gibi etkenlere göre değişmektedir. Güneş panellerinin sürekli ve maksimum güç (360 watt) üretmesi halinde ve bataryaların o anki şarj seviyesi de göz önüne alındığında bu süre 4 saatin altına inebilmektedir. Sistemin akış şeması Şekil 5.29'da gösterilmiştir.



Şekil 5.29 Güneş panelleri üzerinden bataryaların şarj edilmesi durumunda güç alışı şeması

5.4.2 Hidrojen Sisteminde Depolama ve Gaz Akışı

Projede elektriksel olarak enerjinin depolanması bataryalarda gerçekleşirken yakıt pilinin elektrik üretmek için temel ihtiyacı olan hidrojenin depolanması metal hidrür tüplerde gerçekleşmektedir.

Hidrojenin atomik ve fiziko-kimyasal özellikleri onu diğer bütün elementlerden oldukça farklı kılmaktadır. Bunlar şu şekildedir:

Atomik sembolü: H

Atom numarası: 1

Atom ağırlığı: 1.00794 akb

Elektron konfigürasyonu (Proton/Elektron sayısı): 1s¹

Ergime noktası: -259.14 °C (14.009 °K)

Kaynama noktası: -252.87 °C (20.280 °K)

Sınıflandırma: Non-metal

Kristal yapısı: Hekzagonal

Yoğunluk (293 °K): 0.08988 g/cm³ veya g/ml

Buharlaşma ısısı: 0.44936 kJ/mol

Füzyon ısısı: 0.05868 kJ/mol

Özgül ısı: 14.304 J/gK

İyonizasyon potansiyeli: 13.598 V

Atom yarıçapı: 0.79 Å

Bağ yarıçapı: 0.32 Å

İzotopları: H-1: Kararlı; H-2 (Döteryum): Kararlı; H-3 (Trisyum): 12.3 yıl (Yurum, 2002).

Bir yakıt veya enerji taşıyıcısı olarak hidrojen kullanımının en büyük avantajı, hidrojenin ağırlıkça yüksek ısıl değere sahip olmasıdır. Ancak yoğunluğu çok düşük bir gaz olması (83.8g/Nm³) hacimsel enerji yoğunluğunu çok düşürmekte ve kullanılacağı yerde

depolanması hidrojenin enerji taşıyıcı olarak kullanımında en kritik sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrojen depolama yöntemleri aşağıda belirtildiği gibi yedi grupta toplanabilir:

- Yüksek basınç altında gaz olarak depolanması,
- Isıl olarak yalıtılmış kaplarda sıvı olarak depolanması,
- Metal hidrürler halinde depolanması,
- Kriyojenik koşullarda aktif karbon veya karbon nanotüpler gibi malzemelere adsorplanarak depolanması,
- Hidrojenin organik sıvı taşıyıcılarda depolanması
- Hidrojenin cam mikroküreciklerde depolanması
- Hidrojenin zeolitlerde depolanması

Projede çeşitli depolama yöntemlerinden metal hidrür kullanılarak hidrojen depolanması yöntemi seçilmiş ve uygulanmıştır. Bu işlem için özel üretim 6 adet metal hidrür tank kullanılmıştır. Şimdi bu yöntem daha detaylı olarak ele alınacaktır.

Hidrojen kimyasal olarak metallerde, alaşımlarda ve geçiş metallerinde hidrür olarak depolanabilmektedir. Reaksiyon basit olarak;



şeklindedir. Bu reaksiyon, basınca ve sıcaklığa bağlı olarak yön değiştirmekte ve metalin cinsine göre reaksiyon endotermik veya ekzotermik olabilmektedir. Metal hidrürler hidrojen depolamanın bir aracı olarak değerlendirilebileceği gibi, kendine özgü farklı uygulama alanları da mevcuttur. Bunlardan en önemlisi reaksiyonun ısısına ve reaksiyonun tersinir olma özelliğine dayalı ısıtma-soğutma uygulamalarıdır. Bu tür uygulamalarda "reaktör"de ısı ve sıcaklık kontrolü önem kazanmaktadır.

Pratik uygulamalar esas alındığında hidrojen depolamada amaçlanan özellikler belirlidir. Bu özellikler;

- Olabildiğince yüksek geri dönüşümlü depolama kapasitesi,
- Olabildiğince düşük geri-bırakım sıcaklığı,
- Zehirlenmeye karşı direnç ve bağlı olarak olabildiğince yüksek tekrarlanabilir dolun sayısıdır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve A.B.D. Enerji Bakanlığı otomotiv uygulamaları için hedef değerleri kapasite: >% 5-6, geri bırakım sıcaklığı: <150°C ve kullanım ömrü: >1000 dolun olarak tespit etmişlerdir.

Hidrojen depolama açısından değişik türdeki hidrürlerin değerlendirilmesi Douglas ve Derek tarafından verilmektedir. Depolama ve geri bırakım rahatlığı açısından oluşturulan hidrürün çok kararlı olmaması temel bir özelliktir. Bu tarzda hidrojen depolayabilen farklı sistemler ana olarak AB₅, AB, AB₂, AB₃+A₂B₇ geçiş metalleri ve Mg esaslı alaşımlardır.

AB₅ ve AB geçiş metalleri (örneğin, sırası ile LaNi₅ ve Fe-Ti) birkaç barlık basınçta ve oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda hidrojen depolayabilmekte, özellikle AB₅ zehirlenmeye karşı iyi bir direnç göstermekle birlikte depolayabildikleri hidrojen miktarı %1-2'yi geçememektedir.

Söz konusu olabilecek metal-hidrür sistemleri içinde özellikle magnezyum yüksek hidrojen depolama kapasitesi (ağ. %7.6) ve düşük yoğunluğu ile (1.74 gr/cm³, hidrür halinde 1.45 gr/cm³) ön plana çıkmaktadır. Magnezyumun kullanımındaki en önemli engel ise reaksiyonun 400-450 °C de gerçekleşmesi ve reaksiyonun çok yavaş olmasıdır. Diğer bir engel ise aktivasyonun zorluğudur. Bu nedenle ilk yüklemelerde 30 bar üzeri basınç değerine ihtiyaç vardır (TÜBİTAK, 2004).

Hidrojen depolama, depolamanın gerçekleştiği malzemenin yüzey durumuna aşırı bağlılık göstermekte ve bu nedenle çoğu kez bir aktivasyon işlemi gerekli olmaktadır. Bu işlem sırası ile yüksek basınç ve vakum altında bir kaç hidrojen yükleme ve boşaltma işlemi şeklindedir. Bu olumsuzluklara rağmen magnezyum yüksek kapasitesi ile son 10 yıldır yoğun geliştirme çalışmalarının odağı olmuştur. Kinetiği iyileştirme amacıyla başvurulan en yaygın yöntem mekanik öğütmedir. Öğütme saf olarak yapılabileceği gibi (i) metal (V, Ti, Ni, Cu, Fe gibi), (ii) metal oksit (CuO, Al₂O₃, V₂O₅ gibi), (iii) geçiş metalleri (LaNi₅, FeTi gibi) ilaveler ile de yapılabilmekte ve bu şekilde katkılı öğütme daha olumlu sonuç vermektedir.

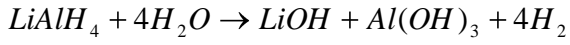
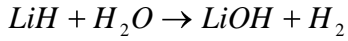
Güvendirilen tarafından yapılan çalışmada bir katkı maddeleri ile yapılan öğütme sonucunda %5'lik grafit ilavesi ile öğütülen magnezyumda %6 düzeyinde bir geri dönüşümlü depolama ve pratik uygulamalar için yeterli hızla bir kinetik elde edilmiştir. Ancak sıcaklık 350 - 400°C ile belirlenen hedef değerlerin çok üzerindedir.

Benzer çalışmalar magnezyumda bir miktar kapasite düşüklüğü ile 260°C 'lik sıcaklıklarda hızlı bir kinetiğin mümkün olabileceğini göstermektedir. Halen magnezyum esaslı sistemlerde %6-7 düzeyinde kapasite ile hedeflenen sıcaklıklara erişme çalışmaları yoğunlukla sürdürülmektedir.

1980'li yıllardan itibaren sürdürülmekte olan ince film esaslı çalışmalar depolayıcı malzemelerin ince film olarak üretilmesi durumunda sıcaklık ve basınç değerlerinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Hidrojen miktarının nispeten az olduğu durumlarda LiH, NaBH₄, LiAlH₄ gibi geri dönüşümsüz ve tek kullanımlık metal hidrürler kullanılmaktadır (TÜBİTAK, 2004).

Hidrojen bu hidrürlerin aşağıda verilen su ile ekzotermik reaksiyonları sonucunda elde edilir.



Geri dönüşümsüz metal hidrürler geri dönüşümlü metal hidrürlerden daha hafif metaller içerirler. Tek kullanımlık bu hidrürlerin diğer bir avantajları da depoladıkları hidrojenin iki katı kadar hidrojen verirler, verdikleri hidrojenin yarısını sudan alırlar.

Amerikan Teknoloji politikaları ofisinin 2003 yılında yayınladığı bir raporda (Evans, 2003) yakıt pilli araçların gelişmesindeki en büyük engelin hidrojen depolamada karşılaşılan problemler olduğu ifade edilmektedir. Şu anki hidrojen depolama sistemleri yakıt pilli araçların kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayacak düzeyde değildir. Hidrojenin düşük enerji yoğunluğu araçta yeterli menzilin sağlanması için gerekli hidrojeni depolayacak birimin ya çok büyük ya da ağır olmasına neden olur.

DOE (U.S. Department of Energy)'nin 2002 yılı raporuna göre hidrojenin basınçlı tanklarda depolanması 2015 yılına kadar en gözde yöntem olmaya devam edecektir. 2020'li yıllarda bu yöntem yerini hidrürlerle depolama yöntemine bırakacaktır. Çizelge 5.5'de yakıt pilli araçlardaki hidrojen depolama yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.5 Yakıt pilli araçlardaki hidrojen depolama yöntemleri

Yakıt	Benzin	Basınçlandırılmış Hidrojen	Sıvı Hidrojen	Metal Hidrür
Enerji(MJ)	1.408	664	664	664
Yakıt Ağırlığı(kg)	29.5	4.7	4.7	4.7
Tank Ağırlığı(kg)	13.4	63.3-86	18.6	120
Toplam Sistem Ağırlığı(kg)	43.2	67.9-90.5	23.3	125
Hacim (litre)	40.1	409-227	178	120
Araç Menzili (km)	600	600	600	570
Teknolojik durum	Ticari	Ticari Prototip	Prototip (başlangıç aşamasında)	Prototip (başlangıç aşamasında)

Elektrikli araç projesinde hidrojen depolanmasında kullanılan metal hidrür tüplerin detaylı teknik bilgileri Ek 6'da verilmiştir.

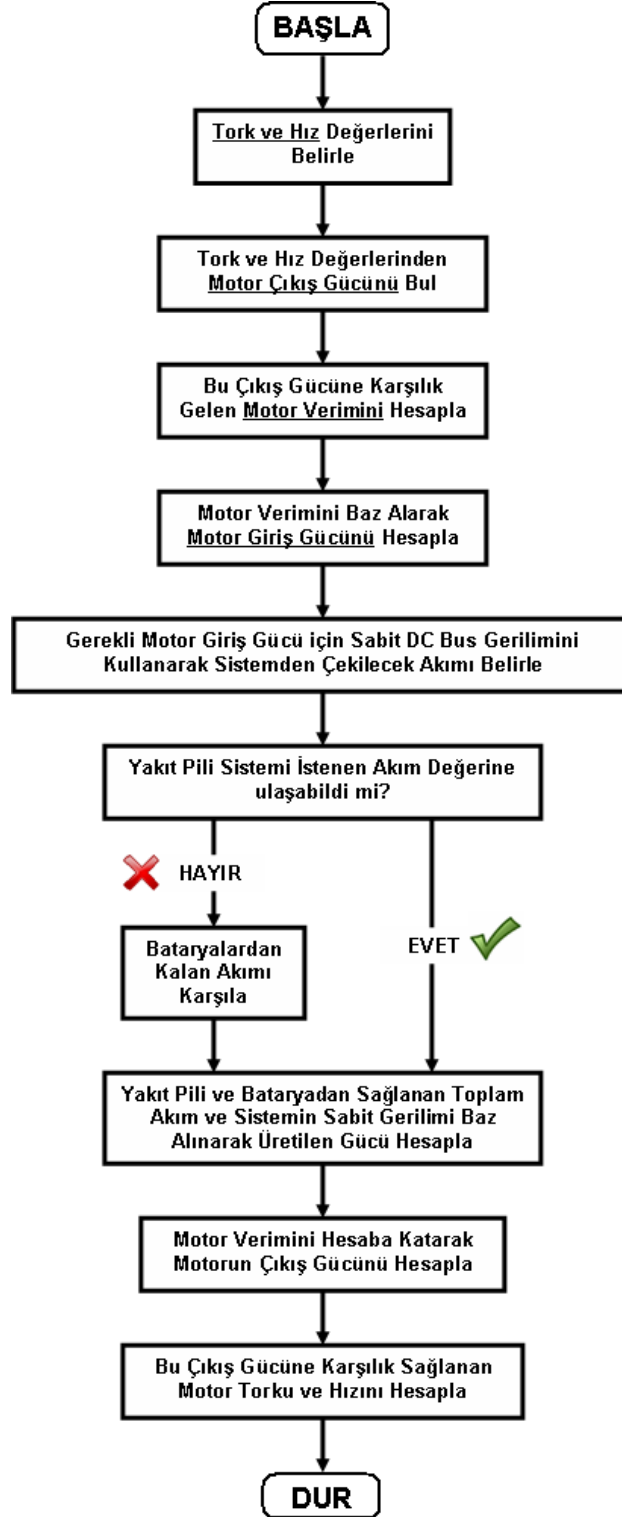
Projede kullanılan 6 adet metal hidrür tankın her biri 17 bar basınç altında 900sl hidrojen depolama kapasitesine sahiptir. Buna göre sistemin toplam hidrojen depolama kapasitesi 5400sl değerine ulaşabilmektedir. Projede kullanılan yakıt pili maksimum 2 kW'lık bir güç ürettiği takdirde dakikada yaklaşık 22sl hidrojen tüketmektedir. Yakıt pili sistemi, hattaki hidrojen basıncı 2 bar gibi bir değere düştüğünde sistemi kapatmaktadır. Bu durumda 17 bar basınçtan 2 bar basınca inene kadar her bir tüpten çıkacak hidrojen hacmi yaklaşık 800sl gibi bir değerdir. Sistemin toplam verebileceği hidrojen hacmi ise 4800sl ile 4500sl aralığındadır. Bu durum ortam sıcaklığına bağlı olarak ta değişkenlik gösterebilir. Yakıt pili yaklaşık bu hacimdeki hidrojeni kullanarak 2kW'lık bir güç ürettiği takdirde toplam 3,5 saate yakın çalışması hedeflenmiştir.

5.5 Sistemin Çalışma Algoritması

Elektrikli araç sisteminde bileşenlerin kendi aralarında bir enerji akışı vardır. Bu enerji akışının kesintisiz, sürekli ve ihtiyaca uygun şekilde sağlanması gerekir. Bu enerji akışı istendiği an ve ölçüde sağlanamaz ise sistemin çalışmasından istenen verim alınmaz ve bir takım aksamlar meydana gelebilir. Özellikle elektrikli aracın hareket sistemini oluşturan motor sistemi için bu durum çok önemlidir. Farklı yol şartlarında aracı kullanan sürücünün kullanımına bağlı olarak motorun gereken cevabı vermesi aracın enerji ünitesinden sağlanacak güce bağlıdır. Bu istenen güç elektrikli araç projesinde kullanılan yakıt pili ünitesi ve bataryalardan sağlanmaktadır.

Enerji akışı sırasında istenen gücün büyük bir kısmı aracın ana güç ünitesini oluşturan yakıt pili ünitesinden sağlanır. Fakat yakıt pili ünitesi her ne kadar ana güç kaynağı olsa da araçta bazı özel durumlarda yakıt pili ünitesini desteklemek üzere sisteme paralel olarak bağlanmış batarya ünitesi bulunmaktadır. Bu batarya ünitesi yardımcı güç kaynağı olarak görev yapmakta ve yakıt pilinin yeterli olmadığı durumlarda devreye girerek araçta ihtiyaç duyulan gücün sürekliliğini sağlamaktadır. Bu özel durumlardan bir tanesi motorun ilk kalkış anı olabilir. Bu durumda yakıt pili anlık gücü karşılamakta zorlanabilir ve sisteme paralel bağlı olan bataryalar bu gücü kendi üzerinden karşılar. Bir süre sonra yakıt pili istenen güce ulaşır ve bataryaların üzerine düşen yük azalır. Ayrıca motor sistemi yakıt pilinin sağlayabileceği güçten fazla bir güçte isteyebilir. Böyle bir durumda yine bataryalar eksik kalan gücü sağlayarak sistemde enerji akışının sürekliliğini sağlar.

Bu gibi durumlarda enerji akışının sürekliliği sağlanırken aynı zamanda yakıt pilinin çalışma sınırlarını zorlayarak aşırı yüklenmeden yakıt pili yığnında oluşabilecek onarılamaz arızalarında önüne geçilmiş olunur. Elektrikli araçta kullanılan sistemlerin bütünü devre şeması olarak Ek 7’de verilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.30’da ise elektrikli aracın çalışma sistemini gösteren bir algoritma verilmiştir.



Şekil 5.30 Elektrikli Aracın Çalışma Algoritması

5.6 Araç Modellemesi ve Simülasyonu

Yakıt pilli hibrit araç modellenmesinde durum uzay yönteminden (state-space method) faydalanılmıştır (Thomas vd., 2004). Öncelikli olarak yakıt piline ait durum uzay modeli çıkartılmıştır. Bu durum uzay denklemleri çıkartılırken bir takım parametreler kullanılmıştır. Aşağıda modele ait parametreler, bu parametrelerin açıklamaları ve birimleri yer almaktadır.

A_S	: Bir hücrenin alanı (m^2)
a, b	: Tafel eşitliklerindeki sabitler (V/K)
a_0	: Tafel eşitliğindeki sabit (V)
C_{fc}	: PEM yakıt pili yığının özgül ısı kapasitesi [$J/(mol.K)$]
e	: Katılan elektron sayısı
E_0^{cell}	: Standart işletim koşullarında referans potansiyel (V)
F	: Faraday Sabiti (C/mol)
ΔG^0	: Standart işletim koşullarında Gibb'in serbest enerjisindeki değişim
h_S	: İletimli ısı transfer katsayısı [$W/(m^2.K)$]
I	: Yakıt pili akımı (A)
K_I	: R^0 hesabının sabiti
K_T	: R^0 hesabının sabiti
M_{fc}	: PEM yakıt pili yığının toplam kütlesi
$(m_{O_2})_{net}$: Katotta oksijenin net mol akış oranı (mol/s)
$(m_{H_2})_{net}$: Anotta hidrojenin net mol akış oranı (mol/s)
$(m_{H_2O})_{net}$: Hücre boyunca su buharının net akış oranı (mol/s)
$\overleftarrow{n}_{H_2O}^a$: Anotta suyun mol akış oranı (mol/s)
$\overleftarrow{n}_{H_2O}^c$: Katotta suyun mol akış oranı (mol/s)
n_S	: Yakıt pili hücre sayısı

P_{H_2}	: Hidrojenin kısmi basıncı (atm)
P_{O_2}	: Oksijenin kısmi basıncı (atm)
P_{H_2O}	: Suyun kısmi basıncı (atm)
$P_{H_2O}^a$: Anottaki suyun kısmi basıncı (atm)
$P_{H_2O}^c$: Katottaki suyun kısmi basıncı (atm)
Q_C	: Elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısı (J)
Q_E	: Elektrik sonucu oluşan ısı (J)
Q_L	: Hava konveksiyonu sonucu kaybolan ısı (J)
R	: Evrensel gaz sabiti [J/(mol.K)]
R^{act}	: Aktivasyon direnci (ohm)
R^{conc}	: Konsantrasyon direnci (ohm)
T	: Hücre yığını (stack) sıcaklığı (K)
u_{P_A}	: Hattaki hidrojenin basıncı (atm)
u_{P_C}	: Hattaki oksijenin basıncı (atm)
u_{T_R}	: Oda sıcaklığı (K)
V_a	: Anot hacmi (m ³)
V_c	: Katot hacmi (m ³)
V_C	: Kapasite boyunca gerilim (V)
V_{fc}	: PEM yakıt pilinin çıkış gerilimi (V)
V^{act}	: Aktivasyon gerilim kaybı (V)
V^{con}	: Konsantrasyon gerilim kaybı (V)
V^O	: Omik gerilim kaybı (V)

λ_A : Anotta akış gecikmesi (s)

λ_C : Katotta akış gecikmesi (s)

Aşağıdaki (5.1) eşitliğinde ise modele ait durum uzay denklemlerinin genel formatı görülmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) + G(\theta)w(t) \\ y(t) &= C(\theta)x(t) + v(t) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Eşitlikte yer alan $x(t)$ sistem durumunu, $y(t)$ sistem çıkışını, $u(t)$ kontrol girişini, $w(t)$ bozulma girişini ve $v(t)$ ise ölçüm parazitini ifade etmektedir. $x(t)$, $u(t)$ ve $y(t)$ vektörleriyle ilişkili olan A,B,C ve G matrisleri ile durum bağılı parametresi θ bir sonraki sayfada gösterilmiştir.

Bu matrislerin açık halleri denklem olarak Eşitlik 5.2 ile 5.12 arasında aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Katottaki oksijenin net mol akış oranındaki değişim Eşitlik 5.2 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_1 = \left(\frac{-1}{\lambda_C} \right) \cdot x_1 + \left(\frac{1}{4\lambda_C F} \right) \cdot I \quad (5.2)$$

Katottaki hidrojenin net mol akış oranındaki değişim Eşitlik 5.3 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_2 = \left(\frac{-1}{\lambda_A} \right) \cdot x_2 + \left(\frac{1}{2\lambda_A F} \right) \cdot I \quad (5.3)$$

Hücre boyunca su buharının net akış oranındaki değişim Eşitlik 5.4 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_3 = \left(\frac{-1}{\lambda_C} \right) \cdot x_3 + \left(\frac{1}{2\lambda_C F} \right) \cdot I \quad (5.4)$$

Yakıt pili sıcaklığındaki değişim Eşitlik 5.5 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_4 = \left[\frac{-h_S \cdot n_S \cdot A_S}{M_{fc} \cdot C_{fc}} \right] \cdot x_4 - \theta_8(x_4, x_5, x_6, x_7) \cdot I + \left[\frac{h_S \cdot n_S \cdot A_S}{M_{fc} \cdot C_{fc}} \right] \cdot u_{Tr} \quad (5.5)$$

Hidrojenin kısmi basıncındaki değişim Eşitlik 5.6 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_5 = 2 \cdot \theta_1(x_4) \cdot u_{pA} - 2 \cdot \theta_1(x_4) \cdot x_5 - \theta_2(x_4) \cdot I \quad (5.6)$$

Oksijenin kısmi basıncındaki değişim Eşitlik 5.7 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_6 = 2.\theta_3(x_4).u_{Pc} - 2.\theta_3(x_4).x_6 - \theta_4(x_4).I \quad (5.7)$$

Suyun kısmi basıncındaki değişim Eşitlik 5.8 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_7 = 2.\theta_5(x_7).x_4 - 2.\theta_4(x_4).I \quad (5.8)$$

Yakıt pilinde elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısı Eşitlik 5.9 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_8 = \theta_6(x_4, x_5, x_6, x_7).I \quad (5.9)$$

Yakıt pilindeki elektrik sonucu oluşan ısı Eşitlik 5.10 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_9 = \theta_7(x_4, x_5, x_6, x_7).I \quad (5.10)$$

Yakıt pilinde hava konveksiyonu sonucu kaybolan ısı Eşitlik 5.11 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_{10} = \sum_S n_S A_S \bar{x}_4 - \sum_S n_S A_S \bar{u}_{T_R} \quad (5.11)$$

Kapasite boyunca gerilimdeki değişim Eşitlik 5.12 ile ifade edilmiştir.

$$\dot{x}_{11} = \frac{-1}{C.(R^{conc} - R^{act})}.x_{11} + \frac{1}{C}.I \quad (5.12)$$

Eşitlik 5.5 ile 5.12 arasındaki denklemlerde kullanılan θ (teta) ifadelerinin açık halleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\theta_1(x_4) = \left[\frac{R}{R} \cdot \left(\frac{a_{H_2O}}{m} \cdot x_4 \right) \right] \left[\frac{R}{R} \cdot \left(\frac{a_{H_2O}}{m} \right) \right]$$

$$\theta_2(x_4) = \left[\frac{R}{R} \cdot x_4 / 2.V_a F \right]$$

$$\theta_3(x_4) = \left[\frac{R}{R} \cdot \left(\frac{c_{H_2O}}{m} \cdot x_4 \right) \right] \left[\frac{R}{R} \cdot \left(\frac{c_{H_2O}}{m} \right) \right]$$

$$\theta_4(x_4) = \left[\frac{R}{R} \cdot x_4 / 4.V_c F \right]$$

$$\theta_5(x_7) = \left[\frac{R}{R} \cdot \left(\frac{c_{H_2O}}{m} \cdot \left(\epsilon_{H_2O}^{in} - x_7 \right) \right) \right] \left[\frac{R}{R} \cdot \left(\frac{c_{H_2O}}{m} \right) \right]$$

$$\theta_6(x_4, x_5, x_6, x_7) = \left[\frac{R}{R} \cdot \Delta G^0 / 2.F \right] \left[\frac{R}{R} \cdot R.x_4 / 2.F \right] \ln(x_5 \cdot x_6^{0.5} / x_7)$$

$$\theta_7(x_4, x_5, x_6, x_7) = n_s \cdot \left[\frac{E_0^{cell}}{F} + \frac{R \cdot x_4}{2 \cdot F} \right] \ln(x_5 \cdot x_6^{0.5} / x_7) - V^{act} - V^{con} - V^O$$

$$\theta_8(x_4, x_5, x_6, x_7) = n_s \cdot \left[\frac{E_0^{cell}}{M_{fc} \cdot C_{fc}} + \frac{R \cdot x_4}{F \cdot M_{fc} \cdot C_{fc}} \right] \ln(x_5 \cdot x_6^{0.5} / x_7) - V^{act} - V^{con} - V^O$$

Durum uzay eşitliğinden ortaya çıkartılan modele ait matrislerin kendisi aşağıda verilmiştir.

$$x = [(m_{O2})_{net} \quad (m_{H2})_{net} \quad (m_{H2O})_{net} \quad T \quad P_{H2} \quad P_{O2} \quad P_{H2O} \quad Q_C \quad Q_E \quad Q_L \quad V_C]^T$$

$$u = [up_A \quad up_C \quad u_{TR}]^T \quad w = [I] \quad y = \theta_7(x_4, x_5, x_6, x_7)$$

$$\theta = [\theta_1(x_4) \quad \theta_2(x_4) \quad \theta_3(x_4) \quad \theta_4(x_4) \quad \theta_5(x_7) \quad \theta_6(x_4, x_5, x_6, x_7) \quad \theta_7(x_4, x_5, x_6, x_7) \quad \theta_8(x_4, x_5, x_6, x_7)]^T$$

$$A_{4*4} = \begin{bmatrix} -\frac{h_s n_s A_s}{M_{fc} \cdot C_{fc}} \end{bmatrix}$$

$$A_{11*11} = \begin{bmatrix} -1 \\ C \cdot \frac{R^{con} + R^{act}}{F} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\lambda_C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\lambda_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda_C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{4*4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2\theta_1(x_4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\theta_3(x_4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\theta_5(x_7) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_s n_s A_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{11*11} \end{bmatrix}$$

$$G = \left[\left(\frac{1}{4\lambda_C F} \right) \quad \left(\frac{1}{2\lambda_A F} \right) \quad \left(\frac{1}{2\lambda_C F} \right) \quad -\theta_8(x_4, x_5, x_6, x_7) \quad -\theta_2(x_4) \quad -\theta_4(x_4) \quad 2\theta_4(x_4) \right.$$

$$\left. \theta_6(x_4, x_5, x_6, x_7) \quad \theta_7(x_4, x_5, x_6, x_7) \quad 0 \quad \frac{1}{C} \right]^T$$

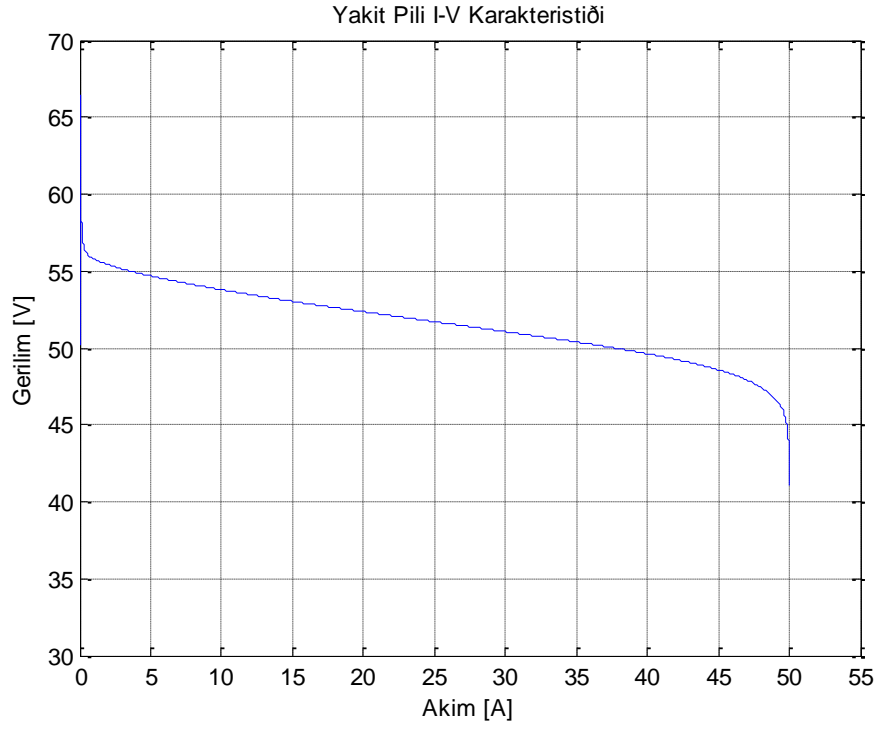
$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{h_s n_s A_s}{M_{fc} \cdot C_{fc}} \right) \\ 2\theta_1(x_4) & 0 & 0 \\ 0 & 2\theta_3(x_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(h_s n_s A_s \right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Bunlara ek olarak modelleme esnasında MATLAB’de kullanılan çeşitli sabitler aşağıda verilmiştir.

$$\begin{array}{ll} A_s = 3,2 \cdot 10^{-2} & a = -3,08 \cdot 10^{-3} \\ a_0 = 1,3697 & b = 9,724 \cdot 10^{-5} \\ C_{fc} = 500 & C = 10 \\ E_{cell}^0 = 1,23 & e = 2 \\ F = 96487 & \Delta G_0 = 237,2 \cdot 10^3 \\ h_s = 37,5 & K_I = 1,87 \cdot 10^{-3} \\ K_T = -2,37 \cdot 10^{-3} & M_{fc} = 44 \\ (m_{H_2O})_{in}^a = 8,614 \cdot 10^{-5} & (m_{H_2O})_{in}^c = 8,614 \cdot 10^{-5} \\ n_s = 70 & (P_{H_2O})_{in} = 2 \\ R = 8,31 & (R_{ohm})^c = 0,28 \\ V_a = 10^{-3} & V_c = 10^{-3} \\ \lambda_A = 60 & \lambda_C = 60 \\ (P_{H_2O})_{in}^a = 1 & (P_{H_2O})_{in}^c = 1 \end{array}$$

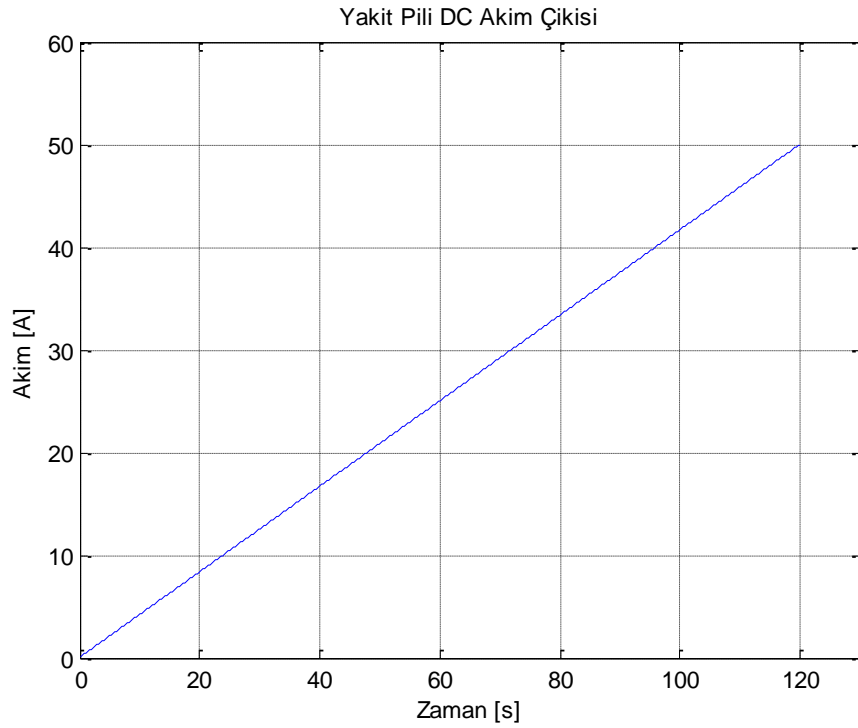
Durum uzay yöntemi kullanılarak oluşturulan model ilk önce MATLAB ortamına aktarıldı. Bunun için yakıt pili modeline ait durum uzay denklemleri, sabitler, değişkenler ve matrislerden meydana gelen bir m-file dosyası oluşturuldu. Sonrasında oluşturulan model üzerinden yakıt piline ait istenen grafikler elde edildi. Bir sonraki sayfada modelde kullanılan eşitlikler ve grafikler yer almaktadır.

Yakıt pili akımındaki artıma bağlı olarak yakıt pili çıkış gerilimindeki değişimin grafiği Şekil 5.31’de verilmiştir.



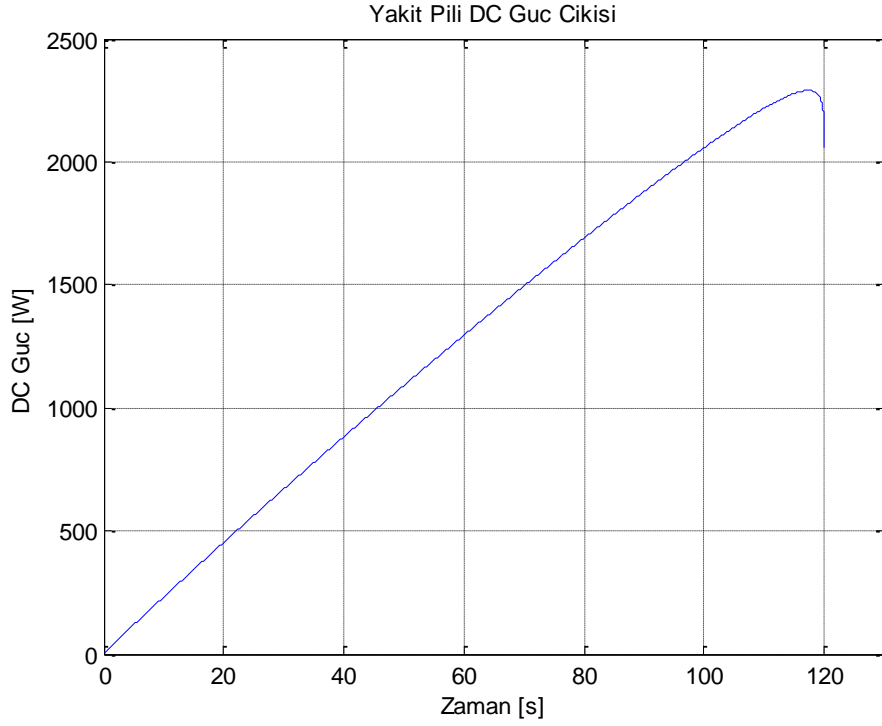
Şekil 5.31 Yakıt pili I-V karakteristiği

Zamana bağlı olarak yakıt pili akımındaki değişimin grafiği Şekil 5.32’de verilmiştir.



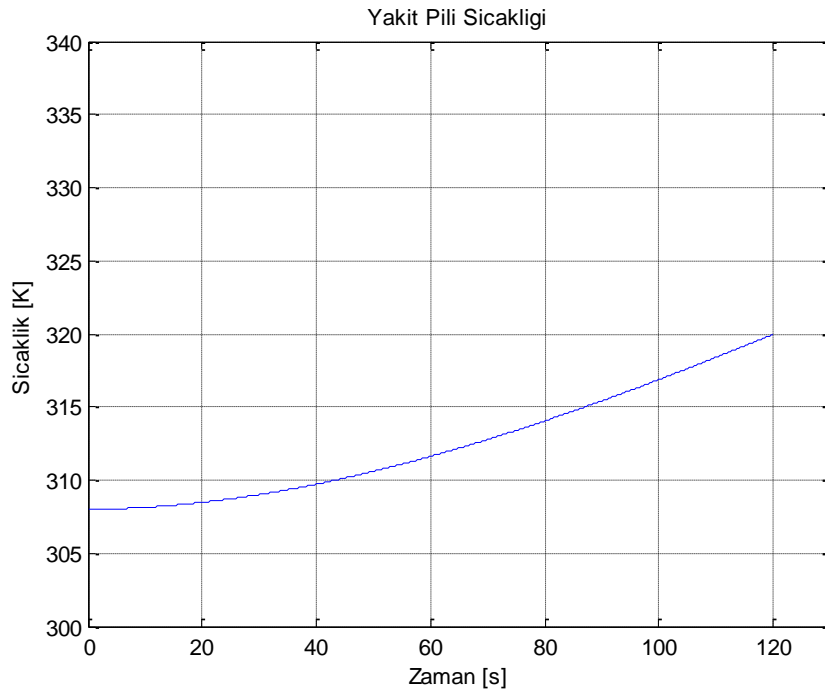
Şekil 5.32 Yakıt piline ait akım (A) – zaman (sn) eğrisi

Zamana bağlı olarak yakıt pili akımı ve gerilimi baz alınarak çıkış gücü değişiminin grafiği Şekil 5.33’de verilmiştir.



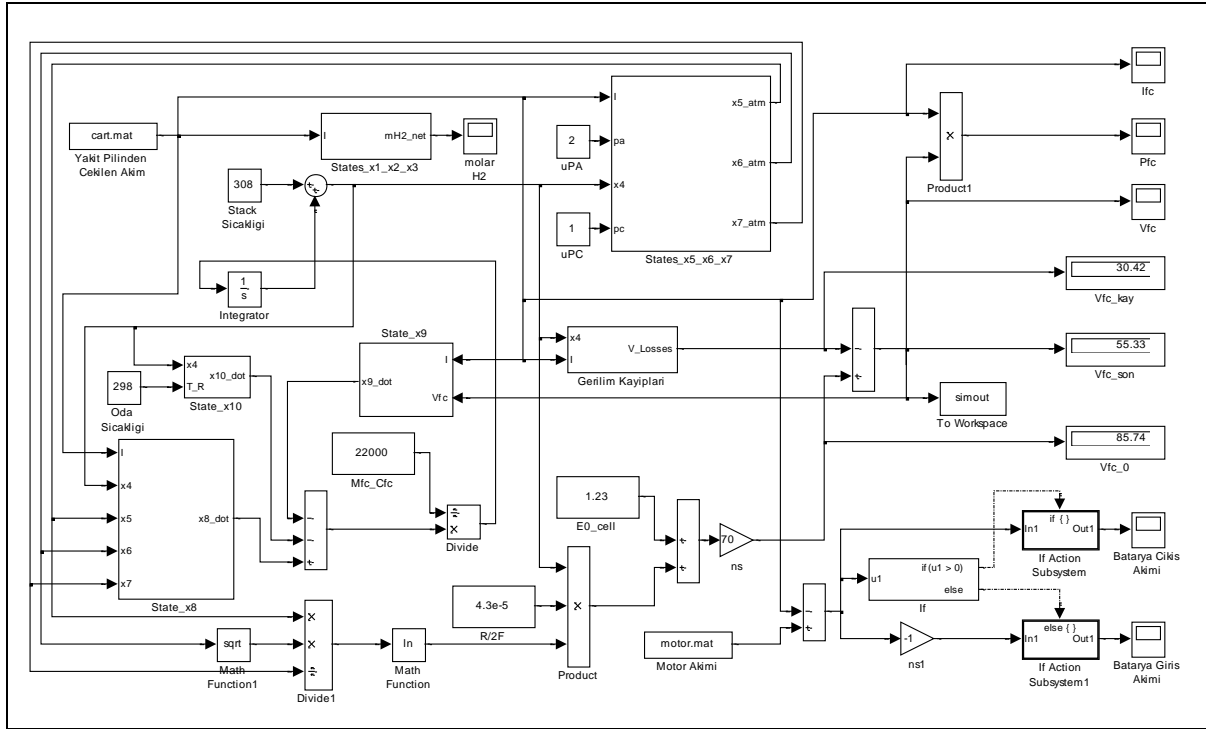
Şekil 5.33 Yakıt piline ait gc (W) – zaman (sn) eğrisi

Zamana bağlı olarak yakıt pili sıcaklığındaki değişimin grafiği Şekil 5.34’de verilmiştir.



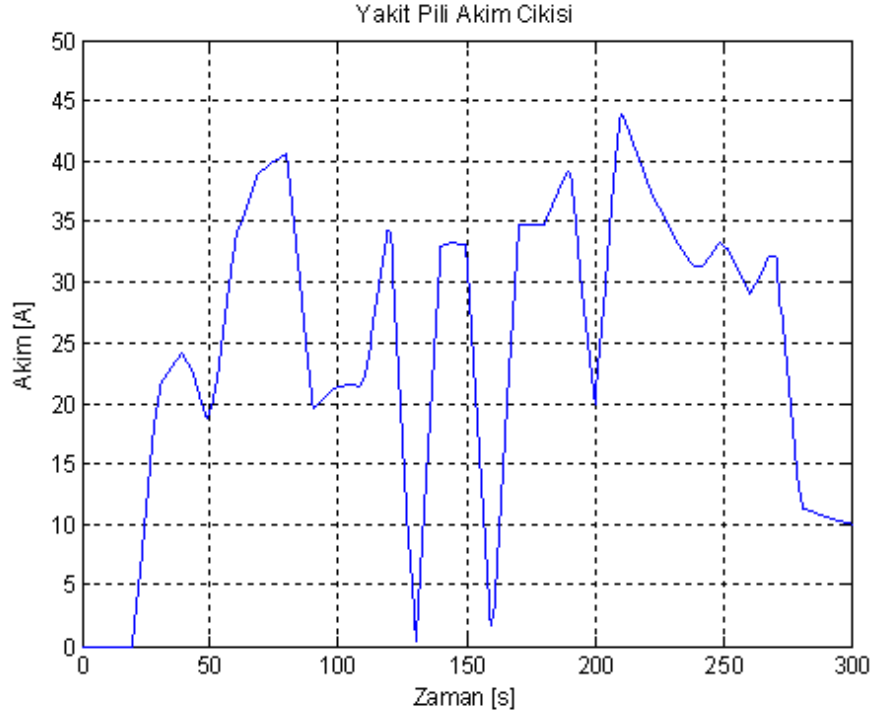
Şekil 5.34 Yakıt piline ait sıcaklık (K) – zaman (sn) eğrisi

Sonrasında durum uzay denklemleri ile m-file ortamında oluşturulmuş olan model MATLAB/Simulink ortamına aktarılarak blok diyagramlarından meydana gelen “non-linear” modeli (Şekil 5.35) oluşturuldu.



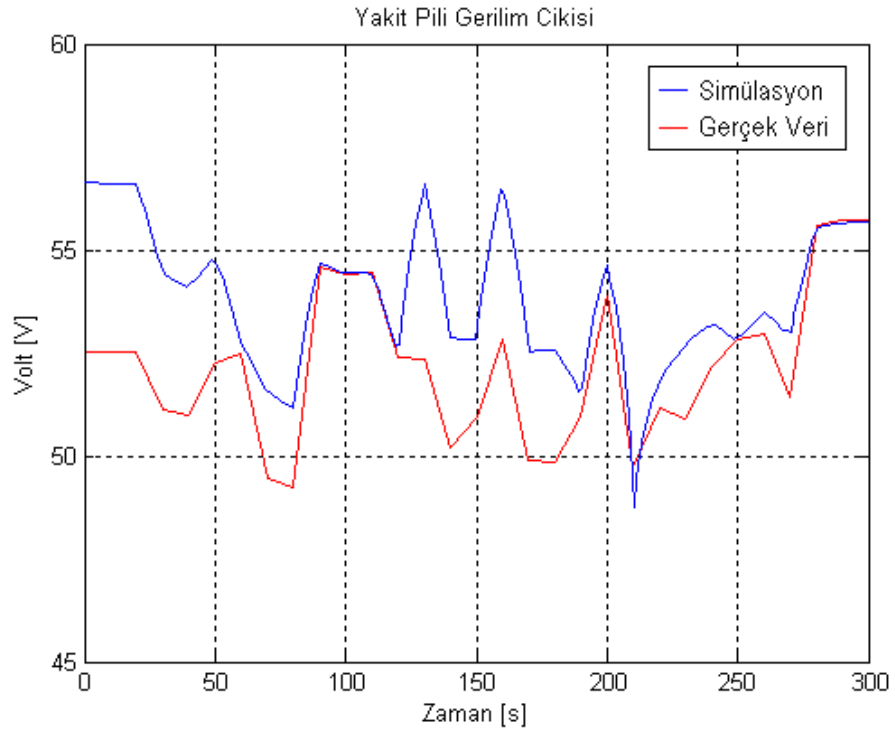
Şekil 5.35 Yakıt pilinin MATLAB/Simulink modeli

Durum uzay denklemleriyle oluşturulmuş olan dinamik model kullanılarak aracın MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyon için gerekli olan araca ait yakıt pilinden çekilen akım bilgisi veri toplama sisteminden elde edilmiştir. Bu veri ile MATLAB ortamında akım-zaman matrisi oluşturularak sonrasında Simulink ortamına aktarılmıştır. Araçtaki anlık akım değişimlerine (Şekil 5.36) karşılık yakıt pili ve batarya sisteminin yüklerle nasıl cevap verdiği bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Bu simülasyon sonrasında elde edilen modele ait sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir. Sonrasında ise bilgisayar ortamında simülasyon ile elde edilmiş grafikler ile araca ait gerçek verilerden elde edilen grafikler karşılaştırılmıştır. Aşağıda bu grafikler görülmektedir.



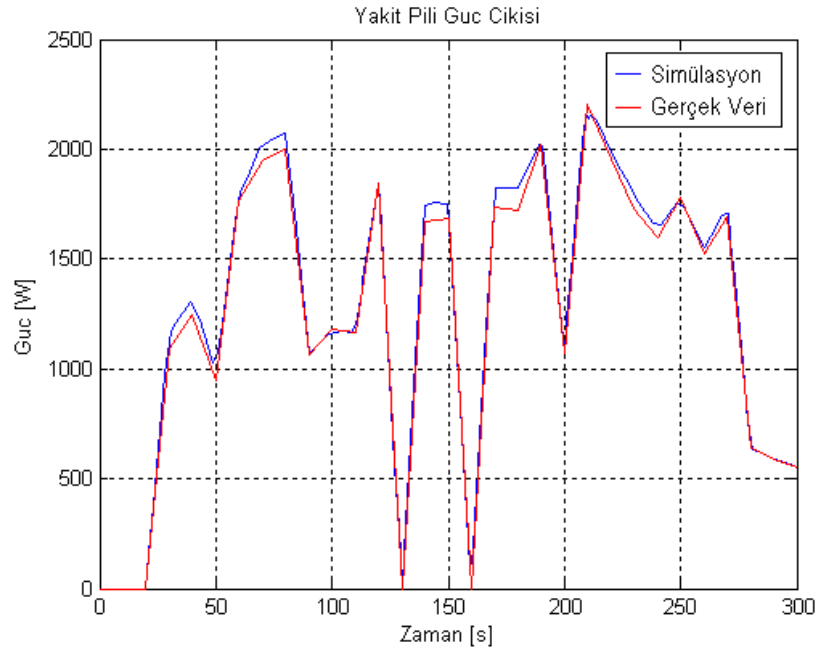
Şekil 5.36 Zamana bağlı yakıt pilinden çekilen akım miktarı

Yakıt pilinden çekilen akıma karşılık, sistem geriliminde oluşan dalgalanmanın simülasyondaki grafiksel sonuçları ile gerçek verilerden elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 5.37’de karşılaştırılmıştır.



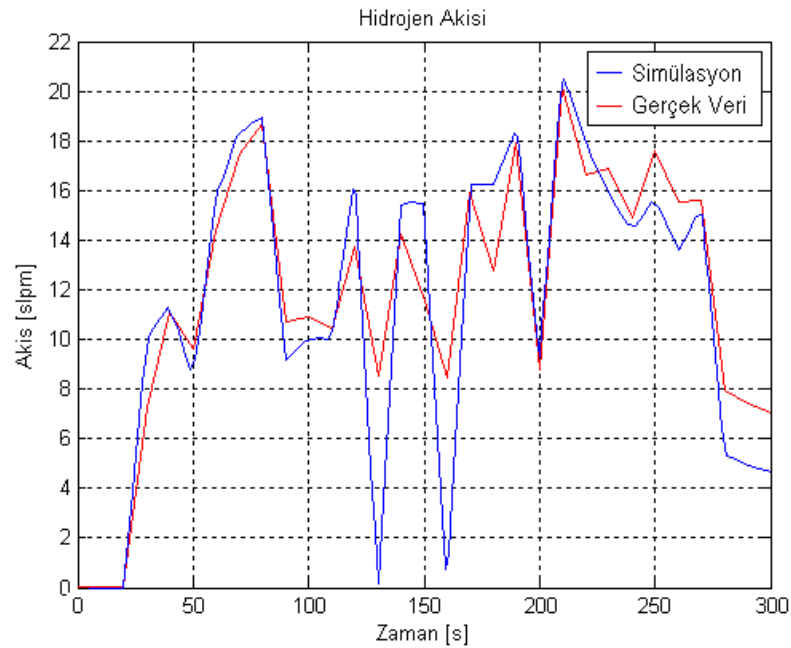
Şekil 5.37 Zamana bağlı sistemdeki gerilim değişimi

Yakıt pilinden çekilen akıma karşılık, yakıt pili gücündeki değişimin simülasyondaki grafiksel sonuçları ile gerçek verilerden elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 5.38'de karşılaştırılmıştır.



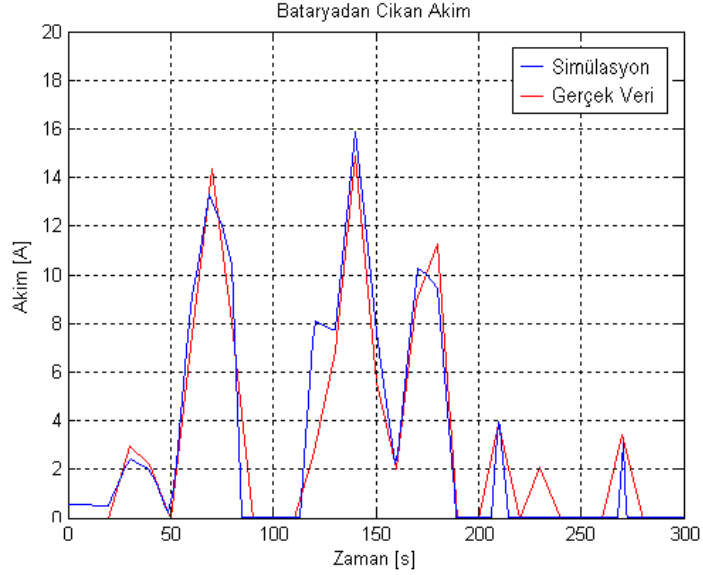
Şekil 5.38 Zamana bağlı yakıt pilindeki güç değişimi

Aşağıdaki Şekil 5.39'da ise yakıt pilinden çekilen güce karşılık hidrojen tüketim miktarlarının simülasyon sonuçları ve gerçek verilerden alınan sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.



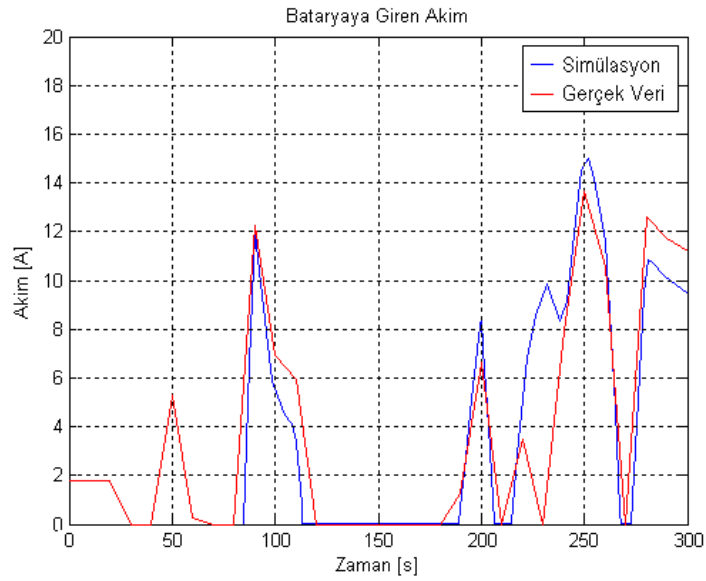
Şekil 5.39 Zamana bağlı değişen güce karşılık hidrojen tüketimi

Yakıt pilinin yeterli enerjiyi sağlayamadığı durumlarda Şekil 5.40'da görüldüğü gibi talep edilen toplam gücü sağlamak için batarya grubu devreye girerek yükleri beslemektedir. Bu sayede güç akışı sürekli ve kesintisiz devam etmekte ve yakıt piline fazla yüklenilmemektedir.



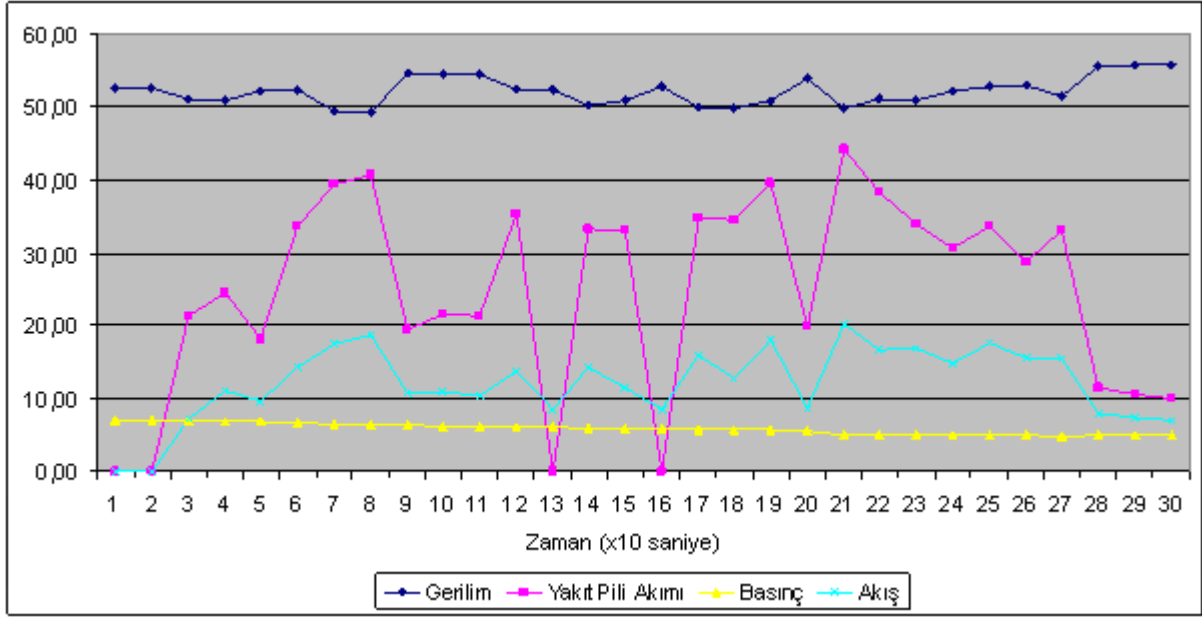
Şekil 5.40 Zamana bağlı bataryadan çıkan akım miktarı

Batarya grubu, ani güç ihtiyaçlarında veya yakıt pilinin karşılayabileceği gücün üzerindeki yüklerde devreye girebildiği gibi yükler tarafından çekilen güç azaldığında yakıt pili batarya grubunu şarj edebilmektedir. Şekil 5.41'de zamana bağlı yakıt pilinin bataryayı şarj ettiği grafik verilmiştir.

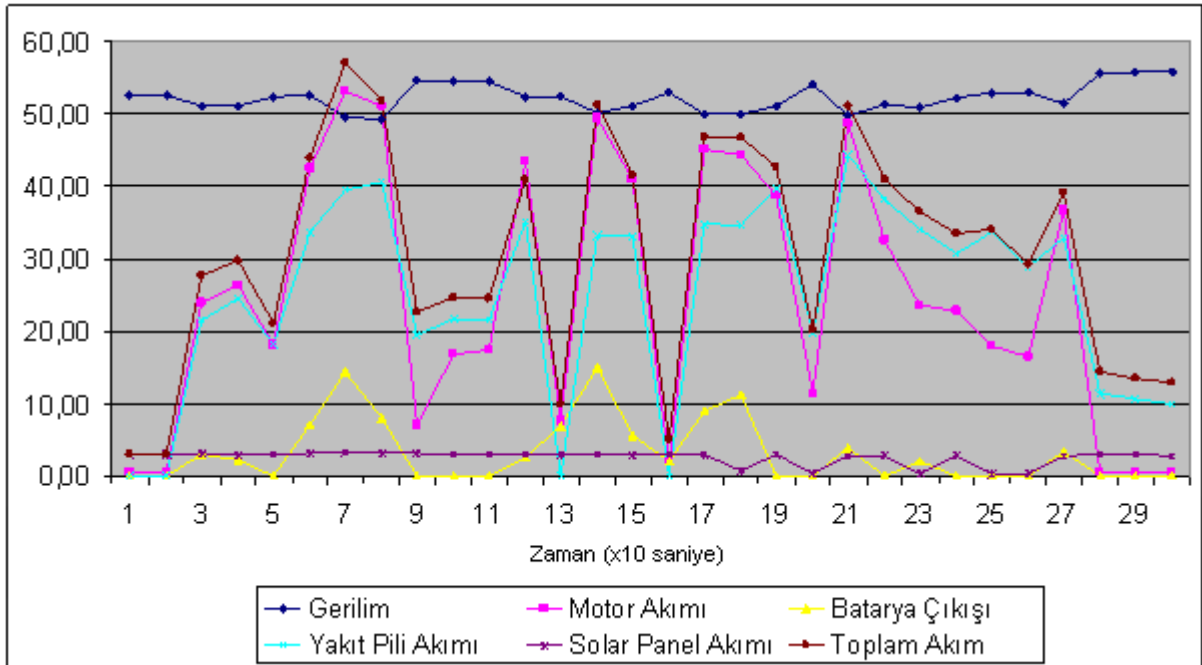


Şekil 5.41 Zamana bağlı bataryaya giren akım miktarı

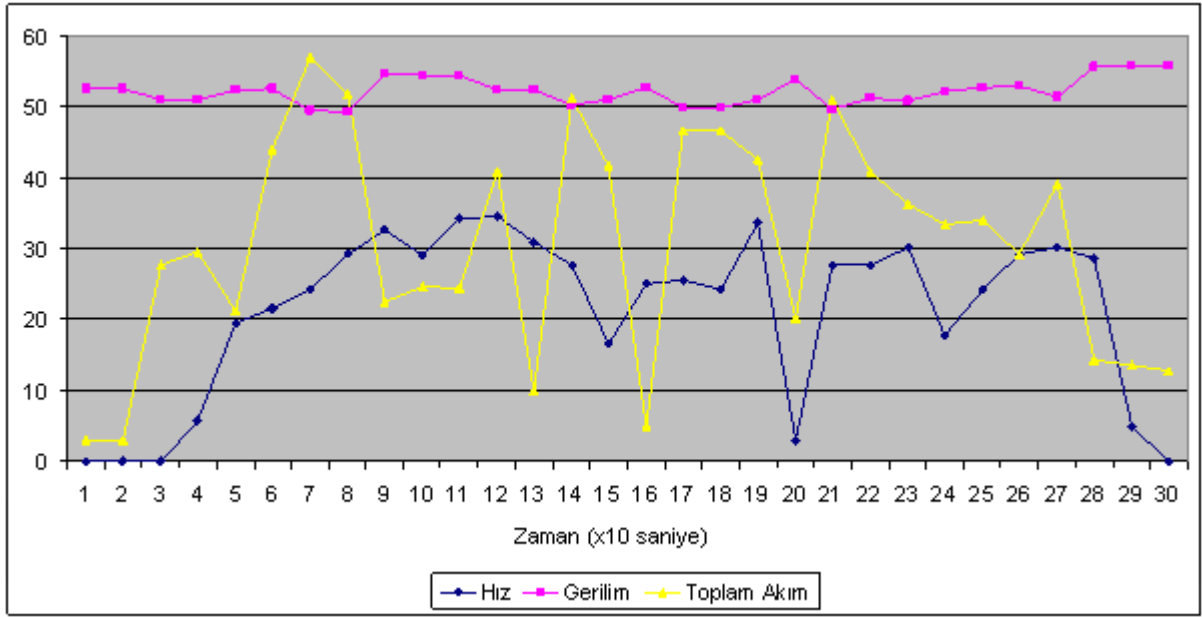
Simülasyon sonuçlarından elde edilmiş grafikler ile gerçek verilerden elde edilmiş grafik sonuçları yukarıda karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak araç üzerinden alınmış farklı verilerde bulunmaktadır. Bunlara ait grafiksel sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5.42 Yakıt piline ait zamana bağlı gerilim (V) – akım (A) – basınç (bar) – akış (slpm) değişimleri (Gerçek sonuçlar)



Şekil 5.43 Yakıt piline ait zamana bağlı gerilim (V) – motor akımı (A) – batarya çıkışı (A) – yakıt pili akımı (A) – solar panel akımı (A) – toplam akım (A) değişimleri (Gerçek sonuçlar)



Şekil 5.44 Yakıt piline ait zamana bağlı hız (km/s) – gerilim (V) – toplam akım (A) değişimleri (Gerçek sonuçlar)

Yakıt pili ve batarya sistemi dışında MATLAB'den yararlanılarak araçta yer alan güneş panellerinin de bir modeli oluşturulmuştur. Bu model oluşturulurken Newton Raphson yöntemi kullanılmıştır. Newton Raphson yöntemi sürekli bir fonksiyonun köklerini bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Bir çeşit iterasyon olan bu yöntemde $x_{y} = x_e - f(x_e)/f'(x_e)$ şeklindeki ifadenin “ $x_y - x_e$ ” ifadesi kabul edilebilir bir fark olana kadar hesaplanmasıdır. Burada x_y , x 'in yeni değeri, x_e ise eski değeridir (González-Longatt, 2005).

MATLAB ortamında güneş panelinin modellenmesinde kullanılan parametrelerin açıklamaları ve birimleri aşağıda verilmiştir.

- A : Diyot Kalite Faktörü
- G : Güneş ışığının parlaklığı (W/m^2)
- I_a : Panel akımı (A)
- I_0 : Diyotun doyma akımı (A)
- I_L : Sıcaklığa bağlı foto akım değeri (A)
- I_{sc} : Panel kısa devre akımı (A)
- k : Boltzman katsayısı ($J/^{\circ}K$)
- N_s : Paneldeki seri bağlı hücre sayısı

R_S	: Hücre başına direnç değeri (ohm)
T_{aC}	: Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{aK}	: Ortam sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_1	: Birinci çalışma sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_2	: İkinci çalışma sıcaklığı ($^{\circ}K$)
q	: Bir elektron şarjı (Coulombs)
V_a	: Panel gerilimi (V)
V_c	: Hücre gerilimi (V)
V_g	: Band Gap Gerilimi (eV)
V_{oc}	: Panel açık devre gerilimi (V)
V_t	: Termal gerilim (V)

Güneş paneli modellemesi esnasında MATLAB’de kullanılan çeşitli sabitler aşağıda verilmiştir.

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$$

$$q = 1,60 \cdot 10^{-19}$$

$$A = 1,2$$

$$V_g = 1,12$$

$$N_s = 32$$

$$V_a = 0 : 22$$

Hücre akımını hesap ederken iki referans sıcaklık olarak t_1 ve t_2 seçilmiştir. Bu iki referans sıcaklığa bağlı hücre açık devre gerilimleri ve hücre kısa devre akımları hesap edilmiştir.

$$T_1 = 273 + t_1$$

$$V_{oc}(T_1) = V_{oc} - 60,8 \cdot t_1$$

$$I_{sc}(T_1) = I_{sc} + 3,5 \cdot t_1$$

$$T_2 = 273 + t_2$$

$$V_{oc}(T_2) = V_{oc} - 60,8 \cdot t_2$$

$$I_{sc}(T_2) = I_{sc} + 3,5 \cdot t_2$$

Çalışma sıcaklığı altında bir takım akım değerlerinin hesaplamasını veren çeşitli eşitlikler aşağıda ifade edilmiştir.

$$T_{aK} = 273 + T_{aC}$$

$$K_0 = \frac{I_{SC}(T_2) - I_{SC}(T_1)}{(T_2 - T_1)}$$

T_1 sıcaklığı ve güneşin parlaklığına bağlı olan foto akım hesabı Eşitlik 5.13'de verilmiştir.

$$I_L(T_1) = I_{SC}(T_{1,nom}) \cdot \frac{G}{G_{(nom)}} \quad (5.13)$$

Sıcaklığa bağlı değişen foto akımın hesaplaması Eşitlik 5.14'de verilmiştir.

$$I_L = I_L(T_1) + K_0(T - T_1) \quad (5.14)$$

T_1 sıcaklığına bağlı diyotun doyma akımının hesaplaması Eşitlik 5.15'te verilmiştir.

$$I_0(T_1) = \frac{I_{SC}(T_1)}{\left(e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1}} - 1 \right)} \quad (5.15)$$

T_{aK} sıcaklığına bağlı diyotun doyma akımının hesaplaması Eşitlik 5.16'te verilmiştir.

$$I_0 = I_0(T_1) \cdot \left(\frac{T_{aK}}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{qV_q(T_1)}{nk \left(\frac{1}{T_{aK}} - \frac{1}{T_1} \right)}} \quad (5.16)$$

Üreticinin grafiğindeki bir hücrenin açık devre geriliminden dV/dI hesabı Eşitlik 5.17'de verilmiştir.

$$\left(\frac{dV}{dI} \right)_{V_{oc}} = -1,15 / N_s / 2 \quad (5.17)$$

Hücre başına seri direnç hesabı aşağıdaki Eşitlik 5.18'de verilmiştir.

$$X_V = I_0(T_1) \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1}} - \frac{1}{T_V}$$

$$R_S = -\frac{dV}{dI_{V_{oc}}} - \frac{1}{X_V} \quad (5.18)$$

Termal gerilim hesabı Eşitlik 5.19 ile ifade edilmiştir.

$$V_t = \frac{A.k.T_{aK}}{q} \quad (5.19)$$

Panelin açık devre gerilimi Eşitlik 5.20 ile ifade edilmiştir.

$$V_{OC} = \frac{A.k.T_{aK}}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \quad (5.20)$$

Panel geriliminden hücre geriliminin hesabı Eşitlik 5.21’de verilmiştir.

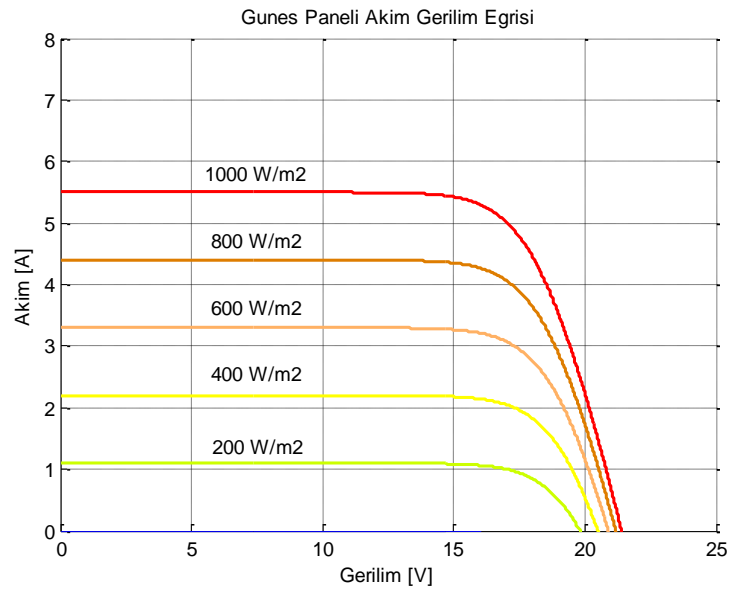
$$V_c = V_a/N_s \quad (5.21)$$

Bir hücrenin üretebileceği akımın hesaplaması için Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır ve Eşitlik 5.22’de ifade edilmiştir.

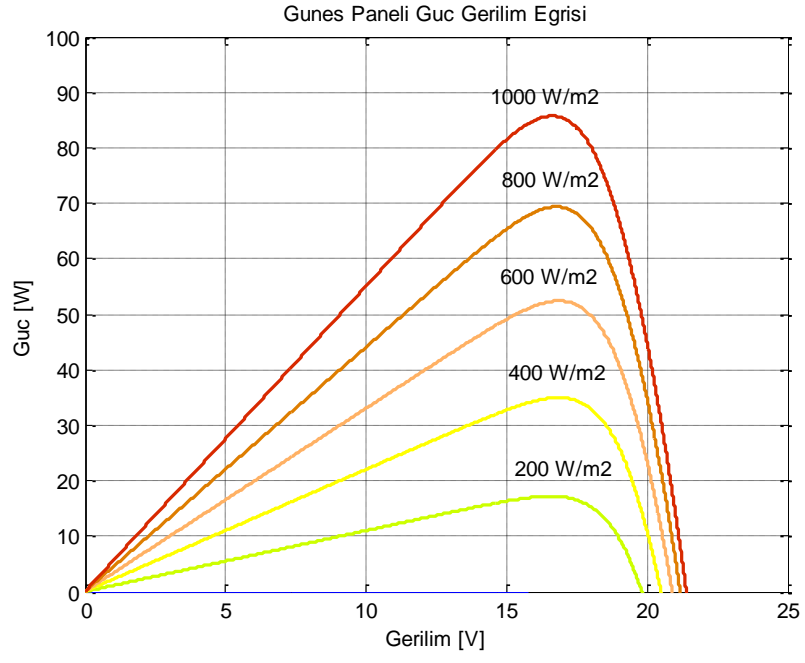
$$I_a = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right)$$

$$I_{a2} = I_{a1} - f(I_{a1}) / f'(I_{a1}) \quad (5.22)$$

Bu eşitliklerden yola çıkarak güneşin farklı parlaklık değerlerine göre aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerden Şekil 5.45 güneşin farklı parlaklık değerlerinde panelin akım gerilim eğrisini vermektedir. Şekil 5.46 ise yine güneşin farklı parlaklık değerlerinde panelin güç gerilim eğrisini vermektedir.



Şekil 5.45 Güneş panelinin gerilim akım eğrisi



Şekil 5.46 Güneş panelinin güç gerilim eğrisi

6. SONUÇ

Projemizin en başında da söylediğimiz gibi dünyanın enerji bağımlılığı ve şu anda kullandığı enerji kaynaklarının tükenmekte olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Proje çalışmalarımız sırasında edindiğimiz bilgiler ışığında söyleyebiliriz ki; enerji kaynağı olarak hidrojen ve bu enerjinin kullanımı doğrultusunda yakıt pilleri, hem dünyamızın ekolojik dengesinin korunması açısından hem de şu anda kullanılan fosil yakıtların yerini alabilmek adına insanoğlu tarafından yapılmış çok doğru bir tercihtir.

Hidrojen birçok yöntemle ve dünyada en çok bulunan bileşik sudan geri dönüşümlü olarak üretilmekte, yakıt pillerinde ise enerjisi yüksek verimle elektrik enerjine dönüştürülebilmektedir. Bu proseslerin sonucunda doğaya zarar vermeyen atık maddeler oluşmaktadır. Bu önemli avantajlarına karşın yakıt pili teknolojisinin önünde iki engel durmaktadır; bu teknolojinin günümüzde maliyetlerinin pahalı ve malzeme teknolojisinin şu an için kısıtlı olması söylenebilir. Fakat günümüzde hızla gelişen teknolojiyle birlikte önümüzdeki yıllarda bu sorunlarda aşılabilecektir. Bu sorunun ortadan kaldırılması maliyet sorununun çözümünü de beraberinde getirebilir. Bu sayede yakıt pili sistemlerini birçok alanda enerji ihtiyacının karşılanmasında yaygın olarak görebileceğiz. Bu alanların başında otomotiv sektörü geliyor.

Dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin gelecekte daha da azalacağı düşünüldüğünde otomotiv firmaları şimdiden çeşitli çözüm arayışları içersine girdi. Bu doğrultuda bazı otomotiv firmaları tarafından üretilen elektrikli araçlar gelişmiş bazı ülkelerde yollara çıkmaya ve dünyada popüler hale gelmeye başladı. Günümüzde daha çok içten yanmalı ve elektriğin ortak kullanıldığı hibrid sistemler kullanılırken, gelecekte bunların yerini sadece elektrik sistemiyle çalışan araçlar alacak. Bu araçlar içinde en önemli aday yakıt pili ve bataryanın enerji sağladığı ortak güç sistemiyle çalışan elektrikli araçlar olacak.

Yakıt pillerinin hidrojen ihtiyacı, suyun elektrolizinden veya doğal gaz çevriminden, bataryaların enerji ihtiyacı ise şehir şebekesinden (plug-in) veya en temiz yol olan güneş pili teknolojisinden yararlanılarak karşılanabilecektir.

Güneş pilleri elektrik üretimi sırasında çevreye zararlı gazlar yaymaz ve doğayı kirletmez. Sistemin ilk kurulum maliyeti günümüzde yüksek olsa da kurulumdan sonra bakım masraflarının hiç denecek kadar az olması ve ömürlerinin aksine çok uzun olması güneş pili teknolojisi için avantajlı bir durumdur. Güneş pili teknolojisinin önündeki en büyük engel, yakıt pilinde olduğu gibi kullanılan teknolojinin pahalı olmasıdır. Buna ek olarak güneş

pillerinin veriminin düşük olması da ayrı bir dezavantajdır. Fakat güneş pili teknolojisi de hızla ilerliyor ve maliyetler giderek düşüyor. Önümüzdeki yıllarda daha ucuz ve daha verimli güneş pilleri sayesinde bu teknoloji, enerjiye ihtiyaç olan çeşitli alanlarda ve otomotiv sektörünü ilgilendiren elektrikli araç teknolojisinde bataryaları şarj etmek için yardımcı güç sistemi olarak görev alabileceklerdir.

Tez çalışması olarak prototip uygulaması gerçekleştirilen elektrikli hibrit araç projesi bu bakımdan iyi bir örnektir. Bu proje sayesinde araç içindeki sistemi oluşturan bileşenlerin çalışması denendi ve izlendi. Ortaya çıkan gerçek sonuçlar MATLAB ortamında oluşturulmuş modelin sonuçlarıyla karşılaştırıldı. Bu sayede oluşturulan modelden çıkan simülasyon sonuçlarının gerçek verilerle ne kadar uyumlu ve tutarlı olduğu karşılaştırıldı.

Elde edilen gerçek sonuçlar sayesinde araç üzerinde kullanılan yakıt pili, güneş paneli, batarya ve hidrojen sistemi gibi bileşenlerin birbirleriyle olan uyumu ve gerekirse gelecekte sistem üzerinde yapılabilecek iyileştirmeler hakkında şimdiden fikir yürütülebilecektir. MATLAB ortamında oluşturulan model üzerinden, araç sistemi üzerinde yapılmak istenen değişiklikler önceden simüle edilerek analizler yapılabilecektir. Bu sayede araç üzerinde yapılması düşünülen iyileştirmelerin ne ölçüde istenen sonuca ulaştığı sanal ortamda önceden test edilip görülebilecektir.

Bu bakımdan prototip elektrikli hibrit araç projesi, yeni teknolojiler kullanılarak ortaya çıkartılmış araç sistemini anlamaya ve kavramaya imkan sağlarken, bu bağlamda gerçekleştirilen modelleme çalışmaları sayesinde gelecekte sistem üzerinde yapılması düşünülen değişiklikleri de şimdiden test ve analiz etme imkanı sağlayarak fikir kazandıracaktır.

Bu yeni teknolojiler devreye girerken bir takım altyapı değişikliklerini de beraberinde getirecektir. Özellikle hidrojen dolum noktaları ve batarya şarj istasyonlarının gelecekte oluşacak talebi karşılaması gerekmektedir. Bu araçların servis hizmetleri, bu sistemlerin eğitimini almış uzman mühendisler ve kalifiyeli çalışanlar tarafından gerçekleştirilmesi de önemli bir gerekliliktir. Bunlara ilave olarak bu teknolojilerin dünyada gelişmesi ve hızla yayılması için devletlere de çeşitli görevler düşmektedir. Bunların en başında bu tür araçların satışlarının teşvik edilmesi için tüketicilere bir takım özel vergi indirimlerinin yapılması örnek verilebilir.

Bu ilerlemeler sağlandığında gelecekte bu teknolojiler ile otomotiv sektörü köklü bir değişiklik yaşayıp gelecek için temiz ve yeni bir sayfa açacaktır. Bu sayede yaşadığımız güzel dünyanın ve insanlığın bu bakımdan daha verimli, temiz ve aydınlık bir geleceği olacaktır.

KAYNAKLAR

- Alam, M. ve Gao, W., (2006), "Conversion of a Golf Car Into a Hybrid Fuel Cell Li-ion Battery Vehicle and Validation of the Vehicle Model for the 2006 GEM eL Golf Car Using PSAT", IEEE International Conference on Industrial Technology, 5:1224-1229.
- Büyüktür, A.R., "Proses Tekniğinde Özel Konular (Yakıt Pilleri)" Doktora ve Yüksek Lisans Ders Notları ve Öğrenci Sunumları.
- Cho, H.Y., Gao, W. ve Ginn, H.L., (2004), "A New Power Control Strategy for Hybrid Fuel Cell Vehicles", Power Electronics in Transportation, 8538(1):159-166.
- Deng, Y., Foo, S., Li, H., (2009), "Real Time Simulation of Power Flow Control Strategies for Fuel Cell Vehicle with Energy Storage by Using Real Time Digital Simulator (RTDS)", Power Electronics and Motion Control Conference, 3556(2):2323-2327.
- European Hydrogen Association, (2009), "Role of Hydrogen in Addressing the Challenges in the New Global Energy Systems", Araştırma Raporu.
- González-Longatt, F.M., (2005), "Model of Photovoltaic Module in Matlab", Latin American Congress of Electrical Engineering, Electronics And Computer, 3-7 Apr. 2006, Puerto La Cruz.
- Gow, J.A., Manning C.D., (1999), "Development of a Photovoltaic Array Model For Use In Powerelectronics Simulation Studies", IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 146(2):193-200.
- Hurley P.(2002), "Build Your Own Fuel Cell", Good Idea Creative Center, Vermont.
- Larminie, J. ve Dicks, A., (2000), Fuel Cell System Explained, John Willey & Sons Ltd., New York.
- Li, X., Li J., Xu, L. ve Ouyang, M., (2009), "Power Management and Economic Estimation of Fuel Cell Hybrid Vehicle Using Fuzzy Logic", Vehicle Power and Propulsion Conference, 2600(3):1749-1754.
- Mauldin R., Baghzouz Y. ve Boehm R.F., (2006), "Light-Weight Fuel Cell-Battery Hybrid Vehicle", Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 0193-3:223-228.
- Meintz, A., Ferdowsi, M. ve Martin, K.B., (2010), "Supervisory Control Development of a Fuel Cell Plug-in Hybrid Electric Vehicle", Vehicle Power and Propulsion Conference, 2600(3): 986-991.
- Ning Q., Xuan D., Nan, Y. ve Kim, Y., (2009), "Modeling and Simulation for Fuel Cell-Battery Hybrid Electric Vehicle", International Conference on Computer Modeling and Simulation, 3562(3):53-57.
- Peavey, M., (2000), Fuel from Water – Energy Independence with Hydrogen, Merit Ltd., Lousville.
- Qiuli Y., Choe, S., Srivastava, A. ve Gao, W., (2006), "Improved Modeling and Control of a PEM Fuel Cell Power System for Vehicles", SoutheastCon, 0168(2):331-336.
- Smith, J. ve Angel, B., (2003), " New Application for DMFC", Journal of the Fuel Cell, 44(1):22-29.

Suehrcke, H., Ling, C.P. ve McCormick, P.G., (1990), "The Dynamic Response of Instruments Measuring Instantaneous Solar Radiation", *Solar Energy*, 44:145-148.

Markvart, T., (1994), *Solar Electricity*, John Wiley & Sons Ltd., Southampton.

Thomas, T., El-Sharkh, M.Y., Rahman, A., Alam M.S., Byrne, P.C. ve Sakla, A.A., (2004), "A Dynamic Model for a Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant for Residential Applications", *Journal of Power Sources*, 138-1(2):199-204.

Türkiye Bilimsel Ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri Ve Çevre Araştırma Enstitüsü, (2003), "Elektrikli Araçlar" Araştırma Raporu.

Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri Ve Çevre Araştırma Enstitüsü, (2004), "Temiz Enerji Üretimine Yönelik Yakıt Pili Teknolojilerinin Geliştirilmesi", Araştırma Raporu.

Walker, G., (2001), "Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model", *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 21(1):49-55.

Yurum, Y., (2002), *Hydrogen Energy System – Production and Utilization of Hydrogen and Future Aspects*, London.

Zhang, C., Ji, C., Chen, F., Ma, T. ve Zhou, S., (2009), "Study Of an Agent-Based Power Management For Fuel Cell Hybrid Vehicles", *Intelligent Vehicles Symposium*, 3503(6):1931-0587.

Zhi-ling, J., Wei-rong, C. ve Zhi-jian, Q., (2010), "Energy Management for a Fuel Cell Hybrid Vehicle", *Power and Energy Engineering Conference*, 4812(8):1-6.

İnternet Kaynakları

[1] International Association for Hydrogen Energy, <http://www.iahe.org>

[2] "The Energy Ventures Inc. Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)", <http://www.energyvi.com/techdmfc.html>.

[3] "Uses & Applications", <http://www.fuelcell.today.org>.

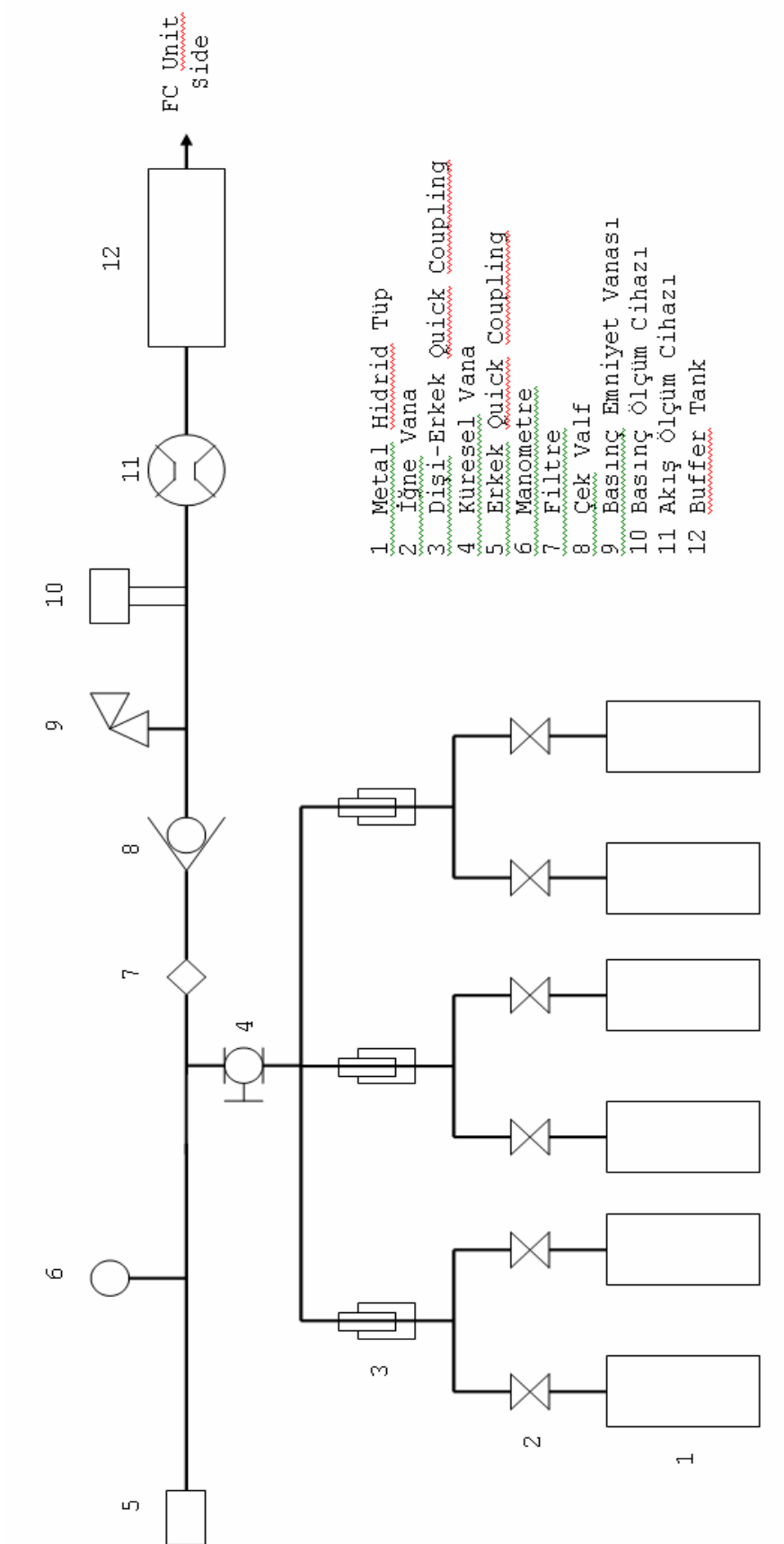
EKLER

- Ek 1 Yakıt pilinin teknik özellikleri
- Ek 2 Gaz manifold sisteminin şeması
- Ek 3 Güneş paneli teknik özellikleri
- Ek 4 Haberleşme modülü ile 8 kanallı analog modülün teknik özellikleri
- Ek 5 Elektronik kontrol kartının teknik şeması
- Ek 6 Metal hidrür tüpün teknik bilgileri
- Ek 7 Hibrid yakıt pilli elektrikli araç sisteminin devre şeması

Ek 1 Yakıt pili teknik özellikleri

Fuel Cell Unit		
Type		PEM (proton exchange membrane)
Number of cells		70
Emissions Water vapour Heat Hydrogen	[W] [ppm]	2000 at rated power 100
Efficiency	[%]	50 (fuel to DC)
Installation distances Top Floor Right Left Rear Front	[m]	0,5 0 0 0 0.5 1.5
Fuel Composition Permitted impurities Entry pressure Consumption		Hydrogen 99.99% dry gaseous hydrogen 3.0 < 0.01 max. sum (He, N2, Ar, and water vapour) < 2 ppm carbon dioxide + carbon monoxide < 500 ppm oxygen < 1 ppm sulphur compounds < 1 ppm hydrocarbons 0.7– 17 barg (10-250 psig) at the cabinet entrance Up to 22 SLPM (approximate) at rated output
Output Rated power Rated voltage Maximum rated current Voltage isolation	[kW] [VDC] [A] [VDC]	2 48 nominal 40 at rated power 240
Output		
Nominal power(6)	[W]	2000

Ek 2 Gaz manifold sisteminin şeması



Ek 3 Güneş paneli teknik özellikleri

High-efficiency PV Module LA90-12S

Technology

The LORENTZ LA-Series of PV modules offer a conversion efficiency of 17-20% due to the unique back-contact technology.

Our monocrystalline silicon solar cells yield a higher voltage per cell. Therefore 32 cells are sufficient to provide the same voltage as traditional 36-cell modules. As a result, LORENTZ modules are lighter and smaller.

In combination with an extremely low voltage-temperature coefficient, this guarantees a superior battery charging performance, even at high operating temperatures.

Exceptional low-light performance and broad spectral response further enhance energy delivery in all weather conditions, year round.

Features

- aerospace style cell interconnects with in-plane strain relief
- advanced EVA encapsulation system with multi-layer backsheets for long-term package durability
- bypass diodes to minimize the power drop caused by shade
- high reliability

Warranty

- Warranty: 2 years
- Performance guarantee:
10 years (90% power output)
20 years (80% power output)

Details according to warranty issued by LORENTZ

Standards

LA90-12S meets the requirements for IEC and CE.



Applications

- remote village lighting
- solar home systems
- street and camp lights
- traffic signals
- medical facilities in remote areas
- microwave/radio repeater stations
- battery charging
- water pumping
- water purification systems



Specifications

Electrical Data

Peak power	P _{max}	[Wp]	90
Tolerance		[%]	+10 / -5
Max. power current	I _{mp}	[A]	5.1
Max. power voltage	V _{mp}	[V]	17.6
Short circuit current	I _{sc}	[A]	5.5
Open circuit voltage	V _{oc}	[V]	21.4
Efficiency of cells		[%]	19.7
Temperature co-efficient for P _{max}		[%/°C]	-0.38
Temperature co-efficient for V _{oc}		[mV/°C]	-60.8
Temperature co-efficient for I _{sc}		[mA/°C]	3.5
Max. system voltage		[V]	600

All technical data at standard test condition:

AM = 1.5, E = 1,000W/m², T_c = 25 °C

Cells

Number of cells per module	32*
Cell technology	monocrystalline
Cell shape	rectangular

* Due to the back-contact cell technology only 32 cells are required to yield the same V_{mp} voltage as traditional SI products with 36 cells.

Ek 4 Haberleşme modülü ile 8 kanallı analog modülün teknik özellikleri

Telemetry module for on-line monitoring and local control

MT-101

- GSM/GPRS packet transmission
- Integral GSM 900 / 1800 modem with automatic login onto GPRS network
- Binary inputs and outputs (8/8IO)
- Analog inputs 4-20 mA (2)
- Serial communication port for external devices (RS 232/422/485), isolated
- Data logger with 0,1 sec. resolution
- RTC Real Time Clock
- Programmable logic controller (PLC)
- Standard communication protocols (MODBUS RTU, M-BUS)
- Removable terminal blocks
- Easy configuration software



Telemetry Module MT-101 is a professional device combining functionality of programmable logic controller, data logger, protocol converter and wireless communication interface for GPRS packet transmission over GSM network.

Compact, robust design, integral GSM modem, attractive technical features and easy to use configuration tools are important advantages of MT-101 in wireless, scalable, multinode systems for telemetry, control, diagnostic, surveillance and alarming.

Resources

- 8 optoisolated binary / counter inputs 24V DC (I1 - I8)
- 8 configurable binary outputs / inputs / counters 24V DC (Q1 - Q8)
- 2 optoisolated analog inputs 4-20 mA (8 bit acc. / 10 bit res.) with configurable hysteresis and filtration
- Isolated serial port RS232/485/422
- Firmware Flash memory with remote update capability
- RTC with external synchronization functions



Functionality

- Transmission modes
 - GPRS - packet transmission
 - SMS
 - CSD - circuit switched data transmission (in modem mode only)
- All binary inputs can be configured as counters or frequency-to-analog converters (0-2kHz)
- Programmable control functions using I/O's and configurable, event triggered flags (SMS sending, data sending / logging, output control, call in)
- Unsolicited messaging
- Event triggered Data Logger
- Dynamic SMS text insertion
- Simple, multipoint alarm configuration for both binary and analog inputs
- Additional manual alarm level setting capability for analog inputs A1, A2 (front panel push buttons)
- External, optoisolated RS 232/422/485 serial port for data transmission
- Serial port emulated protocols in GPRS mode:
 - MODBUS RTU (Master and Slave)
 - Transparent, intelligent modem
- Smart MODBUS RTU routing
- Multibroadcast for transparent mode
- Local or remote (via GPRS) configuration and programming
- Configurable access security - IP and Tel# list, optional password
- DIN rail mounting
- Power supply 12/24V DC, 24 V AC
- Removable terminal blocks
- Diagnostic LED's (status, GSM transmission activity, GSM signal level, GPRS activity, serial communication activity, I/O status)

MT-101

General

Dimensions (length x width x height)	105x86x50 mm
Weight	300 g
Fixing	DIN Rail 35mm
Operating temperature	-20 ... +55°C
Protection class	IP40
Maximum voltage between any contact and device ground	60Vrms max.

GSM/GPRS Modem

Modem type	WISMO Quick
GSM	Dual Band GSM/GPRS module EGSM900/1800
Frequency range (EGSM 900 MHz)	Transmitter: from 880 MHz to 915 MHz Receiver: from 925 MHz to 960 MHz
Output power (EGSM 900 MHz)	33 dBm (2W) - Class 4
Frequency range (EGSM 1800 MHz)	Transmitter: from 1710 MHz to 1785 MHz Receiver: from 1805 MHz to 1880 MHz
Output power (EGSM 1800 MHz)	30 dBm (1W) - Class 1
Modulation	0,3 GMSK
Channel spacing	200 kHz
Antenna	50Ω

Power supply

DC (12V, 24V)	10,8 ... 36 V		
AC (24V)	18...26,4 Vrms		
Input current (A) (for 12V DC)	Idle	Active	Max
	0,10	0,35	0,60
Input current (A) (for 24V DC)	Idle	Active	Max
	0,05	0,17	0,30

Inputs I1...I8

Input voltage range	-36 ... 36 V
Input resistance	5,4 kΩ
Input voltage ON (1)	> 9V lub < -9V
Input voltage OFF (0)	-3V ... 3V

Inputs Q1...Q8

Maximum input voltage	36 V
Input resistance	5,4 kΩ typ.
Input voltage ON	> 9V min.
Input voltage OFF	< 3V max.

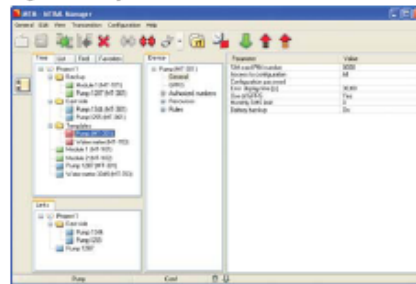
Outputs Q1...Q8

Recommended mean current for a single output	50mA
Single output current	350mA max.
Mean current for all outputs	400mA max.
Voltage drop at 350mA	<3,5V max.
Off state current	< 0,2mA max.

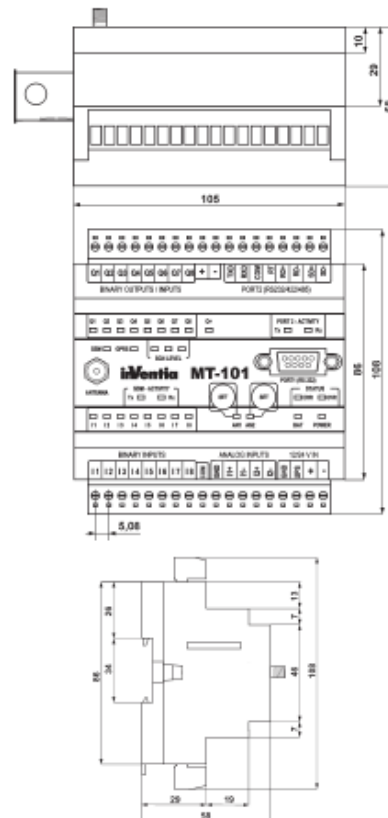
Analog Inputs A1, A2 (4...20 mA)

Input current	4 ... 20 mA
Maximum input current	50 mA max.
Dynamic input impedance	25Ω typ.
Voltage drop at 20mA	< 5V max.
A/D converter	10 bits
Accuracy	+/-1,5% max.
Nonlinearity	+/-1% max.

Configuration utility



Drawings and dimensions (in millimeters)



Additional info:

inventia

INVENTIA Sp. z o.o.

ul. Kulczyńskiego 14, 02-777 Warszawa, POLAND
tel.: +48 22 641-31-30, 641-27-26, fax: +48 22 643-14-21
info@telemetria.pl, www.telemetria.pl



INVENTIA complies with ISO 9001:2000 certified Quality Management System
This project is co-financed by EUROPEAN UNION from the European Regional Development fund resources.

8-Channel Analog Input Module CE Model ADAM-4017

The ADAM-4017 is a 16-bit, 8-channel analog input module that provides programmable input ranges on all channels. This module is an extremely cost-effective solution for industrial measurement and monitoring applications. 3000VDC optical isolation between the analog input and the module protects the module and peripherals from damage due to high input-line voltages.

It offers signal conditioning, A/D conversion, and RS-485 communication functions. The module protects peripheral equipment from ground loops and power surges by providing optical isolation of the A/D input and transformer based isolation up to 3000 VDC.

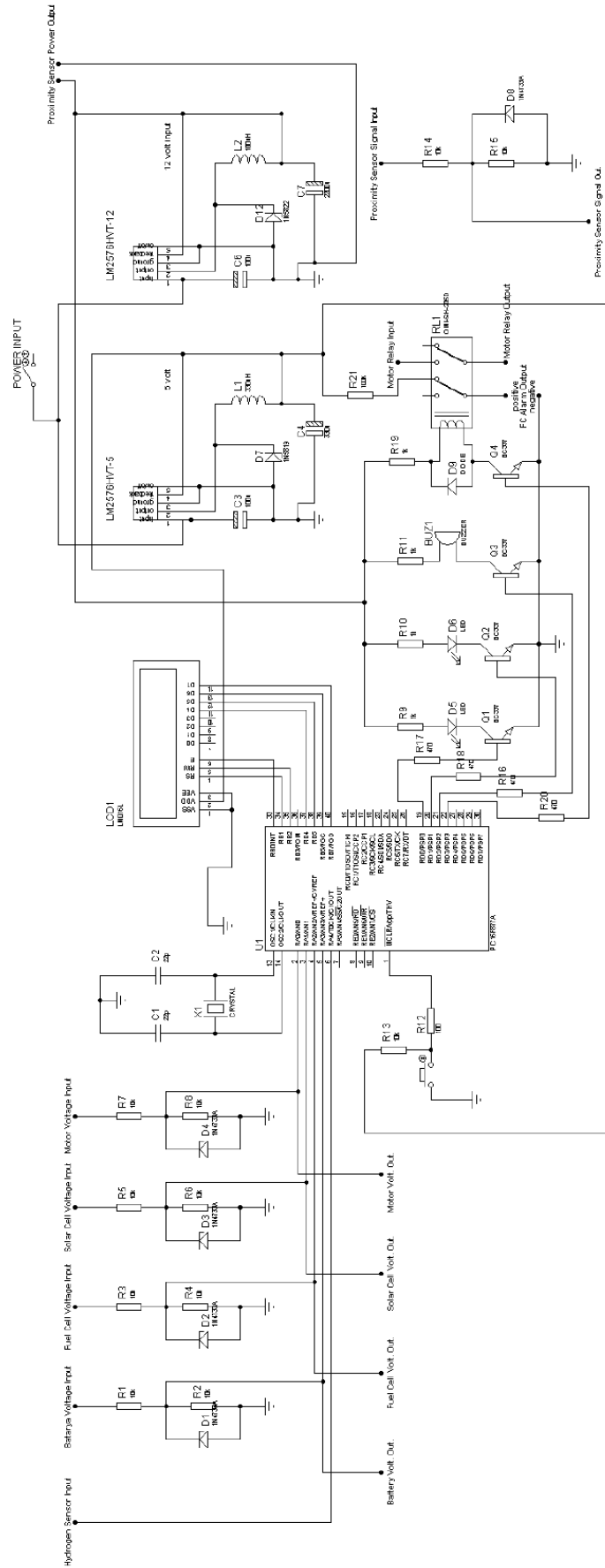
The ADAM-4017 uses a 16-bit microprocessor-controlled sigma-delta A/D converter to convert sensor voltage or current into digital data. The digital data is then translated into engineering units. When prompted by the host computer, the module sends the data to the host through a standard RS-485 interface.



Specifications:

Effective Resolution:	16-bit
Channels:	6 differential, 2 single-ended
Input Type:	mV, V, mA
Input Range:	± 150 mV, ± 500 mV, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V, ± 20 mA
Isolation Voltage:	3000 VDC
Fault and Over Voltage Protection:	Withstands over voltage up to ± 35 V
Sampling Rate:	10 samples per second (total)
Input Impedance:	20M ohms
Bandwidth:	13.1 Hz @ 50 Hz, 15.7 Hz @ 60 Hz
Accuracy:	$\pm 0.1\%$ or better
Zero Drift:	± 6 μ V per degree Celsius
Span Drift:	± 25 ppm per degree Celsius
CMR @ 50/60 Hz:	92 dB min.
Communication Output:	RS-485 (2-wire)
Baud Rate:	1200, 2400, 4800, 9600, 19.2K, 38.4K, 57.6K, 115.2K
Data Format:	8 data bits, no parity, 1 stop bit (asynchronous)
Operating Temperature:	14 to 158°F (-10 to 70°C)
Storage Temperature:	-13 to 185°F (-25 to 85°C)
Humidity:	0 to 95% (non-condensing)
Power:	Unregulated 10-30 VDC (1.2 watts)
Compliances:	FCC Class A and CE marked

Ek 5 Elektronik kontrol kartının teknik şeması



Ek 6 Metal hidrür tüpün teknik bilgileri

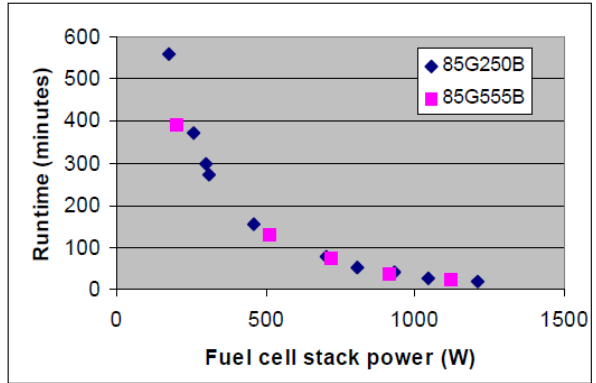
**Ovonic® Solid Hydrogen Storage Canister
Model 85G250B-NPT / 85G555B-NPT**



Shown with optional lifting ring and quick-connect coupling. Actual appearance may vary.

Technical Specifications		
	Standard high-capacity model 85G250B-NPT	International "air-shippable" model 85G555B-NPT
Hydrogen storage capacity, nominal	80 grams / 900 std. liters (condition dependent)	76 grams / 850 std. liters (condition dependent)
Diameter	3.5 in. / 89 mm	
Length	15.1 in. / 384 mm (16.5 in. / 419 mm w/ coupling)	
Weight	14 lbs. / 6.5 kg	
Rated discharge	6 slpm / 600 watts	
Re-filling	Charges in approximately 8 hours at 250psig in flowing ambient air.	
Operating temperature	32-167°F / 0-75°C	
Storage temperature	-20-130°F / -29-54°C	
		*for air shipment, all hydrogen must be desorbed

Typical desorption performance in RT air flowing at 6 m/sec

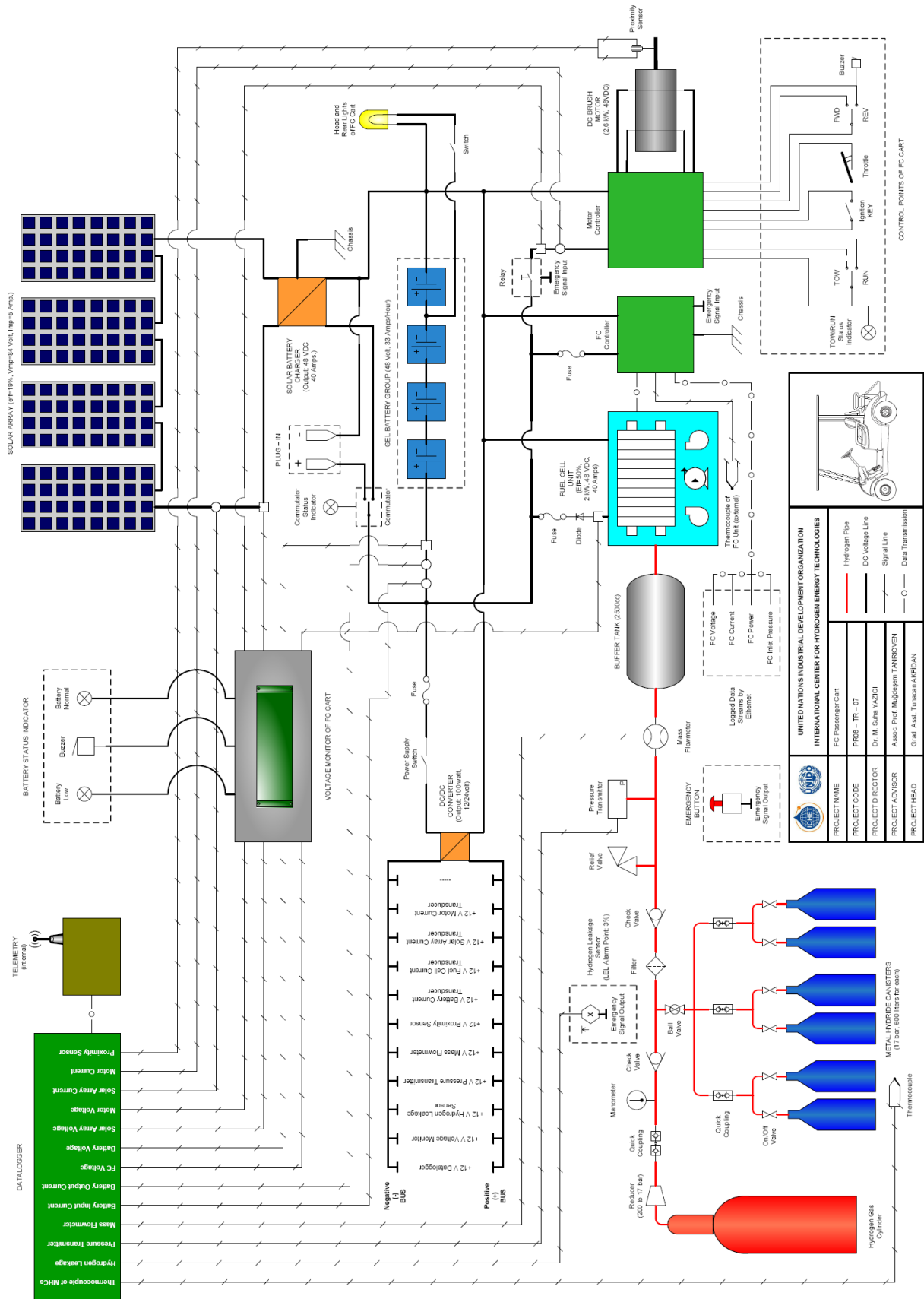


Ovonic Hydrogen Systems LLC
A Subsidiary of Energy Conversion Devices, Inc.

2983 Waterview Drive, Rochester Hills, MI 48309
Tel: (248) 293-8772 Fax: (248) 299-4520
www.ovonic-hydrogen.com

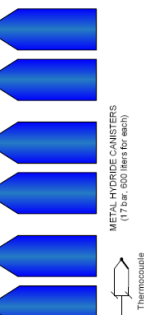
09/09

Ek 7 Hibrid yakıt pilli elektrikli araç sisteminin devre şeması



PROJECT NAME	FC Passenger Cart
PROJECT CODE	PHS-TR-07
PROJECT DIRECTOR	Dr. M. Sula YAZICI
PROJECT ADVISOR	Assoc. Prof. M. Mehmet KARAOBEN
PROJECT HEAD	Grad. Asst. Turkan AMFIDAN

	Hydrogen Pipe
	DC Voltage Line
	Signal Line
	Data Transmission



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.11.1983	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1997-2001	Çapa Anadolu Öğretmen Lisesi
İng. Hazırlık	2003-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi, Yabancı Diller Yüksek Okulu, Hazırlık Sınıfı
Lisans	2004-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fak., Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2008-2010	Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Müh.liği, Elektrik Tesisleri A.B.D.

Çalıştığı kurumlar

2008-2010	UNIDO – ICHET (Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü – Uluslararası Hidrojen Teknolojileri Merkezi)
-----------	---

