

768508

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YAKIT PİLLERİ VE TAŞITLARDAKİ UYGULAMALARI

Mak. Müh. İrem DENİZLİ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan DENİZ

PROF. DR. H. ERTUĞRUL ARSLAN

DOÇ. DR. ŞÜKRÜ BEKDEMİR

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. YAKIT PİLİ PARÇALARI ve PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	4
2.1 Genel Dizayn Özellikleri.....	4
2.2 Yakıt Pilleri ve İçten Yanmalı Motorların Karşılaştırılması.....	6
2.3 Yakıt Pili Bir Taşıtta Bulunan Bölümler.....	8
2.3.1 Hidrojen Deposu.....	8
2.3.2 Yakıt Pili Demetleri.....	8
2.3.3 Akü.....	8
2.3.4 Hava Kompresörü.....	9
2.3.5 Güç Kontrol Ünitesi (PCU).....	9
2.3.6 Elektrik Motoru.....	9
2.4 Yakıt Pili Performansı : MEA ve Akım/Voltaj Eğrisi.....	9
3. YAKIT PİLİ TİPLERİ.....	12
3.1 Erimiş Karbonat Yakıt Pili.....	13
3.1.1 Avantajları.....	13
3.1.2 Dezavantajları.....	14
3.1.3 Reaksiyon.....	14
3.2 Katı Oksitli Yakıt Pilleri.....	15
3.2.1 Avantajları.....	16
3.2.2 Dezavantajları.....	17
3.2.3 Reaksiyon.....	17
3.3 Alkali Yakıt Pilleri.....	18
3.3.1 Avantajları.....	19
3.3.2 Dezavantajları.....	19
3.3.3 Reaksiyon.....	19
3.4 Fosforik Asit Yakıt Pilleri.....	20

3.4.1	Avantajları.....	21
3.4.2	Dezavantajları.....	21
3.4.3	Reaksiyon.....	21
3.5	Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) Yakıt Pilleri.....	22
3.5.1	Avantajları.....	22
3.5.2	Dezavantajları.....	23
3.5.3	Reaksiyon.....	23
3.6	Direkt Metanol Yakıt Pilleri.....	24
3.7	PEM Yakıt Pili Demet Yapısı.....	24
3.7.1	Membran Elektrot Kiti (MEA).....	27
3.7.2	Akış Alanı Plakaları.....	29
3.7.3	Nemlendiriciler.....	30
3.8	PEM Yakıt Pili Performansı.....	31
3.8.1	Verim.....	31
3.8.2	Kutuplaşma Özellikleri.....	34
3.8.3	Güç Özellikleri.....	35
3.8.4	Sıcaklık ve Basıncın Etkileri.....	36
3.8.5	Stokiyometrik Etkiler.....	38
3.8.6	Nemin Etkileri.....	39
4.	YAKIT PİLİ SİSTEMLERİ.....	41
4.1	Sistem Tanımları.....	41
4.1.1	Hava Sistemi.....	41
4.1.2	Yakıt depolama sistemi.....	42
4.1.3	Yakıt Dağıtım Sistemi.....	45
4.1.4	Nemlendirme Sistemi.....	45
4.1.5	Demet Soğutma Sistemi.....	46
4.1.6	Otobüs Soğutma Sistemi.....	47
4.1.7	Isıtma ve havalandırma sistemi (HVAC).....	49
4.1.8	Yağlama Sistemi.....	49
4.1.9	Hidrolik Sistem.....	50
4.1.10	Elektrik Sistemi.....	51
5.	YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNDE YAKIT PROBLEMİ.....	54
5.1	Yakıt Seçenekleri.....	54
5.1.1	Saf Hidrojen.....	55
5.1.2	Hidrojen Zengin Yakıtlar.....	55
5.1.3	Yakıttan Hidrojen Üretim Birimi (Reformer).....	57
5.2	Mevcut Hidrojen Depolama Teknolojisi.....	62
5.2.1	Basınç Silindirleri.....	63
5.2.2	Sıvı Hidrojen.....	64
5.2.3	Metal Hidritler.....	66
6.	YAKIT PİLİ İLE ÇALIŞAN TAŞITLARIN AVANTAJ ve DEZAVANTAJLARI...68	
6.1	Avantajlar.....	68
6.2	Dezavantajlar.....	68
6.3	Güvenlik.....	69

6.3.1	Hidrojen Kaçakları.....	69
6.3.2	Yüksek Sıcaklık.....	73
6.3.3	Yüksek Basınç.....	73
6.3.4	Elektrik Şoku.....	75
6.3.5	Kimyasal Bileşenler.....	76
6.3.6	Fiziksel Kazalar.....	77
7.	YAKIT PİLİ MALİYET ANALİZİ.....	78
7.1	Yakıt Pili Hesaplamaları.....	78
7.2	1 MW'lık Yakıt Pili İçin Gereken Yakıt Miktarı.....	78
7.3	Pil Alanı ve Gerekli Yakıt Pili Demeti Adedi.....	79
7.4	Metan Dönüştürücü.....	80
7.5	DC ve AC Arasında Dönüştürme.....	81
8.	DÜNYADA YAKIT PİLLERİNİN TAŞITLARDAKİ UYGULAMALARI.....	83
8.1	General Motors, Opel ve Suzuki.....	84
8.1.1	Teknoloji ve Ortaklık.....	84
8.1.2	Yolcu Arabaları.....	84
8.2	Toyota ve Daihatsu.....	86
8.2.1	Teknoloji ve Ortaklık.....	86
8.2.2	Yolcu Arabaları.....	86
8.3	Ballard Güç Sistemleri, Daimler Chrysler, Ford ve Mazda.....	88
8.3.1	Teknoloji ve Ortaklık.....	88
8.3.2	Daimler Chrysler.....	88
8.3.3	Ford.....	92
8.3.4	Mazda.....	99
8.4	Nissan.....	101
8.5	Honda.....	102
8.6	Hyundai.....	105
8.7	Diğer Otomotiv Üreticileri.....	105
8.7.1	Fiat.....	105
8.7.2	Mitsubishi.....	106
8.7.3	PSA (Peugeot, Citroen).....	106
8.7.4	Renault.....	107
8.7.5	Volkswagen.....	107
9.	TÜRKİYE'DE YAKIT PİLİ UYGULAMALARI.....	107
10.	SONUÇLAR.....	113
	KAYNAKLAR.....	116
	ÖZGEÇMİŞ.....	117

SİMGE LİSTESİ

••	Hava yoğunluğu
A	Alan
A	İvme
A_F	Taşıt alanı
AY	Akım yoğunluğu
C_D	Hava direnci katsayısı
C_R	Yuvarlanma direnci katsayısı
ϵ_{pil}	Pil gerilimi
G	Yerçekimi katsayısı
ΔG°	Gibbs serbest enerji
I	Akım
M	Taşıt kütlesi
m_{H_2}	1 kA akım için gerekli olan hidrojen miktarı
n_{H_2}	Bir saatte tüketilen hidrojenin molü
P	Güç
P_{aux}	Taşıttaki aksesuarlar için gerekli güç
T_1	Emme gazlarının mutlak sıcaklığı
T_2	Egzos gazlarının mutlak sıcaklığı
U_f	Yakıt kullanım oranı
V	Gerilim
V	Hız

KISALTMA LİSTESİ

GM	General Motors
HVAC	Isıtma ve havalandırma
ICHET	Birleşmiş Milletler Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi
LFL	Alt tutuşma limiti
MEA	Membran-elektrot kiti
PCU	Güç kontrol ünitesi
PEM	Polimer Elektrolit Membran
SULEV	Süper ultra düşük emisyonlu taşıt
TTGV	Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı
UNIDO	Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü
ZEV	Sıfır emisyonlu taşıt



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Yakıt pili şeması.....5
Şekil 2.2	Yakıt pili demeti.....6
Şekil 2.3	İçten yanmalı motorlar, elektrikli taşıtlar ve yakıt pilli taşıtların karşılaştırılması.....7
Şekil 2.4	Yakıt pilli bir taşıtın şeması.....8
Şekil 2.5	Yakıt pili parametrelerine göre işletme şartlarının esnekliği.....11
Şekil 3.1	Erimiş karbonat yakıt pili şeması.....13
Şekil 3.2	Katı oksitli yakıt pili, tüp şeklinde dizayn.....16
Şekil 3.3	Alkali yakıt pili şeması.....18
Şekil 3.4	Fosforik asit yakıt pili şeması.....20
Şekil 3.5	PEM yakıt pili şeması.....22
Şekil 3.6	PEM yakıt hücresi demeti.....26
Şekil 3.7	PEM yakıt pili MEA.....27
Şekil 3.8	PEM yakıt hücresi zarı.....28
Şekil 3.9	PEM Akış alanı plakaları.....29
Şekil 3.10	PEM yakıt hücresi demeti oluşturulurken.....30
Şekil 3.11	PEM kutuplaşma eğrisi.....34
Şekil 3.12	PEM güç eğrisi.....36
Şekil 3.13	Çeşitli kutuplaşma eğrileri.....37
Şekil 3.14	Yakıt pili voltajına sıcaklığın etkileri.....38
Şekil 3.15	Yakıt pili voltajına stokiyometrinin etkileri.....39
Şekil 4.1	Hava akış sistemi.....42
Şekil 4.2	Yakıt depolama sistemi.....43
Şekil 4.3	Hidrojen depolama silindirleri.....43
Şekil 4.4	Depolama sistemi.....44
Şekil 4.5	Yakıt dağıtım sistemi45
Şekil 4.6	Nemlendirme sistemi akış diyagramı.....46
Şekil 4.7	Demet soğutma sistemi akış diyagramı.....47
Şekil 4.8	Otobüs soğutma sistemi akış diyagramı.....48
Şekil 4.9	HVAC sistemi akış diyagramı.....49
Şekil 4.10	Yağlama sistemi akış diyagramı.....50
Şekil 4.11	Hidrolik sistemi akış diyagramı.....51
Şekil 4.12	Elektrik sistemi.....52
Şekil 4.13	Transmisyon.....53
Şekil 5.1	Hidrojenin taşıt deposuna doldurulması.....55
Şekil 5.2	Metanolden hidrojen dönüştürücüsü.....56
Şekil 5.3	Bir GM yakıt pili demeti.....57
Şekil 5.4	Buharla dönüştürme şeması.....60
Şekil 5.5	Kısmi oksidasyon dönüştürme şeması.....61
Şekil 5.6	Ototermal dönüştürücü şeması.....62
Şekil 5.7	%50 yer kazancı sağlayan basınç tankları.....64
Şekil 5.8	BMW içten yanmalı motorlarda kullanılan hidrojen deposu.....66
Şekil 5.9	Münich Havaalanı; krojenik dolum istasyonu.....67
Şekil 5.10	MINI Cooper Hidrojen deposu.....67

Şekil 8.1	HydroGen 1 yakıt pilli taşıt. 2000 yılında GM ve Opel tarafından geliştirildi.....	86
Şekil 8.2	Daimler Chrysler yakıt pilli taşıtları.....	89
Şekil 8.3	Daimler Chrysler yakıt pilli taşıtı NeCar 5.....	92
Şekil 8.4	Daimler Chrysler yakıt pilli otobüsü NEBUS.....	92
Şekil 8.5	Daimler Chrysler F-Cell yakıt pilli taşıtı.....	93
Şekil 8.6	Ford Focus yakıt pilli taşıtının şeması.....	94
Şekil 8.7	Ford yakıt pilli taşıtının hidrojen deposu.....	95
Şekil 8.8	Ford yakıt pilli taşıtının hidrojen doldurma kapağı.....	96
Şekil 8.9	Ford yakıt pilli taşıtının yakıt pili demeti.....	98
Şekil 8.10	Ford P2000 yakıt pilli taşıtı.....	99
Şekil 8.11	Mazda Demio yakıt pilli taşıtı.....	101
Şekil 8.12	Mazda Premacy yakıt pilli taşıtı.....	102
Şekil 8.13	Honda FCX yakıt pilli taşıtı.....	103
Şekil 8.14	Honda FCX'in yakıt pili demeti.....	104
Şekil 8.15	Yakushima / Japonya, hidrojen istasyonu.....	105
Şekil 8.16	Fiat Panda yakıt pilli taşıtı.....	107
Şekil 8.17	Volkswagen yakıt pilli taşıtının yakıt pili birimi.....	109



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1	Yakıt pili tiplerinin karşılaştırılması.....25
Çizelge 5.1	Yakıtların, değişik dönüştürücü tiplerine göre verimleri.....58
Çizelge 8.1	Metanol yakıtlı GM Zafira'sının teknik bilgileri.....86
Çizelge 8.2	GM HydroGen 1 taşıtının teknik bilgileri.....87
Çizelge 8.3	GM HydroGen 3 taşıtının teknik bilgileri.....87
Çizelge 8.4	Toyota FCHV-3'ün teknik bilgileri.....88
Çizelge 8.5	Toyota FCHV-5'ün teknik bilgileri.....88
Çizelge 8.6	Daihatsu Move FCV K II'nin teknik bilgileri.....88
Çizelge 8.7	Daimler Chrysler NeCar 1'in teknik bilgileri.....90
Çizelge 8.8	Daimler Chrysler NeCar 2'nin teknik bilgileri.....90
Çizelge 8.9	Daimler Chrysler NeCar 3'ün teknik bilgileri.....90
Çizelge 8.10	Daimler Chrysler NeCar 4'ün teknik bilgileri.....91
Çizelge 8.11	Daimler Chrysler NeCar 4'ün geliştirilmiş versiyonunun teknik bilgileri.....91
Çizelge 8.12	Daimler Chrysler NeCar 5'in teknik bilgileri.....91
Çizelge 8.13	Daimler Chrysler NeBUS yakıt pilli otobüsünün teknik bilgileri.....92
Çizelge 8.14	Mazda Demio'nun teknik bilgileri.....101
Çizelge 8.15	Mazda Premacy'nin teknik bilgileri.....101
Çizelge 8.16	Nissan R'nessa'nın teknik bilgileri.....102
Çizelge 8.17	Nissan Xterra yakıt pilli taşıtının teknik bilgileri.....103
Çizelge 8.18	Hyundai Santa Fe yakıt pilli taşıtının teknik bilgileri.....106

ÖNSÖZ

Fosil yakıtların yerini alacak, geleceğin enerji kaynağı olarak düşünülen yakıt pilleri, otomotiv endüstrisinde de geniş bir uygulama alanı bulacaktır. Halen araştırma aşamasında olan bu teknolojinin geliştirilip günlük hayata geçirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. Türkiye’de de yakın gelecekte test taşıtları uygulamaya konulacaktır.

“Yakıt Pilleri ve Taşıtlardaki Uygulamaları” konulu çalışmada yakıt pilleri hakkında temel bilgilere ve otomotiv sektöründeki araştırmalara yer verilmiştir. Bu endüstrinin ticari olarak kullanıma geçirilmesi için kimi araştırmacılara göre en az on sene olmasına rağmen, geliştirme çalışmaları çok hızlı bir şekilde ilerlemektedir.

Yakın gelecekte yakıt pilli taşıtlar, yollarda içten yanmalı motorların yerini alacaktır. Bu konudaki araştırma ve incelemeler ışığında hazırladığım yüksek lisans tezimde bana yol gösterip, yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Orhan DENİZ’e teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla,



ÖZET

Hidrojen ile çalışan yakıt pilli taşıtlar otomotiv sektörünün geleceğidir. Dünyada fosil yakıtlar tükenmek üzere olduğundan; hidrojen, yeni enerji taşıyıcı olarak önem kazanmıştır.

Bir yakıt pili, hidrojen ve oksijen arasındaki elektro kimyasal reaksiyondan direkt olarak elektrik üretir. Yakıt pilleri çok verimlidir. Yakıtın % 40-60 enerjisini kullanarak bir arabayı düşük veya sıfır emisyon ile çalıştırabilirler. Saf hidrojen ile çalışan bir yakıt pilinin egzoz ürünü sadece su buharıdır.

Kullanıma sunulmadan önce, yakıt pili teknolojisi geliştirilmelidir. Geliştirilmekte olan konular, hidrojen depolama, hidrojen elde edilmesi, yakıt dağıtım alt yapısı, maliyet ve dönüştürücü kullanıldığı zaman daha hızlı ilk çalışmadır.

Bir yakıt pili tipi olan PEM, adını polimer elektrolit membrandan alır. PEM yakıt pilleri, ulaşım uygulamaları için daha uygundur.

Anahtar Kelimeler: Yakıt pilleri, hidrojen, ulaşım, PEM yakıt pilleri.



ABSTRACT

Fuel cell vehicles are the future of automotive sector, which are powered by hydrogen. As the fossil fuels run out on earth, hydrogen gets important as the new energy carrier.

A fuel cell produces electricity directly from the electrochemical reaction between hydrogen and oxygen. Fuel cells are very efficient. They can capture % 40-60 of a fuel's energy to power a car with low or zero emission. A fuel cell vehicle running on pure hydrogen emits only water vapor.

Fuel cell technology needs to be improved before being commercial. The issues under development are, storage of hydrogen, supplying hydrogen, the infrastructure of fuel delivery systems, hydrogen economy and quicker start-ups while using reformers.

PEM, is a type of fuel cell which is named after polymer electrolyte membrane. PEM fuel cells are more suitable for transportation applications.

Keywords: Fuel cells, hydrogen, transportation



1. GİRİŞ

Yakıt pilleri üzerine yapılan çalışmalar 1800'lere kadar uzanır. 1839 yılında, William Grove; suyun elektrolizi ile hidrojen ve oksijenden elektrik elde ederek; yakıt pillerinin temel çalışma prensibini bulmuştu. Bulduğu bu prensip günümüzde halen geçerliliğini korumaktadır.

Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyici verildiği sürece, devamlı olarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine (bir miktar da ısı enerjisine) dönüştüren bir cihazdır.

Yakıt pilleri, bu nedenle, elektrokimyasal güç üretim prosesi benzerliğinden pillere; yakıt tüketerek (pillerden farklı olarak) devamlı çalışma bakımından motorlara benzemektedirler.

Pillerden ve motorlardan farklı olarak ise, yakıt pilleri tekrar şarj edilme ihtiyacı duymaz, sessiz ve verimli olarak çalışır; yakıt olarak hidrojen kullanıldığı sürece de sadece enerji ve içme suyu üretirler. Dolayısıyla, sıfır emisyon motor olarak adlandırılmaktadırlar. Termodinamik açısından, en önemli farklılıkları, termik makineler Carnot verimi ile sınırlandığı halde, yakıt pillerinde böyle bir sınırlama yoktur.

Grove'un yakıt pili, saf sülfürik aside daldırılmış platinyum elektrotlardan oluşmuş çok hassas bir aygıttı. O zamandan günümüze yakıt pili teknolojisi heyecan verici fakat yavaş ve dolambaçlı bir yol izlemiştir.

Yakıt pilleri ilk olarak 1960'larda Apollo ve Gemini uzay mekiklerinde elektrik elde etmek için kullanılmıştır. O günlerde yapılan yoğun çalışmaların neticeleri günümüzde hala geçerli olup modern yakıt pilleri teknolojilerinde kullanılmaktadır.

Yakıt pilleri günümüzde, ulaşım, enerji santralleri ve taşınabilir cihazlarda uygulama alanı bulmaktadır. Bu çalışmada, ulaşım sektöründeki uygulamaları incelenecektir.

Ulaşım sektöründe, yakıt pilleri, içten yanmalı motorların yerini alabilecek en önemli adaydır. Termik makinelerin aksine elektrokimyasal oldukları için yüksek verimlidirler. Dolayısıyla, temel enerji tüketimini ve CO₂ emisyonu oluşumunu azaltırlar. Yakıt pillerini, ulaşım sektöründe cazip yapan en önemli özellik, sıfır veya çok düşük emisyonuna sahip olmalarıdır. Bu özellik, bir çok önde gelen otomotiv firmasını 1980 ve 1990'larda yakıt pillerini geliştirmeye yöneltmiştir. Üç yönlü katalitik konvertör taşıt emisyonlarını düşürmede bir kilometre taşı olsa da, taşıt üreticileri görmüşlerdir ki, emisyonları daha fazla azalmak gerçekten çok zor bir adım olacaktır. Dolayısıyla anlaşılmıştır ki, elektrikli taşıtlar, sıfır emisyon elde etmenin tek çözümüdür.

Bununla beraber, elektrikli taşıtlardaki akülerin depolama kapasitesi, içten yanmalı motorların sunduğu sürüş menziline sağlayamamaktadır.

Ne yazık ki, yakıt pilleri hakkındaki kamusal görüş, bir hayale dönüşüp, mucizevi beklentiler oluşmuş, yakıt pillerinin fosil yakıtlardan tamamen bağımsız ve yakıt pilli taşıtların bir depo su ile çalışabileceği görüşü oluşmuştur.

İlk olarak yakıt pilli otobüsler üzerinde çalışıldığında, görülmüştür ki, piyasaya en çabuk girebilecek yakıt pilli uygulamaları, hidrojen depolama sorunu olmayan otobüslerdir. Açıkça görülmektedir ki, yakıt pilleri, otomotiv sektöründe kendine çok geniş uygulama alanı bulabilecektir.

Yakıt pilleri, elektrolit kullanımına göre karakterize edilip adlandırılırlar. Bütün yakıt pillerinin çalışma prensibi aynıdır. Anodda, yakıt (genellikle hidrojen) elektron ve protonlarına ayrılır ve katodda oksijen bunları okside etmek için azalır. Elektrolite bağlı olarak, ya protonlar ya da oksit iyonları, karşı tarafa geçerek, diğer oksit iyonları veya protonlar ile birleşerek; su ve elektrik oluşturur.

Fosforik asit yakıt pilleri, elektrolit olarak erimiş H_3PO_4 kullanır ve $200^{\circ}C$ 'de çalışırlar. Bu yakıt pilleri orta ölçekli enerji sistemleri için geliştirilmektedir. Diğer iki düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri, alkali yakıt pilleri ve polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri ile karşılaştırıldığında, fosforik asit yakıt pilleri orta dereceli akım yoğunlukları elde ederler.

Alkali yakıt pilleri, bütün yakıt pilleri tipleri arasında en eski tarihe sahiptir. Bu teknoloji, 1930'da F.T. Bacon tarafından geliştirilmiş ve uzay mekiği Apollo'nun aya gitmesini sağlamıştır. Alkali yakıt pillerinin en büyük sorunu, CO_2 soğuran NaOH ve KOH elektrolitleri kullanmasıdır, bu da elektrolit geçirgenliğini azaltır. Dolayısıyla alkali yakıt pilleri uzay taşıtlarında kullanılmaktadır. Alkali yakıt pillerinin taşıtlardaki uygulamalarını geliştirmek için 1990'larda bazı çalışmalar yapılmış, fakat başarılı olunamamıştır. Diğer alkali yakıt pilli çalışmaları, kamyon ve teknelerde yapılmaktadır. Alkali yakıt pillerinin en büyük avantajı, nispeten ucuz olmasıdır.

Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri adını, elektrolit olarak kullandığı özel plastik zardan almaktadır. Bu geçirgen zarlar, klor-alkali endüstrisi için DuPont tarafında geliştirilmiş ve yakıt pillerinin bütün ana parçalarıyla başarıyla kullanılabilceğini kanıtlamıştır. Zar elektrolit demeti, birkaç yüz mikrondan büyük olmayıp, polimer elektrolit membranlı yakıt pillerinin kalbini oluşturur. Yakıt ve hava ile beslendiğinde; 1 Volt'luk ve $1 Wcm^{-2}$ yoğunluğunda elektrik enerjisi üretebilmektedir. Bu zar, protonları efektif olarak geçirmek için sıvı suya

ihtiyaç duyar; bu nedenle bu tip yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı 100°C'a kadardır. İyi bir performans elde etmek için elektro-katalizör teknolojisine ihtiyaç duyar. Katalizörler, zarin her iki yanında gaz geçirgen elektrot tabakaları oluşturur. Polimer elektrolit membran, bir çift akım kollektörü arasına yerleştirilmiştir ve yakıt oksitleyiciyi anod ve katoda taşıyan akış alanları ile donatılmıştır. Her iki reaksiyon bileşeninin akış alanına metalik akım toplayıcı levha ile su soğutma kanalları konulabilir. Yakıt piline ayrıca, zarı nemli tutmak için, nemlendirici bir bölüm eklenebilir. Gemini uzay programında elektrik kaynağı olarak kullanılan bu tip yakıt pilleri, 1990'ların başında Ballard Power Systems tarafından tekrar hayata geri döndürülmüştür. Ballard, Mark 5 yakıt pili demetini geliştirmiş, bu sistemde, 5 kW güç ve demet hacminin bir litresi başına 0.2 kW güç yoğunluğu elde edilmiştir. Mark 900 demeti, Ballard ve Daimler Chrysler tarafından 1990'ların sonunda geliştirilmiş ve güç yoğunluğu 1 kW/l'te kadar çıkarılmıştır. 75 kW'luk güç çıkışı ile bu yakıt pili demeti, taşıtlar için hedef performansa ulaşmıştır.

İki tip yüksek sıcaklıklı yakıt pili, katı oksitli ve erimiş karbonat yakıt pilleri, büyük ölçekli enerji santralleri için geliştirilmektedir. Bu iki tip yakıt pilinin, düşük sıcaklıklı yakıt pillerine göre iki önemli avantajı vardır. Öncelikle, yüksek elektrik verimi elde edebilirler; protiplerde %45 verim elde edilmiş ve %60 hedeflenmiştir. Bu özellikleriyle elektrik santralleri için çok caziptirler. İkinci olarak, doğal gaz gibi yakıtların direkt olarak kullanılmasına izin vermektedirler. Böylece, düşük sıcaklıklı yakıt pillerinden farklı olarak, daha az karmaşık bir sistem kullanılabilir. Yüksek sıcaklı yakıt pillerinin çalışmasının durulmasının kolay olmaması bakımından da sadece elektrik santrallerinde kullanılmaları avantajlıdır.

Hiç kuşku yok ki, yakıt pillerinin yakıt sorununun en iyi çözümü, yakıt pillerini sıvı yakıt ile çalışmasını sağlamaktır; bu özellikle ulaşım ve taşınabilir uygulamalar için önemlidir. Direkt metanol yakıt pilleri, bir sıvı –veya buhar- besleyicili polimer elektrolit membranlı yakıt pildir; metanol su karışımı ve hava ile çalışır, dolayısıyla özel bir dikkat gerektirir.

Yakıt pilleri ile ilgili olarak halen geliştirilmesi gereken konular; daha iyi anod katalizörleri, zarların ve katod katalizörlerinin katod zehirlenmesini önlemesi için iyileştirilmesi ve metanolün anoddan katoda giderken ki kayıplarının azaltılmasıdır. Şu anki direkt metanol yakıt pilleri, pratik çalışma şartları ve kabul edilebilir platinyum kullanımı altında olmasa da 0.2 Wcm⁻² elektrik gücüne sahiptirler.

2. YAKIT PİLİ PARÇALARI ve PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

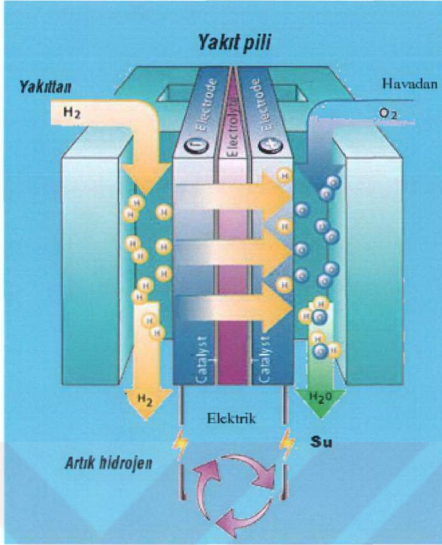
Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri, basit sistemi ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle, binek araçlara enerji sağlamak için en büyük adaydır. Bir yakıt pilinin parçalarını ve performansını PEM yakıt pili örnek alarak incelenecektir.

2.1 Genel Dizayn Özellikleri

Yakıt pilleri, basit bir elektro-kimyasal reaksiyon sonucunda elektrik üretirler. Bu reaksiyon sonucunda da hidrojen ve oksijenin birleşmesiyle su meydana çıkar. Yakıt pillerinin çalışma prensibi elektro-kimyasal pillerinkiyle aynıdır. Yakıt pilleri ve pillerin çalışma prensipleri arasındaki en büyük fark; pillerde kimyasal enerji, içindeki maddelerde depolanmaktadır, dolayısıyla kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüştürülünce, pil ya tekrar şarj edilmelidir ya da atılmalıdır. Yakıt pillerinde ise kimyasal enerji, yakıt pilinin dışında depolanan yakıt ve yakıcı madde tarafından sağlanır. Yakıt ve yakıcı madde sağlandığı sürece elektrik ve ısı olarak enerji üretmeye devam ederler (Hoogers, 2003).

Yakıt pilleri, bir elektrolit etrafında bulunan iki elektrottan oluşur; negatif anod ve pozitif katod. Hidrojen yakıtı, yakıt pilinin anodunu besler. Oksijen (hava) ise yakıt piline katoddan girer. Bir katalizör tarafından harekete geçirilerek, hidrojen atomu, ayrı yollar izleyen bir proton ve bir elektrona ayrılır. Protonlar katoda doğru elektrolitten geçer. Elektronlar, bir dış devreden geçerek akım meydana getirirler.

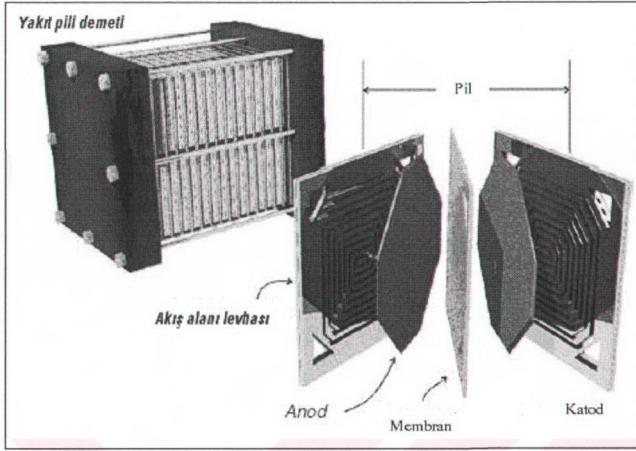
Bu elektrotlardan birine oksijen ötekine de hidrojen verilir. Doğal olarak birleşme eğilimindeki iki gazın arasındaki zar, birleşme sürecini değiştirir. Bu zar yalnızca hidrojen atomu çekirdeklerinin (tek proton) geçmesine izin verir. Elektronlarsa elektrotta kalmaktadır. Böylece bu elektrot (anod) eksi yüklenir. Öte yandan karşı tarafa geçen protonlar da o elektrotu (katod) artı yüklere. Bu iki elektrot arasında kurulan bir elektrik devresinde de akım oluşur. Bu olayın yan ürünü olarak oksijenin hidrojenle birleşmesinin sonucunda su ortaya çıkar.



Şekil 2.1 Yakıt pili şeması [9]

Yakıt pillerinde yakıt olarak genellikle sıvı hidrojen kullanılmaktadır. Hidrojen, uygun katalizörlerle yüksek tepkime, hidrokarbonlardan üretilbilme ve krojenik sıvı olarak depolandığında yüksek enerji yoğunluğu özelliklerine sahiptir. En yaygın oksitleyici ise havadan kolaylıkla ve ucuz olarak elde edilen ve depolanabilen oksijendir. Reaksiyon bileşenlerinin, elektrolitin ve geçirgen elektrot bölgesindeki katalizör arasında 3 aşamalı ara yüzey mevcuttur. Bu ara yüzeyin tipi yakıt pilinin elektro-kimyasal performansı bakımından , özellikle sıvı elektrolitli olanlarda, çok önemli bir rol oynar. Geçirgen elektrot yapısında elektrot, elektrolit ve gaz safhalarından hassas bir denge kurulmalıdır. Günümüzde yakıt pilleri çalışmalarında en çok üzerinde durulan konu, pil bileşenlerinin kalınlığını elektrot yapısını ve elektrolit evresini geliştirerek azaltmak , devamlı ve yüksek bir elektro-kimyasal performans sağlamaktır (Hoogers, 2003).

Elektrolitin tek görevi ergimiş reaksiyon bileşenleri elektrotta taşımak değildir; aynı zamanda iyonik şarjı geçirerek, elektrotlar arasındaki elektrik devresini tamamlar. Aynı zamanda, yakıt ve oksitleyici arasında bir duvar görevi görür.



Şekil 2.2 Yakıt pili demeti (Hoogers, 2003)

Yakıt pilli taşıtlar, bugünün taşıtlarıyla aynı menzili sağlamaktadırlar.

Yakıt pilli taşıtlarda iki tane soğutma sistemi kullanılmaktadır, biri elektronik teçhizatı ve elektrik motorunu soğutmak için; diğeri ise yakıt pili demetini soğutmak için.

2.2 Yakıt Pilleri ve İçten Yanmalı Motorların Karşılaştırılması

Yakıt pilleri ve içten yanmalı motorlar bir çok ortak özelliğe sahiptir. Her iki sistem de dışarıda bir depodan aldığı yakıtları kullanmaktadır. Bu yakıtlar hidrojen zengindirler. Yakıt pilleri saf hidrojen veya diğeri yakıtlardan dönüştürücü ile elde edilen hidrojen kullanırlar. İçten yanmalı motorlar ise hidrojen içeren fosil yakıtlar ile çalışmaktadır (Hoogers, 2003).

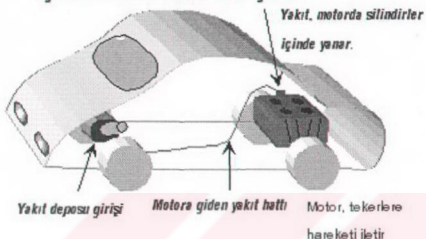
Her iki sistemde; oksitleyici olarak havayı kullanır. Yakıt pillerinde hava; dışarıdan bir kompresör yardımı ile sıkıştırılır; içten yanmalı motorlarda ise; hava piston hareketi ile içinde sıkıştırılır. Her iki sistem de soğutmaya gereksinim duyar.

Diğeri yönlerden yakıt pilleri ve içten yanmalı motorlar temel olarak farklıdırlar. Yakıt pillerinde yakıt ve oksitleyici elektrokimyasal olarak reaksiyona girerken, içten yanmalı motorlarda yanarak reaksiyona girerler. İçten yanmalı motorlar; mekanik enerji üreten mekanik aygıtlardır; yakıt pilleri ise elektrik enerjisi üretirler.

Kirlilik, yakıt bileşenlerine ve reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Saf hidrojenle çalışan yakıt pillerinin zararlı emisyonları yokken; hidrojen zengin yakıtlarla çalışanların emisyonları bir miktar zararlı olabilmektedir. Hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlarda da zararlı emisyonlar olmamakla beraber; fosil yakıtlarla çalışanlar oldukça fazla kirliliğe neden olmaktadır.

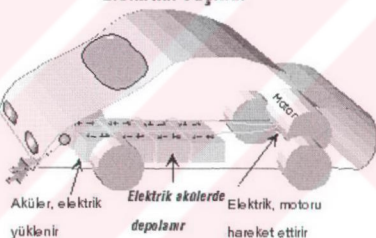
İçten Yanmalı Motorlu Taşıtlar

Yakıtlar:
Benzin
Mazot
Hidrojen
Doğal gaz



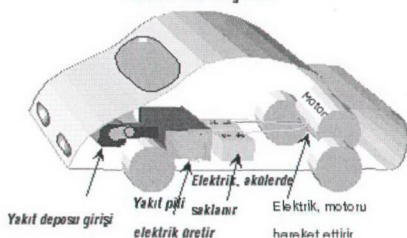
Elektrikli Taşıtlar

Yakıtlar:
Elektrik



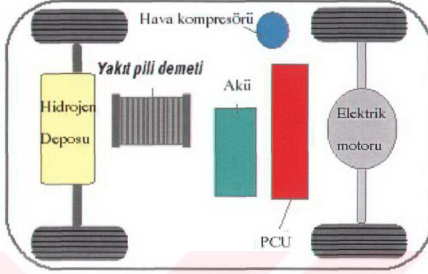
Yakıt Pili Taşıtlar

Yakıtlar:
Hidrojen
Alkol
Benzin
Doğal gaz



Şekil 2.3 İçten yanmalı motorlar, elektrikli taşıtlar ve yakıt pili taşıtların karşılaştırılması [9]

2.3 Yakıt Pili Bir Taşıtta Bulunan Bölümler



Şekil 2.4 Yakıt pili bir taşıtın şeması [9]

2.3.1 Hidrojen Deposu

Yakıt olarak saf hidrojen kullanan yakıt pillerinde, hidrojen genellikle yüksek basınç depolarında gaz olarak saklanmaktadır. Böylece taşıta uygun bir sürüş menzili sağlamak için yeterli yakıt depolanır.

Kullanılan yakıt pilli taşıtların çoğunda yakıt deposu, 3,5 MPa'da hidrojen saklayabilmektedirler. Yüksek basınç depoları halen gelişim aşamasındadır.

2.3.2 Yakıt pili Demetleri

Yakıt pili demetleri, hidrojen gazını ve havayı kullanarak, elektrik motorunu tahrik eden elektrigi üretmektedirler. Bu demetler, yaklaşık 400 birim yakıt pilinden oluşmaktadır.

2.3.3 Akü

Bazı yakıt pilli taşıtlarda yakıt pillerinden elde edilen elektrigi depolamak için akü bulunur. Depolanmış elektrik, elektrik motorunun tahrik edilmesinde ve diğer elektrikli cihazların çalıştırılmasında kullanılabilir.

2.3.4 Hava Kompresörü

Bir yakıt pilinin ürettiği elektrik miktarı, verilen yakıt (hidrojen ve hava) miktarını bağlıdır.

Hava kompresörü, ihtiyaç duyulan güce göre yakıt pili demetine gönderilmesi gereken hava miktarını ayarlar.

2.3.5 Güç Kontrol Ünitesi (PCU)

Güç kontrol ünitesi, elektriğin üretimi ve depolanmasını kontrol eden karmaşık bir elektronik devredir.

2.3.6 Elektrik Motoru

Yakıt pilli taşıta, bir ya da daha çok motor tarafından güç verilebilir. Bazılarında her bir teker için ayrı elektrik motoru bulunur.

Bu elektrik motorları, yakıt pilli taşıtlara günümüzün taşıtlarının hızlarına erişmek için güç vermektedirler.

2.4 Yakıt Pili Performansı : MEA ve Akım/Voltaj Eğrisi

Bir proton geçirgen zarlı yakıt pilinin en küçük birimi MEA, zar elektrot demetidir.

MEAi iki elektrot , anod ve katod, ve polimer elektrolitten oluşur. Anod ve katodun katalizör tabakalarında oluşan elektrokimyasal reaksiyonları aşağıdaki gibidir;



Anoddaki gaz diffüzyon tabakası veya elektrotun destek malzemesi, hidrojenin elektrottan reaksiyon bölgesine ulaşmasını sağlar. Reaksiyon sırasında, protonlar, iyon geçirgen zardan geçerler, ve elektronlar da elektrotun destek malzeme tabakasına, oradan da son olarak yakıt pili demetinin elektrik kutuplarına ulaşırlar. Anoddaki elektrotun destek malzemesi , gaz geçirgen olmasının yanında elektriği de iletmelidir. Çünkü, MEA'da oluşan bütün kimyasal enerji, elektrik enerjine dönüşmez, bir kısmı da ısı enerjisine dönüşür. Dolayısıyla gaz

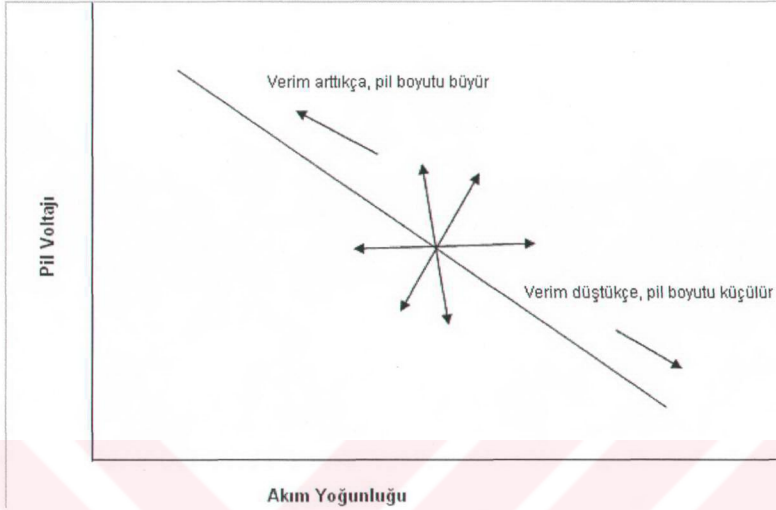
geçirgen elektrotun destek malzemesi ısı iletkeni görevi de görerek, MEA'nın reaksiyon bölgelerindeki ısıyı dışarı atılmasına yardım eder (Hoogers, 2003).

Katodda elektrotun destek malzemesinin fonksiyonları daha karmaşık bir hal alır. Katodda reaksiyon sonucu su oluşur. Bu suyun elektrottan sıvı halde çıkması (ki genellikle reaksiyon bileşenleri su buharına doymuş olduğu için, sıvı halde kalır); elektrotun destek malzemesindeki gözeneklerin kapanması dolayısıyla reaksiyon bölgesine gaz giriş çıkışının engellenmesi riski taşır. Bu da ciddi bir performans problemi yaratır, çünkü ekonomik sorunlar nedeniyle, uygulamalarda oksitleyici olarak saf oksijen yerine hava kullanılmaktadır. Dolayısıyla, katoddaki gazın %80'i soy gazdır. Yakıt pillerinin çalışması sırasında, aktif katod katalizörleri karşısında oksijen tükenmektedir.

Zar, proton iletkeni olarak görev görür. Bu da zarın çok iyi bir şekilde nemlendirilmesini gerektirir, çünkü proton iletimi zardaki suya bağlıdır. Bunun bir sonucu olarak anoddan katoda ek olarak su geçişi mevcuttur ve protonların iletimi ile yakın olarak ilgilidir. Nemlendirme genellikle anod gazlarının, tepkimeye giren bileşenlerin ön-nemlendirilmesi ile sağlanmaktadır.

Yakıt pili demetinin geometri ve boyutunu temsilen bir adet yakıt pilindeki MEA performansının tam analizi yapılmalıdır. Birçok deney ekipmanı, akım/potansiyel eğrisini, kinetik, ohmik, ve kütle taşınım temeline bölerek incelenme olanağı sağlamaktadır. Bu da matematiksel modelleme ile birlikte, MEA'nın dizayn ve performans limitlerinin tanımlanmasına yardımcı olmaktadır.

Yakıt pillerinin performansları, işletme sıcaklığı, basıncı, gaz bileşimleri, akım yoğunluğu, katkı maddeleri ve pil ömrüne bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 2.5 Yakıt pili parametrelerine göre işletme şartlarının esnekliği

Şekil 2.5’de bir yakıt pilinin fiziksel dizaynı belirlendikten sonraki özelliklerini göstermektedir. İşletme sıcaklığı veya basıncını değiştirmek, yakıt pili veya diğer parçaların performansını iyi veya kötü yönde etkileyebilir. İşletme şartlarındaki değişiklikler, yakıt pili maliyetini düşürüp, ilgili diğer aksamaların maliyetini arttırabilir. Bu gibi değişikliklerin amacı, uygun bir pil ömrü ile minimum sistem maliyeti elde etmektir.

Örneğin; yüksek akım yoğunluğunda, yakıt pili boyutu küçük ve düşük sermaye gerektirmesine rağmen, düşük sistem verimi (düşük pil voltajı nedeniyle) ve yüksek işletme maliyetine neden olur. Bu tür bir yakıt pili, otomotiv uygulamalarında, küçük hacim nedeniyle uygun olabilir. Fakat sabit işletmelerde (örneğin; santraller), düşük akım yoğunluğunda çalışan dolayısıyla yüksek voltaj ve düşük işletme maliyetine sahip olan yakıt pilleri daha uygun olmaktadır. Yüksek basınçta çalışmak, pil performansını artırıp, maliyeti düşürmektedir. Bunun yanında, reaksiyon bileşenlerini sıkıştırmak için ayrı bir basınç; pil demeti basınç kabı boruları gerekecektir, bunlar da maliyeti arttırmaktadır.

3. YAKIT PİLİ TİPLERİ

Yakıt pilleri elektrolit tipine göre sınıflandırılır. Her tip, özel maddeler ve yakıtlar gerektirir ve değişik uygulamalarda kullanılır. Elektrolit tipleri aynı zamanda yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarını da belirler.

Yüksek sıcaklık yakıt pilleri, 600°C'dan daha yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadırlar.

Hidrojen dönüştürücüsü (reformer) ile uyumlu çalışabilirler. Reaksiyon sonucunda oluşan fazla ısı, kojenerasyon için kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri, platinyum gibi pahalı bir katalizör olmadan da kolaylıkla ve verimli çalışabilirler. Diğer bir taraftan; elektrokimyasal reaksiyon sonucunda oluşan enerji miktarı; reaksiyon sıcaklığı arttıkça azalmaktadır.

Yüksek sıcaklık yakıt pillerinin bazı malzeme sorunları vardır. Çok az miktarda malzeme uzun süre yüksek sıcaklıkta ve kimyasal bir ortamda çalışabilmektedir. Ayrıca; yüksek sıcaklık reaksiyonları geniş bir çalışma alanına hitap etmemektedirler; özellikle çabuk ilk çalışma gerektiren uygulamalar için uygun değildirler.

Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri;

- 1- Erimiş karbonat yakıt pili
- 2- Katı oksitli yakıt pili,

Düşük sıcaklık yakıt pilleri 250°C'dan daha düşük sıcaklıklarda çalışmaktadırlar. Dönüştürücü (reformer) ile hidrojen elde edilmesine müsait değildirler. Çabuk ilk çalışma gereken uygulamalarda başarıyla çalışmaktadırlar. Dolayısıyla taşıt uygulamalarında tercih edilmektedirler. Malzeme sorunları daha azdır.

Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri;

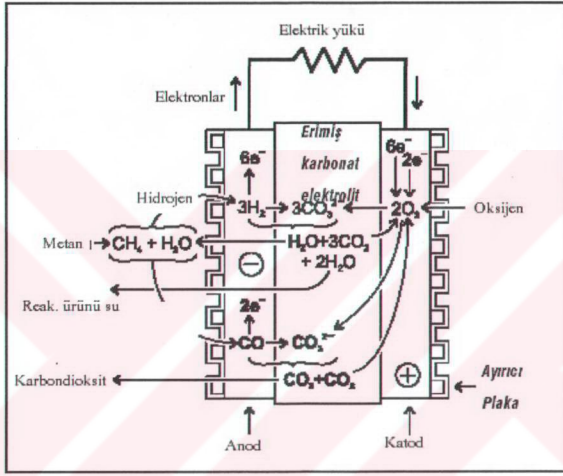
- 1- Alkali yakıt pili,
- 2- Fosforik asit yakıt pili,
- 3- Polimer elektrolit membranlı (PEM) yakıt pili,
- 4- Direkt metanol yakıt pili,

Otomotiv endüstrisinde kullanılmaya uygun olan yakıt pilleri, PEM yakıt pilleri ve doğrudan metanol yakıt pildir.

3.1 Erimiş Karbonat Yakıt Pili

Erimiş karbonat yakıt pilleri; katoddan anoda karbonat iyonlarını (CO_3^{2-}) geçiren bir elektrolit kullanırlar. Bu, genel olarak anoddan katoda hidrojen iyonlarını geçiren diğer yakıt pillerinin tam tersidir (Lanz, 2001).

Elektrolit, erimiş lityum ve potasyumdan oluşur. Yakıt pilinin çalışma sıcaklığında; elektrolitin yapısı yoğun bir macun kıvamındadır; bu macun; yakıt pili kenarlarında gazdan bir sınır oluşturur.



Şekil 3.1. Erimiş karbonat yakıt pili şeması (Lanz, 2001)

Erimiş karbonat yakıt pilleri; 650°C sıcaklıkta; 0,05-1,50 MPa basınçta çalışırlar. Her bir pil 0.7-1.0 V gerilim üretir.

3.1.1 Avantajları

- 1- Erimiş karbonat yakıt pilleri; hafif hidrokarbon yakıtların sistem içinde dönüştürülmesine uygundur.
- 2- Yüksek atık ısı üretirler.
- 3- Reaksiyona çabuk girerler.
- 4- Yüksek verimlidirler.

5- Soy metal katalizörlere ihtiyaç duymazlar.

3.1.2 Dezavantajları

1- Korozyona dirençli, boyutsal olarak kararlı ve dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyarlar. Korozyon; katodda nikel oksit oluşumuna; bunun elektrolite karışmasına; dolayısıyla elektrolitin azalmasına neden olabilir. Korozyon oluşumları, performansı düşürür, yakıt ömrünü kısaltır ve sonunda yakıt pilinin bozulmasına neden olur. Platinyum katalizörler kullanmak bu sorunları çöze de maliyete büyük bir yük bindirmektedir. Boyutsal kararsızlık; elektrot deformasyonuna neden olarak; temassızlık yaratabilir ve parçalar arasında yüksek direnç meydana gelebilir.

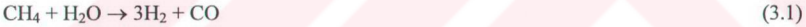
2- Kükürte toleransları yoktur; özellikle anodun 1-5 ppm'den fazla kükürt karşısında performansı düşer.

3- Sıvı elektrolit kullanırlar. Dolayısıyla sıvı kontrolü ile ilgili sorunlarla karşılaşılabilir.

4- Oldukça fazla bir ısıya (ilk çalışma) zamanına gereksinim duyarlar.

3.1.3 Reaksiyon

Erimiş korbanat yakıt pilleri; saf hidrojen veya hafif hidrokarbon yakıtları ile çalışırlar. Metan gibi bir hidrokarbon anoda su ile gönderilirse; ısı olarak; buharla dönüştürme reaksiyonuna girer:



Diğer hafif hidrokarbon yakıtlar kullanıldığında hidrojen ve karbonmonoksit sayıları değişebilir fakat sonuçta reaksiyon ürünleri aynıdır.

Anod reaksiyonu:



Yakıttan bağımsız olarak oluşan hidrojen reaksiyonu.



Sadece hidrokarbon yakıt kullanıldığı zaman oluşan karbonmonoksit reaksiyonu.

Katod reaksiyonu:



Yakıttan bağımsız olarak oluşan oksijen reaksiyonu.

CO_3^{2-} iyonu; elektrolit içinde, hidrojen ve karbonmonoksitin oksijene çekilmesi ile katoddan anoda doğru geçer; bu arada elektronlar dışarıda bir devrenden anoddan katoda doğru ilerlemek zorunda kalırlar.

Anod ve katod reaksiyonlarını birleştirip, pildeki bütün reaksiyonu özetlersek:



Yakıttan bağımsız olarak oluşan hidrojen reaksiyonu.



Sadece hidrokarbon yakıt kullanıldığı zaman oluşan karbonmonoksit reaksiyonu.

Sonuç olarak; ermiş karbonat yakıt pili, yakıttan bağımsız olarak su ve hidrokarbonlu yakıt kullanıldığı zaman karbondioksit üretir. Hem su hem de karbondioksit; reaksiyonun devam edebilmesi için katoddan uzaklaştırılmalıdır (Lanz, 2001).

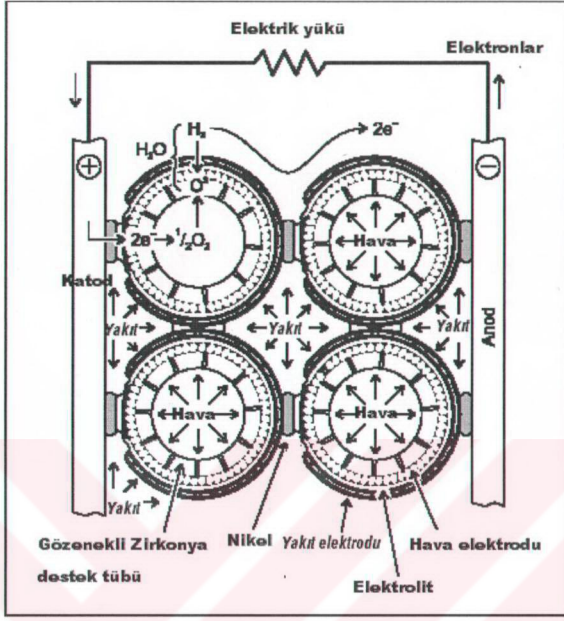
3.2 Katı Oksitli Yakıt Pilleri

Katı oksitli yakıt pilleri, (O^{2-}) iyonlarını katoddan anoda geçiren bir elektrolit kullanırlar. Bu genel olarak anoddan katoda hidrojen iyonlarını geçiren diğer yakıt pillerinin tam tersidir (Lanz, 2001).

Elektrolit, zirkonyadan (yttrium gibi element oksitleri ile kararlı hale getirilerek) oluşur ve seramik yapısındadır.

Katı oksitli yakıt pilleri, bilgisayar çipleri gibi ard arda sıralanmış çeşitli malzeme tabakalarından oluşurlar. En yaygın türleri tüp şeklinde ve düz dizaynlardır. Pil dizaynları, yakıt ve oksitleyici kanalları arasındaki sınır ve pilden pile elektrik bağlantılarındaki mesafe kayıplarına göre değişmektedir. Nikel ve kobalt gibi malzemeler elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Katı oksitli yakıt pilleri 1000°C sıcaklık ve 0,1 MPa basınçta çalışmaktadırlar. Her bir pil 0.8 ve 1.0 V gerilim üretmektedir.



Şekil 3.2 Katı oksitli yakıt pili, tüp şeklinde dizayn (Lanz, 2001)

3.2.1 Avantajları

- 1- Hidrokarbon yakıt dönüştürücüleri ile çalışabilirler. Elektrolitten oksit iyonları geçtiği için yakıt pilleri, temel olarak her hangi bir gaz yakıtı oksitleyebilirler.
- 2- Islak veya kuru yakıtlarda eşit derecede başarıyla çalışabilirler.
- 3- Yüksek atık ısı oluştururlar.
- 4- Hızlı reaksiyon oluştururlar.
- 5- Yüksek verimlidirler.
- 6- Erimiş karbonat yakıt pillerine göre daha yüksek akım yoğunluklarında çalışırlar.
- 5- Elektrolitleri katı olduğu için, sıvı kontrolü problemleri yoktur.
- 6- Soy metal katalizörlere ihtiyaç duymazlar.

3.2 Dezavantajları

1- İletkenlik; yüksek sıcaklıklarda katı kalabilme, boyutsal olarak kararlı ve diğer pil bileşenleri ile kimyasal olarak uyumlu malzeme geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Çok az malzeme, yüksek sıcaklıklarda uzun süre çalışarak katı kalmayı başarır. Ayrıca seçilen malzeme yakıt ve oksitleyicinin karışmasını engellemeli, çatlamaya karşı esnek olmalıdır.

2- Kükürte bir miktar toleranssızdır. 50 ppm kükürt değeri üzerinde performansları düşer. Buna rağmen erimiş karbonat yakıt pillerinden daha toleranslıdır. Bu da daha ağır hidrokarbon yakıtların kullanılmasına izin verir.

3- Teknolojisi henüz gelişme aşamasındadır.

3.2.3 Reaksiyon

Katı oksit yakıt pilleri, erimiş karbonat yakıt pilleri gibi saf hidrojen veya hidrokarbon yakıtlarla çalışabilirler.

Anod reaksiyonu:



Yakıttan bağımsız olarak oluşan hidrojen reaksiyonu.

Katod reaksiyonu:



Sadece hidrokarbon yakıt kullanıldığı zaman oluşan karbonmonoksit reaksiyonu.

O^{2-} iyonu, elektrolit içinde, hidrojen ve karbonmonoksitin oksijene çekilmesi ile katoddan anoda doğru geçer; bu arada elektronlar dışarıda bir devreden anoddan katoda doğru ilerlemek zorunda kalırlar.

Anod ve katod reaksiyonlarını birleştirip, pildeki bütün reaksiyonu özetlersek:



Yakıttan bağımsız olarak oluşan hidrojen reaksiyonu.



Sadece hidrokarbon yakıt kullanıldığı zaman oluşan karbonmonoksit reaksiyonu.

Sonuç olarak; katı oksitli yakıt pili, yakıttan bağımsız olarak su ve hidrokarbon yakıt kullanıldığı zaman karbondioksit oluşturur. . Hem su hem de karbondioksit; reaksiyonun devam edebilmesi için katoddan uzaklaştırılmalıdır (Lanz, 2001).

3.3 Alkali Yakıt Pilleri

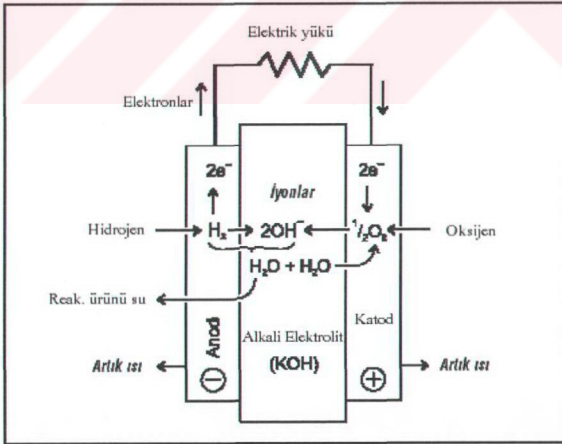
Alkali yakıt pilleri, (OH⁻) iyonlarını katoddan anoda geçiren bir elektrolit kullanırlar. Bu genel olarak anoddan katoda hidrojen iyonlarını geçiren diğer yakıt pillerinin tam tersidir.

Elektrolit, erimiş alkali karışımından (KOH gibi) oluşur. Elektrolit, sabit veya değişken olabilir.

Değişken alkali yakıt pilleri elektrotlar arasında sürekli dolaşan sıvı elektrolit kullanırlar. Reaksiyon ürünü su ve ısı; sıvı elektroliti seyreltir ve ısıtır fakat elektrolit devran ettikçe pilden uzaklaştırılır.

Sabit alkali yakıt pilleri, amyant gibi gözenekli bir yapı yardımıyla kapiler basınç tarafından tutulan kalın macun yapısında bir elektrolit kullanırlar. Macun; pil kenarlarında gazdan bir sınır oluşturur. Reaksiyon ürünü su, anoddaki hidrojen kaynağında buharlaşır ve ardından burada da yoğunlaşır. Fazla ısı; dolaşan soğutucu tarafından ortamdan uzaklaştırılır.

Alkali yakıt pilleri, 65-220⁰C sıcaklık ve 0,1 MPa basınçta çalışırlar. Her bir pil 1.1-1.2 V gerilim üretir.



Şekil 3.3 Alkali yakıt pili şeması (Lanz, 2001)

3.3.1 Avantajları

- 1- Düşük sıcaklıklarda çalışırlar.
- 2- İlk çalışmaları çabuktur.
- 3- Yüksek verimlidirler.
- 4- Platinyum katalizörlere çok az, hatta hiç ihtiyaç duymazlar.
- 5- Korozyon oluşumu minimaldir.
- 6- Ağırlıkları ve hacimleri küçüktür.

3.3.2 Dezavantajları

- 1- CO₂ (maksimum 350 ppm) ve CO'ye az miktarda tolerans gösterirler. Bu önemli bir dezavantajdır. Hem kullanılan oksitleyiciyi hem de yakıtı sınırlandırır. Oksitleyici saf oksijen olmalı veya hava karbondioksitten arındırılmış olmalıdır . Yakıt saf hidrojen veya karbonoksitlerden arındırılmış olmalıdır.
- 2- Sıvı elektrolit kullanıldığı için, sıvı kontrol problemleriyle karşılaşılabilir.
- 3- Karışık su kontrolü gerektirir.
- 4- Ömürleri nispeten kısadır.

3.3.3 Reaksiyon

Alkali yakıt pilleri, karbonoksitlerden arındırılmış saf hidrojenle çalışırlar.

Anod reaksiyonu:



Katod reaksiyonu:



OH⁻ iyonu, elektrolit içinde, hidrojen ve karbonmonoksitin oksijene çekilmesi ile katodan anoda doğru geçer; bu arada elektronlar dışarıda bir devrenden anoddan katoda doğru ilerlemek zorunda kalırlar.

Anod ve katod reaksiyonlarını birleştirip, pildeki bütün reaksiyonu özetlersek:



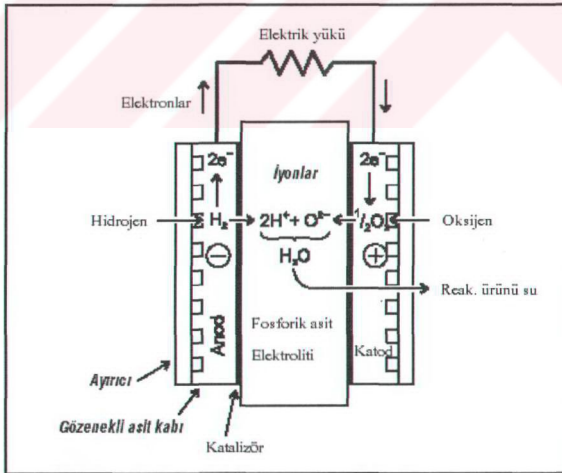
Sonuç olarak; alkali yakıt pilleri su üretirler ve bu su reaksiyonun devamlılığı için ortamdaki uzaklaştırılmaktadır (Lanz, 2001).

3.4 Fosforik Asit Yakıt Pilleri

Fosforik asit yakıt pilleri hidrojen iyonlarını (H^+) anoddan katoda taşıyan bir elektrolit kullanırlar. Elektrolit, silikon karbid malzemesinde sıvı fosforik asittir. (Bazı asit yakıt pilleri sülfürik asit kullanmaktadır)

Fosforik asit yakıt pilleri, 150-205°C sıcaklık ve 0,1 MPa basınçta çalışırlar. Her bir pil 1.1 V gerilim üretir.

Düşük sıcaklıklarda, fosforik asit zayıf bir iyon geçiricidir ve anoddaki platinyum elektrokatalizörünün CO zehirlenmesi daha şiddetli olur. Ayrıca konsantre asit kullanmak su buharı basıncını düşürür böylece yakıt pilindeki suyun kontrolü kolay olur. Hem anod hem de katoddaki katalizör platinyumdur. Fosforik asit yakıt pilleri yaklaşık %40 verimle elektrik üretirler. Çıkış gücü 200 kW kadardır.



Şekil 3.4 Fosforik asit yakıt pili şeması (Lanz, 2001)

3.4.1 Avantajları

- 1- Karbondioksit toleransları vardır. (%30'a kadar). Dolayısıyla oksitleyici olarak hava, yakıt olarak da saf olmayan hidrojen kullanılabilirler.
- 2- Düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Fakat çalışma sıcaklıkları diğer düşük sıcaklık yakıt pillerinden yüksektir; dolayısıyla artık ısıları çok fazla olup kojenerasyon uygulamalarında kullanılabilirler.
- 3- Sabit elektrolit özelliklerine sahiptirler. (200°C sıcaklıkta bile)

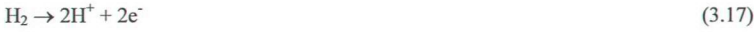
3.4.2 Dezavantajları

- 1- %2'ye kadar karbonmonoksit tolerans gösterirler.
- 2- 50 ppm'e kadar kükürt bileşenlerine tolerans gösterirler.
- 3- Elektroliti korozyona neden olur.
- 4- Sıvı elektroliti olduğu için, sıvı kontrol problemi ile karşılaşılabilir.
- 5- Büyük ve ağırdırlar.
- 6- Hidrokarbon yakıtların dönüştürülmesi ile çalıştırılmazlar.
- 7- Reaksiyon ürünü su, elektrolite girip elektroliti sulandırır.
- 8- İlk çalışmada, ısınma süreçleri vardır veya çalışma sıcaklığında saklanmalıdırlar.

3.4.3. Reaksiyon

Fosforik yakıt pillerinde hidrojen oksijenle reaksiyona girer.

Anod reaksiyonu:



Katod reaksiyonu:



H^+ iyonu, elektrolit içinde, hidrojen ve karbonmonoksitin oksijene çekilmesi ile anoddan katoda doğru geçer; bu arada elektronlar dışarıda bir devrenden anoddan katoda doğru ilerlemek zorunda kalırlar.

Anod ve katod reaksiyonlarını birleştirip, pildeki bütün reaksiyonu özetlersek:

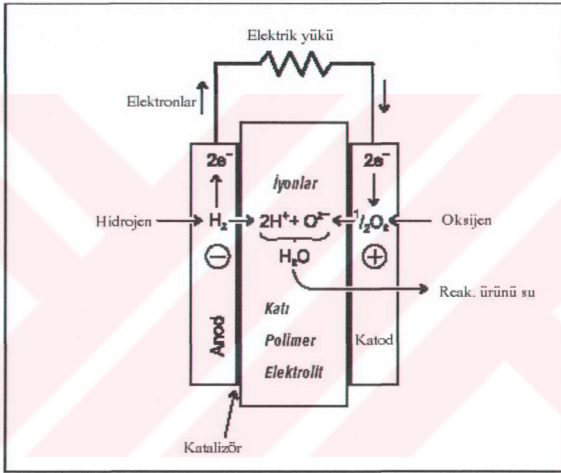


Sonuç olarak; fosforik asit yakıt pilleri, su üretir ve bu su katotta toplanır. Su reaksiyonun devamlılığı için ortamdan uzaklaştırılmalıdır (Lanz, 2001).

3.5 Polimer Elektrolit Membranlı (PEM) Yakıt Pilleri

Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri hidrojen iyonlarını (H^+) anoddan katoda taşıyan bir elektrolit kullanırlar. Elektrolit malzemesi, bir çeşit teflon içeren katı polimerdir.

PEM yakıt pilleri, 160-190°C sıcaklık ve 0,1-0,2 MPa basınçta çalışırlar. Her bir pil 1,1 V gerilim üretir.



Şekil 3.5 PEM yakıt pili şeması (Lanz, 2001)

3.5.1 Avantajlar

- 1- Karbondioksit toleransları vardır; dolayısıyla oksitleyici olarak hava ve yakıt olarak saf olmayan hidrojen kullanabilirler.
- 2- Düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Dolayısıyla malzeme ile ilgili sorunlar azalır, çabuk ilk çalışma sağlanır ve güvenlik yükselir.
- 3- Kuru ve katı bir elektrolit kullanırlar. Bu da, sıvı kontrolü sorununu ortadan kaldırır.

4- Korozif olmayan elektrolit kullanırlar. Saf su korozyon sorunlarını minimuma indirir ve güvenliği artırır.

5- Yüksek voltaj, akım ve güç yoğunluğuna sahiptir.

6- Düşük basınçta çalışır.

7- Nispeten basit bir mekanik düzenegi vardır.

8- Yapısında kararlı malzemeler kullanılır.

3.5.2 Dezavantajlar

1- 50 ppm'e kadar karbonmonoksit tolerans gösterirler.

2- Kükürte toleransları azdır.

3- Reaksiyona giren gazların nemlendirilmesine gereksinim duyar.

4- Pahalı olan platinyum katalizör kullanır.

5- Zar pahalıdır.

3.5.3 Reaksiyon

PEM yakıt pillerinde hidrojen oksijen ile reaksiyona girer.

Anod reaksiyonu:



Katod reaksiyonu:



H^+ iyonu, elektrolit içinde, hidrojen ve karbonmonoksitin oksijene çekilmesi ile anoddan katoda doğru geçer; bu arada elektronlar dışarıda bir devrenden anoddan katoda doğru ilerlemek zorunda kalırlar.

Anod ve katod reaksiyonlarını birleştirip, pildeki bütün reaksiyonu özetlersek:



Sonuç olarak; PEM yakıt pilleri, su üretir ve bu su katodda toplanır. Zardaki su kontrolü verim açısından çok önemlidir. Yakıt pilinin çalışma şartları, zarın kurumaması için, suyun oluşma hızının buharlaşma hızından yüksek olmasını sağlamalıdır. Su reaksiyonun devamlılığı için ortamdan uzaklaştırılmalıdır (Lanz, 2001).

3.6 Direkt Metanol Yakıt Pilleri

PEM yakıt pilleri, hidrojen dışında metanol ile de çalışırlar. Hidrojen kullanıldığında elde edilen enerjiden daha az bir enerji elde edilse de, hidrojenin depolanma sorununu ve metanolü hidrojene çevirmek için dönüştürücü kullanımını gerekliliğini ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir.

Platinyum dışında katalizör olarak ruthenyum (Ru) da kullanılır. Ruthenyum, anodda oluşan reaksiyonda metanol bağlarını koparmak için kullanılır.

Anod katalizörünün aktivitesi sınırlıdır. Metanol PEM'den katoda fiziksel difüzyonla geçmektedir. Katoda doğru geçen metanollerin büyük bir kısmı okside olur. Bu oksitlenme reaksiyonu, yakıt pilinin performansını düşürür ve bazı katod bileşenlerini kullanır. Eğer reaksiyon sırasında CO oluşur ve katalizör yüzeyine yapışır, katod katalizörü zehirlenir ve yakıt pili performansı düşer.

Direkt metanol yakıt pilinde, anodda metanol ve su karışımı ve katodda da hava bulunur. 130°C sıcaklıkta; katalizör (platinyum veya altın) metanolü anında ayrıştırır:



Havadan gelen oksijen, hidrojeni iyonize eder ve su oluşturmak için reaksiyona girer:



Sonuç olarak; direkt metanol yakıt pilleri, su ve karbondioksit üretir.

Avantajları, yakıt dönüştürücüye ihtiyacı ortadan kaldırır, küçük yakıt pili sistemlerine sahiptir ve ucuzdurlar. Dezavantajı ise reaksiyon sonucunda CO₂ oluşur.

3.7 PEM Yakıt Pili Demet Yapısı

Bir adet yakıt pilinin maksimum voltaj çıkışı 1 V'dur. Sürekli gerilim ve güç çıkışlarını elde etmek için, bir çok yakıt pili seri olarak bağlanır. Yakıt pili demetleri, çeşitli boyutlarda ve yakıt pili adetlerinde dizayn edilebilir (Lanz, 2001).

Her bir yakıt pili, bir membran elektrot kitinden (MEA) oluşur. MEA, anod, katod, elektrolit ve katalizörden meydana gelir; grafitten yapılmış iki akış alanı plakası arasına yerleştirilir. Bu plakalardaki kanallar; MEA'da karşı taraflara yakıt ve hava geçişini sağlarlar.

Soğutucu, yakıt pili reaksiyonlarının sıcaklığını ayarlamak için kullanılır. Bu nedenle; soğutma plakaları, her bir yakıt pilinin arasına yerleştirilir. Bu soğutma plakalarındaki

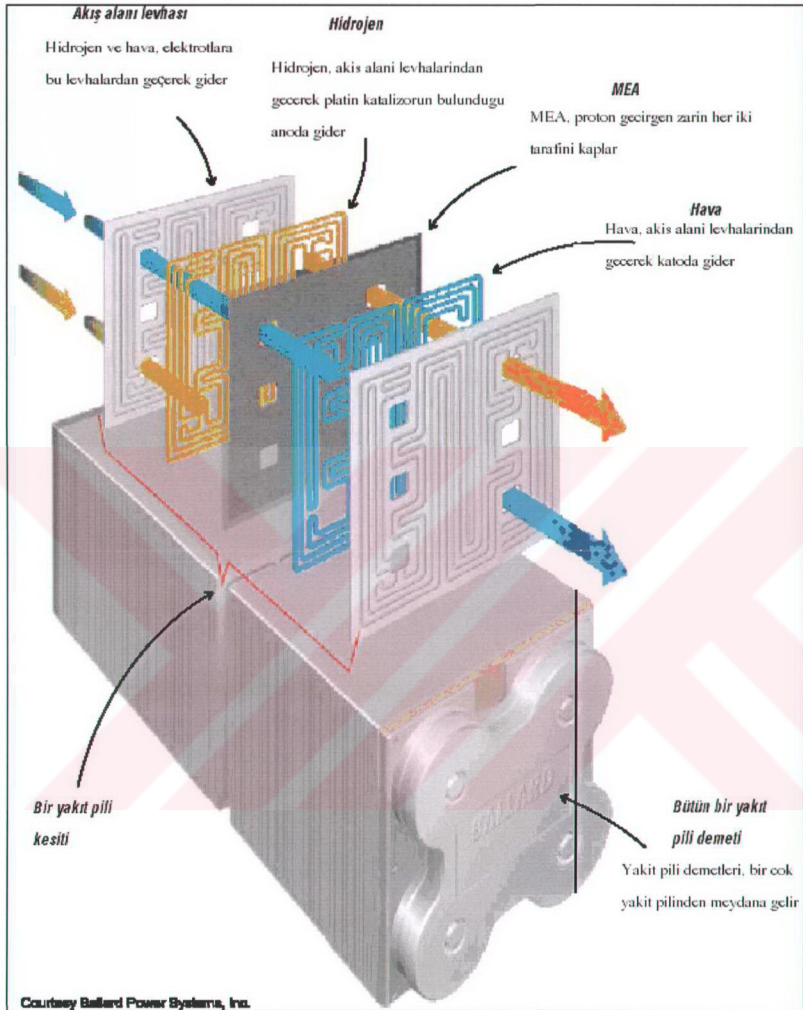
kanallar, yakıt pilleri arasında dolaşarak; gerektiği yerde ısıyı alır veya verirler. Grafit tabakalar arasındaki sınırlar; oksitleyici, yakıt ve soğutucunun karışmasını engeller.

Elektrik arka levhaları , akış alanı plakalarının her iki ucuna bağlanır. Bu arka levhalar, çıkış gücünün alındığı kutuplara bağlanmıştır. Bütün plaka dizileri, bir mekanik aksamla bağlanır.

Pratik olarak, yakıt pillerinin dizaynı, zarın alanı başına en yüksek güç çıkışını elde etmeye göre odaklanır. Dikkat edilmesi gereken önemli noktalar; sınırlar; akış alanı modelinin toleransları ve pil dizilişidir. Ticari olarak kullanılan her ürün gibi, yakıt pillerinin de güvenilir, üretimi kolay; ekonomik olarak uygun ve uzun ömürlü olması istenir.

Çizelge 3.15 Yakıt pili tiplerinin karşılaştırılması

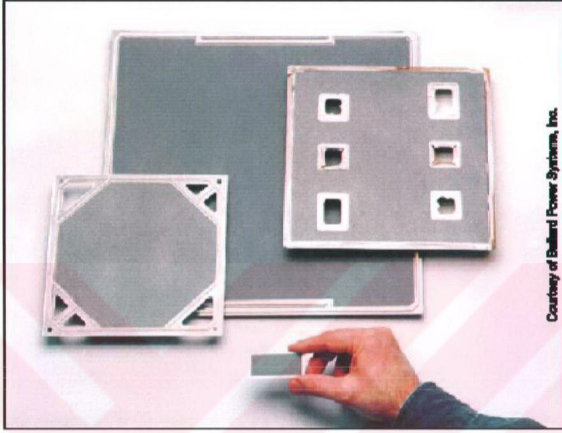
Yakıt Pili Tipi	Elektrolit	İşletim Sıcaklığı (°C)	Verim (%)	Uygulamalar
Erimiş Karbonat	Erimiş Li ve K	650	50-60	Enerji Santralleri
Katı Oksitli	Zirkon	1000	45-55	Enerji Santralleri
Alkali	KOH	65-220	40-50	Uzay
Fosforik Asit	Sıvı H ₃ PO ₄	150-200	40-50	Enerji Santralleri ve Ulaşım
PEM	Polimer	80-160	40-50	Ulaşım, Uzay ve Enerji Santralleri
Direkt Metanol	Polimer	80-120	40-50	Ulaşım ve Taşınabilir Uygulamalar



Şekil 3.6 PEM yakıt hücresi demeti (Lanz, 2001)

3.7.1 Membran Elektrot Kiti (MEA)

MEA, yakıt pilinin kalbidir. MEA, gözenekli iki adet karbon elektrotun arasında yerleştirilmiş, katı polimer elektrolit zardan oluşur. Zar ve elektrotların arasında platinyum katalizör yerleştirilir. Elektrolitler, bitişik parçalardan conta ile ayrılırlar.



Şekil 3.7 PEM yakıt pili MEA (Lanz, 2001)

Elektrotlar; reaksiyona giren gazlar ve elektrolit arasındaki sınırı oluştururlar. Islak gazların geçişine izin verip elektrolitle temas ettikleri yerde reaksiyon yüzeyi sağlarlar. Anodtan katoda geçen elektronlar için de iletkenlerdir ve uyumlu malzemelerden yapılırlar. Karbon fiber kağıdı gözenekli, hidrofik (ıslanmaz), iletken ve paslanmaz olduğu için elektrot olarak tercih edilirler. Elektrot malzemesi, maksimum gaz ve su geçişini sağlamak için çok incedir.

Kimyasal reaksiyonun oranını arttırmak için, elektrotun elektrolit ile temas ettiği yüzeye katalizör eklenir. Katalizör, hazır reaksiyon alanları sağlayarak kimyasal reaksiyonu artırır, fakat tükenmez. Elektro-katalitik faaliyet, karalılık ve elektrik iletkenliği özellikleri nedeniyle katalizör olarak platinyum tercih edilir. Platinyum çok pahalı bir malzemedir, dolayısıyla kullanılan miktarı, yakıt pili maliyeti açısından çok önemlidir. Yakıt pili araştırmalarında, iyi pil performansını koruyarak, platinyum miktarının azaltılmasına çalışılmaktadır.

Katı polimer elektrolit, PEM yakıt pilinin en ayırt edici özelliğidir.

Elektrolit, 50-175 μm kalınlığında plastiğe benzer ince bir tabakadan oluşur. Bu zarlar, sülfürik asit ($-\text{SO}_3^-$) gruplarıyla biten ek zincirleri olan teflon benzeri florokarbon

polimerlerden oluşur. Sonuç olarak, PEM yakıt pilleri, fosforik asit yakıt pilleri gibi, asidik elektrolit kullanırlar.

Tüm asidik katı polimer elektrolitler, hidrojen ionu iletimi için su moleküllerine ihtiyaç duyarlar. Hidrojen iyonları, iyon geçiş reaksiyonunda su ile hareket ederler. Verimli bir iletim için, suyun hidrojen iyonlarına oranı 3:1'dir. Bu nedenle; zarla temas halinde olan gazlar suya doymuş olmalıdır.



Şekil 3.8 PEM yakıt hücresi zarı (Lanz, 2001)

Moleküler seviyede, polimerlerin, sülfonik asit gruplarının iç tarafında bulunduğu tüp şeklinde bir yapısı vardır. Bu gruplar; iletim için hidrofilik (hazır olarak ıslanabilir) yapıyı sağlarlar. Tüplerin dış kısımları hidrofobik florlu malzemeden oluşur. Tüp yapı, su oranı düştükçe küçülür ve yeniden ayarlanır. Dehidrasyon sırasında tüpler küçülünce; zar ve elektrot temas direnci artar; bu da zarda çatlak veya deliklere neden olabilir.

Dupont tarafından geliştirilen Nafion ve Dow Chemical Company tarafından geliştirilen diğer zarlar ticari olarak bulunmaktadır. Bunun yanında, yakıt pili üreticilerinden Ballard Power Systems, patentli zarlarını geliştirmişlerdir.

Tüm elektrolitler, proton geçirgenlik, elektron yalıtımı ve gaz ayırıcılık gibi temel özelliklere sahip olmalıdır. Bunların yanında üreticiler, elektrolitlerin, uygun bir mekanik dayanıma, boyutsal kararlılığa, yüksek iyon iletkenliğine, düşük ağırlığa ve kolay üretilibilme özelliğine sahip olmaları üzerinde çalışmaktadırlar. Elektrolitin yardımcı bir yapı görevi de gören MEA'nın içinde bulunması bir miktar mekanik ve boyutsal dayanımı sağlamaktadır.

3.7.2 Akış Alanı Plakaları

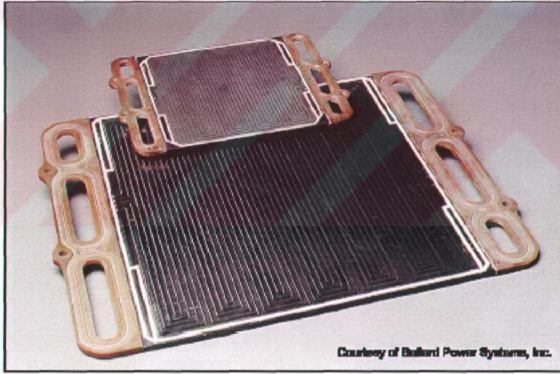
Akış alanı plakaları, MEA'nın karşıt taraflarına yakıt ve oksitleyici geçişini sağlarlar.

Her bir akış alanı plakası, MEA'nın gaz ile temasını maksimum seviye sağlamak için, kıvrımlı bir gaz kanalından oluşur. Gaz kanallarının şekilleri, düzenli güç üretimi, sürekli bir pil performansı ve reaksiyon ürünü olan suyun kontrolü bakımından çok önemlidir. Çeşitli yakıt pili uygulamaları için farklı akış alanı plakaları dizaynları mevcuttur.

Her bir plaka; elektro kimyasal reaksiyon sonucunda oluşan akımın yandaki pile geçebilmesi, en son olarak da demet gücünün alındığı arka levhalara ulaşması için elektriksel olarak iletken olmalıdır.

Plakalar, içine akış kanallarının işlendiği grafitlerden yapılırlar. Mükemmel iletkenliği, düşük kirliliği ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle grafit tercih edilen malzemedir.

Soğutucu plakalar, her bir yakıt pilinin arasına yerleştirilir ve gaz akış alanı plakalarının dizayn ve yapısına benzer olurlar. Soğutucu akış kanalları, etkili bir ısı kontrolüne uygun dizayn edilirler.



Courtesy of Ballard Power Systems, Inc.

Şekil 3.9 PEM Akış alanı plakaları (Lanz, 2001)

Akış alanı ve soğutucu plakalar, demete giren ve çıkan yakıt, oksitleyici ve soğutucuyu düzgün bir şekilde dağıtmak için kullanılan gaz ve su çıkışlarını birleştirirler. Grafit plakalar arasındaki contalar, bu akışların karışmamasını sağlarlar.



Şekil 3.10 PEM yakıt hücresi demeti oluşturulurken (Lanz, 2001)

3.7.3 Nemlendiriciler

PEM yakıt pilinin çalışması bakımından, reaksiyona giren gazların nemlendirilmesi çok önemlidir. Yeterli bir nemlendirme olmadan, iyon iletimi olmaz ve yakıt pili hasar görebilir.

Bir gazın soğurabileceği su miktarı, büyük ölçüde nemlendirme sıcaklığına (özellikle düşük sıcaklıklarda) bağlıdır. Sıcak gazlar, soğuk olanlara göre daha çok su tutarlar.

Nemlendirmenin amacı; reaksiyona giren gazları mümkün olduğunca su ile doyurmak olduğundan, gazlar, yakıt pili işletme sıcaklığında nemlendirilmelidir. Eğer, düşük bir sıcaklıkta nemlendirilirse, gaz işletme sıcaklığına ulaştığı zaman artık suya doymuş hale getirilemez. Yüksek sıcaklıkta nemlendirilirse de, işletme sıcaklığına düştüğünde, bir miktar su, gaz kanallarında yoğunlaşır.

Bazı yakıt pillerinde, nemlendiriciler, yakıt pili demetinin içerisine konur; bazılarında ise; ayrı olarak dışardan çalışırlar.

Dahili nemlendiriciler, yakıt pili demetinin içerisine konulmuş grafit plaka serilerinden oluşur. Böylece yakıt pili demeti aktif ve aktif olmayan iki bölüme ayrılmış olur. Aktif bölümde yakıt pilleri, aktif olmayan bölümde nemlendiriciler bulunur. Nemlendirme

plakaları, akış alanı plakalarına benzerdirler ve zarın her iki tarafına gazı ve suyu iletirler. Su, zarı geçerek, temas halinde gazları doyurur. Bu zarlar, ticari amaçlı olarak da bulunabilirler.

Dahili nemlendiriciler, suyu soğutma sisteminden alarak, pildeki sıcaklığın sürekliliğini de devam ettirirler. Bunun yanında, bu sistem, soğutucu olarak saf su kullanılmasını gerektirir. Saf su soğuk hava şartlarında soğutucunun donma problemini de beraberinde getirir. Ayrıca, yakıt pili demeti ve nemlendiricinin ayrı ayrı olması bakım gerektiğinde kolaylık sağlar.

Harici nemlendiriciler, bir zar veya bağlantı şeklinde mevcuttur. Harici nemlendiriciler yakıt pili dışında bulunsalar da; dahililer gibi çalışırlar. Harici nemlendiriciler, bir sprey yardımı ile, suyu sıcak bir yüzeye veya reaksiyona giren bir gazın geçtiği geniş alanlı bir yüzeye püskürtür. Daha sonra; su hemen buharlaşarak, gazın doymasını sağlar.

Harici nemlendiriciler, suyu, soğutma kanalından ya da ayrı bir nemlendirici su devresinden alırlar. Soğutma sisteminden su almanın avantaj ve dezavantajları dahili nemlendiricilerle aynıdır. Su kaynağı ne olursa olsun harici nemlendiriciler, daha az hantal ve daha sağlam parçalardır (Lanz, 2001).

3.8 PEM Yakıt Pili Performansı

3.8.1 Verim

Yakıt pillerinin verimleri, bu teknolojinin en önemli kazançlarından biri olarak görülmektedir. İlke olarak bu doğru olsa da, yakıt pili demet verimini ve yakıt pili sistemi verimini ayırmak gerekmektedir.

Yakıt Pili Demet Verimi:

Yakıt pili demet verimi, elektro kimyasal reaksiyonun gerçek veriminin ortalaması alınarak hesaplanır.

Hydrojen ve oksijenin su oluşturmak için birleşmesinden doğan ısı miktarı “reaksiyonun entalpisi- ΔH° ” olarak adlandırılır. Bu değer, deneylerle ölçülür ve suyun gaz veya sıvı olarak oluşmasına bağlıdır. Yakıt pillerinde, su gaz olarak oluşur ve reaksiyonun entalpisi:

$$\Delta H^{\circ}_{\text{gaz}} = - 242 \text{ kJ/ mol}_{\text{su}}$$

$$\text{mol}_{\text{su}} = 6,023 \times 10^{23} \text{ molekül su}$$

Enerji, reaksiyon sırasında çıkmaktadır.

Reaksiyonun bu entalpi değeri, 25°C ve 1 atm basınçta geçerlidir. Sıcaklığın etkisi basınçtan daha fazladır; sıcaklık arttıkça çıkan enerji miktarı azalır. Enerjideki bu değişiklik, PEM yakıt pillerinde az miktarda gözükmek fakat yüksek sıcaklık yakıt pillerinde %30'lara kadar azalabilir. Bu nedenle, yüksek sıcaklık yakıt pilleri, doğal olarak düşük sıcaklık yakıt pillerinden daha az güce sahiptir.

Ne yazık ki, entalpi reaksiyonun hepsi yararlı iş olarak kullanılamamaktadır. Entalpinin bir kısmı evrenin düzensizliğine entropi olarak karışarak kaybolur. Geri kalan “Gibbs serbest enerji - ΔG° ” olarak bilinir. Su buharı için;

$$\Delta G^\circ_{\text{gaz}} = -229 \text{ kJ/mol}_{\text{su}}$$

Her bir pilin gerilimi (ϵ_{pil}) Gibbs serbest enerjisiyle ilgilidir;

$$\epsilon_{\text{pil}} = -\Delta G^\circ / n.F$$

n = reaksiyona giren elektron sayısı

F = Faraday sabiti, 96,500 C/mol e^-

$$\epsilon_{\text{pil}} = -\frac{-217 \text{ BTU}}{\text{molsu}} \times \frac{1055.7 \text{ J}}{\text{BTU}} \times \frac{\text{molsu}}{2 \text{ molé}} \times \frac{\text{molé}}{98,500 \text{ C}} = \frac{1.187 \text{ J}}{\text{C}} = 1.187 \text{ V} \quad (3.25)$$

$$\epsilon_{\text{pil}} = -\frac{-229 \text{ kJ}}{\text{molsu}} \times \frac{1000 \text{ J}}{\text{kJ}} \times \frac{\text{molsu}}{2 \text{ molé}} \times \frac{\text{molé}}{96,500 \text{ C}} = \frac{1.187 \text{ J}}{\text{C}} = 1.187 \text{ V} \quad (3.26)$$

Her bir pil teorik olarak 1.187 V gerilim (25°C sıcaklık ve 1 atm basınçta) üretebilir. Yakıt pili verimi de basitçe pilin ürettiği gerçek gerilimin bu teorik değere oranıdır.

$$\text{Verim}_{\text{pil}} = V_{\text{gerçek}} / \epsilon_{\text{pil}} \cong V_{\text{gerçek}} / 1.2 \text{ V} \quad (3.27)$$

Gerçek bir yakıt pili için normal çalışma yüklerinde gerilim 0.5 ve 0.6 V'dur; açık devre durumlarında 1.1 V'a ulaşabilir. Elektro kimyasal verim yaklaşık % 40-50 civarında olup, açık devre şartlarında %90'a ulaşabilmektedir.

Yakıt Pili Sistem Verimi:

Yakıt pili sistem verimi, yakıt pili güç sistemlerinin toplam performansı ile ilgilidir.

Bir yakıt pili demeti, ancak basınçlı hava, hidrojen ve soğutucu ile çalışabilir. Pratikte yakıt pili sistemleri, gaz ve sıvı akışını ayarlamak, yağlanmayı sağlamak, yardımcı ekipmanların çalışması, elektrik çıkışını yönetmek ve işlemin kontrolü için yardımcı ekipmanlara gerek

duyar. Bazı sistemler, yakıt için dönüştürücüye gerek duyar. Bütün bu ekipmanlar, kayıplara neden olur ve sistemin toplam teorik verimini düşürür.

Yakıt pili ve diğer güç üreten sistemler arasında doğru bir verim mukayesesi yapmak için, her güç sistemini benzer yönlerden tanımlamak gerekir.

Bir taşıt uygulamasında, yakıt pili ile içten yanmalı motoru karşılaştırıldığında; her iki sistemde yakıt ve havayı alarak, mekanik bir güç çıkartır. Her ikisinde de yakıt, gaz veya sıvı olarak bir depodan alınır.

Her iki sistem de atmosferden alınan havayı sıkıştırır. İçten yanmalı motor da bunun için piston hareketinden faydalanırken, yakıt pili güç sistemi, dışardan kompresör kullanır. İçten yanmalı motorlar mekanik gücü tahrik miline iletirken yakıt pili güç sistemleri, elektrik motor kullanır. Her iki sistemde de fazla ısı, bir soğutucu pompası, radyatör veya diğer ısı kontrol ekipmanları ile ortamdan dışarı atılır.

Bir içten yanmalı motorun toplam verimi % 15-25 olarak hesaplanır. Bu değerler, taşıtın tekerleklerindeki çıkan verimdir; volandaki verim % 30-35 gibidir; bu dizel motorlarda daha da yüksektir.

Saf hidrojenle çalışan yakıt pili güç sistemleri için volan verimi aşağıdaki gibi ayrılır;

Yakıt pili verimi	% 40-50
Hava kompresörü	% 85 (brüt gücün %85'ini kullanır)
DC/AC çevirici verimi	% 95
Elektrik motoru verimi	% 97

Tüm bu verimleri toplarsak toplam verim yaklaşık olarak % 31-39 olarak bulunur.

Yakıt dönüştürücüsü kullanan bir yakıt pilinde bu verim % 65-75 olarak (dönüştürücü tipine göre değişir) azalır, toplam verim % 20-29 olarak bulunur.

Sistem ağırlığının etkisi hesaplanması en zor olandır. Yakıt pili sistemler (hidrojen depolama da dahil olmak üzere) aynı güç ve çalışma alanındaki içten yanmalı motorlara kıyasla daha ağırdır. Dolayısıyla daha fazla güç kullanır.

Akülerin yakıt pilleriyle karşılaştırılabilir bir elektro kimyasal verimleri mevcuttur. Bir otomotiv güç sisteminde kullanıldığı zaman akülerin de bir doğru akımı alternatif akıma çevirici ve elektrik motoruna ihtiyacı vardır. Hava kompresörü, karmaşık soğutma sistemi ve

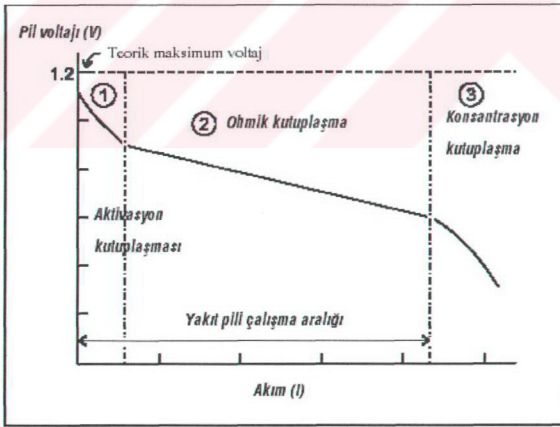
yakıt dönüştürücüsü kullanılmalarına rağmen akülü sistemler, yakıt pillerinden daha ağırdırlar.

Yakıtın kaynağı da toplam verimin önemli bir bileşenidir. İçten yanmalı motorlarda hidrokarbon yakıtların rafine edilmesi gerekmektedir. Yakıt pillerinde ise, hidrojenin fosil yakıtlardan veya elektroliz ile üretimi veya metanol gibi ikincil yakıt üretimi söz konusu olmaktadır. Akülü sistemlerde ise bir elektrik güç kaynağına ihtiyaç duyulur.

Bu faktörlerin analizi zordur ve yakıt kaynağına, işleme metoduna, kullanmaya, taşıma zorluğuna ve son yakıtın sıkıştırılması veya sıvılaştırılması için kullanılan enerjiye bağlıdır. Sonuç olarak, tüm bu faktörler toplam yakıt maliyetini artırsa da; uzun süreçte çevreye verilen zararlar sonucu çıkan masrafların yanında dikkate alınacak bir miktar değildir.

3.8.2 Kutuplaşma Özellikleri

İdeal bir dünyada, teorik optimum yakıt pili gerilimi, 1.2 V bütün çalışma akımlarında elde edilebilir. Gerçekte ise, yakıt pilleri en yüksek gerilimleri açık devre (yüksüzken) şartlarında elde ederler ve gerilim, yükselen akım ile düşer. Bu, kutuplaşma olarak bilinir ve Şekil 3.11'de görülen kutuplaşma eğrisi ile ifade edilir.



Şekil 3.11. PEM kutuplaşma eğrisi

Kutuplaşma eğrisi, pil gerilimini akımın bir fonksiyonu olarak tanımlar. Akım, sonuç olarak, yakıt piline uygulanan elektrik yükünün büyüklüğüne bağlıdır. Kutuplaşma eğrisi esasen her

hangi bir çalışma akımında elektro kimyasal verimi göstermektedir. Verim, gerçek pil geriliminin teorik maksimum gerilim 1.2V'a oranıdır.

Akülerin kutuplaşma eğrileri, yakıt pillerinininkine çok benzerdir. Hem yakıt pilleri hem aküler, yük azalıp gerilim yükseldikçe mükemmel bir kısmı yük performansı sergilerler. Bunun aksine, içten yanmalı motorlar tam yükte en yüksek verimle çalışırlar ve kısmi yükte verimde hızlı bir düşüş gösterirler.

Kutuplaşma, yakıt pilinin çeşitli bileşenlerinin kimyasal ve fiziksel faktörleri tarafından ortaya çıkar. Bu faktörler, akım varolduğu sürece reaksiyonu sınırlar. Toplam kutuplaşmayı etkileyen üç bölge vardır;

- 1- Aktivasyon kutuplaşması,
- 2- Ohmik kutuplaşma (veya direnç kutuplaşması),
- 3- Konsantrasyon kutuplaşması.

Pil geriliminin ideal hareketinden sapması bu faktörlerin toplamının bir sonucudur.

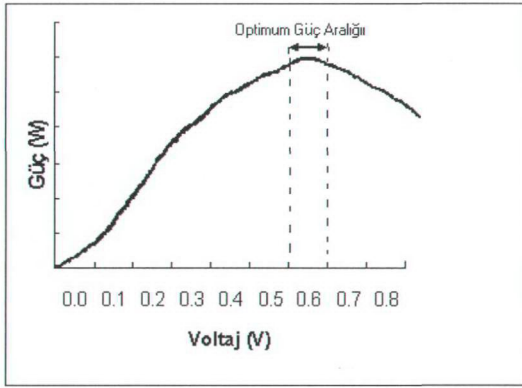
Aktivasyon kutuplaşması, reaksiyona giren maddeler arasında bir kimyasal reaksiyonun başlaması için aşılması gereken enerji engeli ile ilgilidir. Düşük akımlarda, elektron transfer oranı yavaşır; elektrot voltajının bir bölümü, elektro-katalitik hareketinin eksikliğini kapatmak için kaybolur.

Ohmik kutuplaşma (direnç kutuplaşması) pildeki direnç kayıplarına bağlı olarak ortaya çıkar. Bu direnç kayıpları, elektrolitte (iyonik), elektrotlarda (elektriksel ve iyonik) ve kutup bağlantılarında (elektriksel) meydana gelir.

Konsantrasyon kutuplaşması, elektrot reaksiyonları kütle transfer etkileri tarafından engellendiği zaman ortaya çıkar. Bu bölgede, reaksiyona giren malzemeler, tedarik edildiklerinden daha yüksek hızlarda tüketilirler; aynı zamanda reaksiyon ürünleri de ortamdan uzaklaştırılmalarından daha hızlı bir şekilde ortamda birikirler. Bu etkiler, daha sonraki reaksiyonları engeller ve pil gerilimi sıfıra düşer.

3.8.3 Güç Özellikleri

Elektriksel güç, gerilim ve akımın bir ürünüdür ($P=VI$). Bir yakıt pilinin kutuplaşma eğrisi tüm çalışma şartlarında gerilim ve akım arasındaki ilişkiyi gösterdiği için, benzer bir güç eğrisi oluşturmak için kullanılabilir. Şekil 3-12'de güç eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 3.12 PEM güç eğrisi

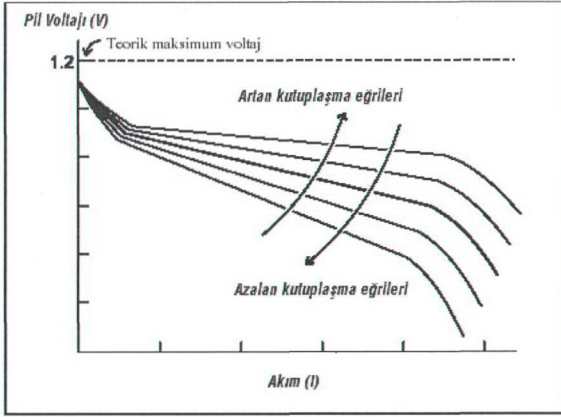
Maksimum güç, nispeten yüksek olan 0.5-0.6 V arasında bulunmaktadır. En tepe noktada, pil içi direnç, dış devrenin elektriksel direncine eşittir. Bununla birlikte, verim yükselen voltajla düştüğü için, yüksek güç ve yüksek verim arasında bir ilişki vardır. Yakıt pili tasarımcıları, ilgili uygulamada, verim ve güçten hangisi daha önemli ise ona göre çalışma aralığı belirlemelidir. Güç eğrisinin düştüğü alanlarda çalışma istenilmez.

3.8.4 Sıcaklık ve Basıncın Etkileri

Kutuplaşma eğrisinin şekli, işletme sıcaklığı ve basıncına bağlıdır. Genel olarak, kutuplaşma eğrileri, tüm çalışma şartlarındaki demet performansını gösterecek şekilde çizilebilir.

Genel olarak, kutuplaşma eğrisini yukarı çıkaracak her hangi bir parametre; güç ve elektro kimyasal verimde artış demek olduğu için yararlı olmaktadır.

Yakıt pili kutuplaşma eğrisi, çalışma basıncı arttıkça yükselir.



Şekil 3.13 Çeşitli kutuplaşma eğrileri

Bunun nedeni, kimyasal reaksiyonun oranının hidrojen ve oksijenin kısmi basınçlarıyla orantılı olmasıdır. Böylece, seyreltik oksitleyici (hava gibi) veya seyreltik yakıt kullanılması, yükseltelen basıncın etkisini daha göze çarpıcı yapar. Aslında yüksek basınçlar, hidrojen ve oksijeni elektrolit ile temas etmeye zorlar. Basınca bu hassasiyet, yüksek akımlarda daha fazladır.

Basıncıdaki artış, elektro kimyasal reaksiyonu desteklemesine rağmen, başka sorunlara neden olur. Yakıt pili demeti akış alanı plakaları, akıştan kaynaklanan küçük basınç kayıpları gösterdikleri için, düşük basınçlarda daha iyi çalışırlar. Yakıt pili contaları, daha yüksek basınçlarda çalışırlar. Ek bir hava kompresyonu gereklidir; ki bu da brüt gücün çoğunu kullanır. Diğer sistem parçaları, tekrar dizayn edilmeli, bazı parçaların boyutları büyütülmelidir, ki bu da maliyetin artması demektir. Bu nedenlerden dolayı, PEM yakıt pilleri bir kaç atm basınçtan daha yüksek basınçlarda çalışmazlar.

Yakıt pili kutuplaşma eğrisi, çalışma sıcaklığı arttıkça yükselir.

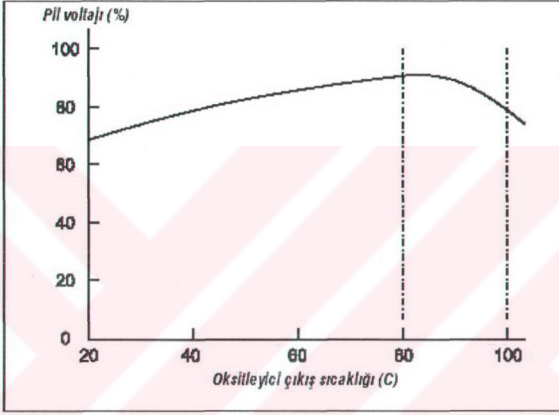
Yüksek sıcaklıklar, kütle akışını iyileştirir ve pil direncinde net bir artış sağlar (sıcaklık arttıkça, metallerdeki elektriksel iletkenlik azalır fakat elektrolitteki iyonik iletkenlik artar). Bu etkiler, birlikte reaksiyon oranını iyileştirir.

Oksitleyici akışındaki reaksiyon ürünü su birikmesi; çalışma sıcaklığını 100°C 'nin altında sınırlandırır. 100°C 'da su buharlaştığı için, oksijenin kısmi basıncını şiddetle düşüren bir

buhara neden olur. Dolayısıyla, oksijensizlikten, pil performansı düşer. Bu, yakıt pillerine zarar verip ömürlerini kısaltabilir.

Bazı durumlarda, yüksek sıcaklıklar, yüksek basınçlarda (yüksek basınç, suyun kaynama noktasını düşürdüğü için) elde edilebilir. Yine de, bu etki PEM yakıt pillerinin pratikteki çalışma basınçlarında pek önemli değildir.

Suyun kaynama noktası sıcaklığına kadar, yakıt pili voltajı sıcaklıkla yükselir, bu noktadan sonra; voltaj düşmeye başlar. En verimli sıcaklıklar 70-90⁰C'dir.



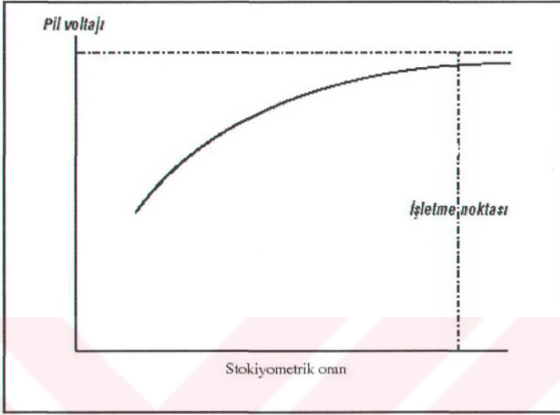
Şekil 3.14 Yakıt pili voltajına sıcaklığın etkileri

3.8.5 Stokiyometrik Etkiler

Yakıt pili kutuplaşma eğrisi, reaksiyona giren gaz stokiyometrisinin artması ile yükselir. Bunun nedeni, yüksek stokiyometri ile elektrolit ile etikleşen yeterli sayıda hidrojen ve oksijen moleküllerinin artmasıdır. Yetersiz stokiyometri, yakıt pilinin reaksiyona giren maddelerin yetersiz olması nedeniyle kalıcı hasarlara neden olur.

Stokiyometri, mevcut gaz miktarının tam bir reaksiyon oluşturmak için gerekli olan gaz miktarına oranıdır. Bu durumda, stokiyometrik oranın 1,0 olması durumunda, reaksiyonun tamamlanması için gerekli gaz sayısı tam olarak doğrudur. 1,0'den düşük stokiyometrik oran, yetersiz gaz; yüksek olan da aşırı gaz sağlar.

Gaz akış stokiyometri oranı yükseldikçe yakıt pili voltajı kutup voltaj asimptotuna yaklaşır. Pratikte yakıt pili demetleri, 1,4 hidrojen stokiyometrisi ve 2,0 hava stokiyometrisinde çalışırlar. Düşük güçte çalışınca, daha yüksek stokiyometrik oranlar gerekmektedir.



Şekil 3.15 Yakıt pili voltajına stokiyometrinin etkileri

3.8.6 Nemin Etkileri

Su molekülleri, zardan geçerken hidrojen iyonlarıyla hareket ettikleri için, PEM yakıt pillerinde yeterli gaz akışının nemlendirilmesi çok önemlidir.

Yetersiz, nemlendirme, zarin kurumasına neden olabileceği için çatlak ve delikler oluşabilir. Bu da kimyasal kısa devreye, gazların karışmasına, sıcak noktalara ve yangına neden olabilir.

Fazla nemlendirme suyu da; yoğunlaşmaya ve akış alanı plakalarında taşmaya neden olur. Bunun sonucunda da pil tersinir ve sıfır veya negatif voltaj üretirler. Eğer negatif voltaj çok büyükse, etkilenen piller elektrolizör gibi çalışmaya başlarlar. Bu da çok fazla ısı çıkmasına ve pilin tahrip edilmesine yol açar. Yakıt pillerine, pil hasar görmeden önce; pilin tersinmesini gösteren pil denetleyicileri konulur.

Nem, basınç ve sıcaklığa bağlı olduğu için rölatif nem olarak ölçülür. Bir gaz verilen basınç ve sıcaklıkta alabildiği kadar suyu emer; doymuştur. Eğer bu doymuş gaz ısınır, rölatif nem düşer. Eğer gaz soğursa, bir kısım su yoğunlaşır ve gaz yeni sıcaklıkta da doymuş kalır.

Yakıt pilleri, çalışma sıcaklığında, doymuş şartlarda veya bu şartlara yakın çalışırlar. Böylece mümkün olduğunca çok miktarda su elde edilirken, su taşması da önlenmiş olur.

Nemlendirmek için su kullanılması nedeniyle, yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 0-100°C sıcaklıklar arasında kalmaktadır.

Nemlendirme suyu geçirgen olmamalıdır. Geçirgen olursa, kısa devreye ve yakıt pili demetinde korozyon akımlarına neden olabilir. Su, etraftan iyon emdikçe geçirgen olmaktadır. Bu iyonları elemek için, su sürekli olarak bir iyonlaşma gidericiden geçirilmelidir.

4. YAKIT PİLİ SİSTEMLERİ

Bir yakıt pili demeti, çalışabilmek için, yakıta, oksitleyiciye ve soğutucuya gereksinim duyar. Her birinin akışlarının bileşeni, basıncı ve akış oranı ayarlanmalıdır. Ayrıca, gazlar namlendirilmeli ve soğutucu sıcaklığı kontrol edilmelidir. Bunları elde edebilmek için, yakıt pili demeti, bir yakıt sistemi, yakıt dağıtım sistemi, hava sistemi, soğutma sistemi ve namlendirme sistemi ile çevrelenmelidir (Lanz, 2001).

Çalışırken, yakıt pilleri tarafından üretilen güç, yük tarafından düzenlenmeli ve soğurulmalıdır. Güvenliği tehlikeye atacak şartlar oluşursa sistemi kapatacak uygun alarmlar yerleştirilmeli, ve yakıt pili demetinin performansını görüntüleyecek bir pil voltaj denetleyicisi konulmalıdır. Bu işlevler, elektrik ve kontrol sistemleri tarafından uygulanmaktadır.

Bir otobüse, yakıt pili güç kaynağı yerleştirildiği zaman; bu sistem, otobüsün, transmisyonu, soğutma ve ısıtma-havalandırma sistemi ile uyuşmalıdır. Transmisyon, hareket motoru, vites kutusu ve yardımcı parçalardan oluşur. Soğutma sistemi, ısıyı otobüs ve yakıt pili bileşenlerinden uzaklaştırır; ısıtma-havalandırma sistemine verir ve fazla ısıyı çevreye atar. Isıtma-havalandırma sistemi, ısı ve havalandırmayı sağlar, Bu ekipman, çalışmak için ek bir yağlama ve hidrolik sisteme gereksinim duyar.

Ayrıca, otobüste hidrojen bulunması, yolcu güvenliğini sağlamak için bir sistem gerektirir. Bu sistem, hidrojen kaçağını yakalamak için bir kaçak dedektörü ve yangın anında, yangını algılayacak ve söndürecek ekipmanlardan oluşur.

4.1 Sistem Tanımları

Bu bölümde bahsedilecek olan sistem tanımları, yüksek basınçta saf hidrojen kullanan bir otobüs uygulamasına aittir. Otobüs, XCELLSIS Fuel Cell Engines Inc tarafından geliştirilmiş 3. ve 4. nesil yakıt pili otobüslerindedir.

4.1.1 Hava Sistemi

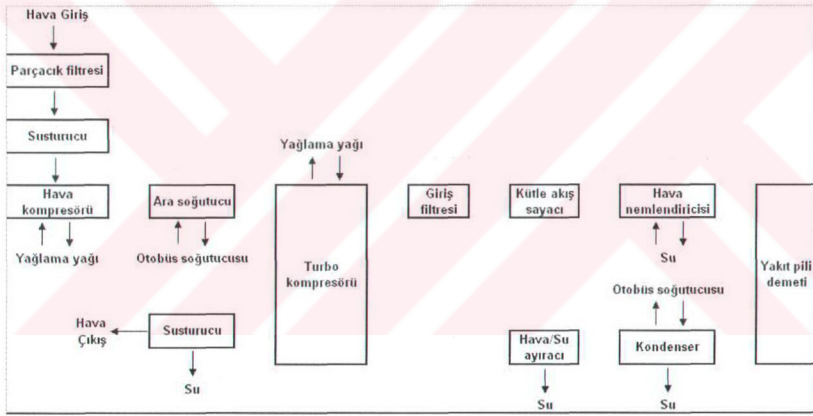
Hava sistemi, yakıt pilinde güç üretimi için gerekli olan havayı sağlamaktadır.

Çevreden alınan hava sistemine girip, parçacıklardan temizlenmek üzere bir filtreden geçer. Kompresör gürültüsünü azaltmak için bir susturucu kullanılır.

Hava, iki basamakta, bir hava kompresör ve bir turbo kompresörü kullanılarak sıkıştırılır. Hava kompresörü hızı, hava basıncını yükseltir ve hava akış oranını belirler. Turbo kompresörü, egzoz hava akışından aldığı enerji ile hava basıncını daha da yükseltir. Normal çalışma şartlarında, yakıt pili demetine giren hava basıncı yaklaşık olarak 0,21 MPa'dır.

Havanın basıncının artması, hava akışının sıcaklığı yüksek oranda artırır; bu da kompresöre yağlama sisteminden geçen yağ parçacıklarına sebep olur. Yakıt pillerinin zarar görmesini engellemek için, sıcak hava akışı, kompresörden sonra bir ara soğutucudan geçerek yakıt pili çalışma sıcaklığına soğutulur.

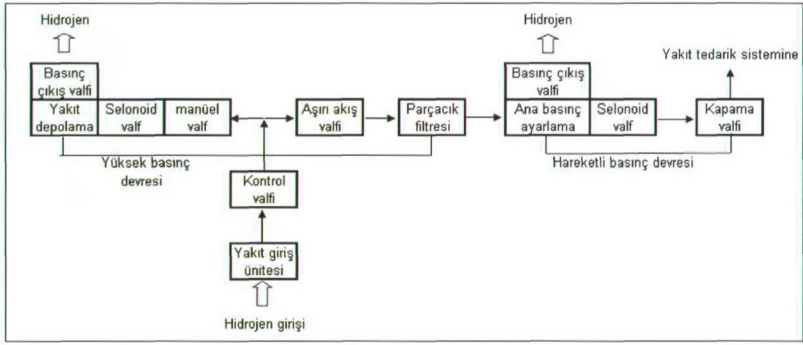
Soğutulmuş hava, bir giriş filtresinden geçerek yağ parçacıklarından temizlenir, daha sonra kütle akış sayacından geçerek, gerçek hava akışı ölçülür. Hava akışı, burdan nemlendiriciye gider ve yakıt pilinin çalışma sıcaklığında suya doymuş hale getirilir. Burdan da yakıt piline geçer.



Şekil 4.1 Hava akış sistemi

4.1.2 Yakıt Depolama Sistemi

Yakıt depolama sistemi, hidrojeni alır, depolar ve dağıtır. Yakıt depolama sistemi, bir yakıt devresi, depolama silindirleri, bir yüksek basınç devresi ve hareketli basınç devresinden oluşmaktadır.



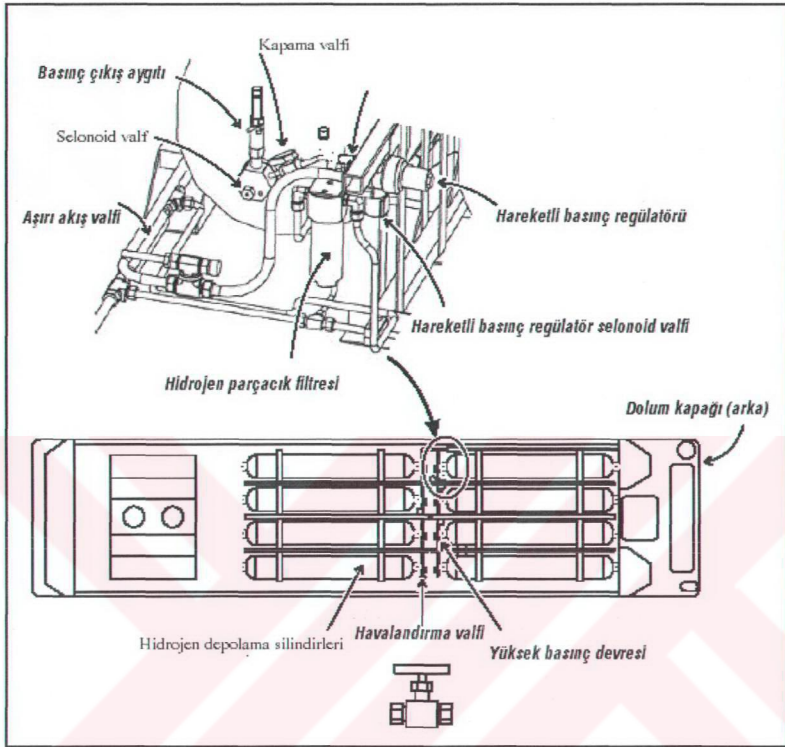
Şekil 4.2 Yakıt depolama sistemi

Yakıt devresi, yakıtı alır, yakıt burdan geri akışı önlemek için kontrol valfine gider; daha sonra yüksek basınç devresine geçerek, hidrojen depolama silindirlere dolar.

Hidrojen depolama silindirleri, hidrojeni yüksek basınçlı gaz olarak saklamaktadırlar.



Şekil 4.3 Hidrojen depolama silindirleri (Lanz, 2001)



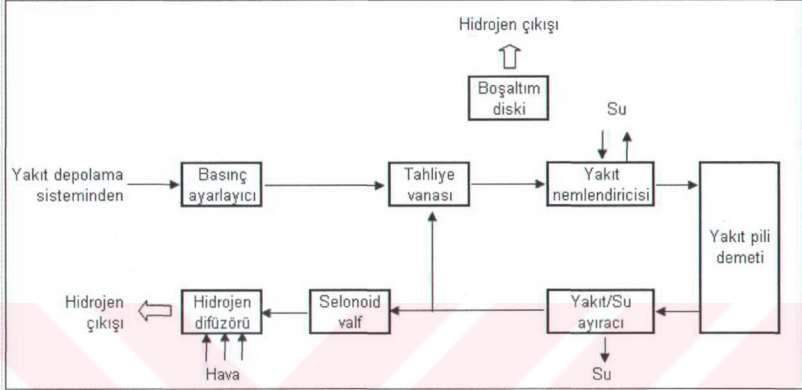
Şekil 4.4 Depolama sistemi (Lanz, 2001)

Depolama silindirlerin yakıt giriş ve çıkışlarında, bir selonoid valf, kontrol valfi, aşırı akış valfi ve manüel çalışan bir kapama valfi bulunmaktadır. Selonoid valf, otobüs çalışmadığı zaman otomatik olarak kapanır. Kontrol valfi ise, solenoid valf kapalı olduğu zamanlarda yakıt geçişine izin verir. Aşırı akış valfi, bir fazlalık olduğunda silindirlere yakıt akışını engeller. Ek bir güvenlik için giriş borularında bir manüel valf daha bulunmaktadır.

Yüksek basınçlı hidrojen silindirlere yüksek basınç devresine geçerek, hareketli basınç devresine gider. Hareketli basınç devresinde, hidrojenin yakıt dağıtım sistemine orta seviyede bir basınçla girmesi sağlanır. Basınç regülatörü, hidrojen basıncını, depolama basıncından ara basınca (1,2 MPa) düşürür.

4.1.3 Yakıt Dağıtım Sistemi

Yakıt dağıtım sistemi, yakıt pili demetine girecek hidrojeni ayarlamaktadır. Sistem, bir yakıt dağıtım devresi ve düzenleme devresinden oluşmaktadır.



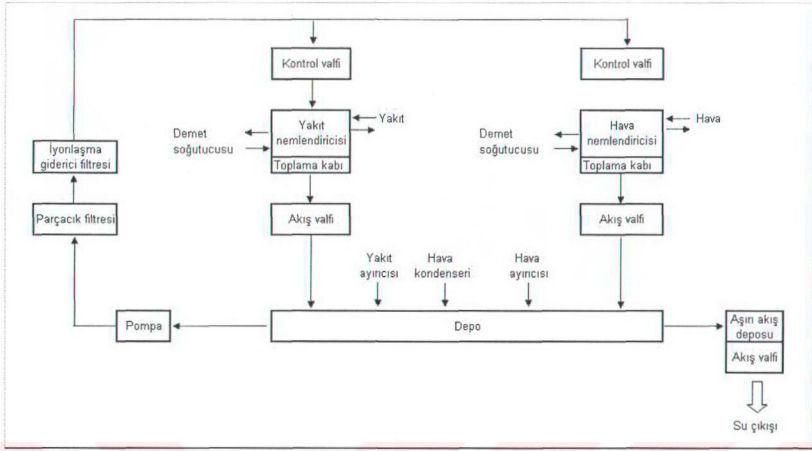
Şekil 4.5 Yakıt dağıtım sistemi

Hidrojen yakıt dağıtım sistemine girişteki basınç regülatöründen giriş yapar. Böylece yakıt pili demetine giren hidrojenin basıncı kontrol altında tutulur. Hidrojenin basıncı 0,32 MPa'ın üzerine çıkarsa, bir boşaltım diskinden hidrojen çıkışı sağlanarak, basınç ayarlanır.

Düzenleme devresi, atmosfere periyodik olarak hidrojen çıkışı gerçekleştirir. Böylece, artık gazlar ve su seviyeleri düzenlenmiş olur. Bir solenoid valf, gaz çıkışını kontrol eder ve motor durduğunda açık konuma geçer.

4.1.4 Nemlendirme Sistemi

Nemlendirme sistemi, hidrojen gazı ve havanın yakıt pilinde kullanılmadan önce suya doymuş olmasını sağlar ve reaksiyon ürünü olan suyun kontrolünü gerçekleştirir.



Şekil 4.6 Nemlendirme sistemi akış diyagramı

Bazı yakıt pili sistemlerinde, nemlendirme sistemi ve yakıt pili demeti soğutma sistemi birleştirilmiştir. Bu sistem, basittir ve mükemmel bir sıcaklık eşleştirme gerçekleştirilir. Fakat soğutucu olarak sadece saf su kullanılmasını gerektirir. Bu da soğuk havalarda ilk hareket problemine neden olur.

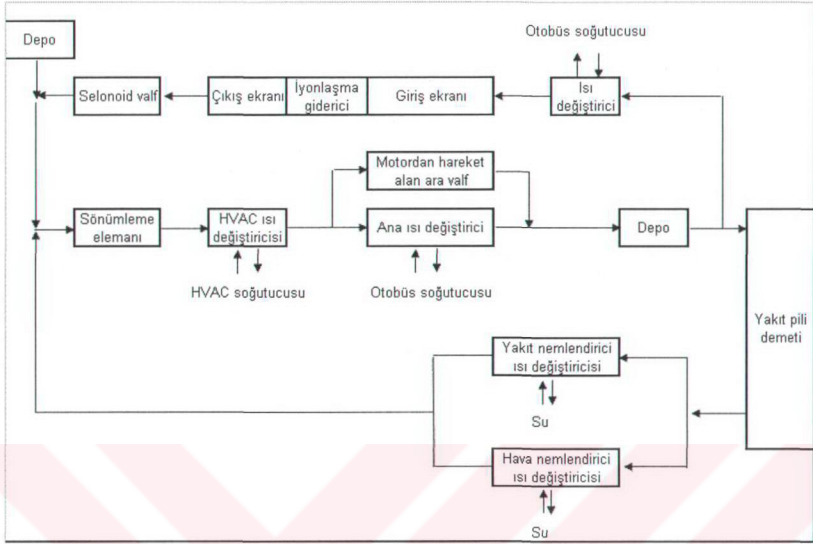
Nemlendirme sistemi, nemlendirme suyunu, su deposundan bir pompa yardımıyla alıp, parçacıklardan, katyon ve anyonlardan temizleyen filtrelerden oluşan bir devreden meydana gelir. İyonlar, akışkanda iletkenlik oluşturabilir ve yakıt pili içinde akışkandaki bu iletkenlik kısa devreye neden olabilir.

Katyon ve anyonlarından temizlenmiş akış ikiye bölünür. Biri havanın biri de yakıtın nemlendirilmesi için kullanılır. Her bir akış, öncelikle bir kontrol valfinden geçerek nemlendiriciye girer.

Nemlendiricilerde kullanılan ısının kaynağı, demet soğutucusudur. Böylece, hem yakıt pili hem de nemlendirici aynı sıcaklıkta çalışır.

4.1.5 Demet Soğutma Sistemi

Demet soğutma sistemi, yakıt pili reaksiyon sıcaklığını ayarlar ve reaksiyona giren gazlar için ısı kaynağı görevi görür. Isıtma ve havalandırma sistemi için de ısı kaynağı olarak kullanılır.



Şekil 4.7 Demet soğutma sistemi akış diyagramı

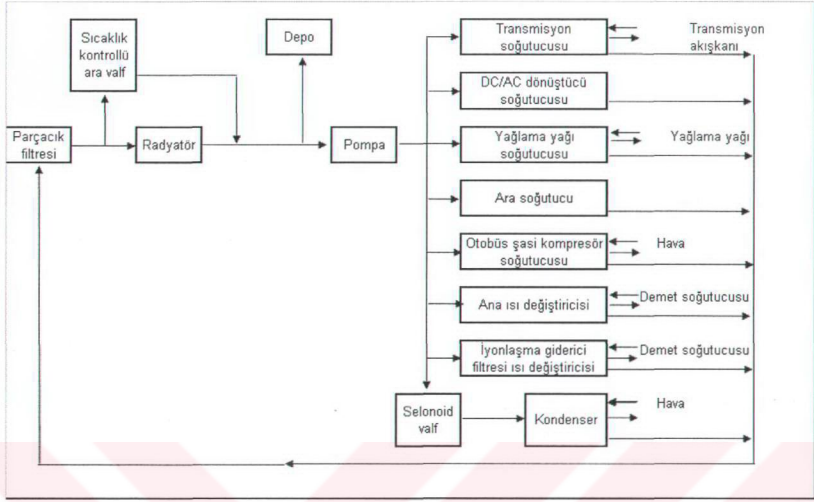
Demet soğutma sistemi, ana soğutucu ve ara filtreleme devresinden oluşmaktadır.

Ana soğutucu devresi, yakıt pili demetinde dolaşarak, ısıyı absorbe eder ve yakıt pili demet sıcaklığını optimum çalışma sıcaklığında tutar. Soğutucu, yakıt pili demetini terkettiğinde hava ve hidrojen nemlendiricilerinden geçerek, nemlendirme suyunun buharlaştırılması için gerekli ısıyı tedarik eder.

Soğutucu, nemlendirme suyu gibi iyonlardan arındırılmalıdır. Ara filtreleme devresinde, soğutucu iyonlardan temizlenir.

4.1.6 Otopüs Soğutma Sistemi

Otopüs soğutma sistemi, yakıt pili motoruna bağlı çeşitli sistemlerden ısıyı alarak, atmosfere verir.



Şekil 4.8 Otobüs soğutma sistemi akış diyagramı

Otobüs soğutma sisteminde bir pompa yardımıyla soğutucu aşağıdaki parçalardan geçer;

- doğru akımı alternatif akıma çevirici
- kondenser
- ara soğutucu
- otobüs şasi hava kompresörü
- ana ısı değiştirici
- İyonlaşma giderici filtresi ısı değiştiricisi
- yağlama yağı soğutucusu
- Transmisyon akışkan soğutucusu

Soğutucu, her bir parçadan ısıyı absorbe eder. Sadece hidrojen difüzörünü, buzlanmayı engellemek için ısıtır. Parçalar şaside soğutma yüküne göre seri veya paralel olarak yerleştirilirler. Kondenserde, soğutucu akışını ayarlayan bir solenoid valf vardır.

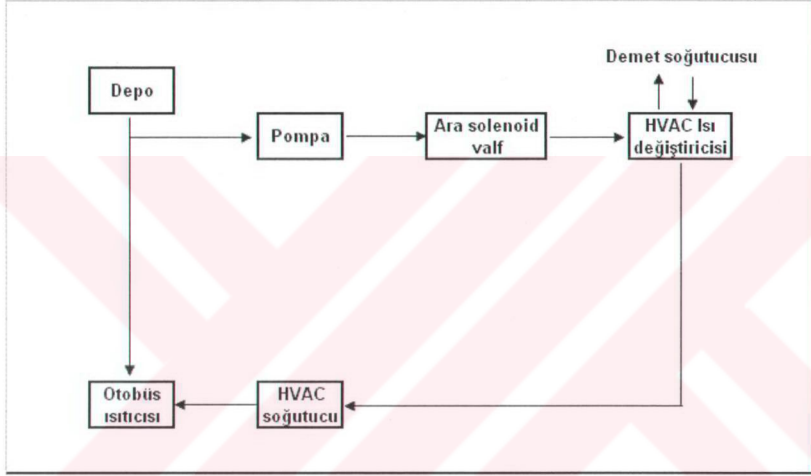
Soğutucu, bir çok parçadan geçtikten sonra, toplanarak parçacıklardan temizlenmek üzere bir filtreden geçer. Bir sıcaklık kontrollü ara valf, soğutucuyu ikiye ayırır. Bir kısmı radyatöre

giderken bir kısmı da başka bir devreden geçer. Radyatöre giden akışkanın sıcaklığı ayarlandıktan sonra birleşirler. Radyatör, hidrolik sistem tarafından çalışan fanlar yardımıyla ısıyı atmosfere bırakır.

Otobüs soğutucusu, yakıt piliyle direkt temas halinde olmadığından iyonlarından temizlenmesi gerekmez. Bu soğutucu, %50 etil glikol ve %50 temiz sudan meydana gelir.

4.1.7 Isıtma ve Havalandırma Sistemi (HVAC)

Isıtma havalandırma sistemi, yolcu bölümünü ısıtmak için kullanılır.



Şekil 4.9 HVAC sistemi akış diyagramı

HVAC sistemi için gerekli ısı, yakıt pili demeti soğutucu akışından bir ısı değiştiricisi ile alınır. Bir ara solenoid valfi, HVAC soğutucusunun, ısı değiştiricisinin içinden mi etrafından mı geçeceğini ayarlar. Sıcak akışkan, bir ısıtıcıdan geçerek, gerekli olursa ek olarak ısıtılır. Daha sonra otobüsün ısıtıcısına geçen akışkan, yolcu bölümüne ısıyı dağıtır.

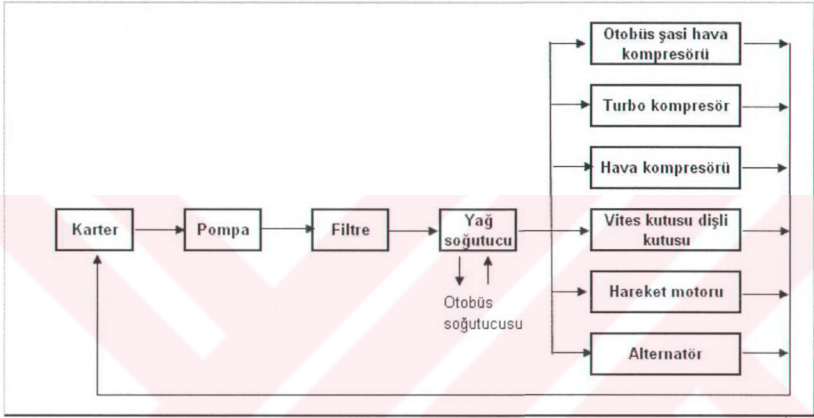
HVAC akışkanı %50 etil glikol ve %50 temiz sudan meydana gelmektedir.

4.1.8 Yağlama Sistemi

Yağlama yağı, karterde bulunur. Karterdeki pompa, yağı, önce bir filtreden daha sonra dağıtma manifoldundan geçirir. Bu manifold yağı öncelikle otobüs soğutma sistemine ısıyı veren soğutucuya gider daha sonra aşağıdaki parçalara dağılır;

- otobüs şasi hava kompresörü,

- turbo kompresör
- vites kutusu dişli kutusu
- hava kompresörü
- motor
- alternatör



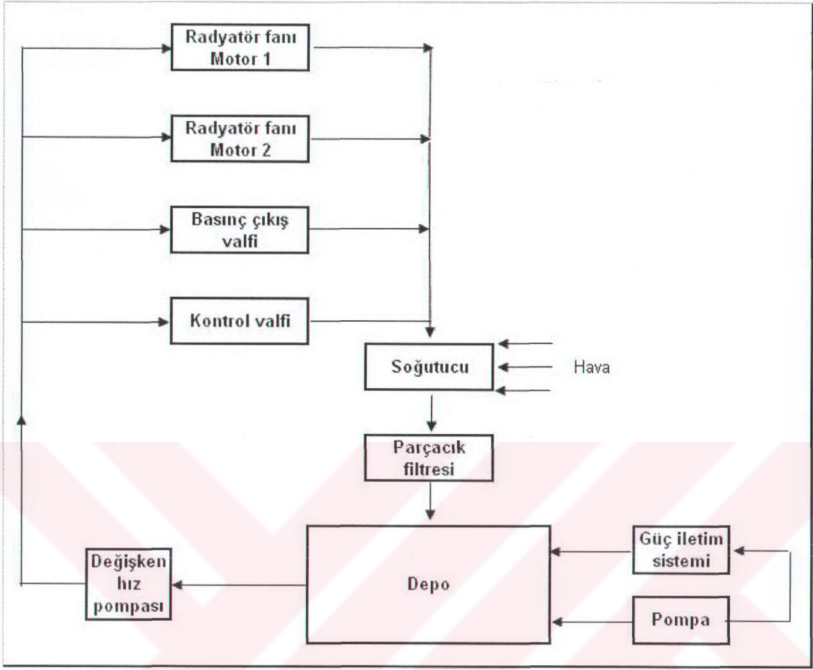
Şekil 4.10 Yağlama sistemi akış diyagramı

Yağlama yağı olarak düşük buhar basıncı olan sentetik yağlar kullanılır.

4.1.8 Hidrolik Sistem

Hidrolik sistemi, radyatör fanlarına ve direksiyon sisteme güç verir.

Radyatör fan devresi, hidrolik akışkanını bir depodan değişken hızlı bir pompa yardımıyla alır. Akışkan daha sonra üçe ayrılır. İki akım radyatör fan motorlarından, üçüncü akım ise basınç azaltma valfinden geçer.

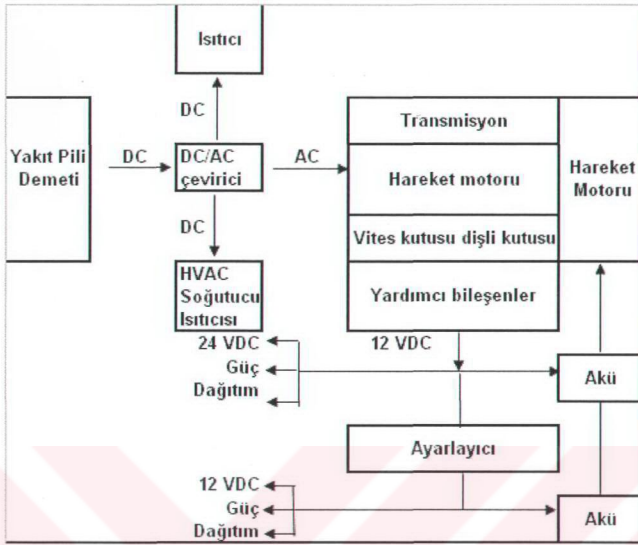


Şekil 4.11 Hidrolik sistemi akış diyagramı

Her iki radyatör fan motoru da radyatörden hava geçiren bir fana bağlıdır. Böylece ısı, otobüs soğutma sisteminden atmosfere atılır. Hidrolik akımlar, fan motorlarından sonra birleşerek depoya dönmeden önce bir akışkan soğutucu ve filtreden geçerler.

4.1.10 Elektrik Sistemi

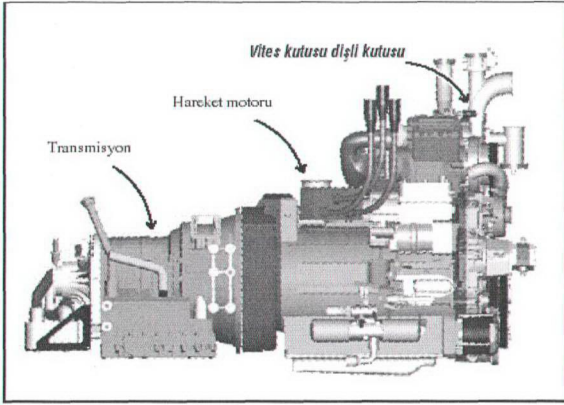
Elektrik sistemi, yakıt pili demetleri tarafından oluşturulan gücü dağıtarak koşulları ayarlar.



Şekil 4.12 Elektrik sistemi

Yakıt pili demetleri tarafından üretilen doğru akım, direkt olarak doğru akımdan alternatif akıma çeviriciden geçer. Doğru akımdan alternatif akıma çevirici, motorun değişik tork ihtiyaçlarını karşılamak için, üç fazlı alternatif akım üretir. İnverter aynı zamanda dump chopperdaki resistöre ilk harekette yakıt pili demetinin sıcaklığını hızlı bir şekilde arttırmak için güç üretir ve ısıtma ve havalandırma sistemine gerektiğinde ısı verir.

Hareket motoru, mekanik gücü otobüsün tahrik mili ve vites kutusu dişli kutusuna iletir. Vites kutusu dişli kutusu, alternatör, hava kompresörü, demet soğutucu pompası, otobüs soğutucu pompası, yağlama yağı pompası, radyatör fan motorları pompası, servo direksiyon pompası, ısıtma havalandırma kompresörü ve otobüs şasi hava kompresörünü çalıştırır. Bir ilk hareket motoru ve diğer yardımcı parçaları ilk harekette döndürür.



Şekil 4.13 Transmisyon (Lanz, 2001)

Alternatör 24 V'luk elektrik üretir; bu güç ayarlanarak otobüs akülerini şarj eder.

5. YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNDE YAKIT PROBLEMİ

Bir çok yakıt pili için, en ideal yakıt hidrojen olmasına rağmen, henüz bir hidrojen alt yapısı mevcut değildir ve hidrojen birincil enerji kaynağından elde edilmektedir. Ne tür bir birincil yakıt kullanılacağı, uygulama üzerinde (sabit uygulamalarda veya taşıtlarda) yakıt oluşturulup oluşturulmayacağı, doğru yakıtın lokal ve global olarak elde edilebilirliğine ve tam olarak yakıt pili tipine bağlıdır. Bu bölümde, yakıt depolanması ile ilgili teknolojik seçenekleri, yakıt hazırlanışını ve tüm sistem üzerindeki etkileri incelenecektir (Hoogers, 2003).

5.1 Yakıt Seçenekleri

Hidrojen, bütün düşük ve orta sıcaklıklı yakıt pilleri için düşünülmektedir. Hidrojenin saflığına olan ihtiyaç, işletme sıcaklığı arttıkça azalmaktadır. PEM yakıt pilleri, yakıt buharında birkaç ppm'lik CO ile çalışamazken, fosforik asit yakıt pilleri, daha yüksek sıcaklıklarda çalışabildiği için, % 1-2'lik CO seviyelerinde dikkate değer bir performans kaybı olmadan çalışabilmektedirler.

Karbon dioksit, yakıt buharında olup olmaması bir diğer önemli husustur. PEM yakıt pilleri, yakıt buharında % 25 oranında CO₂ olduğu zaman küçük performans kayıplarına uğrar. Hızlı performans düşüşleri, Alkali yakıt pillerinde yakıt veya oksitleyicide karbon dioksit mevcut ise; alkali elektrolitinde karbonat oluşur. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri, erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pilleri, hidrojen, CO ve en önemlisi küçük hidrokarbonlarla çalışırlar. Özellikle, metan (doğal gazın en önemli bileşeni) ve başlıca parçanda oluşan LPG kabul edilebilir yakıtlardır. Bu tip yakıt pilleri, belirli seviyelerde CO₂'e tolerans göstermektedirler. NOx oluşumları yüksek sıcaklık yakıt pillerinde görülse bile azot, soygaz olarak bütün yakıt pillerinde kabul edilebilir.

Birincil yakıtlardaki geniş yelpazedeki saf olmayan maddeler her tip yakıt pilinin çalışmasına zarar vermektedir. Kükürt, halojen, silikon bileşenleri bir çok fosil yakıtta veya yenilenebilir enerji kaynaklarında bulunmaktadır. Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, saf olmayan parçacıklara tolerans o kadar artar.

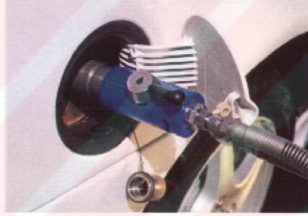
Yakıt hazırlanmasında düşük sıcaklık yakıt pilleri en çok özeni gerektirdiği, özellikle yakıt taşınmasının en kısıtlı olduğu taşıt uygulamalarında önem kazandığı için, PEM yakıt pillerine

daha detaylı değinilecektir. Bu yakıt pilleriyle ilgili görüşler, aynı zamanda diğer tip yakıt pilleri için de geçerlidir.

5.1.1 Saf Hidrojen:

Yakıt pilli taşıtlara yakıt, taşıtta bulunan depoda saklanabilen saf hidrojen gazı ile sağlanabilir. Hidrojen gazı çok fazla difüzyon kabiliyetine sahip olduğu için, yüksek basınç depolarında saklanmalıdır. Günümüzde kullanılan depolarda hidrojen 35 MPa basınçta saklanmaktadır. Bu depolarda saklanan hidrojen, yakıt pilli taşıta 320 km kadar, tekrar yakıt ikmali yapmayı gerektirmeden, sürüş menzili sağlar. Üretici firmalar, daha fazla hidrojeni yüksek basınçlarda depolamak için araştırmalar yapmaktadırlar.

Depolama sorunlarından biri de, günümüzde kullanılan benzin istasyonlarının gaz hidrojen için uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden tüketiciye hidrojen yakıtını daha kolay ve kısa zamanda sağlamanın yeni yolları araştırılmaktadır.



Şekil 5.1 Hidrojenin taşıt deposuna doldurulması [1]

5.1.2 Hidrojence Zengin Yakıtlar

Yakıt pilli taşıtlar metanol, doğal gaz, hatta benzin gibi hidrojen zengin yakıtları da kullanabilirler. Bu yakıtların, taşıtta bulunan reformer tarafından yakıt pilline gönderilmek üzere hidrojenleri ayrılır. Bu prosesler sonucunda az miktarda CO₂ oluşsa da, benzinli motorlarla kıyaslandığında çok az miktardadır.

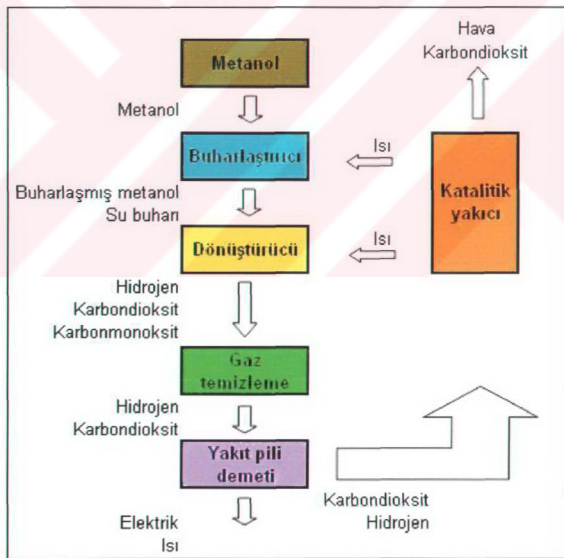
Metanolün yakıt olarak kullanılmasının bir çok üstünlükleri var. Metanolün moleküler bağları zayıf olduğundan hidrojenin ayrılması kolay olur. Metanol de tıpkı benzin gibi oda sıcaklığında sıvı bir maddedir. Yani benzin istasyonlarında önemli bir değişikliğe gidilmeden

kolaylıkla satılabilir. Taşıtlarda metanol için gereken yakıt deposu hidrojeninkinden çok daha küçük ve hafiftir.

Doğal gazın bünyesinde bulunan metan, hidrokarbon yakıtlar içinde en büyük hidrojen/karbon oranına sahiptir, dolayısıyla hidrojen elde etmek açısından önemli bir kaynaktır. Bunun yanında, doğal gazın taşıtta depolanma sorunları olabilir. Sıkıştırılmış doğal gaz için ağır ve büyük depolar gerekmektedir.

Yakıt pili taşıtlarda benzin kullanılmasının avantajı, yakıtın tüketiciye ulaştırılması bakımından kurulu düzenin var olmasıdır. Bunun yanında benzin içinde bulunan bazı hidrokarbon zincirlerinin molekül bağlarının kopması çok zordur. Bu da hidrojenin elde edilmesi bakımından bir dezavantajdır.

Eğer yakıt pilinde yakıt olarak hidrojen yerine doğalgaz kullanılırsa yan ürün olarak az bir miktar CO₂ oluşmaktadır. Doğalgazdan elde edilen enerjinin verimi hidrojeninki kadar yüksek değildir.



Şekil 5.2 Metanolden hidrojen dönüştürücüsü

Bu sistemin dezavantajı, reaksiyonun endotermik olmasıdır. Endotermik reaksiyonlara dışarıdan enerji verilmesi gerekmektedir. Bu, sistemin verimini düşürdüğü gibi, yakıt pilinin

çalışmaya hazır hale gelmesinde bir miktar gecikme meydana getirir. Dolayısıyla, taşıtların ilk kalkışındaki bu gecikmeler, tüketici memnuniyeti açısından olumsuz etkiler yaratır.

Yakıt pilleri ayrıca rejeneratif fren sistemleri ile de donatılmışlardır. Bu sistemler, fren sırasında kaybedilen enerjiyi bir aküde toplar.

Hidrojene ayırma işlemine tabi tutmadan metanolü direkt yakıt olarak kullanmak için yakıt pilleri geliştirilmektedir. Ama henüz bu teknoloji bütün uygulamalarda kullanmak için yeterince fonksiyonel değildir.

Bir yakıt pilinden elde edilen elektrik 1,16 volt kadardır. Bir taşıta güç vermek için bu enerji yeterli olmayacağından, taşıtlarda, bir çok yakıt pilinden oluşan yakıt pili demetleri kullanılır. Yakıt pilinden sağlanacak olan güç, yakıt pili demetindeki birim yakıt pili sayısına, boyutuna ve PEM'in yüzey alanına bağlıdır.



Şekil 5.3 Bir GM yakıt pili demeti [8]

5.1.3 Yakıttan Hidrojen Üretim Birimi (Reformer)

Hidrojen dönüştürme işlemi, hidrojen zengin yakıtların buhar, oksijen veya her ikisi ile hidrojen zengin buhar oluşturan kimyasal bir reaksiyondur. Katı yakıtlara uygulandığı zaman bu işleme gazlaştırma denilmektedir.

Dönüştürme reaksiyonları su ve ısıya ihtiyaç duyarlar. Dönüştürücünün toplam verimi elde edilen hidrojenin alt ısı değerini kullanılan toplam yakıtın alt ısı değerine oranı ile hesaplanmaktadır. Yüksek sıcaklık dönüştürücülerinin verimi % 65, düşük sıcaklık metanol dönüştürücülerinininki ise %70'dir.

Fosil yakıtların dönüştürülmesinin avantajları;

- Mevcut yakıt altyapısının kullanılması,
- Hidrojenin nakil ve depolama ihtiyacının azaltılması,
- Elektrolizde ihtiyaç duyulandan daha az enerji gerektirmesi,
- Diğer hidrojen üretim yöntemlerinden daha ucuz olması.

Dezavantajları ise;

- Nispeten daha uzun ısınmaya ihtiyaç duyulması (ilk harekette),
- Taşıt uygulamalarındaki değişken güç ihtiyaçlarını karşılayamaması,
- Karmaşık, büyük ve pahalı olması,
- Enerji dönüştürmede ek kayıplara neden olması,
- Yenilenebilir fosil yakıtların kullanılamaması,
- Hava kirliliği. Dönüştürücülerin neden olduğu kirliliği üç grupta toplayabiliriz, karbondioksit emisyonları, tamamlanmamış reaksiyonları sonucu oluşan karbonmonoksit, yanma sonucu oluşan azot bileşenleri.

Dönüştürmede kullanılan başlıca yakıtlar, metan, metanol, benzin, mazot ve kömürdür. Çizelge 5.1'de bu yakıtların dönüştürme oranları buharla dönüştürme ve kısmi oksidasyon ile dönüştürme yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Yakıtların, değişik dönüştürücü tiplerine göre verimleri (Lanz, 2001)

	Metan		Metanol		Benzin/Mazot		Kömür	
	Buharla dönüştürme	Kısmi oksidasyon	Buharla dönüştürme	Kısmi oksidasyon	Buharla dönüştürme	Kısmi oksidasyon	Buharla dönüştürme	Kısmi oksidasyon
Hidrojen	% 75,7	% 47,3	% 71,1	% 37,8	% 71,1	% 37,8	% 63,1	% 23,6
Azot	% 1,9	% 33,5	% 1,9	% 39,8	% 1,9	% 39,8	% 1,9	% 49,2
Karbondioksit	% 19,9	% 16,7	% 24,5	% 19,9	% 24,5	% 19,9	% 32,5	% 24,7
Kaynak yakıt/diğer	% 2,5	% 2,5	% 2,5	% 2,5	% 2,5	% 2,5	% 2,5	% 2,5

Dönüştürme işlemi PEM yakıt pillerinde aşağıdaki noktalar gözönüne alınarak kullanılabilir.

- Karbonmonoksit ve diğer saf olmayan yakıt bileşenleri kabul edilebilir bir seviyeye düşürülmelidir. Çünkü bunlar PEM yakıt pillerini zehirlemektedir.
- Reaksiyona girmeyen sıvı yakıtları, yakıt piline girerse, güç üretimini engellerler.

- Azot, karbondioksit ve gaz yakıtlar, yakıt pillerine zarar vermeseler bile, hidrojenin saflığını bozacakları için, saf hidrojenle çalışan yakıt pillinde daha büyük bir sisteme gerek duyulur.
- Dönüştürücü kullanımında, gazlar suya doymuş olacağından yakıt nemlendirici ihtiyacı kalmaz.

Dönüştürücü tipleri:

Temel olarak üç tip dönüştürücü bulunmaktadır, buharla dönüştürme, kısmi oksidasyon dönüştürücüleri ve ototermal dönüştürücüler.

1- Buharla dönüştürme

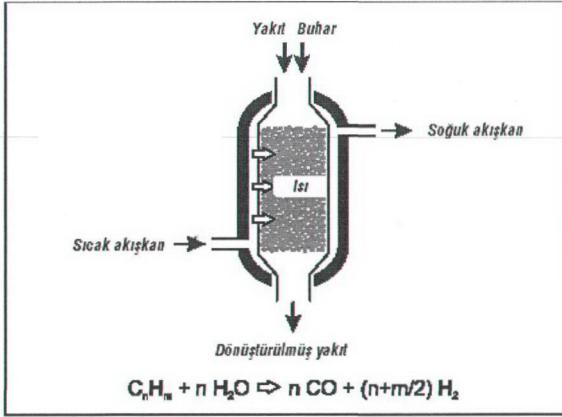
Buharla dönüştürme işlemi, mevcut en verimli, ekonomik ve geniş olarak kullanılan sistemdir. Buharla dönüştürme işlemi, hidrojen içeren yakıtların nikel bazlı bir katalizör yardımıyla, buharla hidrojen ve karbonmonoksit karışımı üretmesidir.



İşlem sonucunda reaksiyona girmemiş yakıt ve su kalabilir. Hafif hidrokarbonlar, karbon artırmadan tamamıyla buharlaşabilirler. Karbonmonoksit ek işlemlerle karbondioksite dönüştürülmelidir.

Hidrojen oluşumunda yakıtın suya oranı önemli bir rol oynamaktadır. Fazla su ya dışarı atılmalı ya da yakıt pilinin ürünü su buharına karıştırılmaldır.

Yakıt ve su oranının karmaşık kontrolü, ısı, termik kütle ve hidrojen ihtiyacının nispeten yavaş ilk hareket özellikleri nedeniyle, buharla dönüştürme sistemi otomotiv uygulamaları için karmaşık kontrol sistemleri ve yaratıcı mühendislik çalışmaları gerektirmektedir. Buharla dönüştürme için tipik bir binek taşıtta, 5-7 litre katalizör ve benzin deposunun 3 katı büyüklükte bir metanol/su deposuna gerek duyulur.



Şekil 5.4 Buharla dönüştürme şeması (Lanz, 2001)

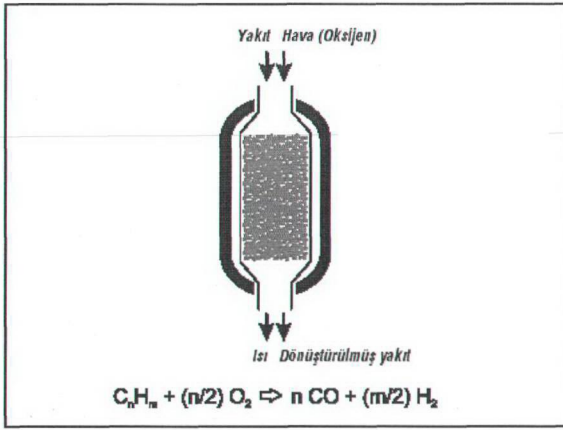
2- Kısmi Oksidasyon dönüştürücüleri

Kısmi oksidasyon dönüştürücülerinde hava (oksijen) ve yakıt karışımı, hidrojen ve karbonmonoksit oluşturulur.



Oksijen kaynağı olarak hava kullanıldığından reaksiyon ürünleri ile azot da ortama karışmaktadır. Karbonmonoksit ek işlemlerle karbondioksite dönüştürülmelidir.

Buharla dönüştürmeden farklı olarak kısmi oksidasyon dönüştürücüleri, benzin, mazot gibi ağır hidrokarbonların dönüştürülmesinde kullanılmaktadır.



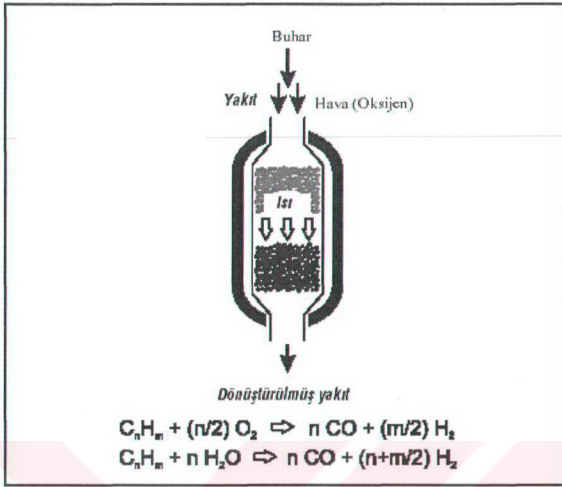
Şekil 5.5 Kısmi oksidasyon dönüştürme şeması (Lanz, 2001)

Kısmi oksidasyon dönüştürücülerinin verimi buharla dönüştürmeden daha düşüktür. Bunun nedeni, bu reaksiyonları ekzotermik olmasıdır. Bu demektir ki, yakıt enerjisinin bir kısmı ısı olarak açığa çıkmaktadır. Fakat buharla dönüştürmeye oranla, ilk hareket ve değişik yüklere uyumları daha iyidir.

3- Ototermal dönüştürücüler

Ototermal dönüştürücüleri, kısmi oksidasyon dönüştürücülerinin değişik yüklere uyumunu, buharla dönüştürmenin de yüksek verimini elde edebilen ikisinin bileşimi bir sistemdir.





Şekil 5.6 Ototerml dönüştürücü şeması (Lanz, 2001)

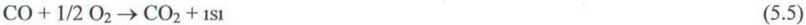
Ototerml dönüştürmede, yakıt, buhar ve oksijen (veya hava) karışık katalizörlerden geçerek, kısmi oksidasyon ve buharla dönüştürme reaksiyonlarını desterler. Kısmi oksidasyonda ortaya çıkan ısıyı buhar buharla dönüştürmede kullanılmakta böylece dışarıdan bir ısıtıcı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

Dönüştürücülerin temizlenmesi:

Buharla, kısmi oksidasyon ve ototerml dönüştürücüleri sonucunda açığa çıkan karbonmonoksit karbondioksite dönüştürülmedir. Bu temizleme işlemi iki basamakta gerçekleştirilir. Öncelikle, su/gaz değişim reaksiyonu ile karbonmonoksit karbondioksite dönüştürülmektedir.



Daha sonra, karbonmonoksit oranı oksidasyon veya metanidasyon reaksiyonları ile azaltılmaktadır.





5.2 Mevcut Hidrojen Depolama Teknolojisi

Hidrojenin yakıt pillerinde kullanılmasının bir avantajı da depolanabilmesidir. Hidrojen, basınçlı gaz, krojenik sıvı, metal hidrit ve metanol ile amonyak gibi kimyevi maddeler şeklinde depolanabilmektedir. Fakat hidrojenin yüksek difüzyon katsayısına sahip olması nedeniyle depolanmasında bazı sorunlarla karşılaşılabilir.

Taşıtlardaki yakıt probleminde bir çözüm, taşıtta temiz hidrojen depolanmasıdır. Ne yazık ki, hidrojenin kritik sıcaklığı (hidrojen gazının sıvılaştırma sıcaklığı - 240 °C), çevre sıcaklığından düşüktür. Bu da demektir ki, çevre sıcaklığında, saf hidrojen sadece basınçlı silindirlerde gaz olarak saklanabilmektedir.

Krojenik tanklarda, hidrojenin kaynama noktasında, 20.39 K (-252.76°C/-422.97°F), 1 atm (981kPa) depolama, sıvılaştırma prosesi için gerekli olan enerjinin harcanmasında yüksek depolama yoğunluklarına izin verir. Diğer depolama metodları, hidrojenin diğer bazı taşıyıcı malzemelere adsorbsiyonuna dayanır. Metal hidrit tankları başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Hidrojen, küçük moleküllere sahip oluşu ve yüksek difüzyon özelliğinden yararlanılarak, katı metallerin kafes şeklindeki yapılarına nüfuz ederek kristal yapının çeşitli yerlerine bağlanırlar. Bu şekilde hidrojen, metal içinde yüksek yoğunlukta saklanabilir. Pratikte, bu depolama metodu, depoların ağırlığı ve depolama prosesi sırasında açığa çıkan ısı nedeniyle, özellikle taşıtlar için uygun değildir.

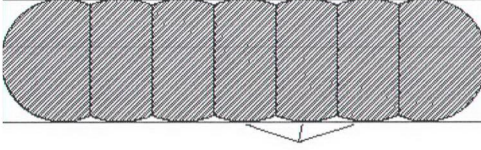
Diğer bir ilginç hidrojen depolama yöntemi ise, buhar-demir prosesidir. Bu işlem için, demir oksit, yüksek derecede reaktif metalik demire kimyasal olarak indirgenir. Demir, taşıt üzerinde özel tanklarda saklanır. Demirin oksijene eğilimi fazla olduğu için, suyun demiri oksitlemesi işleminde ortaya hidrojen çıkacaktır. Bu yöntem, demir oksiti indirgeme metodu ve indirgeme elemanı kullanımı açısından esnek olsa da, depoların ekonomik ve yapılabilirlik açısından bazı sorunları bulunmaktadır.

5.2.1 Basınç Silindirleri

Hidrojen, gaz olarak yüksek basınçta, hafif fakat güçlü malzemelerden yapılmış kaplarda saklanmaktadır. Çünkü hidrojen atomları küçük olup, bir çok malzemeden geçebilmektedir.

Depolamanın daha hafif olması için, çelikten daha hafif kompozitden yapılmış silindirler geliştirilmektedir (Hoogers, 2003).

Piyasada bulunabilen karbon sarılı alüminyum silindirler; hidrojeni 55 MPa (550 bar/8000 psi) basınca kadar depolayabilmektedir.



Hidrojen basınç silindirleri

Şekil 5.7 %50 yer kazancı sağlayan basınç tankları (Hoogers, 2003)

Bir çok ülkede, gaz silindirleri 24.8 veya 30 MPa (248 bar/3600 psi ve 300 bar/4350 psi) basınçlara kadar doldurulmaktadır. Yüksek basınçta, modern kompozit tankı %3 hidrojen kütlesi oranına ulaşmaktadır; yani toplam tank ağırlığının sadece %3'ü hidrojenden oluşmaktadır.

Yerden kazanç sağlamak için geliştirilen yeni tip tanklar; doluyken 29 kg ağırlığında olup, bunun 1,5 kg'ı hidrojendir, bu da yaklaşık %5,2 depolama yoğunluğu demektir. Hidrojen depolama, gaz kaçaqlarını önlemek için aynı zamanda polimer duvarı kullanımını da gerektirebilir.

Hidrojeni basınçlı depolama şeklini, Ballard Power Ssystems, DaimlerChrysler ve diğerleri bir çok otobüs protipine uygulamışlardır. Haziran 1995'de, Ballard ikinci otobüsünü tanıtmıştır; sıfır emisyonlu taşıt (ZEV), 275 beygir gücünde (205 kW) yakıt pili motoru ile çalışmaktaydı. 400 km menzilli bu otobüs, dizel transit otobüslerinin çalışma performansına ulaşmaktaydı. Otobüs, 30psig (207 kPa) basınçta sıkıştırılmış hidrojenle çalışmakta idi. Hidrojen, otobüsün çatısında, 3600 psig (24,8 MPa) basınçta tanklarda depolanmaktaydı (sıkıştırılmış doğal gaz için normal bir değer) (Hoogers, 2003).

Daimler Chrysler's 1997 NEBUS taşıtında, çatıda 150 litrelik, 30 MPa basınçlık silindirler bulunmaktaydı. Bunlar, yakıt pillerine yaklaşık 45,000 litre hidrojen sağlayabilmekteydiler. NEBUS, bu miktarda hidrojenle yaklaşık 250 km yol katedebilmekteydi.

General Motors'un şu anki hidrojen depolama sistemi, 140-litre/65 kg'lık bir tankda 350 bar basınçta 2,1 kg hidrojen tutabilmektedir, menzili 170km'dir. Hedef, 230 litre/110 kg'lık bir tankta 70 MPa basınçta 7 kg hidrojen tutup, 700 km'lik bir menzil elde etmektir.

Bu yöntem, en ekonomik depolama yöntemi olmakla beraber hidrojenin enerji yoğunluğunun oldukça düşük oluşu ve taşıt boyutlarına bağlı olarak basınçlı kapların belirli boyutlarda yapılma zorunluluğu nedeniyle depolanan hidrojen miktarı ağırlık olarak yetersiz kalmaktadır. Üstelik kullanılan basınçlı kapların emniyetli olmaları gereği nedeni ile kap içindeki hidrojenin az olmasına karşın kabın boş ağırlığı fazla olmaktadır. Bu durum küçük boyutlardaki taşıtlar için önemli sorunlar yaratmakta ve taşıtın bir depo yakıtla katedeceği mesafe kısalmaktadır.

5.2.2 Sıvı Hidrojen

Hidrojenin sıvı halde depolanmasının bir takım yararları ve zararları vardır. Ağırlık olarak nispeten hafif bir depolama şeklidir. Sıvılaştırma için gerekli enerji büyüktür. Hidrojen gazı sıvılaştırılmaktadır. Hidrojen gazı, sıvı hale geçerken bir kısmı buharlaşır bu sebeple faz değişiminin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Sıvı olarak hidrojenin tanklarda depolanması ve kullanılması sırasında buharlaşma kayıpları meydana gelir. Hidrojenin tanklarda depolanması düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden kullanılacak yakıt tankının ısı yalıtımının çok iyi yapılması gerekmektedir. Depo yalıtımının tam anlamı ile yapılması nedeniyle oluşan ısı transferi, depo basıncının artmasına neden olur. Basıncın artmasını önlemek için buharlaşan hidrojenin atmosfere atılması gerekmektedir.

Hidrojenin sıcaklığını kaynama noktasına ($-252.76^{\circ}\text{C}/-422.97^{\circ}\text{F}$), atmosferik basınçta düşürmek, yaklaşık 39,1 kJ/g'lık bir enerji gerektiriyor. Diğer bir bakış açısıyla, bu enerji, hidrojenin alt ısı değerinin (LHV 242 kJ/mol) üçde biri ve hidrojenin üst ısı değerinin (HHV 286 kJmol⁻¹) dörtte birine eşdeğerdir. Diğer bir deyişle, tüm enerji verimini önemli bir kısmı, krojenik tanklar doldurulduğu sırada kaybolmaktadır.



Şekil 5.8 BMW içten yanmalı motorlarda kullanılan hidrojen deposu (Hoogers, 2003)

Krojenik depolama ile ilgili bir sorun da hidrojenin buharlaşmasıdır. İyi bir termik yalıtıma rağmen Krojenik tanklardaki ısı, sıvının sürekli olarak buharlaşması ile yenilenmektedir. Arabalardaki krojenik depolama sistemlerinde, kaynama oranı birçok araştırması tarafından % 1 olarak tahmin edilmektedir ki, bu önemli bir kayıptır.

Krojenik tanklar, Linde ve Messer gibi bir çok firma tarafından üretilmektedir. Bu tanklar, çok katmanlı alüminyum folyo yalıtımına sahiptirler. BMW'nin içten yanmalı motorlarda hidrojen depolamak için kullandığı krojenik tanklar, 120 lt krojenik hidrojen depolayabilmektedir. BMW'in kullandığı bu depo, 200 lt hacme ve 51,5 kg ağırlığa sahiptir.

General Motors'un 'HydroGen1' taşıtı, 130 litre/50 kg'lık bir depoda 5 kg hidrojen saklayabilmektedir ve 400 km menzile sahiptir.

Krojenik tankların güvenlikle ilgili bir sorunları olmayıp, Alman güvenlik yetkili firması; TÜV tarafından onaylanmıştır. Krojenik hidrojenle ilgili önemli sorun, yakıt dolum istasyonlarında bazı prosedürlere uyulması gerekliliğidir. Almanya Münich Havaalanında; Linde ve BMW işbirliği ile tamamen otomatik ve robotik bir dolum istasyonu kurulmuştur. (Şekil 5.9)



Şekil 5.9 Münih Havaalanı; krojenik dolum istasyonu (Hoogers, 2003)

5.2.3 Metal Hidritler

Bir çok element, iyonik, metalik, kovalent veya polimerik hidritler oluşturur. İyonik ve metalik tipler, hidrojenin tersinir depolanmasına izin verir.



Şekil 5.10 MINI Cooper Hidrojen deposu (Hoogers, 2003)

Hidrit oluşumu ekzotermal bir işlemdir. Bu olaydaki önemli parametreler, hidrit oluşumunun entalipisi ve hidrojenin hidritten salınması için gerekli olan uygun basınç ve sıcaklıktır. Bu değerleri kabul edilebilir seviyelerde tutmak için, intermetalik bileşenler geliştirilmiştir. Çizelge 5.1'de metal hidrit sistemlerinin listesi görülmektedir. Hidrit tipine göre, hidrojenin kütle oranı toplam kütle için % 1,4 ile 7,7'si arasında değişmektedir. Birçok metal hidrit, hacimce sıvı hidrojenle daha fazla hidrojen depolayabilmektedir. Çizelge 4.1'de ayrıca hidrojen salımı sırasında açığa çıkan ısılar gösterilmektedir.

Bir metal hidrit biriminin 60 cm^3 'ü, 1,7 kg hidrojen tutabilmektedir. Daha büyük bir sistemde; 1,7 litre hacminde 3,5 kg ağırlığında bir silindirde, 7,5 kg'lık hidrit 0,14 kg hidrojen depolayabilmektedir, dolayısıyla kütle oranı %1,3 olmaktadır.

Metal hidrit depolama sitemleri, eğer alt yapı kurulursa, taşınabilir yakıt pili sistemleri için uygun olabilir. Otomotiv uygulamaları için iki büyük sorun vardır. Bir çok durumda, depolama prosesi kendisi önemli miktarlarda ısı açığa çıkarır ki, bu da yakıt verimini düşürür. Metal hidritin dolumu sırasında açığa çıkacak olan hızlı ısı artışı; dolun istasyonundan bu ısının uzaklaştırılması gibi bir problem doğurur. Bununla beraber, krojenik depolamada da aynı sorun mevcuttur. En önemlisi, metal hidritlerin ağırlığı şu an için arabalarda kullanım için uygun değildir.

Metal hidrit depolama için, hidrojen saflığı açısından da önemlidir. Bazı görüşlere göre, metal hidritler sayesinde, hidrojenler daha saf olarak depolanabilmektedir, çünkü saf olmayan elementler, depolama ortamında kararlı bileşikler oluşturamazlar. Bununla beraber, CO, O₂ ve H₂O gibi katıklar, depoda kalıcı hasarlar verebilir, bu da depolama kapasitesini hızlı olarak düşürür.

6. YAKIT PİLİ İLE ÇALIŞAN TAŞITLARIN AVANTAJ ve DEZAVANTAJLARI

6.1 Avantajlar

- 1- Yakıt pilli sistemler, saf hidrojen kullanıldığı zaman; reaksiyon ürünleri saf su ve ısıdır. Hidrojence zengin yakıtlar kullanıldığı zaman ise zararlı emisyonları; özellikle içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığı zaman yok denecek kadar azdır.
- 2- Yakıt pilli sistemler, ısı makinalarına (içten yanmalı motorlar ve türbinler) göre daha yüksek termodinamik verim ile çalışırlar.

$$\text{Verim}_{\max} = 1 - (T_2 - T_1) \quad (6.1)$$

T_1 = Emme gazlarının mutlak sıcaklığı

T_2 = Egzos gazlarının mutlak sıcaklığı

Bu denklemden görüldüğü gibi, motora giren hava ne kadar sıcak; egzos gazı da ne kadar soğuk olursa termodinamik verim o kadar yüksek olur. Yakıt pillerinde yanma reaksiyonu olmadığı için; verimleri maksimum işletme sıcaklığına bağlı değildir.

- 3- Yakıt pilleri, sistemin büyüklüğüne bağlı olmaksızın yüksek verimde çalışırlar.
- 4- İçten yanmalı motorlu taşıtlara göre daha sessiz çalışırlar.
- 5- Yakıt pilli sistemlerinde hareketli parçaların az olması, bakım masrafını azaltır.
- 6- Yakıt esnekliği olması.

6.2 Dezavantajları :

- 1- Hidrojenin depolanması
- 2- Soğuk havalarda çalışma: Çalışma ürünü olarak ve nemden dolayı yakıt pilinde bulunan su, soğuk havalarda donma tehlikesi yaratır. Yakıt pillerinin tam performansla çalışabilmeleri için de belirli bir sıcaklık sağlanmalıdır.
- 3- Hidrojenin tüketicileri ulaştırılması, dağıtım altyapısının yetersiz olması,
- 4- Maliyet: Gerek katalizörlerin gerekse elektrolit zarfının pahalı olması nedeniyle, yakıt pillerinin maliyetleri henüz tüketiciye sunmak için fazladır. Özellikle taşıtlarda kullanılan yakıt pillerinde çok pahalı bir malzeme olan platinyum katalizör kullanılmaktadır. Ayrıca hidrojen elde edilme ve hidrojenin tüketiciye ulaşma

maliyetinin de düşürülmesi gerekmektedir. Günümüzdeki birim enerji maliyeti 4500\$/kW, 2010 yılı itibarıyla hedeflenen maliyet ise 10-15\$/kW.

- 5- Yakıt pilli sistemleri oldukça ağırdırlar. Yakıt pilleri kendi başlarına çok ağır olmasalar da yardımcı sistemleri ve depoları ağırdır.
- 6- Güvenlik, henüz araştırma aşamasındadır.
- 7- Diğer teknolojiler ile yarış : Üreticiler, halen benzinli ve dizel motorların verimini arttırmak için çalışmalar yapmaktadırlar. Benzin-elektrik hibrid taşıtı her geçen gün popülerlik kazanmaktadır.
- 8- Toplumun kabul etmesi, zaman gerektirmektedir.

6.3 Güvenlik

Tepkimeyi başlatan kimyasal reaksiyon nedeniyle bütün yakıtlar tehlikelidir. Bu tepkimeyi başlatma özelliği, yakıtların mükemmel bir enerji kaynağı olmasını sağlamıştır. Hidrojen doğası dolayısıyla, doğal gaz ya da benzinden daha fazla yakıcı değildir. Ancak hidrojenin kendisine has özellikleri vardır ve uygun bir şekilde kullanılmalıdır. Hatta bir çok açıdan hidrojen, diğer yakıtlara göre daha güvenlidir.

Hidrojenle meydana gelebilecek bütün kazaların temelini, hidrojen kaçakları oluşturur. Kaçak olmadan hidrojen hava ile karışmaz ve böylece yanabilirlik veya gazla boğulma olayları için temel hazırlanmamış olur. Kaçaklara ek olarak sıvı hidrojenin düşük sıcaklıkta olması, donma ve oksijen yoğunlaşmasına temel hazırlar.

6.3.1 Hidrojen Kaçakları

Hidrojenin sızıntıya sebep olan özellikleri:

- Molekül ağırlığı en düşük olan element hidrojendir ve en küçük moleküle sahiptir.
- Yoğunluğu en düşük olan ve en hafif elementtir
- Bazı maddeler içerisinde kırılabilirliğe sebep olabilir.
- Hidrojen renksiz, kokusuz ve tatsızdır.
- Bir ortamda oksijen miktarının azalmasına sebep olacak yoğunluğa erişilirse boğulmalara sebep olabilir.

Hidrojen moleküllerinin küçük boyutta olması zapt edilmesini zorlaştırır. Yüksek miktarda olduklarında, dizayn sebebiyle, hidrojen kaçak potansiyeli azalır. Kullanılan malzeme

hidrojen kullanımı için tasarlanmıştır ve metal kırılmasına karşı dayanıklıdır. Yakıt hatları hiçbir zaman yolcu bölmesinden geçmez, böylece hidrojenin araç içerisine girme riski azaltılmış olur.

Transit otobüs uygulamasında, hidrojen, aracın tavanında yüksek basınç silindirleri içerisine yerleştirilmiştir. Hidrojen kaçak durumunda, direkt olarak atmosfere karışarak yok olacaktır.

Araçta en yüksek miktarda hidrojeni bu depolama silindirleri bulundurur. Yakıt hücresinde veya içten yanmalı motorda bulunan hidrojen miktarı çalışma sırasında çok azdır ve çalışmadığında ise mevcut değildir. Depolama silindirlerindeki ve manifolddaki hidrojen yüksek basınçta ancak motor içerisindeki ise düşük basınçta. Bu yüzden yakıt yolları, kaynak yapılmamış bileşim yerleri, metal olmayan contalar olası kaçak noktalarıdır.

Hidrojen yakıt pili motorunda kullanılacağı zaman, yakıt pili demetinden gelen hava ve oksijen direkt olarak karışmayacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu ise kullanılan contalar ile sağlanır. Zamanla bu contalardan oluşabilecek kaçaklarla meydana gelen hidrojen birikimini önlemek için yakıt pili demetleri, basınçlı hava ile havalandırılmaktadır. Yakıt pili demetlerindeki kaçaklar, bir yakıt pilinin elektrik performansının düşmesi ile kendini gösterir.

Hidrojen kendi başına bir olaya sebep olmaz, ancak hava ile uygun konsantrasyonla karıştığında yangın tehlikesi oluşur. Ortam içerisindeki oksijenin yerini dolduruyorsa boğulma tehlikesini doğurur.

Hidrojen kaçağının tespit edilmesi:

Hidrojen renksiz ve kokusuz olduğu için, oluşan kazalar, varlığının tespit edilememesi sebebiyle oluşmaktadır.

Otobüs uygulamasındaki kaçak tespit sistem, aracın kontrol mekanizmasına bağlanmış olan bir çok sensörden oluşmuştur. Sensörler tavan döşemesinin altı ve motor kompartımanı gibi araç üzerinde kritik yerlere yerleştirilmiştir. Hidrojen konsantrasyonun alt tutuşma limiti (LFL) %5-15 aralığında olduğunda bir uyarı, %25 olduğunda alarm vermektedir. Havadaki hidrojenin alt tutuşma limiti (LFL) %4 'dür. Hidrojen konsantrasyonu 0,2, 0,6 ve %1 olduğunda yani tehlikeli boyutlara gelmeden kullanıcı uyarılmaktadır.

Bir çok durumda, kaçak tespit sistemi araç çalışırken devrededir. Bu yüzden araç çalışmadığı anda bakım sırasında ya da park hali gibi yakıt dolu olduğu anlarda, görev yapan yardımcı kaçak tespit sistemi bulunmaktadır.

Hidrojen kaçaqları az veya çok miktarda gerçekleşebilir. Gaz kaçağı, gaz akış sesi ile basınçtaki düşüş veya uyarı sisteminin devreye girmesi ile anlaşılabilir. Gaz kaçağı çok az ise bu metotlarla tespit edilemez, özel kaçak testleri ile kontrol etmek gerekir.

Hidrojen kaçaqlarının engellenmesi:

Temel olarak hidrojen kaçaqları, kaçak yeri bileşenlerinin kısılması ya da değiştirilmesi suretiyle onarılmaktadır.

Kaçak yerinin onarılması, hidrojenin birikim yapmayacağı ve ateşleme noktasından uzak güvenli bir alanda gerçekleştirilmelidir.

Yakıt depolama devresi, araç çalışmadığı anda bile yüksek basınç altındadır. Geri kalan sistemler, yalnız araç çalıştığında basınç altındadır. Motor stop ettikten sonra, akü bağlantıları kesilerek ve aracın elektrik aksamını devreden çıkararak onarmak gerekmektedir.

Kaçak yeri tespit edildikten sonra o noktalarda gerekli sıkılmalar yapılır veya parça değiştirilir. Ancak değişim yapılacak noktada yüksek basınç varsa, devrenin açık hava ortamında havalandırılması gerekmektedir, aksi takdirde büyük hasarlar meydana gelebilir.

Hidrojen Yangınları :

Hidrojenin yanmasına sebep olan özellikleri:

- Bütün yakıtlar arasında yanabilirliği en fazla olan yakıttır.
- Çok düşük ateşleme enerjisi gerektirir
- Ağırlık başına en çok enerji sahibi olan yakıttır
- Dumansız ve görünmeden yanar
- Akış yönünde kıvılcım oluşumuna sebep olan elektrostatik yüklenme meydana getirebilir.

Kaçak bir kez meydana geldikten sonra, hidrojen hava ile karışır, belirli konsantrasyonlarda yanabilir. Bu karışımın ateşlenmesi çok kolaydır ve yanma meydana geldiğinde şiddetli olur. Alevi gün ışığında görmek çok zordur. Eğer hidrojen kapalı bir ortama sızarsa yanma ve patlama ihtimali artar, bir kıvılcımla ya da sıcak bir yüzeyle kolayca tutuşur.

Büyük miktarlarında, dizaynı ile yanma ihtimali azaltılmıştır. Yapım malzemeleri yanmaya dayanımlıdır, statik yük birikimini engelleyecek şekilde küçük parçacıktan yapılmıştır. Yüksek basınç yakıt depo silindirelerinde bulunan basınç serbest bırakma noktaları, yanma meydana geldiğinde basıncı serbest bırakır, böylece silindir içerisinde patlayıcı basınç

oluşumu engellenmiş olur. Basınç tahliye noktası otobüsün üzerindeki atmosfer çıkışına yönlendirilmiştir.

Hidrojen yangınlarının fark edilmesi :

Hidrojen yangınlarının güçlükle görülüyor olması, tespit edilmesini güçleştirir. Küçük veya büyük yangınlar olabilir, yangının şiddetini kaçak noktasındaki basınç miktarı belirler. Yangının varlığı alevler, alev içerisindeki bitişik ekipmandan gelen duman, ısı dalgaları, yanma kokusu, patlama, parçaların hasarı ve yangın söndürme sisteminin devreye girmesi ile tespit edilebilir. Küçük yangınlar bu şekillerde anlaşılabilir.

Bazı transit otobüsleri yangın önleme ve yangın söndürme sistemlerini de içermektedir. Yangın önleme sistem, araç kontrol sistemine bağlı sensör serisinden oluşmaktadır. Sensörler tavan döşemesinin altı ve motor kompartımanı gibi araç üzerinde kritik yerlere yerleştirilmiştir ve yangın durumunda alarm verecek şekilde tasarlanmıştır. Bazı tip sensörler yüksek sıcaklığı da tespit eder. Yakıt pili uygulamaları, yakıt pili demetleri etrafında ısı tesisat hasarlarında devreyi kesecek ve kontrol sistemine sinyal verecek şekilde tasarlanmıştır.

Sensör tetiklenmesi meydana geldiğinde gösterge panelinde ışıklar yanarak sürücü uyarılır. Araç durdurulduktan sonra yangın engelleyiciler bir veya daha çok noktada serbest bırakılır. Yangın engelleyiciler kesinlikle aracın yolcu kompartımanına bırakılmaz. Engelleyiciler serbest bırakıldığında araç içerisinde yüksek bir ses duyulabilir, araç etrafında kimyasal bir bulut tabakası meydana gelebilir. Boğaz ve akciğerlere zararlı olan bu kimyasallar solunmamalıdır.

Hidrojen yangınlarının söndürülmesi :

Hidrojen yangınlarını önleme yöntemi, diğer gaz yangınlarını önleme ile aynı şekildedir. Yapılması gereken ilk şey yakıt kaynağını engellemektir. Eğer engellenmesi mümkün değilse, yakıtın kontrol edilebilir şartlarda yanması sağlanmalıdır.

Büyük yangınları söndürmenin tek yolu, yakıt kaynağını kesmektir. Küçük yangınları kuru toz engelleyiciler ve karbondioksit ile söndürmek mümkündür. Karbondioksit söndürücülerini, yangına üfleme yerine yangını boğma suretiyle söndürür. Yangın battaniyeleri kullanılabilir. Eğer yangın, yakıt kaynağı kesilmeden söndürülmeye çalışılıyorsa yanıcı ve patlayıcı karışım yeniden oluşabilir ve sıcak yüzeylerin etkisiyle yeniden ateşleme oluşabilir. Yakıt kaynağı engellenemiyorsa, çevre ekipmanların üzerine bol miktarda su püskürtülebilir.

Eğer yanma araç halindeyken meydana gelirse, araç hemen stop ettirilmelidir. Bu durumda her silindir içerisindeki solenoid valfleri kapanır ve yüksek basınç solenoidi yakıt deposu içerisindeki yakıtı ayırır. Oluşan alarmla, yangın bölgesine yangın söndürücü maddeler gönderilir.

Düşük Sıcaklık Kazaları :

Hidrojen, helyumdan sonra kaynama noktası en düşük olan elementtir. Düşük sıcaklık kazaları hidrojen sıvı halindeyken meydana gelir. Sıvı hidrojen çok düşük sıcaklıklarda ciddi donma tehlikesi ve ikincil yanma tehlikesini oluşturur.

Sıvı hidrojen -253 °C sıcaklığında kap içerisinde vakum hatunda depo edilmektedir. Sıvı hidrojen kapları tamamıyla ayrı tutulmalıdır, özel malzemeler ile sıvı hidrojenin kap ile teması önlenmelidir.

İnsan vücudunun sıvı hidrojen ile veya buharı teması sonucunda ciddi donma hasarları meydana gelir.

İkincil yanma tehlikesi, havanın sıvı hidrojen ile teması sonucunda oluşur. Sıvı hidrojenin bulunduğu düşük sıcaklık havanın sıvılaşması için yeterlidir. Sıvı oksijen, asfalt gibi yanıcı malzemenin üstüne geldiğinde tutuşma veya yanma ihtimalini oluşturur.

Düşük sıcaklıkta oluşacak tehlikeleri önlemek için, bütün borular, kaplar ve sıvı hidrojen içeren diğer ekipmanlar uygun malzeme ile ayrılmalıdır. Bakım sırasında, sıvı hidrojen araç içerisinde uzaklaştırılmalıdır yada çalışma anında ayrı tutulmalıdır.

6.3.2 Yüksek Sıcaklık

Su, glikol çözeltileri, yağlar ve gazlar transit otobüs içerisinde borular ve kaplar içerisinde dolaşmaktadır. Turboşarj kompresörünün çıkışında oluşan en yüksek buhar sıcaklığı 200°C'dir. Bu sıcaklığa sahip bölgelere ten teması olursa, ciddi yanmalar meydana gelir.

Normal çalışma sırasında, motor bölmesi koruması bu yüksek sıcaklığa ulaşımı engeller. Ancak araç bu koruma olmadan da çalıştırılabilir. Bakım sırasında koruma kapağı açık çalışılırsa, sıvı devri daim yüzeylerinden ve gazlardan uzak durmaya dikkat edilmelidir. Motor durdurulduktan uzunca bir süre daha motor bileşenleri sıcak kalır.

6.3.3 Yüksek Basınç

Hidrojen transit otobüs uygulamasında tavan üzerine monte edilmiş silindirler içerisinde bulunur. Çalışma basıncı 25 MPa'dır ve 35 MPa değerlerine kadar çıkar. Çalışan personel,

silindirlere yakıt gönderildiğinde bu yüksek basınca maruz kalabilir. Bu yüksek basınç çok tehlikelidir ve kaçak veya bileşenlerde bir bozukluk varsa patlama ile sonuçlanabilir. Bitme durumunda bile hidrojen silindirleri 2,1 – 3,5 MPa kalan basıncında olurlar.

Yüksek basınç bağlantıları kesinlikle basınç altındayken sıkılmamalı ya da açılmamalı. Yüksek basınç nedeniyle çıkan bir parça büyük bir kuvvetle fırlayacaktır, önemli yaralanmalara sebep olabilir.

Hidrojen depo silindirlerinin bir çok güvenlik mekanizması vardır. Her silindirde motor kapatıldığında ya da çarpışma sensöründen bir bilgi alırsa otomatik olarak kapanan solenoid valfi vardır. Her silindirde, silindirden çıkan gaz akışı fazla olduğunda kapanan, iç akış fazlası valfi bulunur. Ortak silindir manifoldunda, aynı işlevi gören ek akış fazlası valfi de bulunmaktadır. Basınç azaltıcı mekanizmalar her silindirin çıkışında bulunur, yangın durumunda açılırlar ve silindir içindeki yüksek basınç boşalır.

Bütün yüksek basınç bileşenleri aracın tavan kısmında kutu içerisinde bulunur. Silindirden çıkan hidrojen 1,2 MPa civarındaki orta basınca ayarlanmıştır; bu basınç yakıt taşıma sistemi içerisinde yükselerek 2,1 MPa'a düzenlenir.

Ek bileşenler, düşük basınç devrelerini koruyarak, yüksek basınç olmasını engellerler. Basınç serbest bırakma valfi, hareketli basınç düzenleyici akış yönünde monte edilmiştir. Bu valf, basınç 2,1 MPa'ı aştığında atmosfere açılır. Devre içerisindeki basınç 0,3 MPa'ı geçtiğinde patlama diski, hidrojeni, yakıt iletme sisteminden atmosfere boşaltır.

Hidrojen, hava, su ve soğutucu yakıt pili içerisinde en fazla 0,24 MPa civarında bulunur. Yağlayıcı ve hidrolik sıvı 0,62 MPa maksimum basıncında çalışırlar. Otobüs şasinin hava sistemi (fren havası) 0,9 MPa basıncın üzerinde çalışır. Bu yükseklikteki basınçlar tehlikelidir ve yüksek basınçta bulunun parçalar üzerinde çalışılırken dikkat edilmesi gerekir.

Yakıt pili motoru kapatıldığında, şu devrelerdeki basınç düşer;

- Hareketli basınç yakıt devresi,
- Yakıt aktarım devresi ,
- Hava aktarım devresi,
- Nemlendirici su devresi,
- Hidrolik devresi,
- Yağlama devresi.

Yakıt pili motoru kapatıldığında yüksek basınç şu devrelerde bir süre daha yüksek basınçta kalıp yavaş yavaş basınç düşer;

- Pil demeti soğutma devresi,
- Otobüs soğutma devresi,

Yakıt pili motoru kapatıldığında, şu devrelerde basınç düşmez;

- Yakıt depolama devresi,
- Yüksek basınç yakıt devresi,
- Otobüs şasi hava sistemi.

Yangın engelleme sistemi olan araçlarda, yangın engelleyici depolar her zaman basınç altında bulunurlar.

6.3.4 Elektrik Şoku

Yakıt pili ile çalışan transit otobüs düşük ve yüksek voltajda bir çok bileşen vardır.

Yakıt pili demetleri, içerdikleri yakıt pili sayısına göre voltaj üretirler. Bütün üretilen voltaj ağır yük motorlarında 1000 V'u geçer. Doğru akımı alternatif akıma çevirici içerisinde bu akım, alternatif akıma çevrilir. Doğru akımı alternatif akıma çevirici, alternatif akım çıkış frekansını ayarlar, çıkış voltajı 460 VAC'a ulaşabilir. Alternatif akımın bir kısmı ısıya çevrildiği, su ile soğutulan dirençlere yönlendirilir. Yüksek voltaj ciddi şok tehlikesi taşır, motor stop ettikten beş dakika sonrasına kadar aynı elektrik yükü kalır.

Yakıt pili demetleri, doğru akımı alternatif akıma çevirici ve diğer yüksek voltaj bileşenleri etrafı kapatılmış bir şekilde motor bölmesinde bulunur. Normal çalışma sırasında bu kapaklar yerinde olmalıdır, böylece şok etkisinden korunmuş olunur.

Motor stop ettiğinde, oluşan gazlar otomatik olarak dışarı verilir ve sönmleme elemanları ile üretilen bütün enerji absorbe edilir.

Takı (kolye, yüzük, bilezik ve saat gibi) yüklü elemanlarla temas ettiğinde elektrik yükünü alır, bu durumda ciddi yanma tehlikesi oluşur. Yakıt pili ile çalışırken takı kullanılmaması, eller ve kıyafetlerin kuru olmasına dikkat edilmelidir.

Araç kontrol sistemi ve diğer bileşenler 12 ve 24 V'da çalışır. Araç çalışmadığı halde bu güç bir veya bir kaç bataryadan, araç çalışırken alternatörden üretilir. Düşük voltaj parçaları aracın değişik bir noktasına yerleştirilmiştir ve şok tehlikesi taşımaz. Bu parçaların bir kısmı araç stop ettikten sonra da yüklü kalırlar.

Araç yüzey hata monitörü; yüksek voltaj parçaları elektriksel olarak araç şasisinden izole edilmiştir. Araç şasisi üzerinde istenmeyen bir yük kaçacağını önlemek için doğru akımı alternatif akıma çevirici içerisine araç yüzey hata monitörü yerleştirilmiştir. Bu sistem sürekli olarak, iki yüzey arasındaki yaklaşık elektrik direncini ölçer ve gösterir. Yüksek direnç, şasi üzerinde akım kaçağı olmadığını ve düşük direnç olması ise kaçak olduğunu gösterir. Kaçak, kısa devre olduğunda meydana gelir ve genellikle nemlendirme suyundaki veya demet soğutucusunda iyon birikiminden oluşur.

6.3.5 Kimyasal Bileşenler

Yakıt pili ile çalışan transit otobüs uygulamasında kimyasal olayların herhangi bir tehlikesi yoktur. Ancak bazı kimyasallar ile çalışırken dikkat edilmesi gerekir. Bu kimyasallar, reçine, etilen glikol, "Purple K" kuru kimyasal yangın engelleyicidir.

Sakız, reçine ve iyonlaşma giderme:

İyonlaşma giderici filtreleri, nemlendirme suyu içerisinde (humidification water) demet soğutucusunda oluşan, anyon ve katyonları yok etmekte kullanılan çift yataklı iyonlaşma giderici reçineleri içerir. İyonlaşma giderici reçine zararsızdır ve güvenlidir, ancak göz üzerine gelmemesi gerekir, filtreler ve reçine üzerinde çalışırken gözlük kullanılması gereklidir. Çalışırken ortamda havalandırma bulunması zorunlu değildir.

Etilen Glikol :

Yakıt pili demeti ve otobüs soğutucu devresi etilen glikol çözeltisi içerir. Etilen glikol propilen glikolden farklı olarak temelde zehirli değildir. Propilen glikol kullanımı tercih edilmemiştir çünkü ısıyı emişi konusunda yetersiz kalmaktadır.

Etilen glikol az miktarda da olsa zehirleme özelliği vardır. Yutulması merkezi sinir sistemine, kardiovasküler sisteme ve böbreklere zarar verir. Etilen glikozun yutulması, hafif bilinç yitirme, görme bozukluğu, reflekslerde zayıflama, yüksek tansiyon, kalp atışlarında hızlanma belirtilerini ortaya çıkarır. Etilen glikol ancak yutulduğunda ve gazı direkt olarak ciğerlere alındığında ortaya çıkar. Gazı ise düşük buhar basıncı olması nedeniyle, ısıtıldığında tehlike teşkil eder. Baş ağrısı, öksürük olarak belirti gösterir, daha çok solunmaya devam edilirse koma etkisine sebep olabilir. Etilen glikol üzerinde çalışılan durumlarda, kimyasal etkilere koruyan gözlükler ve eldivenler kullanılmalıdır.

Isıtılmış veya buharlaştırılmış etilen glikol yangın ve patlama riski taşır. Kendi kendine ateşlenme sıcaklığı 398°C'dır. Etilen glikol yangınlarını karbondioksit, kuru kimyasal, su spreyi ve alkole dayanıklı söndürücü köpükler ile söndürmek mümkündür.

Etilen glikol, %100 bağıl nemde su içerisinde ağırlığının iki katı kadarını absorbe eder. Etilen glikolün su içerisinde veya yüksek nemli ortamlarda saklanmaması gerekir.

“Purple K” Kuru Kimyasal Yangın Engelleyici :

Yangın söndürme sistemi depoları “Purple K” kuru kimyasal yangın engelleyicileri içerirler. “Purple K” kuru kimyasal karışık kimyasallar içeren bir tozdur ve genellikle kazaya sebep olmazlar. Ancak yüksek miktarda olup ortamdaki oksijenin yerine geçerse boğucu etki yapar.

Normal çalışma sırasında “Purple K” kuru kimyasal, depoda yangın söndürücü içerisinde basınç altında bulunur. Yangın sensörünün uyarı alması durumunda etkilenen bölgeye püskürtülür. Püskürtüldüğü anda yüksek ses meydana gelir.

Bu kimyasal ozon tabakasını delici etki yaptığı için dönüşümlü olarak kullanılması önerilmektedir.

6.3.6 Fiziksel Kazalar

Fiziksel kazalar, dönen ekipmanlardan ve ağırlık sebebiyle kaynaklanabilir.

Yakıt pili motoru fanlar ve kemer kontrollü dönen ekipmanlardan oluşur. Bu elemanlar kısmen açıkta bulunurlar, koruyucu kapak kaldırıldığında tamamen ortaya çıkarlar. Normal çalışma sırasında motor ve radyatör bölümü kapağı bu bölgeleri korur. Bakım sırasında bu kapaklar çıkarılacağı için dönen parçalardan korunaklı olarak çalışmak gerekir.

Yakıt pilli araçların motor aksamı çok ağırdır, yaklaşık 1000 kg kadar çıkar. Bakım sırasında kaldıran mekanizmaların, kaymaya sebebiyet vermeden, bu ağırlığı güvenli bir şekilde kaldırabilmesi gerekir.

7. YAKIT PİLİ MALİYET ANALİZİ

7.1 Yakıt Pili Hesaplamaları

1 Amper'lik akım elde etmek için gerekli olan yakıt (hidrojen) miktarını aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz (Read vd., 2000).

Bir yakıt pilinde reaksiyona giren her bir hidrojen molekülü (H_2), yakıt pilinin anodunda iki elektron olarak serbest kalmaktadır.



$$n_{H_2} = (1,0A) \left(\frac{1C/s}{1A} \right) \left(\frac{1e}{96.487C} \right) \left(\frac{1gmolH_2}{2e} \right) \left(\frac{3600s}{1sa} \right) = 0,018655 \text{ g.mol/sa } H_2 \quad (7.2)$$

$$m_{H_2} = (0,018655 \text{ g.mol/sa } H_2) \left(\frac{2.0158g}{1g.molH_2} \right) \left(\frac{1kg}{1000g} \right) = 37,605 \times 10^{-6} \text{ kg } H_2 / A \quad (7.3)$$

1 kA akım için 0,037605 kg hidrojen gerekmektedir.

7.2 1 MW'lık Yakıt Pili İçin Gereken Yakıt Miktarı

1 MW_{DC}'lık bir yakıt pili, 700mV'lık pil voltajı, saf hidrojen ve %80'lik bir yakıt kullanım oranı (U_f) ile çalışmaktadır (Read vd., 2000).

• Bir saatte kaç kg hidrojen tüketilmektedir?

Bu problemi, her bir pilin paralel bağlandığını varsayarak daha basit bir hale indirgeyebiliriz. Böylece yakıt pili demetinin voltajı, bir yakıt pilininki ile aynı olacaktır. Yakıt pili demetinin akımı ise; tüm yakıt pillerinin akımlarının toplamına eşittir.

$$\text{Güç (P)} = I \times V$$

Dolayısıyla, yakıt pili demetindeki akım;

$$I = \frac{P}{V} = \left(\frac{1.0MW}{0.7V} \right) \left(\frac{10^6W}{1MW} \right) \left(\frac{1VA}{1W} \right) \left(\frac{1kA}{1000A} \right) = 1429 \text{ kA} \quad (7.4)$$

Yakıt pili demetinde, 500 adet yakıt pili olduğunu varsayarsak; bir yakıt pilinden geçen akım;

$$1429 \text{ kA} / 500 = 2,858 \text{ kA}$$

Bir yakıt pilinde tüketilen hidrojen sayısı;

$$m_{H_2, \text{ tüketilen}} = (2,858 \text{ kA}) \left(\frac{0,037605 \text{ kg } H_2}{\text{kA}} \right) (500 \text{ adet yakıt pili}) = 53,74 \text{ kg } H_2/\text{sa} \quad (7.5)$$

• Gerekli yakıt miktarı ne olmalıdır?

Dolayısıyla, tüketilen hidrojen miktarı;

$$U_f = \frac{H_2, \text{ tüketilen}}{H_2, \text{ giren}} \quad (7.6)$$

$$H_2, \text{ giren} = \frac{H_2, \text{ tüketilen}}{U_f} = \frac{53,74 \text{ kg } H_2/\text{sa}}{\%80} = 42,99 \text{ kg } H_2/\text{sa} \quad (7.7)$$

• %25 oksitleyici kullanmak için gerekli hava miktarı ne olmalıdır?

Gerekli hava miktarını hesaplamak için, sudaki (H_2O) hidrojenle oksijenin stokiyometrik oranı ikiye birdir. Dolayısıyla, yakıt pilindeki reaksiyon için gerekli oksijenin mol sayısı;

$$n_{O_2, \text{ tüketilen}} = (53,74 \text{ kg } H_2/\text{sa}) \left(\frac{1 \text{ kg.mol } H_2}{2,0158 \text{ kg.} H_2} \right) \left(\frac{1 \text{ kg.mol } O_2}{2 \text{ kg.mol } H_2} \right) = 13,33 \text{ kg mol } O_2 / \text{sa} \quad (7.8)$$

%25 kullanım hedeflendiği için giren hava, tüketilenin dört katı kadar oksijen içermelidir.

$$n_{O_2, \text{ giren}} = (13,33 \text{ kg mol } O_2, \text{ tüketilen} / \text{sa}) \left(\frac{1 \text{ kg.mol } O_2, \text{ giren}}{0,25 \text{ kg.mol } O_2, \text{ tüketilen}} \right) \quad (7.9)$$

$$= 53,32 \text{ kg mol } O_2 / \text{sa}$$

Kuru hava, hacimce veya mol yüzdesi olarak, %21 O_2 içerdiğinden, gerekli kuru hava miktarı;

$$M_{\text{hava, giren}} = (53,32 \text{ kg mol } O_2, \text{ giren} / \text{sa}) \left(\frac{1 \text{ kg.mol.hava}}{0,21 \text{ kg.mol.} O_2} \right) \left(\frac{29 \text{ kg.kuru hava}}{1 \text{ kg.mol.hava}} \right) \quad (7.10)$$

$$= 7.363 \text{ kg kuru hava} / \text{sa}$$

7.3 Pil Alanı ve Gerekli Yakıt Pili Demeti Adedi

1 MW_{DC} çıktı, 600 mV ve 400 mA/cm² çalışma değerleri olan bir yakıt pilinin;

• Ne kadar yakıt pili alanı gereklidir? (Read vd., 2000).

Yakıt pili için toplam akım;

$$I = \frac{P}{V} = \left(\frac{2.0 \text{ MW}}{0.6 \text{ V}} \right) \left(\frac{10^6 \text{ W}}{1 \text{ MW}} \right) \left(\frac{1 \text{ VA}}{1 \text{ W}} \right) \left(\frac{1 \text{ kA}}{1000 \text{ A}} \right) = 3,333 \text{ kA} \quad (7.11)$$

Her bir yakıt pili, 400 mA/cm^2 'de çalıştığı için; toplam gereken alan;

A: Alan

AY: Akım yoğunluğu

$$A = \frac{1}{AY} = \left(\frac{3.333 \text{ kA}}{400 \text{ mA/cm}^2} \right) \left(\frac{1000 \text{ mA}}{1 \text{ A}} \right) \left(\frac{1000 \text{ A}}{1 \text{ kA}} \right) = 8333,333 \text{ cm}^2 \quad (7.12)$$

• Yakıt pili alanı 1 m^2 ve bir demette 280 adet yakıt pili bulunduğu varsayılırsa; 2 MW 'lik bir birim için kaç adet yakıt pili demeti gereklidir?

$$\text{Pil sayısı} = \frac{(8333,333 \text{ cm}^2)}{1 \text{ m}^2 / \text{pil}} \left(\frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2} \right) = 833 \quad (7.13)$$

$$\text{Demet Sayısı} = \frac{833 \text{ hücre}}{280 \text{ hücre / demet}} = 2,98 \text{ demet} = 3 \text{ demet} \quad (7.14)$$

7.4 Metan Dönüştürücüsü

• Konu ile ilgili reaksiyonlar;

- Buharla dönüştürme reaksiyonu;



- Su/gaz değiştirme reaksiyonu;



- Kompozit buharla dönüştürme reaksiyonu;



Üçüncü reaksiyon, bir ile ikinin kombinasyonu olsa da; bu üç denklem de analiz için kullanılabilir.

• Dönüştürücü reaksiyonu sıcaklık ile nasıl etkilenir?

LeChâtelier yasası der ki; “eğer dengede bir sisteme bir etki uygulanırsa, sistem kendini, bu etkiyi azaltmak için yeniden dengelemeye çalışır”. Buharla dönüştürücüde de, eğer sisteme ısı verilirse, reaksiyon endotermik olduğu için, bu ısı reaksiyon tarafından kullanılır ve kendini

dengeler. Dolayısıyla, dönüştürme reaksiyonu, yüksek sıcaklıklarda olumlu yönde etkilenir. (Read vd., 2000).



• Dönüştürücü reaksiyonu fazla buhar ile nasıl etkilenir?

LeChâtelier yasasından yararlanarak bu soruyu çözmek için, dönüştürücü reaksiyonlarını molekül sayısı olarak yazalım.



2 Molekül \leftrightarrow 4 Molekül

Eğer, dönüştürücü sisteminin dengede olduğunu farz edersek ve basınç uygularsak, reaksiyon bu basıncı dengeleme yönünde harekete geçer. Basıncı düşürmek için molekül sayısı azalacaktır; dolayısıyla, yüksek basınç, dönüştürme reaksiyonunu yavaşlatır.

7.5 DC ve AC Arasında Dönüştürme

1 MW_{AC}'lik ve %96,5 verimle çalışan bir yakıt pili demetinin DC çıkışı ne olur?

$$\text{MW}_{\text{DC}} = (1,0 \text{ MW}_{\text{AC}}) \left(\frac{1 \text{ MW}_{\text{DC}}}{\%96,5 \text{ MW}_{\text{AC}}} \right) = 1,036 \text{ MW}_{\text{DC}} \quad (7.20)$$

7.6 Otomotiv Dizayn Hesapları

Taşıtın toplam gücü (P), ivmelenmeyi, hava direncini, yuvarlanma direncini ve taşıttaki aksesuarlarını karşılamaya yeterli büyüklükte olmalıdır.

$$P = (mav + 0.5 \cdot C_D A_F v^3 + mgC_{Rv} + mgv \cdot \sin(\theta)) / \eta + P_{\text{aux}}$$

P = toplam güç (W)

m = taşıt kütlesi (kg)

a = ivme (m/s²)

v = hız (m/s)

•• = hava yoğunluğu (kg/m³)

C_D = hava direnci katsayısı

A_F = Taşıt alanı (m²)

g = Yerçekimi katsayısı (9,8 m/s²)

C_R = Yuvarlanma direnci katsayısı

•• = yol eğim açısı

•• = Motorun ve viteslerin verimi

P_{aux} = Taşıttaki aksesuarlar için gerekli güç (W)

Güç sisteminde, yakıt pili ve yüksek güç depolama cihazı bulunabilir. New Generation of Vehicles (PNGV) tarafından açıklanan kritere göre;

- Yakıt pili sistemi (yüksek güç depolama cihazı olmadan) 24.58 m/s hızı devam ettirmeye yetecek gücü sağlayabilmelidir (yol eğimi % 6,5).
- Yüksek güç depolama cihazıyla beraber çalışan yakıt pili sistemi, 29.05 m/s hızda, 1,34 m/s² ivmelenmeye izin verebilmelidir. [2]

Bu değerler, orta büyüklükte bir yolcu taşıtı için hesaplanmıştır;

$$P_S = ((0.5)(1.29)(0.3)(2.0)(24.58)^3 + (1632)(9.8)(0.0085)(24.58) + (1632)(9.8)(24.58)\sin(0.0649))/0.77 + 400$$

$$P_S = 45,339 \text{ kg-m}^2/\text{sec}^3 = 4.53 \text{ kW}$$

29.05 m/s hızda, 1,34 m/s² değerinde ivmelenmeye izin verecek minimum güç;

$$P_A = (1632)(1.34)(29.05) + (0.5)(1.29)(0.3)(2.0)(29.05)^3 + (1632)(9.8)(0.0085)(29.05))/0.77 + 400$$

$$P_A = 100,355 \text{ kg-m}^2/\text{sec}^3 = 10.03 \text{ kW}$$

8. DÜNYADA YAKIT PİLLERİNİN TAŞITLARDAKİ UYGULAMALARI

Başlıca otomotiv üreticileri geçtiğimiz son on senede, içten yanmalı motorlarla çalışacak veya onları yerlerini alacak yakıt pilli enerji kaynakları üzerindeki çalışmalarını arttırmışlardır.

1980'lerin başında hemen hemen bütün büyük otomobil şirketleri yakıt pilleriyle işleyen otomobillere yönelik araştırma programı başlatmışlardır.

Bu şirketlerden Daimler-Benz ve Toyota ile öne geçmiştir. Daimler-Benz, Ballard Daimler-Benz ortaklığı neticesinde 1994 yılı mayıs ayında PEM'li yakıt pilleriyle çalışan ilk otomobili birlikte ürettiler ; NECAR I (New Electric Car) . NECAR I iki kişi taşıyabiliyordu. Menzili de yalnızca 130 km'ydi. İki yıl sonra yine Mayıs ayında NECAR II üretildi. NECAR II altı kişi taşıyabiliyordu ve menzili de iki katına çıkarılmıştı (250 km) . NECAR I 'den %20 daha hafif olan bu minibüsün erişebildiği en yüksek hız da 90 km/saat'di. 1997 başlarında NEBUS adlı otobüs üretildi. 250 km menzilli bu otobüs kent içi ulaşımında piyasadaki otobüsler gibi rahatlıkla kullanılabiliriyordu. NEBUS çatısındaki güneş panelleri sayesinde ek bir elektrik üretimi daha gerçekleştirebiliyordu. Bu elektrik de otobüsün havalandırma sisteminde kullanılıyordu. Aynı yılın Eylül'ünde NECAR III halka gösterildi. NECAR III önceki üç taşıttan da farklıydı. Yakıt olarak hidrojen değil metanol kullanıyordu. Metanoldeki hidrojen , otomobilin seyri sırasında ayrıştırılıp yakıt pillerine veriliyordu. Yakıt olarak benzin ve dizel de düşünülmüş ama bunların verimleri düşük olduğundan yakıt olarak metanol tercih edilmişti. Metanolün yakıt olarak kullanılmasının bir çok üstünlükleri vardır. Metanol de tıpkı benzin gibi oda sıcaklığında sıvı bir maddedir. Yani benzin istasyonlarında önemli bir değişikliğe gidilmeden kolaylıkla satılabilir. Taşıtlarda metanol için gereken yakıt deposu hidrojeninkinden çok daha küçük ve hafiftir. NECAR III bir depo (40 litre) metanolle 400 km gidebiliyordu. Daha önceki modeller gibi NECAR III'ün de egzoz borusundan yalnızca su buharı çıkıyordu. Otomobil çok sessiz ilerliyordu. İçindeyken bir kompresörün hafif mırıltısı duyuluyor; dışarıdansa hiç ses duyulmuyordu.

DaimlerChrysler'ın NECAR 5'i, 4 Haziran 2002'de San Francisco'dan Washington'a 16 günlük bir yolluğu tamamlamıştır.

8.1 General Motors, Opel ve Suzuki

8.1.1 Teknoloji ve Ortaklık

General Motors (GM), yakıt pili araştırma ve geliştirme çalışmalarında uzun bir geçmişe sahiptir. 1964 yılında, GM, bir elektrikli sürüş sistemindeki (motor, güç kaynağı gibi) koşulları araştırmak için bir elektrikli taşıt programı başlattı. Elektrik güç kaynağı olarak seçilen sistemlerden biri de yakıt pilleriydi. Yakıt pillerinin seçilmesindeki önemli iki husus, yakıt pillerinin akülerden farklı olarak limitsiz bir alana sahip olması ve termik motor verimi ile sınırlanmayıp iyi bir yakıt ekonomisine sahip olmasıydı.

1966 yılında GM ilk yakıt pilli taşıtı (Electrovan) yapan araba üreticisi olmuştur. Electrovan, sıvı hidrojen ve oksijen depolarına sahipti, menzili 240 km maksimum hızı da 110 km/sa idi. Bu taşıtta, Union Carbide Corporation tarafından üretilen alkali yakıt pilleri kullanılmaktaydı. Yakıt pilleri 32 kW sürekli olarak ve 160 kW kısa süreler için üretebilmekteydi. Üç fazlı AC motoru 90 kW gücünde idi. Electrovan, GM'in yakıt pilli taşıtları ticari kullanıma açma fikrine öncülük etmiş, günümüz itibarıyla çözülmüş olan bir çok sorunun da tanımlanmasında yardımcı olmuştur.

2001 yılında, Suzuki, Hydrogenics ve Giner ortaklığı kurulmuştur. Giner, GM'a hidrojen yakıt teknolojilerinde yardımcı olmaktadır. Suzuki'nin görevi ise, yakıt pili teknolojilerini küçük arabalara entegre etmektir.

GM ve Opel'in ortaklığı hidrojen depolama konusundadır. Quantum Technologies, Haziran 2001'de bu çalışma grubuna katılarak, hafif sıkıştırılmış hidrojen depolamak teknolojisi üzerindeki tecrübelerini paylaşmaktadır.

8.1.2 Yolcu Arabaları

Çizelge 8.1'de, geliştirilen yolcu arabaların özellikleri görülmektedir.

Çizelge 8.1 Metanol yakıtlı GM Zafira'sının teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Fuel Cell Zafira - Eylül 1998
Temel alınan taşıt	Opel Zafira
Ağırlık	1850 kg
Maksimum hız	120 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	2 x 25 kW PEM 80-90 °C
	Yakıt pili demeti, yakıt dönüştürücü ve metanol deposu arkaya yerleştirilmiştir.
Motor tipi/güç	50 kW AC motoru
Yakıt	Metanol, buharla dönüştürme ile hidrojene dönüştürülür.
Yakıt depolama	54 lt. Metanol
Yedek akü	Metal hidrid akü
Menzil	483 km



Şekil 8.1 HydroGen 1 yakıt pilli taşıt, 2000 yılında GM ve Opel tarafından geliştirildi [7]

Çizelge 8.2 GM HydroGen 1 taşıtının teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	HydroGen 1 - 2000
Temel alınan taşıt	Opel Zafira
Boyutlar	4317 mm x 1742mm x 1684mm
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	140 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	GM Gen 7 PEM, 75 kW, 200 birim
	125-200 V
Motor tipi/güç	AC, 60 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	130 lt. Sıvı hidrojen
Menzil	400 km

Çizelge 8.3 GM HydroGen 3 taşıtının teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	HydroGen 3 - Eylül 2001
Temel alınan taşıt	Opel Zafira
Boyutlar	4317 mm x 1742mm x 1684mm
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	150 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	GM Stack2000, 94-129 kW, 200 birim
	125-200 V
Motor tipi/güç	DC, 60 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	68 lt. Sıvı hidrojen
Menzil	400 km

8.2 Toyota ve Daihatsu

8.2.1 Teknoloji ve Ortaklık

Toyota, 1997 yılında hibrit yakıt pilli taşıtı Prius'u kullanıma sundu, bu taşıtın 2000 yılı itibarıyla 50,000 adet satışı gerçekleştirildi. Toyota, hibrit yakıt pilli taşıt konusunda çalışmalarını sürdürmekte, ürettiği her modelin bu versiyonunu da yapmayı planlamaktadır.

Toyota, hibrit yakıt pilli taşıtlarda, metal hidrit, sıkıştırılmış hidrojen ve metanol ile benzin dönüştürücülerini kullanmaktadır.

8.2.2 Yolcu arabaları

Çizelge 8.4, 8.5 ve 8.6'da Toyota'nın RAV3 ve RAV5 hibrit yakıt pilli taşıtlarını ve Daihatsu'nun K2 yakıt pilli taşıtlarının özellikleri görülmektedir.

Çizelge 8.4 Toyota FCHV-3'ün teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	FCHV-3 - Mart 2001
Temel alınan taşıt	Toyota SUV Kluger V/Highlander
Boyutlar	4685 mm x 1825mm x 1720mm
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	150 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Toyota PEM, 90 kW
Motor tipi/güç/tork	Daimi mıknatıslı senkron motor, 80 kW, 260 Nm
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Metal hidrit
Yedek akü	NiMH
Menzil	300 km

Çizelge 8.5 Toyota FCHV-5'ün teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	FCHV-5 - Ekim 2001
Temel alınan taşıt	Toyota SUV Kluger V/Highlander
Boyutlar	4735 mm x 1815mm x 1685mm
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	150 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Toyota PEM, 90 kW
Motor tipi/güç/tork	Daimi mıknatıslı senkron motor, 80 kW, 260 Nm
Yakıt	Benzin dönüştürücü
Yakıt depolama	35 lt. Benzin
Yedek akü	NiMH

Çizelge 8.6 Daihatsu Move FCV K II'nin teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Move FCV K2 - 2001
Temel alınan taşıt	Özel Daihatsu
Boyutlar	3395mm x 1475mm x 1670mm
Yolcu sayısı	4
Yakıt pili tipi/güç	Toyota PEM, 30 kW
Motor güç	32 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen, 25 MPa/basınç silindiri

8.3 Ballard Güç Sistemleri, Daimler Chrysler, Ford ve Mazda

8.3.1 Teknoloji ve Ortaklık

Ballard, ağır ve hafif taşıtlar için yakıt pili sistemleri üretmektedir. 1983 yılında PEM yakıt pili teknolojilerine yoğunlaştıktan sonra, 1993 yılında 5 kW'lık beş adet yakıt pili demeti ile çalışan bir otobüsü uygulamaya geçirmiştir.

General Motors, Chrysler ve Ford Ballard'ın ilk ortaklarındandır. 1998 yılında, GM Ballard'a 3,2 milyon \$'lık yakıt pili ve test ekipmanı siparişi vermiştir. Ballard ve Daimler Chrysler, 1993 yılından sonra, birlikte Mark 700 yakıt pili demetini geliştirmişlerdir. 1997 yılında Daimler-Benz (Daimler Chrysler), Ballard ve Ford yakıt pili motorlarını geliştirmek için ortaklıklarını ilan etmişlerdir. 1998 yılında, bu gruba Mazda da katılmıştır. Ballard, bu gurubun yakıt pili ve yakıt pili motorlarının taşıtlar için geliştirme ve üretim görevini üstlenmiştir.

8.3.2 Daimler Chrysler

Daimler Chrysler, 1993 yılında yakıt pili teknolojilerinde Ballard'la ortak olduğundan beri beş nesil yakıt pilli taşıt (NeCar 1-5) ve bir adet otobüs (NEBUS) geliştirmiştir.



Şekil 8.2. Daimler Chrysler yakıt pilli taşıtları [4]

Çizelge 8.7 Daimler Chrysler NeCar 1'in teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NeCar 1 - 1994
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz 180 van
Ağırlık	3500 kg
Yolcu sayısı	2
Maksimum hız	90 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	12 adet Ballard Mark 5, 50 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen, 150 lt, 30 MPa
Menzil	130 km

Çizelge 8.8 Daimler Chrysler NeCar 2'nin teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NeCar 2 - 1996
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz V-class MPV
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	110 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	2 adet Ballard Mark 700, 1 kW/lt
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen
Menzil	250 km

Çizelge 8.9 Daimler Chrysler NeCar 3'ün teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NeCar 3 - 1997
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz A-class
Ağırlık	1750 kg
Yolcu sayısı	2
Maksimum hız	120 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	2 adet Ballard Mark 700, 1 kW/lt
Yakıt	Metanol buharla dönüştürücüden hidrojen elde ediliyor.
Yakıt depolama	40 lt. Metanol
Menzil	400 km

Çizelge 8.10 Daimler Chrysler NeCar 4'ün teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NeCar 4 - Mart 1999
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz A-class
Ağırlık	1750 kg
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	145 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Ballard Mark 700, 70 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	5 kg sıvı hidrojen taşıyan depo Linde tarafından yapılmış, günlük % 1 buharlaşma kaybı mevcut.
Menzil	450 km

Çizelge 8.11 Daimler Chrysler NeCar 4'ün geliştirilmiş versiyonunun teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NeCar 4 geliştirilmiş - 2000
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz A-class
Ağırlık	1750 kg
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	145 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Ballard Mark 900, 75 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	2,5 kg sıkıştırılmış hidrojen, 35 MPa
Menzil	200 km

Çizelge 8.12 Daimler Chrysler NeCar 5'in teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NeCar 5 - Kasım 2000
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz A-class
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	150 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Ballard Mark 900, 75 kW
Yakıt	Metanol dönüştürücü
Yakıt depolama	Metanol



Şekil 8.3 Daimler Chrysler yakıt pilli taşıtı NeCar 5 [4]

Çizelge 8.13 Daimler Chrysler NeBUS yakıt pilli otobüsünün teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	NEBUS - Mayıs 1997
Temel alınan taşıt	Mercedes-Benz dizel otobüs 0 405 N2
Boyutlar	11,8m x 2,5m x 3,5m
Yolcu sayısı	62
Maksimum hız	80 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	Ballard PEMFC, 250 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	7 adet 150 lt'lik sıkıştırılmış hidrojen deposu, otobüsün üstüne yerleştirilmiş.
Menzil	250 km



Şekil 8.4 Daimler Chrysler yakıt pilli otobüsü NEBUS [4]

Daimler Chrysler, 2004 yılında, 30 adet Mercedes-Benz F-Cell yakıt pili taşıtlarını ilk müşterilerine teslim etmiştir. Avrupa'nın ilk servis istasyonu günlük kullanım için hizmete açılmıştır. F-Cell taşıtında tüm yakıt pili sistemi ve hidrojen silindirlere alt tabanına yerleştirilmiştir. Taşıtın, yakıt pili sistemi Ballard tarafından üretilmiştir.



Şekil 8.5 Daimler Chrysler F-Cell yakıt pili taşıtı [4]

8.3.3 Ford

Ford tarafından geliştirilen P2000 yakıt pili taşıtı, 24 saatlik bir testte 65 mph maksimum hızı ile 1390 mil katetmiştir.

Ford tarafından geliştirilen başka bir otomobil olan THINK, metanol yakıtlı bir sedandır. 2000 Ford Focus baz alınarak geliştirilen bu yakıt pili taşıtta, yakıt pili güç ünitesi taşıt tabanının altına yerleştirilmiş, böylece yolcu ve bagaj yerini işgal etmemektedir.

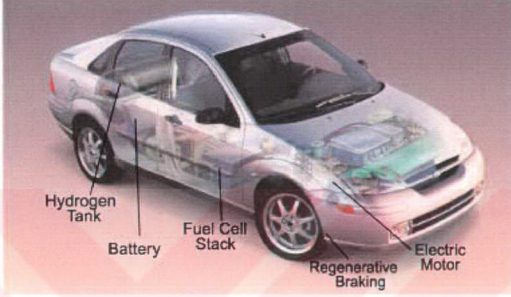
Ford'un P2000 Prodigy'si ise, Ford Taurus baz alınarak yapılmıştır ve yakıt olarak saf hidrojen kullanmaktadır. Yakıt pili ile çalışan motorun gücü 63 kW'a eşittir.

Ford ayrıca P2000 SUV adı altında bir spor araba da geliştirmiştir. Bu taşıt metanol dönüştürücü ile çalışmaktadır.

Ford'un yakıt pilli taşıtlarında kullanılan hidrojen Messer and Air Product adlı şirketten sağlanmaktadır. Hidrojen, doğal gazdan ve suyun elektrolizinden elde edilmektedir.

Ford Focus FCV- Hibrit:

Hidrojen ile çalışan Ford Focus FCV-Hibrit Ford'un 3. kuşak yakıt pilli taşıtıdır. Performans ve verimi arttırmak için Ni-MH yüksek voltajlı akü ile takviye edilmiştir. Yakıt pili demetleri, ön koltukların altındadır.



Şekil 8.6 Ford Focus yakıt pilli taşıtının şeması [2]

• Elektrik Motoru:

- AC motoru
- Ön tekerleklerden tahrik
- En yüksek güç 65 kW (87 hp)
- En yüksek tork 190 Nm (140 ft-lbs)
- En yüksek verim %91

• Çekiş Gücü Değiştirme Birimi:

- 3 fazlı köprü tipi
- Maksimum akım 330 amp
- Maksimum voltaj 400 volt
- Minimum voltaj 250 volt
- Nominal voltaj 315 volt



Şekil 8.7 Ford yakıt pilli taşıtının hidrojen deposu [2]

• Özellikler

- Örnek alınan taşıt, 2002 model Ford Focus
- 4 kapılı sedan
- Uzunluk: 4338 cm
- Genişlik: 1758 cm
- Ağırlık : 1600 kg
- Yakıt : Sıkıştırılmış hidrojen
- Yakıt basıncı : 35 MPa
- Sürüş menzili : 260-320 km
- Maksimum hız: 128 km/sa
- Emisyon : Sıfır emisyonlu taşıt (ZEV)



Şekil 8.8 Ford yakıt pilli taşıtının hidrojen doldurma kapağı [2]

• Güç Birimi – Hibrit Yakıt Pili Sistemi:

- Yakıt pili tipi : PEM
- Yakıt pili demeti : Ballard Mark 902 Series
- Reaksiyona girenler: hidrojen ve hava
- Yüksek voltajlı akü : SANYO Ni-MH Hibrit akü sistemi
- Rejeneratif fren : Continental Teves Elektro-hidrolik fren sistemi

Ford Focus FCV:

Dört kapılı Ford Focus; hidrojen yakıt pili birimlerini yerleştirmek için bir miktar değiştirilmiş ve Ford Focus FCV geliştirilmiştir. Focus FCV yüksek yakıt ekonomisi ve performans sağlayarak; bir elektrikli taşıttan beklenen minimum gürültü ile titreşim; sıfır emisyon ve sürüş yumuşaklığını da vermektedir. Yakıt pili demetleri, ön koltukların altındadır.

• Elektrik Motoru:

- AC motoru
- Ön tekerleklerden tahrik
- En yüksek güç 67 kW (87 hp)
- En yüksek tork 190 Nm (140 ft-lbs)
- En yüksek verim %91

• Özellikler

- Örnek alınan taşıt, 2000 model Ford Focus

- 4 kapılı sedan

- Uzunluk: 4338 cm

- Genişlik: 1758 cm

- Ağırlık : 1727 kg

- Yakıt : Sıkıştırılmış hidrojen

- Yakıt basıncı : 25 MPa

- Sürüş menzili : 160 km

- Maksimum hız: 128 km/sa

- Emisyon : Sıfır emisyonlu taşıt (ZEV)

• Çekiş Gücü Değiştirme Birimi:

- 3 fazlı köprü tipi

- Maksimum akım 280 amp

- Maksimum voltaj 420 volt

- Minimum voltaj 250 volt

- Nominal voltaj 315 volt

• Güç Birimi :

- Yakıt pili tipi : PEM

- Yakıt pili demeti : Ballard Mark 900 Series

- Reaksiyona girenler, hidrojen ve hava

Ford Focus FC5:

Ford Focus FCS, metanolden hidrojene dönüştürücü birim, reformer, ile çalışan yakıt pili kullanmaktadır. Taşıt, yüksek yakıt ekonomisi ve verimle çalışmaktadır ve çok düşük emisyonu (SULEV) sahiptir. Yakıt pili demetleri, ön koltukların altındadır.

• Elektrik Motoru:

- AC motoru

- Ön tekerleklerden tahrik

- En yüksek güç 65 kW (87 hp)
- En yüksek tork 189.8 Nm (140 ft-lbs)
- Özellikler
 - Örnek alınan taşıt, 2000 model Ford Focus
 - 4 kapılı sedan
 - Uzunluk: 4338 cm
 - Genişlik: 1758 cm
 - Ağırlık : 1769 kg
 - Yakıt : Metanol
 - Maksimum hız: 128 km/sa
 - Emisyon : Super ultra düşük emistonlu elektrik taşıtı (SULEV)
- Güç Birimi :
 - Yakıt pili tipi : Metanolden hidrojene dönüştürücü PEM yakıt pili



Şekil 8.9 Ford yakıt pilli taşıtının yakıt pili demeti [2]

- Çekiş Gücü Değişirme Birimi:
 - 3 fazlı AC temelli Ecostar
 - Maksimum akım 200 amp
 - Maksimum voltaj 440 volt
 - Minimum voltaj 200 volt

- Nominal voltaj 325 volt

Ford P2000:

Ford P2000, verimli sessiz ve sıfır emisyonlu bir taşıttır. Yakıt pili demetleri, deponun altındadır. Daha çok araştırma amaçlı geliştirilen bu taşıt nispeten hafiftir.

• Elektrik Motoru:

- AC motoru

- Ön tekerleklerden tahrik

- En yüksek güç 67 kW (87 hp)

- En yüksek tork 190 Nm (140 ft-lbs)

- En yüksek verim %91



Şekil 8.10 Ford P2000 yakıt pilli taşıtı [3]

• Özellikler

- Örnek alınan taşıt, Alüminyum kaplı Ford Contour

- 4 kapılı sedan

- Uzunluk: 4747 cm
- Genişlik: 1755 cm
- Ağırlık : 1514 kg
- Yakıt : Sıkıştırılmış hidrojen
- Sürüş menzili : 160 km
- Maksimum hız: 128 km/sa
- Emisyon : Sıfır emisyonlu taşıt (ZEV)

• Çekiş Gücü Değiştirme Birimi:

- 3 fazlı köprü tipi
- Maksimum akım 280 amp
- Maksimum voltaj 385 volt
- Minimum voltaj 200 volt
- Nominal voltaj 255 volt

• Güç Birimi:

- Yakıt pili tipi : PEM
- Yakıt pili demeti : Ballard Mark 700 Series

8.3.4 Mazda

1991'de yakıt pili çalışmalarına başlayan Mazda, bir çok yakıt pilli taşıt prototipi geliştirmiştir.

Çizelge 8.14 Mazda Demio'nun teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Mazda Demio FCEV - 1997
Temel alınan taşıt	Mazda Demio
Yolcu sayısı	4
Maksimum hız	90 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	4 adet Mazda yakıt pili demeti, 20 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Metal hidrit
Sistem	Hibrit
Menzil	170 km



Şekil 8.11 Mazda Demio yakıt pilli taşıtı [5]

Çizelge 8.15 Mazda Premacy'nin teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Mazda Premacy FC-EV - 2001
Temel alınan taşıt	Mazda Premacy
Ağırlık	1850 kg
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	125 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Ballard 65 kW
Motor/güç/tork	AC motor, 65 kW, 190 Nm
Yakıt	Metanol dönüştürücü
Yakıt depolama	Metanol



Şekil 8.12 Mazda Premacy yakıt pilli taşıtı [5]

8.4 Nissan

Nissan yakıt pilli çalışmalarına 1991 yılında başladı. 1999 yılında Renault ile ortak olan Nissan, günümüze kadar çeşitli yakıt pilli taşıt üretmiştir. Nissan ilk yakıt pilli taşıtı, hibrit yakıt pilli taşıt olan R'nessa SUV, 1999 yılında test sürüşlerine başlamıştır.

Çizelge 8.16 Nissan R'nessa'nın teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Nissan R'nessa FCV - 1999
Temel alınan taşıt	Nissan R'nessa
Yolcu sayısı	2
Maksimum hız	70 km/sa
Yakıt pilli tipi/güç	Ballard 10 kW , 41 kg
Yakıt	Metanol dönüştürücü (400mm x 450mm x 550mm)
Yakıt depolama	40 lt. Metanol

Mayıs 2001 yılında ise Nissan Xterra SUV test sürüşlerine başlamıştır. Aynı yıl, bu taşıtın direkt hidrojen yakıtlı versiyonu geliştirilmiş ve bu taşıt Ballard'ın 75 kw'lık yakıt pilli sistemini (Mark 900) kullanmaktadır.

Çizelge 8.17 Nissan Xterra yakıt pilli taşıtının teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Nissan Xterra FCV - 2001
Temel alınan taşıt	Nissan Xterra
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	120 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	Ballard Mark 900, 75 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen

8.5 Honda

Honda, yakıt pili çalışmalarına 1980'lerde başladı. 1999 yılında FCX-1 ve FCX-2 yakıt pilli taşıt prototiplerini tanıttı. Bunları 2000 yılında FCX-3 ve 2001'de FCX-4 izledi. FCX-5 modeli, şehir içinde 62m/kg ve şehir dışında 51 m/kg'lık hidrojen tüketimi ile yakıt ekonomisi konusunda büyük bir başarı elde etmiştir.

Yakıt pillerinin sorunlarından biri olan soğuk havada ilk kalkış sorununu da çözen Honda FCS -20°C hava sıcaklıklarında da başarıyla çalışabilmektedir.



Şekil 8.13 Honda FCX yakıt pilli taşıtı [6]

• Özellikler:

- Boyutları (uzunluk x genişlik x yükseklik) : 4165x1760x1645 mm

- Yolcu sayısı : 4

- Menzil : 190 mil

• Motor:

- Maksimum hız : 93 mph

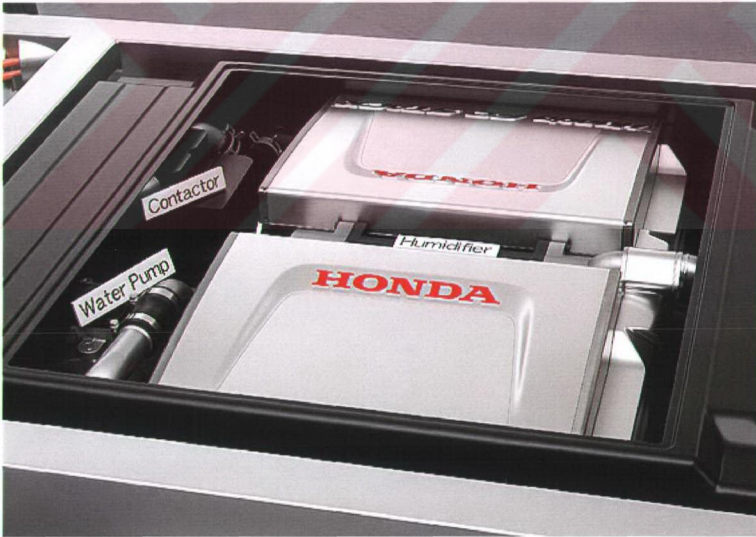
- Maksimum güç : 80 kW

- Maksimum tork : 272 Nm

- Tipi : AC motor

• Yakıt Pili Demeti:

- Tipi : PEM, Honda yakıt pili demeti



Şekil 8.14 Honda FCX'in yakıt pili demeti [6]

• Yakıt :

- Sıkıştırılmış hidrojen

- Depolama : Yüksek basınçlı hidrojen deposu (5000 psi)

- Depolama kapasitesi : 156.6 lt

• Enerji depolama : Ultra Kapasitör (Honda)

Yakushima / Japonya'da kurulan hidrojen istasyonu, Nisan 2004'de çalışmaya başladı.

İstasyonda hidrojen suyun elektrolizi ile elde ediyor. Hidrojen üretim kapasitesi 1.25 Nm³/sa ve hidrojen depolama basıncı 350 atm.



Şekil 8.15 Yakushima / Japonya, hidrojen istasyonu [6]

Honda, 2002 yılında Los Angeles şehrine iki adet FCX yakıt pilli taşıtı kiralamıştır. 2003 yılında üç adet daha FCX'i Los Angeles'a kiralaayan Honda, 2005 yılında New York Eyaleti'ne iki adet FCX yakıt pilli taşıtı sağlayacaktır. Bu taşıtların, iki senelik deneme süreleri vardır.

8.6 Hyundai

Hyundai, 2001 yılında Santa Fe SUV yakıt pilli taşıtını geliştirmiştir.

Çizelge 8.18 Hyundai Santa Fe yakıt pilli taşıtının teknik bilgileri

Yakıt pilli taşıt adı ve tarihi	Hyundai Santa Fe - Mart 2001
Temel alınan taşıt	Hyundai SUV
Ağırlık	3571 kg
Yolcu sayısı	5
Maksimum hız	124 km/sa
Yakıt pili tipi/güç	IFC series 300 PEMFC, 75 kW
Motor/güç	AC üç fazlı motor, 65 kW
Yakıt	Direkt hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen, 35 MPa
Menzil	160 km

Santa Fe'nin 75 kW'lık yakıt pili demeti hidrojen ile çalışmaktadır. Taşıt, ilk harekette benzinli taşıtlarda kullanılan akü ile çalışmaktadır. Santa Fe, 2001 yılında, gürültü ve enerji verimi konularında ödüllendirilmiştir. Aynı yıl, hidrojen depolaması geliştirilerek, menzili 402 km'ye kadar çıkarılmıştır.

8.7 Diğer Otomotiv Üreticileri

8.7.1 Fiat

2001 yılında, Fiat, Seicento Elettra Hidrojen yakıt pilli taşıtını geliştirmiştir. Üç fazlı asenkron motor (30 kW, 216 V) kullan bu taşıt 7kW'lık PEM yakıt pilleri (1,5 bar hidrojen ve 1,3 bar oksijen, 48 V) ile çalıştırılmaktadır. Maksimum hızı 100 km/sa ve 140 km menzili olan taşıt, 20 MPa'da 6 adet 9'ar litrelik silindirlerde hidrojen depolamaktadır. Maksimum hızı 140km/sa ve menzili 150 km'dir.

2003 yılında, Fiat Panda yakıt pilli taşıtını geliştirmiştir. Panda'nın maksimum hızı 130 km/sa ve menzili 320 km'dir.



Şekil 8.16 Fiat Panda yakıt pilli taşıtı [7]

8.7.2 Mitsubishi

Mitsubishi, 2003 yılında, Grandis minivan taşıtı baz alınarak geliştirilmiş ilk yakıt pilli taşıtının test sürüşlerini gerçekleştirmiştir. Bu taşıtı, Ballard'ın Mark 902 yakıt pili demetini kullanmaktadır ve maksimum gücü 68 kW'dır. Hidrojeni, doldurma basıncı 35 MPa'da sıkıştırılmış olarak depolayan Grandis'in depolama kapasitesi 117 litredir. Alternatif akım motorunun çıkışı 65 kW ve maksimum torku 210 Nm'dir.

Mitsubishi, hidrojen dönüştürücü kullanan yakıt pilli taşıtı üzerine çalışmalarına devam etmektedir. Hidrojen dönüştürücüde yakıt olarak metanol kullanılmaktadır. Mitsubishi, düşük sıcaklıklarda çalışabilen kendi katalizör teknolojisini kullanmaktadır. Yakıt pili sistemi de Mitsubishi'nin kendisine aittir. Bu sistem, yolcu kabininin altına sığacak kadar küçüktür ve yüksek verimlidir.

8.7.3 PSA (Peugeot, Citroen)

PSA 2000 ve 2001 yıllarında iki adet yakıt pilli taşıtı geliştirmiştir. Hydro-Gen 2000 yılında tanıtılmıştır. 20 kW'lık ve maksimum torku 210 Nm olan bir motor kullanan bu taşıtın

maksimum hızı 95 km/sa ve menzili 300 km'dir. 30 kW'lık Nuvera yakıt pili ile çalışan sistemde 35 MPa basınçta 3.3 kg hidrojen depolanabilmektedir.

2001 yılında tanıtılan Peugeot yakıt pili taksisi, benzer bir dizaynda olup, 5 yolcu taşıyabilmektedir. 5.5 kW H-Power yakıt pilinden güç alan bu taşıt 30 MP basınçta 1.5 kg (veya 80 litre) hidrojen depolayabilmektedir. Menzili 200-300 km'dir.

8.7.4 Renault

Renault, 1997 yılında iki yolcu kapasiteli FEVER yakıt pilli taşıtını geliştirmiştir. Elektrik motoru, 10 kW PEM De Nora yakıt pilleri (115 adet yakıt pili) ile çalıştırılmaktadır. Sıvı hidrojen, 8 kg veya 120 litrelik depolarda saklanmaktadır. Maksimum hızı 120 km/sa olan taşıtın menzili 500 km'dir.

1998 yılında, Renault, Laguna Estate'yi tanıttı. Araç, sıvı hidrojen ve 30 kW'lık yakıt pili kullanmakta olup, menzili 400 km'dir.

8.7.5 Volkswagen

Volkswagen, 2000 yılında Bora HyMotion'ı tanıttı. 75 kW'lık PEM yakıt pili kullanan aracın maksimum hızı 140 km/sa ve menzili 350 km'dir. 75 kW'lık asenkron motor kullanmaktadır. 2002 yılında bu taşıtın daha geliştirilmiş bir modeli tanıtılmıştır.



Şekil 8.17 Volkswagen yakıt pili taşıtının yakıt pili birimi [7]

9. TÜRKİYE'DE YAKIT PİLLERİ UYGULAMALARI:

Geleceğin enerji kaynağı olarak görülen hidrojenin yakıt pili uygulamaları Türkiye'de de yer almaya yakın bir gelecekte başlayacaktır. Türkiye'de ilk defa beş önemli kuruluş, bir teknolojiyi geliştirmek için bir araya gelmiştir. Ford Otosan, Arçelik, Tofaş, Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV) ve TÜBİTAK-MAM tarafından 10 Kasım 2003 tarihinde imzalanan anlaşma ile, yakıt pili teknolojisinin, rekabet öncesi geliştirilmesi, teknolojinin tam anlamıyla öğrenilmesi, projede çalışacak elemanların uzmanlaşması ve ileriye dönük daha kapsamlı projelerin oluşturulması amaçlanmaktadır. İlk etapta, 1.5 kW PEM yakıt pili sistemi kurulması hedeflenmektedir. Proje kapsamında, öncelikle yakıt pili sistemleri konusunda detaylı araştırma yapılması, 1.5 kW PEM yakıt pili modülü ve sistem alt bileşenlerinin temin edilmesi ve gerekli performans testlerinin tamamlanması düşünülmektedir. Proje sonunda durum değerlendirmesi yapılacağı, evsel ya da araç kullanımı için sistem entegrasyonu aşamalarına geçiş olanaklarının araştırılacağını belirtildi. Herhangi bir ürünün ortaya çıkması halinde bunun patent hakkının TÜBİTAK MAM'a ait olacağını, ticari ürüne dönüşmesi halinde de firmalarca kullanılabileceğini belirtildi.

Ford Otosan, Arçelik, Tofaş, Aygaz, Demirdöküm, TTGV ve TÜBİTAK-MAM tarafından "Yakıt Pillerinin Yerli İmkanlarla Üretilmesi Projesi" 2004 yılı sonbaharında imzalandı. 18 ay içinde üretimi hedefleyen ortaklar, teknolojinin sadece otomotiv değil bir çok sektörde uygulama alanı bulacağını belirtmektedirler.

Birleşmiş Milletler Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi'nin (ICHET) kurulmasına ilişkin anlaşma, Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti ile Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (UNIDO) arasında, 21 Ekim 2003 tarihinde Viyana'da imzalanmıştır.

Ülkemiz ile birlikte, uluslararası enerji çevrelerinin büyük önem verdiği ve geleceğin enerjisi olarak adlandırılan hidrojen enerjisinin İstanbul'da kurulacak olan merkezinin başlıca amaçları:

- Kalkınmış ve kalkınmakta olan ülkeler arasında bir köprü vazifesi görerek; hidrojen araştırma, geliştirme ve yatırımcı kuruluşlar arasında bir koordinasyonu sağlamak ve gelecekteki hidrojen teknolojisi ve endüstrisinin uygulama alanlarını tespit etmek.
- Hidrojen teknolojisi uygulamalarında barışçıl ve kalkınmaya yönelik işbirliğini geliştirmek.
- Hidrojen araştırma ve geliştirme çalışmalarının artırılması için kalkınmış ülkelerin bilim -

damlarını ve uzmanlarının doğrudan katkılarını sağlamak,

-Kalkınmakta olan ülkelerin Ar-Ge merkezlerinin ve programlarını desteklemek, hidrojen teknolojileri alanındaki yatırımları teşvik etmek, olarak belirlenmiştir.

ICHET'in Faaliyetleri;

-Uzun ve kısa dönemli atölye (workshop) çalışmaları, bilimsel toplantılar, bilim adamları ve uzmanların katılacağı uygulamalı eğitim programları düzenlemek;

-Ar-Ge ve teknoloji transferi yapmak;

-Danışmanlık hizmeti sunmak;

-Endüstri ile işbirliği kurmak;

-Hidrojen enerjisi teknolojilerini tanıtmak amacıyla katılımcı ülkelere tekno-ekonomik çalışmalar, teknoloji izleme ve tahmini, Ar-Ge, teknoloji transferi, eğitim, burs ve danışmanlık hizmeti sağlamak;

ICHET'in çalışma kapsamı içerisinde:

-Hidrojen enerjisi politikası oluşturulması, büyük miktarlarda hidrojen üretimi ve hidrojen enerji teknolojilerinin uygulanmasının ve çevresel çalışmaların ekonomik analizi;

-Diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle hidrojen üretim tekniklerinin entegre edilmesi;

-Hidrojen depolama teknikleri;

-Klima sistemleri ve hidrojen depolamada metal hidrürlerin kullanımı;

-Boru ile hidrojen nakli;

-Sıvı hidrojen teknolojileri;

-Hidrojenle çalışan taşıtlar (otobüsler, kamyonlar, otomobiller, iki ve üç tekerlekli taşıtlar);

-Yakıt pili uygulamaları;

-Hidrojen alt yapısı geliştirilmesi;

-Kimyada, enerji üretiminde, gaz, petrol endüstrisinde ve metalürjide hidrojen uygulamaları; bulunmaktadır.

ICHET'in faaliyete geçmesi ile TÜBİTAK-MAM ve diğer araştırma kuruluşları ile üniversitelerde yapılan araştırma ve uygulama çalışmaları bir çatı altında toplanacak, ülkemizin doğal kaynakları da dikkate alınarak koordineli olarak çalışmalara hız kazandırılacaktır.

Enerjisinin % 70'ini ithal kaynaklardan sağlayan dolayısıyla yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarını çeşitlendirme ve kullanım paylarını artırma çabasında olan Türkiye'nin hidrojen enerji sistemleri konusunda öncü ülkelere ulaşması gereklidir. Çünkü, sahip olduğumuz bazı

doğal kaynaklar özellikle güneş enerjisi potansiyelimiz, güneş-hidrojen sistemine geçmek için son derece uygun bir seçenektir.

Merkezi İstanbul'da bulunan Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi'nce yürütülen proje uyarınca, hidrojenli 12 adet otobüs 2007 yılında İstanbul'da sefere başlayacaktır.

Birleşmiş Milletler Endüstriyel Kalkınma Teşkilatı'na (UNİDO) bağlı olarak kurulan ve merkezi İstanbul'da bulunan Uluslararası Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi, İstanbul'da hidrojeni yakıt olarak kullanan otobüs projesini uygulamaya almıştır. İstanbul otobüs projesi, henüz mühendislik hesapları içeren gelişme aşamasındadır. Maliyetinin yarısı Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı, Dünya Bankası gibi uluslararası kuruluşlardan, diğer yarısı da yurt içi kaynaklardan karşılanacak projenin hesaplanan bütçesinin 2005 yılı başında BM organlarına sunulacak, yapılan hesaplara göre projenin toplam maliyetinin 22 milyon 400 bin doları bulacağı belirtilmektedir.

Bu rakama sadece otobüs alım maliyetlerinin değil, hidrojen üretim, dolum ve dağıtım sistemleri ile gerekli teknik kadronun kurulması da dahil olmaktadır. Proje ile İstanbul'da 12 adet hidrojen yakıtlı otobüsün çalıştırılmasının kararlaştırılmıştır. Bunlardan 8 adedi hidrojenli yakıt pili, 4 adet de içten yanmalı hidrojenli motorlar ile çalıştırılacaktır. Bu şekilde iki sistem birbirleriyle karşılaştırılacaktır. Otobüs siparişlerinin 2005 yılı sonu veya 2006 yılı başlarında verilmesi planlanmaktadır. Yakıt pilli otobüs imalatının yaklaşık 15 ay sürmesi hesaplandığından 2007 yılı başında bu otobüslerin İstanbul'da kullanımına başlanması planlanmaktadır. İstanbul'da İETT ve halk otobüsleriyle yılda 500 bin ton sera etkisi oluşturan egzos gazı havaya karışmaktadır. Otobüslerde ağırlıklı olarak hidrojen kullanılırsa egzos emisyonu büyük lde azalacaktır. AB, şu anda her bir ton karbondioksit indirimi için 6-7  teşvik öngörmekte, hidrojen yakıt sistemine geçişin bir ek ekonomik kaynak yaratacağı da belirtilmektedir.

Bor dünya rezervinin üçte ikisine sahip olan Türkiye, bor madenini geleceğin enerjisi olarak geliştirmeye alışıyor. Bor, geleceğin enerji kaynağı hidrojenin taşınmasında kullanılması planlanmaktadır.

Türk bilim adamları, borun cep telefonundan otomobile kadar pek çok araçta yakıt olarak kullanılması için proje geliştirilmektedir. Bilim adamları bor sayesinde hidrojenin taşınma ve depolanması sırasındaki patlama riskini ortadan kaldırıyor.

Yakın gelecekte cep telefonundan, bilgisayara kadar günlük yaşamda kullanılan birçok cihazın enerjisi, hidrojen kaynaklı yakıt pillerinden sağlanma olasılığı yüksektir. Dünya bor rezervinin üçte ikisine sahip olan Türkiye de, bu noktada enerji tekeli olmak için bir proje geliştirmektedir. TÜBİTAK'a göre bu proje sayesinde Türkiye, 2010'lu yıllarda teknoloji satan bir enerji tekeli olabilecektir.

Bir enerji bileşeni olarak bor-hidrür, hidrojenin taşınma, depolanma, patlama gibi tüm risklerini yok eden bir taşıyıcıdır. Sanılının aksine bor kendi başına bir enerji kaynağı değil; bileştiği kimyasallar ile bir değer ifade etmektedir.

Elimsan Şirketler Grubu üyesi, Hidrener A.Ş., Plug Power ve Proton Energy şirketleri ile yaptığı anlaşma uyarınca, 5 kW gücündeki PEM yakıt pillerini satışa sunmuştur. Anlaşma ile birlikte, Laboratuar Tipi Hidrojen Jeneratörleri, Kullanım yerinde Hidrojen üretimi için değişik güçlerde jeneratörler, yakıt pilli araçlar için hidrojen dolum istasyonları ve ekipmanları, kesintisiz güç kaynağı uygulamaları vs. Hidrener A.Ş'nin ürün gamında yerini almıştır.

10. SONUÇLAR

Günümüzde enerji ihtiyacının % 90'ı halen fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Kullanılan fosil yakıtların % 40'ını petrol, % 24'ünü kömür ve % 22'sini doğal gaz oluşturmaktadır. Fosil yakıtların tükeneceği tarihler konusunda çeşitli hesaplamalar yapılmış olsa da, kesin bir tarih belirlemek çok zordur. Fosil yakıt kullanan sistemlerin geliştirilip yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi, henüz keşfedilmemiş rezervlerin olabileceği göz önünde bulundurulursa, 40-50 sene içerisinde fosil yakıtların tükeneceği tahmin edilmektedir. Fosil yakıtların kullanımı sonucunda meydana çıkan zararlı bileşenler, dünyaya zarar vermekte, asit yağmurları, küresel ısınma, vb. gibi sorunlara neden olmaktadır.

Hem fosil yakıtların tükenmesi, hem de dünyaya zararları, fosil yakıtlar kadar verimli ve daha temiz enerji kaynaklarının araştırılmasına neden olmaktadır. Araştırmalar sonucunda hidrojen, fosil yakıtların yerini almaya aday bir yakıt olmuştur. Hidrojen, hem içten yanmalı motorlarda hem de yakıt pillerinde kullanılmaya uygun bir yakıttır. Yakıt pili sistemleri, yüksek verim ve sıfır emisyon ile gelecek vadetmektedir. Fosil yakıtların büyük bir oranı, otomotiv sektöründe kullanılmaktadır, dolayısıyla yakıt pilleri çalışmalarının taşıtlardaki uygulamaları da geniş bir yer tutmaktadır.

Dünya çapında bir çok büyük otomotiv firması, yakıt pillerinin geliştirilmesi için ortaklıklar kurmuşlardır. Yakıt pili teknolojileri, büyük bir hızla geliştirilmekte, her sene bir öncekinden daha iyi yakıt pilli taşıt prototipleri üretilmektedir. Fakat tabii ki, yakıt pili teknolojilerinin geliştirilmesi, yakıt pilli taşıtların günlük kullanıma geçirilmesi için yeterli değildir. Yakıt pillerini halen tüketicilerin kullanımına sunulmasını engelleyen ve geliştirilmesi gereken bir çok husus vardır. Yakıt pillerinde kullanılan hidrojenin üretimi, depolanması, dağıtım alt yapısının mevcut olmaması bu sorunlardan birkaçıdır. Otomotiv firmaları, yakıt pillerine daha yavaş ve kolay bir geçiş yapmak için hem benzinli ve dizel sistemlerle hem de yakıt pilleriyle ortak çalıştırılan hibrit taşıtları geliştirmişlerdir.

Yakıt pili sistemlerde geliştirilmesi gereken başlıca noktalar;

- 1- İlk hareket zamanının düşürülmesi,
- 2- Yakıt pili sistemi ve bileşenlerinin maliyetinin düşürülmesi,
- 3- Sistem ve bileşen dayanıklılığının deney ve uygulama yoluyla kanıtlanması,
- 4- Yüksek verimli termik, su ve hava kontrol sistemlerinin geliştirilmesi,

5- Uygun bir yakıt dağıtım alt yapısı kurulması,

6- Hidrojen depolama sorununun çözülmesi.

Özellikle taşıt üzerinde hidrojen dönüştürücü kullanan sistemlerde, ilk hareket biraz zaman almaktadır. Özellikle soğuk havalarda bu konu, çalışmayı geciktirmektedir. Bu sorunun çözülmesi için ön ısıtma düzeneği hazırlanması düşünülmüştür. Yakıt pili demeti dışından bir aküden güç alacak olan bu sistemde, dönüştürücü ve yakıt pili sisteminin çalışma sıcaklığına kadar ısıtılması üzerinde çalışılmaktadır. Fakat, güç kaynağı ek akünün kaplayacağı yer ve ağırlığı başka bir soruna neden olmaktadır. Yakıt pilleri sistemlerinin bu konu üzerinde geliştirilmesi gerekmektedir.

Hidrojen elde edilmesi, yakıt pili sistemlerinde kullanılan bileşenlerin ve parçaların maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Tüketicilerin yakıt pilli taşıtları kullanımına alışmaları için yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, membran üretimi % 35, katalizörlerin de %40 oranında ucuzlamasını sağlamıştır. PEM yakıt pillerinde kullanılan ve çok pahalı olan platinyum katalizörlere bir alternatif bulunması gerekmektedir. 0,5 kg platinyumun fiyatı 10.000 \$'dır. Platinyuma alternatif olarak nano-nikel geliştirilmiştir ve bu konudaki iyileştirme çalışmaları sürmektedir. Nano-nikel, platinyuma benzer fiziksel özellikler göstermektedir ve yakıt pilinde aynı işlevi görmektedir. Nano-nikel'in 10 yıl içinde ticari bir bileşene dönüştürülmesi düşünülmektedir. Hidrojenin, doğal gazdan buharla dönüştürme yoluyla elde edilmesi 1 \$/kg'dır fakat bunun boru hatlarıyla kullanıcıya ulaştırılması hesaba katılırsa maliye 15 \$/kg'a kadar çıkmaktadır. Bu fiyatla, hidrojenin benzinle yarışması mümkün değildir.

Yakıt pilleri sistemi ve bileşenlerinin dayanıklılık testleri halen devam etmektedir. Yakıt pili maliyeti ve geleceği açısından bu bilgilerin tamamlanması gerekmektedir.

Yakıt pili sistemlerinde, üretilen enerjinin bir kısmı, su ve hava kontrol sistemlerinde kullanılmakta, bu da toplam verimi düşürmektedir. Toplam verimin artması için bu sistemlerin verimlerinin de iyileştirilmesi gerekmektedir.

Hidrojen dağıtım sistemi alt yapısı henüz mevcut değildir. Alt yapı, hem yüksek maliyet hem de bir çok düzeneğin geliştirilmesi demek olduğundan bu gerekliliği geciktirmek veya ortadan kaldırmak için bazı alternatif çözümler düşünülmüştür; örneğin, yakıt olarak hidrojen yerine metanol kullanımı. Metanol normal şartlarda, benzin gibi sıvı bir maddedir. Dolayısıyla, mevcut benzin istasyonları ve alt yapısı kullanılarak metanol dağıtımı gerçekleştirilebilir. Bunun içinde, metanol dönüştürücü kullanan yakıt pilli taşıtlar geliştirilmektedir. Araç

üzerinde dönüştürücü kullanılarak hidrojen elde edilmesi diğer yakıtlar için de düşünülmektedir.

Hidrojen, küçük bir element olup, diğer malzemelerden kaçması nedeniyle, depolanması büyük bir sorundur. Hidrojenin, sağlam büyük depolarda saklanması araçlarda yer kaplamaları bakımından sorun teşkil etmektedir. Hidrojen, metal hidrit olarak metallere difüze edilerek depolanabilmektedir, fakat bu yöntemde ağır ve yer kaplayan bir sistemdir. Hidrojeni, bor hidrür olarak depolamak da diğer araştırılan bir yöntemdir. Bor hidrür, hidrojenin, taşınma, depolanma ve patlama gibi tüm sorunlarını ortadan kaldıran bir taşıyıcıdır. Özellikle Türkiye’de dünya bor rezervinin büyük bir kısmının bulunduğu düşünülürse, Türkiye açısından bu seçenek büyük önem taşımaktadır.

Tüketicilerin yakıt pilli taşıtları benimsemesi için, maliyet sorununun çözülmesi ve verimli çalışan kompakt taşıtlar geliştirilmelidir.

Dünyadaki bir çok ülke, bu teknolojinin gerisinde kalmamak için bütçelerinin bir bölümünü yakıt pilli araştırma ve uygulamalarına ayırmaktadır. Gelecekte teknoloji alan değil geliştiren bir ülke olmak için Türkiye’de de yakıt pilli taşıtların çalışmalarının başlaması büyük önem taşımaktadır. 2007 yılında İstanbul’da uygulamaya konulacak olan yakıt pilli otobüsler, bu teknolojinin öğrenilmesi ve araştırılması bakımından bir avantaj olacaktır.

Önümüzdeki yıllarda yakıt pilli taşıtların test sürüşlerinin çoğalacağı ve günlük hayata daha çok aracın çıkarılacağı görülmektedir. Sorunları ve avantajlarıyla yakıt pilleri gelecekteki yerini şimdiden almıştır.

KAYNAKLAR

Boyacı San, F.G., Sain Özdemir, S., Örs, N., Kalafatoğlu, E. ve Bahar, T., (2001), "Hidrojen Yakıt Pilleri: Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamalar ve Geleceği", Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, Marmara Araştırma Merkezi, İzmit.

Chalk, S., (1999), "Progress Report for Fuel Cells for Transportation", U.S. Department of Energy, Office of Advanced Automotive Technologies, Washington.

Eudy, L., Parish, R., D.Little, A., (2001), "Hydrogen Fuel Cell Bus Evaluation", Fullerton.

Hoogers, G., (2003), Fuel Cell Technology Handbook, CRS Press, New York.

Lanz, A., (2001), Hydrogen Fuel Cell Engines, College of Desert, Palm Desert.

Read, C., Thijssen, J., Krumpelt, M., Ralph J., Ahmed, A., Kumar, R., Harris, D., Maru, H., Heady, H., Staniunas, J. ve Pierre, J., (2000), Fuel Cell Handbook, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, West Virginia.

İNTERNET KAYNAKLARI

- [1] <http://www.fueleconomy.gov>
- [2] <http://www.ford.com>
- [3] <http://www.ballard.com>
- [4] <http://www.daimlerchrysler.com>
- [5] <http://www.mazda.com>
- [6] <http://world.honda.com>
- [7] <http://www.h2cars.biz>
- [8] <http://www.gm.com>
- [9] <http://fuelcellworld.org>
- [10] <http://www.fuelcelltoday.com>
- [11] <http://www.h2fc.com>
- [12] <http://www.hfcletter.com>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.01.1976	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1987-1994	Nişantaşı Anadolu Lisesi
Lisans	1995-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-günümüze	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programı
Çalıştığı kurumlar		
	2002-günümüze	Federal-Mogul-Sapanca Segman ve Gömlek Üretim Tesisleri A.Ş.