

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKIT PİLİNİN MOTORLU  
TAŞITLARDA UYGULANMASI**

Makine Mühendisi Ömer ÇAMCI

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı:** Prof. Dr. Orhan DENİZ

**İSTANBUL, 2005**

## İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTIMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 GİRİŞ.....	1
2 YAKIT PİLİ.....	4
2.1 Yakıt Pili Çalışma Prensibi .....	4
2.2 Yakıt Pili Çeşitleri .....	4
2.2.1 Polimer Elektrolit Membrane Yakıt Pili ( PEMFC ).....	4
2.2.2 Fosforik Asit Yakıt Pili ( PAFC ).....	6
2.2.3 Katı Oksit Yakıt Pili ( SOFC ).....	7
2.2.4 Erimiş Karbonat Yakıt Pili ( MCFC ).....	9
2.2.5 Alkali Yakıt Pili ( AFC ).....	11
2.3 Yakıt Pili Özellikleri.....	11
2.3.1 Yakıt Pili Dizaynı.....	11
2.3.2 Temel Sınırlamalar.....	11
2.3.3 Pratik Sınırlamalar.....	13
2.3.3.1 Aktivasyon Kayıpları.....	14
2.3.3.2 Ohmik Kayıplar.....	15
2.3.3.3 Konsantrasyon Kayıpları.....	15
3 YAKIT PİLİ SİSTEMİ.....	16
3.1 Yakıt Pili Grubu.....	16
3.2 Yakıt Sağlama Sistemi.....	17
3.2.1 Direk Hidrojen Kullanımı.....	18
3.2.1.1 Hidrojenin Doldurma İstasyonlarına Sağlanması veya Bu İstasyonlarda Üretilmesi.....	18
3.2.1.2 Hidrojeni Taşıtta Depolama Yöntemleri.....	19

3.2.1.2.1	Sıkıştırılmış Hidrojen Depolama.....	20
3.2.1.2.2	Sıvılaştırılmış Hidrojen Depolama.....	29
3.2.1.2.3	Metal Hidrid Depolama.....	31
3.2.1.4	Hidrojen Depolama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	36
3.2.2	Yerinde Dönüştürme Sistemleri.....	37
3.2.2.1	Dönüştürme Sistemleri.....	37
3.2.2.1.1	Buhar Dönüştürme Sistemi.....	37
3.2.2.1.2	Kısmi Oksidasyon Dönüştürme Sistemi.....	37
3.2.2.1.3	Ototermal Dönüştürme Sistemi.....	37
3.2.2.2	Yakıt Dönüştürme Sistemleri.....	38
3.2.2.2.1	Metanolün Hidrojene Dönüştürülmesi.....	38
3.2.2.2.2	Benzininin Hidrojene Dönüştürülmesi.....	43
3.2.2.3	Gaz Temizleme Sistemi.....	46
3.2.3	Hidrojen Depolama, Metanol ve Benzin Dönüştürme Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	49
3.3	Hava Sağlama ve Nemlendirme Sistemi.....	49
3.4	Soğutma Sistemi.....	52
3.5	Kontrol Sistemi.....	54
3.6	Direk Hidrojen Yakıt Pili Sistemi.....	54
3.7	Yakıt Dönüştürücülü Yakıt Pili Sistemi.....	55
4	YAKIT PİLİ TAŞITLARI.....	57
4.1	Hibrid Yakıt Pili Taşıtı ( Yakıt Pili + Batarya ).....	59
4.1.1	Hibrid Yakıt Pili Taşıtı Özellikleri.....	59
4.1.2	Jeep Commander 2 Hibrid Yakıt Pili Taşıtı.....	63
4.2	Sadece Yakıt Pili Kullanan Taşıtlar.....	66
4.2.1	Sadece Yakıt Pili Kullanan Taşıtların Özellikleri.....	66
4.2.2	NeCar4 Yakıt Pili Taşıtı.....	66
4.3	Yakıt Pili Taşıtı Verimi.....	67
4.4	Yakıt Pili Taşıtı Maliyeti.....	72
5	YAKIT PİLİ TAŞITLARININ İÇTEN YANMALI MOTORLAR ve BATARYA ELEKTRİK TAŞITLARIYLA MALİYET, AĞIRLIK, HACİM EMİSYON ve VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRILMASI.....	73

6	SONUÇLAR.....	77
	KAYNAKLAR.....	79
	ÖZGEÇMİŞ.....	83

## SİMGE LİSTESİ

$H_2$	Hidrojen
$O_2$	Oksijen
$CO$	Karbonmonoksit
$CO_2$	Karbondioksit
$H_2O$	Su
$e^-$	Elektron
$H^+$	Hidrojen ( pozitif ) iyonu
$O^-$	Oksijen ( negatif ) iyonu
$CH_3OH$	Metanol
$CO_3^-$	Karbonat iyonu
$CH_4$	Metan
$E_o$	Pil reaksiyonu için tersinir standart potansiyel
$E$	İdeal denge potansiyeli
$T$	Sıcaklık
$F$	Faraday sabiti
$P$	Basınç
$V$	Volt
$\eta_{akt}$	Aktivasyon kaybı
$\alpha$	Elektron transfer katsayısı
$i$	Akım
$i_0$	Değişen akım yoğunluğu
$n$	Reaksiyona katılan elektronların sayısı
$R$	Üniversal gaz sabiti
$\eta_{ohm}$	Ohmik kayıplar
$R_{pil}$	Pil direnci
$\eta_{kons}$	Konsantrasyon kaybı
$i_L$	Akım limiti
$NaBH_4$	Sodyum bor hidrür
$W_h$	Üretilen hidrojen kütlesi
$W_s$	$NaBH_4$ 'ün kütlesi
$\eta_{aktarma}$	Güç aktarma verimi
$\eta_{motor}$	Elektrik motor verimi

$\eta_{\text{konverter}}$	Konverter verimi
$P_{\text{net}}$	Yakıt pili sisteminden sağlanması gereken net gücü
$P_{\text{tekerlik}}$	Tekerliğe iletilmesi gereken güç
$P_{\text{parasitik}}$	Yardımcı parçalar tarafından tüketilen güç
$P_{\text{Brüt}}$	Yakıt pilinden sağlanan güç
$\eta_{\text{sistem}}$	Yakıt pili sistem verimi
$h_{H2}$	Alt ısı değeri ( kJ/kgK )
$m_{H2}$	Hidrojenin kütle akış hızı ( g/s )
$\eta_{\text{taşıt}}$	Taşıtın toplam verimi
$\eta_{\text{FC}}$	Yakıt pili verimi
$u$	Yakıt kullanımı
$U_{\text{pil}}$	Ortalama pil voltajı ( V )
$I$	Akım ( I )
$n_{\text{pil}}$	Toplam pil sayısı
$n_{\text{grup}}$	Grup sayısı
$J$	Akım yoğunluğu ( A/cm <sup>2</sup> )
$A_{\text{aktif}}$	Aktif pil alanı ( cm <sup>2</sup> )
$\alpha_{\text{aktif}}$	Aktif alanın iki kutuplu levha alanına oranı
$h_{\text{grup}}$	Grup yüksekliği
$w_{\text{grup}}$	Grup genişliği
$L_{\text{grup}}$	Grup uzunluğu
$d_{\text{pil}}$	Bir pilin kalınlığı
$d_{\text{son levha}}$	Son levha kalınlığı
$V_{\text{grup}}$	Grup hacmi

## KISALTMA LİSTESİ

PEMFC	Polimer elektrolit membran yakıt pili
PEM	Polimer elektrolit membran yakıt pili
SOFC	Katı oksit yakıt pili
AFC	Alkali yakıt pili
MCFC	Erimiş karbonatlı yakıt pili
PAFC	Fosforik asit yakıt pili
NG	Doğalgaz
YP	Yakıt pili
LH2	Sıvılaştırılmış hidrojen
HTS	Yüksek sıcaklık değişim reaktörü
LTS	Düşük sıcaklık değişim reaktörü
PROX	Tercihli oksidasyon gaz temizleme reaktörü

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Yakıt pili.....	4
Şekil 2.2	PEM Yakıt Pili ve PAFC.....	5
Şekil 2.3	Katı Oksit Yakıt Pili.....	8
Şekil 2.4	Erimiş Karbonat Yakıt Pili.....	10
Şekil 2.5	Sıcaklık karşısında elektrokimyasal reaksiyonların voltaj değerleri.....	13
Şekil 2.6	İdeal ve gerçek akım ve voltaj karakteristiği.....	14
Şekil 3.1	PEM yakıt pilinin I-V eğrileri ve kayıplar.....	16
Şekil 3.2	Hidrojen dağıtım ve üretimi için yakın dönem seçenekleri.....	19
Şekil 3.3	296 K sıcaklıkta farklı basınçlarda zamanın fonksiyonu olarak hidrojen verimi.....	33
Şekil 3.4	296 K sıcaklıkta hidrojen veriminde basıncın etkisi.....	34
Şekil 3.5	296 K sıcaklıkta hidrojen veriminde eklenen suyun etkisi.....	34
Şekil 3.6	Metanol buhar dönüştürme deney sonuçları.....	39
Şekil 3.7	PEM yakıt piliyle uyumlu ototermal dönüştürücülü yakıt sağlama sistemi.....	43
Şekil 3.8	700 °C de $8776^{-1}$ bağıl hız ve $H_2O/C = 3$ şartlarında iso-oktanın kısmi oksidasyonunda ürün dağılımında O/C oranının etkisi.....	44
Şekil 3.9	700 °C de $8776^{-1}$ bağıl hız ve $O/C = 1$ şartlarında iso-oktanın kısmi oksidasyonunda ürün dağılımında $H_2O/C$ oranının etkisi.....	45
Şekil 3.10	Tercihli oksidasyon deneyinin sonuçları.....	48
Şekil 3.11	Hava sağlama sisteminin şeması.....	50
Şekil 3.12	Yakıt pili sisteminde yüksek basınçlı hava sağlama sistemi.....	52
Şekil 3.13	Yakıt pili sistemi.....	53
Şekil 3.14	Sıkıştırılmış direk hidrojen yakıt pili sistemi.....	54
Şekil 3.15	Yakıt dönüştürücülü yakıt pili sistemi.....	56
Şekil 4.1	GM Hy-wire şasisi.....	57
Şekil 4.2	Yakıt pili hibrid taşıtı.....	60
Şekil 4.3	30 kW yakıt pili ve 45 kW 'lık batarya gücü için simülasyon programına göre taşıt güç isteği yakıt pili güç çıkışı ve batarya güç çıkışı gösteriliyor.....	61
Şekil 4.4	75 kW 'lık yakıt pili hibrid taşıtının yakıt ekonomisi simülasyon sonuçları gösteriliyor.....	62
Şekil 4.5	Jeep Commander 2 hibrid yakıt pili taşıtı.....	63
Şekil 4.6	Jeep Commander 2 Metanol buhar dönüştürme sistemi.....	65
Şekil 4.7	NeCar4'ün yakıt pili sisteminin ve $H_2$ tankının yerleşimi.....	66
Şekil 4.8	NeCAR4 komple yakıt pili taşıtı.....	67



Şekil 4.9	Yakıt pili sistem parçalarının verimleri.....	68
Şekil 4.10	NeCar 2 nin Sankey diyagramı.....	71
Şekil 4.11	NeCar 4 nin Sankey diyagramı.....	71
Şekil 5.1	0 'dan 100 km/h hıza 9 hızlanma testin zamana göre profili.....	74
Şekil 5.2	Batarya elektrik taşıtı ve yakıt pili taşıtı için ilk kaynaktan tekerliklere enerji kaynağı.....	75

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Toyota FCHV-4 teknik verileri.....	21
Çizelge 3.2	Daihatsu Move FCV K II teknik verileri.....	21
Çizelge 3.3	Toyota/Hino Motor FCHV_BUS 1 teknik verileri.....	22
Çizelge 3.4	NeCar 1'in teknik verileri.....	23
Çizelge 3.5	NeCar 2'in teknik verileri.....	23
Çizelge 3.6	NeCar 4- Advanced'in teknik verileri.....	24
Çizelge 3.7	Ford P2000'in teknik verileri.....	24
Çizelge 3.8	Ford Focus FCV hidrojen güçlü taşıtının teknik verileri.....	25
Çizelge 3.9	Ballard 1993 32-Foot Bus'in teknik verileri.....	25
Çizelge 3.10	Ballard 1995 40-Foot P2'in teknik verileri.....	26
Çizelge 3.11	Ballard P3 Yakıt pili otobüsünün teknik verileri.....	26
Çizelge 3.12	DaimlerChrysler NEBUS yakıt pili otobüsünün teknik verileri.....	27
Çizelge 3.13	Nissan 2001 Xterra Yakıt pili taşıtının teknik verileri.....	27
Çizelge 3.14	Honda FCX-V3'in teknik verileri.....	28
Çizelge 3.15	Honda FCX-V4'in teknik verileri.....	28
Çizelge 3.16	Hyundai Santa Fe yakıt pili taşıtının teknik verileri.....	29
Çizelge 3.17	Hyundai 'nın Tucson FCEV teknik verileri.....	29
Çizelge 3.18	GM's HydroGen1'in teknik verileri.....	30
Çizelge 3.19	GM's HydroGen3'in teknik verileri.....	30
Çizelge 3.20	NeCar 4'in teknik verileri.....	31
Çizelge 3.21	Bazı metal hidridlerin depolama özellikleri.....	32
Çizelge 3.22	Toyota RAV4 FC EV'nin teknik verileri.....	35
Çizelge 3.23	Toyota FCHV-3 'nin teknik verileri.....	35
Çizelge 3.24	Mazda Demio FCEV'in teknik verileri.....	36
Çizelge 3.25	Toyota Metanol güçlü RAV4 FC EV 'nin teknik verileri.....	41
Çizelge 3.26	NeCar 3'in teknik verileri.....	41
Çizelge 3.27	NeCar 5'in teknik verileri.....	41
Çizelge 3.28	Ford Focus FC5 Metanol güçlü yakıt pili taşıtının teknik verileri.....	42
Çizelge 3.29	Mazda Premacy FC-EV'in teknik verileri.....	42
Çizelge 3.30	Nissan R'nessa Yakıt pili taşıtının teknik verileri.....	42
Çizelge 3.31	Toyota FCHV-5 teknik verileri.....	46
Çizelge 4.1	Jeep Commander 2'nin teknik verileri.....	64
Çizelge 4.2	Yakıt pili taşıt maliyetleri.....	72

## ÖNSÖZ

Yapmış olduğum tez çalışmam boyunca ilgi, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve bu tezin tamamlanması için gerekli koşulları sunan sayın hocam Prof. Dr. Orhan DENİZ 'e, beni her türlü konuda destekleyen ve bu tezin tamamlanabilmesi için maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan aileme ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

## ÖZET

Tezin ilk bölümünde yakıt pili çeşitleri incelendi. Yakıt pili taşıtındaki yakıt pili motorunun parçaları ayrıntılı bir şekilde incelendi. Bunlar yakıt pili grubu, yakıt sağlama sistemi, hava sağlama sistemi, soğutma sistemi ve kontrol sistemidir. Yakıt sağlama sistemi direk hidrojen kullanımı ve yakıt dönüştürme sistemi olarak iki bölümde incelendi. Hidrojenin sıkıştırılmış, sıvılaştırılmış metal veya kimyasal hidridlerde depolanması incelenip birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Yakıt dönüştürme sistemleri buhar dönüştürme, kısmi oksidasyon dönüştürme ve ototermal dönüştürme olarak üç bölümde incelenip metanol ve benzin dönüştürme sistemleri anlatılmış direk hidrojen depolamayla bu sistemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Dönüştürme sistemlerinin sonunda dönüştürülen gazın içindeki CO 'nun temizlendiği gaz temizleme sistemi detaylı bir şekilde incelendi. Bu bölümde son olarak direk hidrojen kullanımı ve dönüştürme sistemlerini tanıtan örnekler sunulmuştur. .

Tezin ikinci bölümünde hibrid yakıt pili taşıtıyla sadece yakıt pili kullanan taşıtlar incelenmiş birer örnekle tanıtılmıştır. Buna ilave olarak yakıt pili taşıt maliyetine de değinilmiş olup iki yakıt pili taşıtının Sankey diyagramı incelendi. Son olarak yakıt pili taşıtlarının içten yanmalı motorlarla maliyeti, ağırlık, hacim, emisyon ve verimlilik bakımından karşılaştırılması yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler;** Yakıt pili, Hidrojen depolama, Yakıt dönüştürme sistemleri, Yakıt pili taşıtları.

## **ABSTRACT**

In the first part of thesis, fuel cell and fuel cell types are investigated in detail. These are fuel cell stack, fuel supplying system, air supplying system, cooling system and control system. Fuel supplying system are examined in two chapter which are direct hydrogen using and fuel reforming system. Hydrogen storage as a compressed, liquified, metal and chemical hydrid are analysed and then they are compared one another. Fuel reforming systems are examined as a steam reforming, partial oxidation reforming and autothermal reforming in three chapter. In addition methanol and gasoline reforming systems are explained and these systems are compared with direct hydrogen storage. Gas cleaning system where cleans at the and of the reforming system CO in the reformed gas, are investigated in detail. At the end of this part direct hydrogen using and reforming system models are presented briefly.

In the second part of the thesis, hybrid fuel cell vehicle and only fuel cell using vehicles are analysed and are presented one for each model. In addition to this, fuel cell vehicle cost are examined and then sankey diagrams of two fuel cell vehicles are explained. At the end of this part, fuel cell vehicles are compared with internal combustion engines in terms of cost, weight, volume, emisyon and efficiency.

**Keywords;** Fuel cell, Hydrogen storage, Fuel reforming systems, Fuel cell vehicles.

## 1. GİRİŞ

Dünya büyük bir küresel ısınma ve enerji problemi içindedir. Gerek taşıma sektöründeki araçlardan gerek sanayi bölgelerindeki fabrikalardan atmosfere bırakılan CO<sub>2</sub>, dünyanın daha fazla ısınmasına, dünyanın kuzeyindeki buzulların erimesine, iklimlerin değişmesine sebep olmaktadır. Yakıt pilleri suyun elektrolizi olayının tam tersi gerçekleşen bir olaydır. Yakıt pili anot, katot elektrot ve bir elektrolitten oluşur. Anota beslenen hidrojen proton ve elektronlarına ayrılır. Protonlar elektrolit içinden katota geçerken elektronlar bir dış devre yardımıyla anottan katota geçer. Katot tarafına beslenen O<sub>2</sub> burada H<sup>+</sup> iyonu ve elektronlarla birleşerek H<sub>2</sub>O oluşturur. Bu reaksiyonlardan kesinlikle CO<sub>2</sub> çıkmamaktadır. Yalnız hidrojeni yakın zamanda taşıtta yeteri kadar depolamak ve hidrojen dağıtım altyapısının çok maliyetli olması yüzünden yakın zamanda kurulması mümkün görülüyor ( en az 10 – 20 yıl ).Yakın ve orta dönem için hidrojenin taşıtta veya yakıt pili sisteminin bulunduğu yerde metanol, benzin, doğalgaz ve etanol gibi hidrokarbon yakıtlardan yakıt dönüştürme sistemleri aracılığıyla elde edilmesi düşünülüyor. Hidrokarbon yakıtlardan hidrojen elde edilmesi sırasında az miktarda CO<sub>2</sub> de çıkmaktadır.

Petrolün uzak dönemde ( 50 – 70 yıl ) tükenmesi problemi, yakın dönemde petrol fiyatlarının aşırı değerlenmesi ( 2005 Ağustos ayı içinde petrolün varil fiyatı 67 doları geçti ve bu değer yıl sonunda 100 dolara ulaşabileceği tahmin ediliyor.) sebebiyle yakıt pilleri yakıt pillerinin alternatif güç üretim sistemleri olarak geliştirilmesine hız verilmiştir. Günümüzde yakıt pilleri otomotiv sektöründe, evsel ısıtma sistemlerinde, elektrik üretim santrallerinde ve dizüstü bilgisayar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Yakıt pillerinin yakıtının hidrojen olması bu teknoloji için en büyük avantajdır. Çünkü hidrojenin gelecekte rüzgar enerjisinden, güneş enerjisinden, hidrolik enerjiden, jeotermal enerjiden ve nükleer enerjiden elde edilen elektriğin suyun elektrolizinde kullanılmasıyla hidrojen elde edilmesine geçilecektir. Böylelikle uzun dönem içinde petrol ve diğer hidrokarbon yakıtlara olan bağımlılık kalkarken devletler kendi öz kaynaklarından kendi enerjilerini üretmeleriyle ekonomik ve siyasi bakımdan bağımsız olur. Türkiye de üretilen elektriğin bir kısmı dışardan ithal edilen doğalgazdan elde edilir. Bunun yanında petrole yıl içinde ödenen miktarın 7-8 milyar doları geçmiştir ( Sadece 2005'in Ocak ayından Ağustos ayında artan petrol fiyatlarının ülkemize faturası 3-4 milyar doları bulmaktadır.). Bunun engellenmesi için yakıt piline yani yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz gerekir. İstanbul da BM tarafından 21 Ekim 2003'de kurulan Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi ( UNIDO-ICHET ) Türkiye için

büyük bir şanstır. Bu enstitünün Bozcaada da rüzgar enerjisinden hidrojen elde etme projesi ve aynı zamanda İstanbul da toplu taşıma aracı olarak kullanılmak için otobüs üretme projesi bir bakıma yakıt pili teknolojisi için Türkiye de bir başlangıç oluşturabilir.

Dünyada yakıt pili teknoloji gelişimi son 10 yılda büyük bir aşama katetmiştir. Özellikle petrol fiyatlarının artması otomotiv sektörünün devlerinin yakıt piline yaptığı yatırımların artmasına yol açmıştır. İlk yakıt pili taşıtı DaimlerChrysler 'in NeCar1 taşıtıdır. Yakıt pilleri 5 çeşittir; PEM yakıt pili ( PEMFC), Katı oksit yakıt pili ( SOFC ), Alkali yakıt pili ( AFC ), Fosforik asit yakıt pili ( PAFC ), Erimiş karbonat yakıt pili ( MCFC ) dır. PEM yakıt pili, otomotiv üreticileri tarafından yakıt pilleri içinden yüksek güç yoğunluğuna ve düşük sıcaklıkta çalışması yüzünden tercih edilir. Otomotiv üreticileri çok sayıda yakıt pili taşıtı üretmiştir. Günümüzde henüz seri üretime geçilmediği için fiyatlar çok pahalıdır ( 300 \$/kW). Yalnız teknolojinin daha ilerlemesi, otomotiv sektörünün seri üretime geçmesiyle bu değerın 20-30 \$/kW'a düşebileceği tahmin ediliyor. Böylelikle içten yanmalı motorlarla rekabet edebilecek seviyeye ulaşılır ( 20 \$/kW ). Yakıt pili taşıtlarının hava kirliliğine sebep olmaması ve petrole alternatif olması yanında günümüz içten yanmalı motorlardan 2-3 kat daha verimlidir ( % 40 civarı ). Tüketilen hidrojen miktarı aynı esaslı taşıt için benzinli taşıtta 7,1 litre benzin harcarken yakıt pili taşıtında 4,0 litre benzin eşitliğinde hidrojen harcar. Yakıt pili taşıtlarının sessiz çalışması diğer otomotivlere karşı başka bir avantajdır. Yakıt pili taşıt dizaynında içten yanmalı motorlarda olduğu gibi taşıtın önüne belli bir yere sıkıştırmaya gerek yoktur. Yakıt pili taşıtında her parça taşıtın altına istendiği şekilde yerleştirilebilir. Her şeyden önce yakıt pilleri ülkemizde ve dünyada insanların SO<sub>2</sub> 'den CO<sub>2</sub>'den etkilenmeden havası ve suyu temiz şehirlerde yaşamasının önünü açacaktır.

Otomotivlerde yakıt pili sistemi 5 kısımdan oluşur. Yakıt sağlama sistemi, yakıt pili grubu, hava sağlama sistemi, soğutma sistemi ve kontrol sistemi. Otomotivde yakıt olarak H<sub>2</sub> kullanılırsa, hidrojen yüksek basınçlarda sıkıştırılarak veya çok düşük sıcaklıklarda sıvı olarak veya metal hidridlerde depolanır. Bu sistemde saf hidrojen kullanıldığı için taşıttan hiçbir şekilde CO<sub>2</sub> çıkmaz. Eğer yakıt olarak Hidrojen kullanılmazsa taşıtta yakıt tankının yanında yakıt dönüştürme sistemi kullanılır. Bu taşıtlarda yakıt olarak benzin ve metanol kullanılır. Bu taşıtlarda yakıt içinde C bulunduğu için CO<sub>2</sub> 'de çıkar.

Bu çalışmamızda önce yakıt pili çeşitlerine değinilmiş olup sonrasında yakıt pili sistem parçaları tanıtılması ve günümüz otomotiv sektöründe üretilen taşıtların çizelgeleri ve bazı

özellikleri belirtilmiştir. Bunun yanında yakıt pili taşıtları iki kısımda; hibrid yakıt pili taşıtı ve sadece yakıt pili kullanan taşıtlar olmak üzere incelenmiş onlara bir örnek taşıt ayrıca tanıtılmıştır. Tezin son aşamasında yakıt pili taşıtlarının içten yanmalı motorlarla CO<sub>2</sub> emisyonu, verim, maliyet, ağırlık ve hacim bakımından karşılaştırılması yapılmıştır.

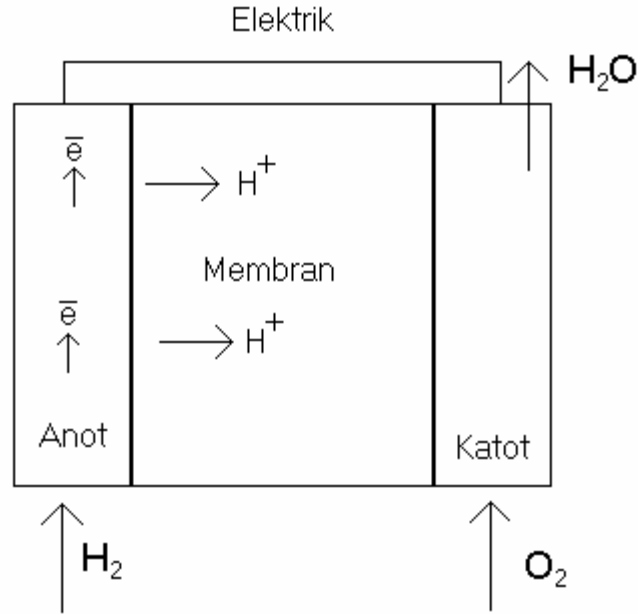


## 2. YAKIT PİLİ

### 2.1. Yakıt Pili Çalışma Prensibi

Yakıt pili anot elektrot, elektrolit membran ve katot elektrottan oluşur. Yakıt pilinde yakıt olarak hidrojen kullanılır. Hidrojen oksijenle reaksiyona girer ve yan ürün olarak su ortaya çıkar. Hidrojen yakıt pilinin anot kısmında proton ve elektronlarına ayrılır. Elektrolit yalnızca protonların geçmesini sağlarken elektronların geçmesine izin vermez. Elektronlar anottan katota bir dış devre yardımıyla giderken bu sırada elektrik üretilir. Katotda elektrolit içinden geçen protonlar, katota gelen elektronlar ve oksijenle reaksiyona girerek su ortaya çıkar.

Yakıt pillerinde hidrojen kullanımıyla yalnızca su ortaya çıkar. Hidrokarbonlu yakıtların kullanılmasıyla CO<sub>2</sub> de çıkar.



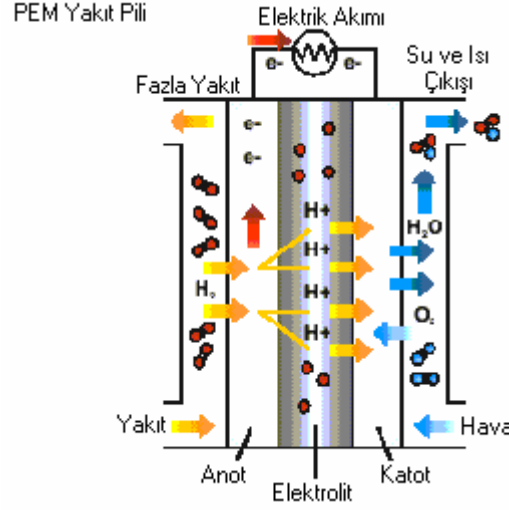
Şekil 2.1 Yakıt pili

### 2.2 Yakıt Pili Çeşitleri

#### 2.2.1 Polimer Elektrolit Membrane Yakıt Pili ( PEMFC )

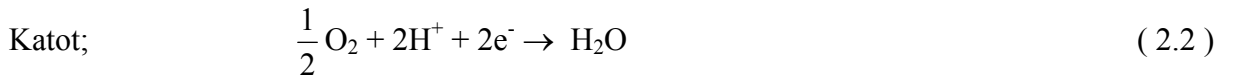
PEM yakıt pilindeki anot ve katot karbondan yapılıdır. Elektrolit genellikle flüorlu sülfonik asit polimer elektrolittir. Bu tip elektrolit elektron yalıtkanı olarak hareket ederken hidrojen iyonların ( H<sup>+</sup> ) iletimine izin verir. Sülfonik asit molekülleri elektrolite kimyasal bağla

protonların elektrolit içinden serbest biçimde hareket etmesi için bağlanır. Yüksek elektrolit su içeriği kabul edilebilir iyon iletkenliği için istenir. PEM yakıt pillerinin çalışma sıcaklığını suyun çalışma sıcaklığının altında olması sınırlar. Çalışma sıcaklığı 60 °C ile 100 °C arasındadır. Düşük çalışma sıcaklığı yüzünden pahalı platinyum katalist, elektron reaksiyon hızlarını yükseltmek için anot ve katotda istenir.



Şekil 2.2 PEM Yakıt Pili ve PAFC ( Vanston ve Elliot, 2003 )

Şekil 2.2 de PEM yakıt pilini gösteriyor. PEM yakıt pili içinde hidrojen oksijenle reaksiyona girer ve su ortaya çıkar.



Anotta hidrojen  $\text{H}^+$  ve elektronlarına ayrılır. Hidrojen iyonları anottan katoda elektrolit içinden geçerken elektronlar anottan dış bir devre yardımıyla katoda geçerek bir elektrik akımı oluşturur. Katotda ise oksijen  $\text{H}^+$  ve elektronlarla reaksiyona girerek su oluşturur. Tüm reaksiyon ekzotermiktir.

Hidrojen ya direk hidrojen sağlanmasıyla yada dışarıdan yakıt işleme ünitesi tarafından yakıt piline sağlanır. Eğer yakıt işleme ünitesi kullanılırsa sistemden karbonmonoksitin (CO) kaldırılması istenir. Platinyum katalist özellikle 120 °C 'den daha düşük sıcaklıklarda CO

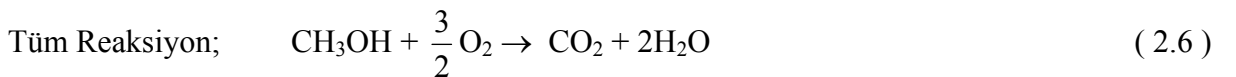
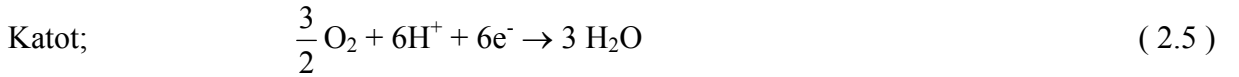
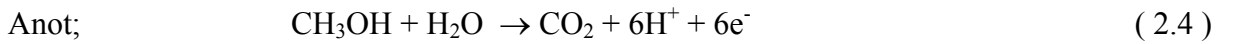
oldukça duyarlıdır. PEM yakıt pili çalışma sıcaklıklarında CO öncelikle platinyum katalist yüzeyde emilir. Böylelikle Hidrojenden  $H^+$  ve elektronların elde edilme miktarını azaltır. PEM yakıt pili içinde kullanılan yakıtta CO içeriği 10 ppm 'den çok olmamalıdır.

Yakıt dönüştürme sistemi önemli ısı girişi gerektirir. PEM yakıt pilinin düşük sıcaklıkta çalışması yüzünden yakıtın endotermik dönüştürücü işlemi için gerekli ısı girişini sağlamak için ayrı bir yerde yakılmalıdır.

Su yönetimi iyonik iletkenliği desteklemek için nemlendirilmiş elektrolit sağlamak problemdir. Artan su miktarı su buharıyla reaksiyona giren gazları seyreltir veya elektrotların suyla taşması elektrotlara olan gaz iletimini engeller. Eksik su miktarı elektrolitin suyunu alarak iyonik iletkenliği azaltır. Reaktantların nemlendirilmesi elektrolit içinde elde edilmesi gereken yeterli suyu sağlamak için yapılır.

PEM yakıt pilleri şu avantajlara sahiptir; yüksek akım yoğunluğunda çalışma, uzun ömür sunması, oldukça çabuk çalıştırma, pil imalindeki basitlik, talep edilen değişiklikler için oldukça hızlı cevap. Yakıt ve oksitleyici anot ve katoda sağlandığı müddetçe PEM yakıt pili güç üretmeye devam eder. İstenen çalışma şartlarına ulaşmak için gerekli zaman PEM yakıt pillerinin düşük çalışma sıcaklıkları yüzünden birkaç saniyeden birkaç dakika arasında değişir. PEM yakıt pilleri uzun periyotlar için yüksek akım yoğunluğunda çalışabilir ve aynı zamanda yüksek akım yoğunluğuna sahiptir. PEM yakıt pilleri düşük ağırlık, maliyet ve hacim potansiyeline sahiptir.

Direk metanol PEM yakıt pilleri için potansiyel alternatif yakıttır. Reaksiyonlar



### 2.2.2 Fosforik Asit Yakıt Pili ( PAFC )

Fosforik asit yakıt pili platinyum katalist parçacıkları tutmak için karbon siyahı içeren karbon kağıdından yapılmış anot ve katotdan oluşur. Elektrolit silikon karbit bağlanmış

politetraflüoretillen'dir. PAFC çalışma sıcaklığı 150 ile 220 °C arasında değişir. Fosforik asit çok iyi iyonik iletkenliğe ve oldukça iyi dayanıklılığa sahiptir. 150 °C 'nin altında fosforik asit zayıf iyonik iletkenliğe sahipken, 220 °C 'nin üstünde fosforik asit dayanıksız olur. Anot ve katotda platinyum katalist PAFC'nin çalışma sıcaklığında kimyasal reaksiyonu artırmak için istenir. PAFC elektrotlar su geçirmez karbon kağıdından oluşan geri dönüşlü tabakaya sahiptir. Şekil 2.2 de PAFC 'ini gösterir. Reaksiyonlar PEM yakıt piliyle aynıdır.

Direk hidrojen veya yakıt işleme ünitesi tarafından üretilen hidrojen PAFC de kullanılabilir. Eğer yakıt işleme ünitesi kullanılırsa CO'in kaldırılması gerekir. Çünkü PAFC 150 °C'in üzerindeki sıcaklıklarda çalışmada platinyum katalist yakıt içinde %1 CO'ya tolerans gösterebilir. Hidrojen sülfid ( H<sub>2</sub>S ) ve karbonil sülfid ( COS ) platinyum yüzeyinde toplanır. Hidrojenin oksitlenmesi için gereken aktif bölgeler kapanmış olur. Anot egzoz gazı yakıt işleme ünitesi için gereken ısı girişini sağlamak için yakılır.

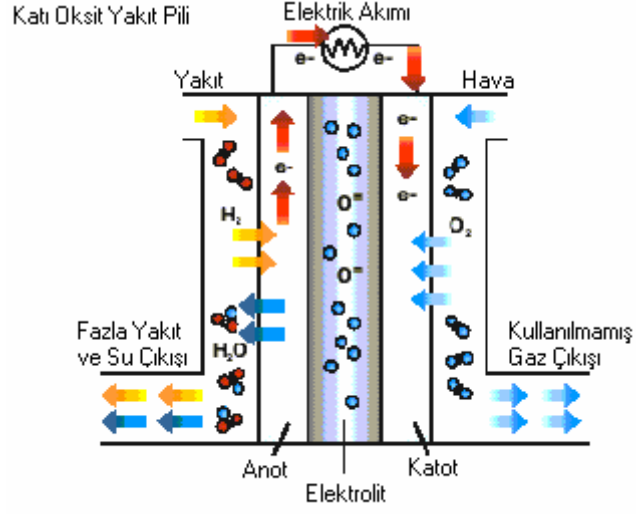
Yüksek çalışma sıcaklığı PAFC çalışmasını etkilerken istenen çalışma sıcaklığını gerçekleştirmek için uzun çalıştırma zamanı istenir. İstenen yakıt pili grup sıcaklığını sürdürebilmek için ısı yönetimi grup içinde soğutma kanallarından akan sıvı veya soğutucu hava tarafından gerçekleştirilir. PAFC için aşınma problemdir. PAFC yakıt pili içinde karbon ve platinyum parçaların aşınmasını önlemek için her bir pil 0,8 voltun altında çalışmak zorundadır.

Su yönetimi PAFC'leri için problem değildir. Çünkü fosforik asit PAFC çalışma sıcaklığında yeterli iyonik iletkenliğe sahiptir. PAFC sistemlerinin diğer güç üretim metotlarıyla ekonomik olarak rekabeti başarması için PAFC sistemlerinin güç yoğunluğunu artırmak ve maliyetleri düşürmek gerekiyor. Katalist ihtiyacının azaltılması ve iki kutuplu levha maliyetlerinin düşürülmesi için önemli olan yüksek voltaja dayanabilecek aşınmaya dirençli maddelerin geliştirilmesi gerekir.

### **2.2.3 Katı Oksit Yakıt Pili ( SOFC )**

SOFC anotu metal nikeldir. Katot lantan manganit karışımıdır. Oksijen negatif iyonları (O<sup>-</sup>) iyonik iletkenliği elektrolit boş kafes yerlerinden geçerek hareket etmesiyle sağlar. SOFC genellikle 1000 °C'de çalışır. Elektrolit sıcaklığı 800 °C'nin üzerinde olması O<sup>-</sup> taşınması

için gerekli aktivasyon enerjisine ulaşmak için ve yeterli iletkenliği sağlamak için gereklidir. Şekil 2.3 de SOFC 'yi gösteriyor.



Şekil 2.3 Katı Oksit Yakıt Pili ( Vanston ve Elliot, 2003 )

SOFC reaksiyonları;



Hidrojen anotta oksijen negatif iyonları tarafından oksitlenir. Böylelikle su ve elektronlar üretilmiş olur. Oksijen katotdan negatif şarjlı olarak katı oksit elektrolit içinden anota gider. Tüm reaksiyon ekzotermiktir. CO aynı zamanda anotta oksitlenebilir. CO anotta oksijenle reaksiyona girerek CO<sub>2</sub> ve elektronlar üretir. Alternatif SOFC reaksiyonları;



Eğer H<sub>2</sub> ve CO yakıt piline aynı zamanda girerse hidrojenin oksitlenmesinden elde edilen su gaz dönüşüm reaksiyonuyla CO ile reaksiyona girer.



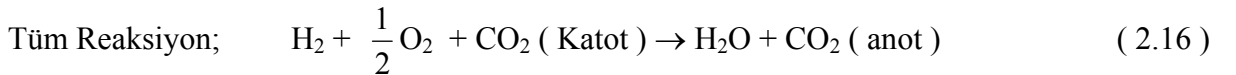
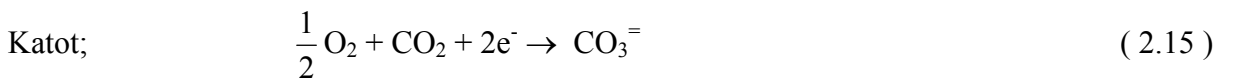
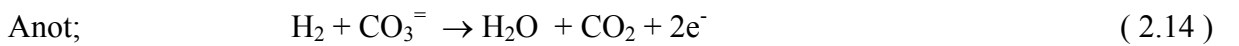
SOFC karışımli yakıtlar kullanabilir. Elektrot reaksiyonlarını artırmak için platinyum katalist gerekli değildir. Yakıt bileşimleri yakıt pili içinde dönüştürülür ve özel bir katalist gerektirmeden hızlı bir şekilde oksitlenir. SOFC yakıt içinde 1 ppm kükürte tolerans gösterebilir.

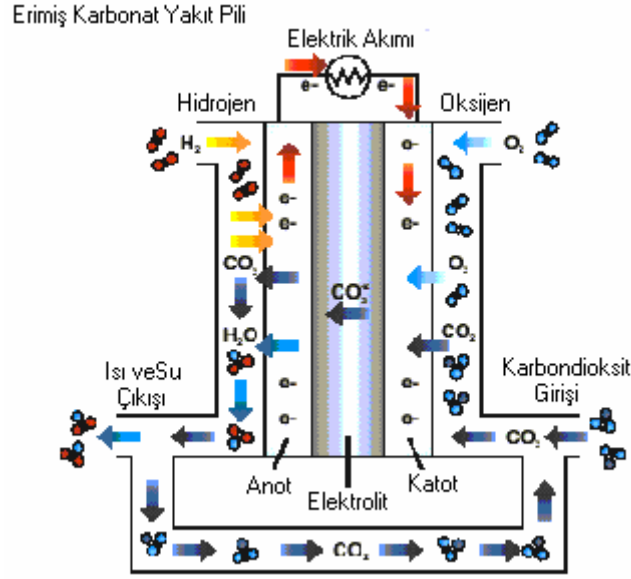
Oldukça yüksek sıcaklıkta çalışma SOFC'lerine avantaj ve dezavantaj sağlar. SOFC'nin yüksek sıcaklıkta çalışması yüzünden kojenerasyon için gerekli ısı girişi sağlanmış olur. SOFC'nin bütün parçalarının katı olması yüzünden SOFC konfigürasyonu esnektir. Dezavantajı ise yüksek çalışma sıcaklığı yüzünden uzun süreli çalıştırma zamanı, diğer sistem parçalarını korumak için ısı yalıtımı istenmesi, yakıt pili içinde kullanılan değişik maddeler boyunca uygunsuz ısı dağılımı, yüksek elektrik direnci ve zor imal edilmesidir.

#### 2.2.4 Erimiş Karbonat Yakıt Pili ( MCFC )

MCFC nikel alaşımlı anot, nikel oksit katot ve LiAlO<sub>2</sub> seramik elektrolit yardımcı matrisinden oluşur. Elektrolit lityum, sodyum ve/veya potasyum alkali karbonatların bileşiminden oluşur. MCFC çalışma sıcaklığı 600 °C ile 700 °C arasında değişir. Bu sıcaklıklarda alkali karbonatlar son derece iletken erimiş tuz şeklindedir. Anot ve katot içindeki nikel MCFC'nin yüksek çalışma sıcaklığı yüzünden kimyasal reaksiyonları yeterli düzeye artırır. Karbonat iyonları iyonik iletkenliği sağlar. Şekil 2.4 de MCFC 'yi gösteriyor.

MCFC'lerinin reaksiyonları;





Şekil 2.4 Erimiş Karbonat Yakıt Pili ( Vanston ve Elliot, 2003 )

Anottaki hidrojenin karbonat iyonları tarafından oksitlenmesiyle su,  $\text{CO}_2$  ve elektronlar üretilir. Elektronlar anottan katota bir dış devre yardımıyla gider. Katotta oksijen ve  $\text{CO}_2$  elektronlarla reaksiyona girerek karbonat iyonları üretir. Anot egzosu  $\text{CO}_2$  ve su şeklindedir.  $\text{CO}_2$  katoda  $\text{O}_2$  indirgenmesi esnasında kullanılmak üzere yol alır. Tüm reaksiyon ekzotermiktir.

MCFC geniş yakıt bileşiminde çalışabilir. Çünkü oldukça yüksek sıcaklıkta çalışması (  $650^\circ\text{C}$  ) ve katalist olarak platinyum kullanmadığı için, yakıt işleme ünitesi tarafından üretilen CO yakıt pilinde kullanılabilir. Anotta hidrojenin oksitlenmesi CO oksitlenmesinden çok hızlı meydana gelir. Üretilen su anotta su-gaz değişim reaksiyonu ile CO ile reaksiyona girer.

Bu reaksiyonla yakıt pili için ek hidrojen üretilmiş olur. Anot egzoz gazının yanması yakıt işleme ünitesi için gerekli ısı girişini sağlar. Yüksek sıcaklıkta çalışma aynı zamanda yakıtın içten buhar dönüştürme işlemine yardım eder. MCFC’de içten dönüştürülebilir yakıtlar metan, metanol, propan, nafta’ dır. Yakıt pili reaksiyonu içten dönüştürme işlemi için ihtiyaç duyulan ısı girişini sağlamasıyla MCFC çalışma sıcaklığı dengelemek için gereken soğutma ihtiyacını azaltır.

MCFC’nin dezavantajları erimiş karbonat elektrolitin yüksek aşındırma özelliği, katot yarı reaksiyonu için  $\text{CO}_2$  ihtiyacı, düşük kükürt toleransı, elektrolit sızıntısı, yüksek sıcaklıklarda çalışmaya dayanıklı madde isteğidir. MCFC’nin avantajları yakıtı içten dönüştürme

kabiliyeti, daha az maliyetli nikel katalist, CO'in yakıt olarak kullanılması ve kojenerasyon potansiyeline sahip olmasıdır.

### **2.2.5 Alkali Yakıt Pilleri ( AFC )**

Alkali yakıt pilleri 100-250 °C sıcaklıkta çalışır. Elektrolit olarak potasyum hidroksit ( KOH ) kullanılır. İyonik iletkenlik hidroksit ( OH ) iyonlarının elektrolit içinden geçirilmesiyle sağlanır. Uzay uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanıldı. Kirleticilere karşı duyarlı olduğu için sadece saf hidrojen kullanılır. Çünkü elektrolit CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek potasyum karbonat oluşturur. Böylelikle elektrolit azalmış olur.

## **2.3 Yakıt Pili Özellikleri**

### **2.3.1 Yakıt pili Dizaynı**

Yakıt pili güç sistemi birden çok yakıt pilinin birleşiminden oluşan yakıt pili grubundan oluşur. Yakıt pili sistem dizaynı ekonomiklik ve verimlilikle birlikte yakıt pili bölümlerinin optimizasyonunu gerektirir. İstenen uygulamaların sınırlamaları içinde elektrik maliyetinin minimizasyonunu gerektirir. Çoğu uygulamalar için temel prosesler düşük sermaye maliyetleriyle verimli fabrikalarda bütünleştirilmelidir. Bu amaçlar uyumsuzluk içindedir. Bu yüzden tavizler ve dizayn kararları verilmek zorundadır. Buna ek olarak istenen yakıt, emisyon düzeyleri kullanılmayan ısının potansiyel kullanımları ( elektrik, buhar veya ısı ) , istenen güç düzeyleri, hacim veya ağırlık kriterleri gibi özel proje amaçları yakıt pili güç sistemini etkiler.

### **2.3.2 Temel Sınırlamalar**

Yakıt pilinin ideal performansı yakıt pili içinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlara bağlıdır. Düşük sıcaklık yakıt pilleri ( AFC, PAFC, ve PEMFC ) hepsi değerli metal (platinyum ) elektrot katalitisti anot ve katotta pratik reaksiyon hızlarını gerçekleştirmek için istiyor ve yakıt olarak hidrojen istiyor. Yüksek sıcaklık yakıt pilleri (MCFC ve SOFC ) elektrokimyasal reaksiyonları başarmak için nikel esaslı maddeler istiyor. Bununla beraber yüksek sıcaklık yakıt pilleri diğer yakıtlar kadar iyi ( CO ve CH<sub>4</sub>) hidrojenle elektrokimyasal



biçimde reaksiyona girebilir. Karbonmonoksit ( CO ) düşük sıcaklık yakıt pillerinin değerli metal katalistlerini zehirler. Ama yüksek sıcaklık yakıt pillerinde yakıt ( H<sub>2</sub> ) kaynağı olarak kullanılabilir.

Yakıt pillerinin ideal performansı teorik olarak üretilen voltaj seviyesi tarafından belirlenir. Bu potansiyel voltaj Nernst potansiyeli olarak adlandırılır ve Nernst eşitliği tarafından tanımlanır. Genel reaksiyonlar için



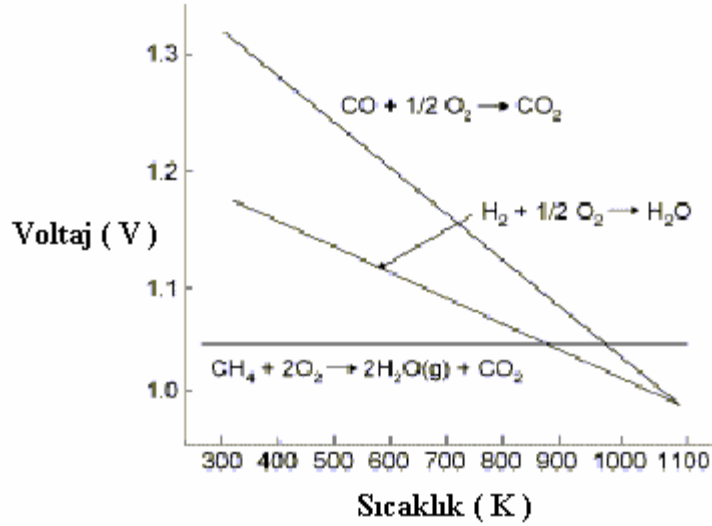
Nernst eşitliği şu şekilde açıkça belirtilebilir:

$$E = E_0 + \left[ \frac{RT}{2T} \right] \ln \left[ \frac{P_A^a \cdot P_B^b}{P_C^c \cdot P_D^d} \right] \quad (2.18)$$

Burada; E<sub>0</sub> pil reaksiyonu için tersinir standart potansiyel, E ideal denge potansiyeli, T sıcaklık, T Faraday sabiti ve P basınçtır. Bununla beraber yakıt pili tiplerinin her biri için, pil içinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonların her biri için Nernst eşitliği tarafından belirlenerek gerçekleştirilebilen teorik voltaj seviyesi vardır. Nernst eşitliğine göre verilen sıcaklıklar için yüksek basınçlarda çalışmayla ideal pil voltajı artırılabilceğine dikkat edin.

Hidrojen ve oksijenin reaksiyonu su üretir. Fakat anotta karbon içerikli yakıtlar kullanıldığı zaman CO<sub>2</sub>'de üretilir. MCFC için CO<sub>2</sub> elektrolit içindeki sabit karbonat konsantrasyonunu sürdürmek için katotda istenir. Çünkü CO<sub>2</sub> anotta üretilir ve MCFC içinde katotda tüketilir..

Hidrojen oksijen yakıt pilinin ideal standart potansiyeli 1,229 V'dir. Şekil 2.5 de sıcaklığa karşı pil reaksiyonlarının her biri için ideal potansiyeli gösteriyor. Başlıca yakıt pili reaksiyonlarının bazısı için ideal potansiyel sıcaklığın azalmasıyla arttığına dikkat edin. Bu ısı esaslı motor teknolojilerinin hepsinden çok farklıdır. Onlarda sıcaklığın azalmasıyla performansın azaldığı görülür.



Şekil 2.5 Sıcaklık karşısında elektrokimyasal reaksiyonların voltaj değerleri ( Jacob Brouwer, 2001 ).

### 2.3.3 Pratik Sınırlamalar

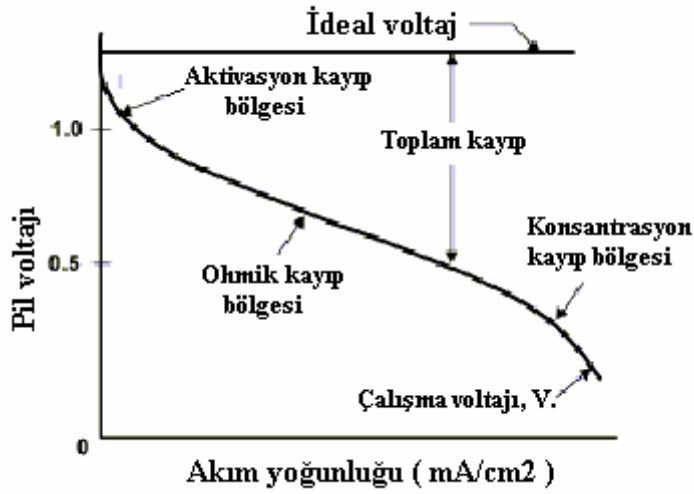
Yakıt pillerinin performansında kayıp olmaksızın gerçekleşmeyen birkaç fiziksel proses (taşıma ve kimyasal reaksiyon ) sebebiyle pratik sınırlamalar vardır. Fiziksel prosesler bu kayıplarla bağlantılıdır; (1) gaz elektrolit arayüzeyinde reaktantların taşınması, (2) elektrolit içindeki reaktantların çözülmesi , (3) elektrolit içinden elektrot yüzeyine reaktantların taşınması, (4) Ön elektrokimyasal homojen ve heterojen reaksiyonlar, (5) elektrot üzerindeki elektro-aktif parçaların aşınması, (6) aşınmış parçaların yüzeye geçmesi, (7) elektrot yüzeyden uzakta ürünlerin taşınması, (8) elektrolitten ürünlerin gelişimi, (9) elektrolit/gazdan gaz ürünlerin taşınması.

Bu kimyasal ve fiziksel proseslerle bağlantılı kayıplar genellikle başlıca üç yakıt pili kayıplarında açığa çıkar. Bu kayıplar şunlardır.

1. Aktivasyon aşırı voltaj kayıpları
2. Ohmik aşırı voltaj kayıpları
3. Konsantrasyon aşırı voltaj kayıpları

Bu kayıplar tersinmez ve ideal voltajdan daha az olan pil voltajı içinde sonuçlanır. Aktivasyon kayıpları genellikle yavaş kimyasal reaksiyonlarla bağlantılı kayıpların bir sonucudur. Ohmik kayıplar elektrik akışına karşı koyan yakıt piline rağmen elektriğin akışı yüzünden olan bir

kayıptır. Konsantrasyon kayıpları hacim akışı içinden elektrokimyasal yüzeye reaktantların düşük konsantrasyonunu sürdüren taşıma olayı sebep olur.



Şekil 2.6 İdeal ve gerçek akım ve voltaj karakteristiği ( Jacob Brouwer, 2001 ).

Şekilde 2.6 da yakıt pili akım karakteristiklerine karşı ideal ve gerçek voltajın karşılaştırılmasını gösteriyor. Aktivasyon kayıplarının akımın akmasından ve reaktant parçaların tükenmesinden önce elektronik engellerin üstesinden gelinmek zorunda olduğu düşük akım yoğunluklarında baskın olduğuna dikkat edin. Ohmik kayıplar doğrudan akımla değişir ve akım yoğunlukları bütün düzeylerin üstünde artar. Gaz taşıma kayıpları akım yoğunluğu düzeylerinin başından sonuna kadar gerçekleşir. Fakat akım yoğunluğu büyük olduğu zaman konsantrasyon kayıpları sürdürmede çok önemlidir ve reaktantlar hızlı bir şekilde elektrot yüzeylerde tükenir.

### 2.3.3.1 Aktivasyon Kayıpları

Aktivasyon kayıpları elektrot yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyonun hızı yavaş elektrot kinetikleri tarafından kontrol edildiği zaman meydana gelir. Elektrokimyasal reaksiyonların hızları kimyasal reaksiyonlara benzer ve kimyasal reaksiyon olmadan önce aktivasyon engelini üstesinden gelinmesini gerektirir. Elektrokimyasal reaksiyonların örneğinde bu aktivasyon enerjisi 50 ila 100 mV seviyesinde Tafel eşitliği tarafından şöyle tanımlanır.

$$\eta_{akt} = \frac{R.T}{\alpha.n.T} \ln\left(\frac{i}{i_o}\right) \quad (2.19)$$

burada;  $\alpha$  elektron transfer katsayısı,  $n$  reaksiyona katılan elektronların sayısı,  $R$  universal gaz sabiti,  $T$  sıcaklık,  $F$  Faraday sabiti,  $i$  akım,  $i_0$  değişen akım yoğunluğu.

### 2.3.3.2 Ohmik Kayıplar

Ohmik kayıplar elektrolit içindeki iyonların akış direnci ve elektrotların içinde elektronların akış direnci sebep olur. Baskın kayıplar elektrolit içinden iyonların akışıyla bağlantılıdır. Bu kayıplar elektrotlar arasındaki mesafenin azaltılmasıyla ve/veya elektrolit maddenin iyonik iletkenliğinin artırılmasıyla azaltılabilir. Elektrolit ve elektrot dirençleri yüzünden olan kayıplar bir bütün olarak ele alınmaktadır. Ohm kanunu bu kayıpları şöyle tanımlar;

$$\eta_{ohm} = i \cdot R_{pil} \quad (2.20)$$

burada;  $i$  akım ve  $R_{pil}$  iyonik, elektrot ve birbirine bağlı dirençler. Bütün pil direnci deneysel bir şekilde elde edilebilir.

### 2.3.3.3 Konsantrasyon Kayıpları

Konsantrasyon kayıpları elektrot yüzeyinde reaktant konsantrasyon gradyeninin düzensizliği sebep olur. Bu konsantrasyon gradyeni, hacim akışı onların orijinal konsantrasyonuna reaktantları yeniden getirecek kadar yeterli zamana sahip olmadığı zaman elektrot yüzeyinde reaktantların çabuk tükenmesi yüzünden şekillenir. Bu potansiyel kayıp (1) elektrot gözenekleri içinde gaz evresindeki difüzyon, (2) elektrot içindeki reaktantların çözeltisi, (3) elektrolit dışındaki ürünlerin çözünmesi, (4) elektrolit ve elektrokimyasal reaksiyon yerleri arasındaki ürünlerin ve reaktantların difüzyonunu içeren mekanizmaların miktarı sebep olabilir. Konsantrasyon aşırı potansiyelinin bütün etkisi şu formülle belirlenir.

$$\eta_{kons} = \frac{RT}{n \cdot T} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (2.21)$$

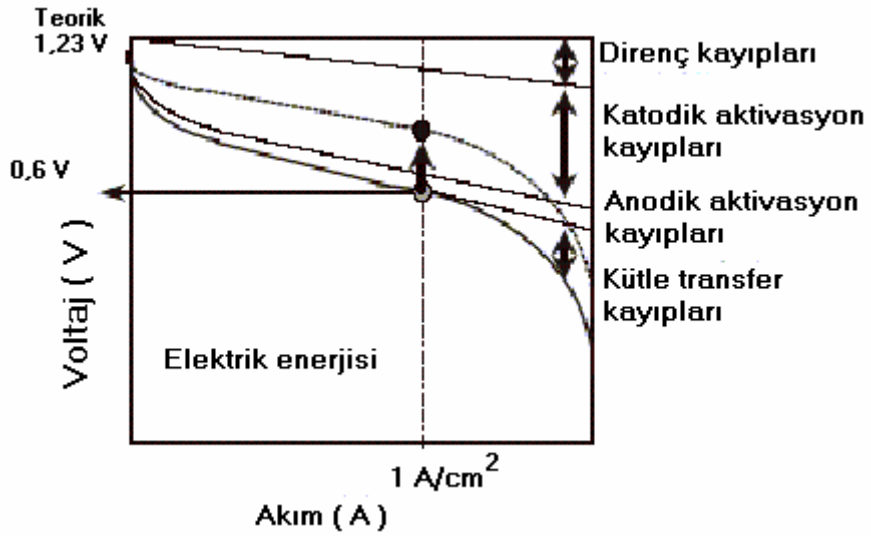
burada  $i_L$  akım limiti; elektrota sağlanabilen reaktantların maksimum hızının ölçümüdür.

### 3 YAKIT PİLİ SİSTEMİ

#### 3.1 Yakıt Pili Grubu

Bir yakıt pili yalnızca 1 volt civarında voltaj üretme kapasitesindedir. Bu yüzden yakıt pili bir grup şeklinde ayrı piller bir araya getirilerek dizayn yapılır. Yakıt pili grubu daha fazla voltajı karşılamak için seri ve paralel bağlantılı yakıt pili gruplarıyla çalıştırılabilir. Bir grup içindeki ayrı pillerin sayısı 50'den daha fazla olup grubun dizaynı ile değişebilir.

Şekil 3.1 de PEM yakıt pilinin I-V eğrileri ve kayıplar gösteriliyor. Katot katalistin aktivasyon kayıplarının azaltılması, verimin düzeltilmesi için en önemli meseledir. Bu problem Pt 'a %30 Fe katalist kullanımıyla katalist etkinliği normal Pt kataliste göre 20 kat artar ( Arita, 2002). Gaz difüzyon tabakası, kütle transfer kayıplarını azaltmak için daha iyi olmalı. Elektrolit direncini azaltmak, ohmik kayıpları azaltmak ve her bir parça arasında daha düşük temas direnci için gereklidir.



Şekil 3.1 PEM yakıt pilinin I-V eğrileri ve kayıplar ( Arita, 2002 )

Yüksek güç yoğunluğu taşıta yakıt pili grup sisteminin yüklenmesinde en önemli istektir. Daha büyük Yüksek güç yoğunluğu başarmak amacıyla yakıt pili sisteminin güç yoğunluğunu artırmak gerekir. Yüksek güç yoğunluğuna ulaşmak amacıyla levhalardaki akış alanı yakıt pilinin performansını düzeltmek için daha iyi olmalıdır.

PEM yakıt pilinde elektrolitin iyonik iletkenliği onun içindeki su miktarıyla orantılıdır. Protonlar pilin çalışması sırasında anottan katoda su moleküllerini çeker. Su kararlı çalışmanın sürdürülmesi için zorunlu olmasına rağmen, su 0 °C'nin altında donar. Yakıt pili taşıtları suyun donma noktası altındaki sıcaklıklarda başlatılmak ve çalıştırılmak zorundadır. Elektrolit membran içindeki su -20 °C de sıcaklıkta donmaz. Bu yüzden düşük sıcaklık şartları altında grup elektrik üretebilir. Diğer yandan gaz difüzyon tabakası veya katalist tabaka içindeki suyun donması yüzünden, grubun çalışması için üretilen ısı enerjisi bu parçaların içindeki suyun donmasını önlemek için kullanılır. Grubun çıkış gücü bu sıcaklık şartlarında sınırlıdır. Donma problemi yakıt pili taşıtlarının satışa sunulmadan önce çözülmesi gereken önemli meselelerden biridir. Bu problemi çözmek için yakıt pili sistemi içinde dış nemlendiricilerin yok edilmesi gerekir ( Arita, 2002).

Diğer önemli bir problem tüm sürüş şartlarında yakıt pili sisteminin sıcaklık dengesini devam ettirmektir. PEM yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 80-85 °C civarındadır. Bu sıcaklık içten yanmalı motorlara göre oldukça düşüktür. Soğutucudan gelen ısı havaya, soğutucu ve hava arasındaki sıcaklık farkının kullanılmasıyla serbest bırakılır. İçten yanmalı motorlarda en yüksek soğutucu sıcaklığı yaklaşık 110 °C 'dir. Bu yüzden çevre sıcaklığı 30 °C de iken, 80 °C sıcaklık farkı vardır. PEM yakıt pilinde ise sıcaklık farkı yaklaşık 50 °C 'dir. Bununla beraber PEM yakıt pili grubunun radyatörü içten yanmalı motorlardan daha büyüktür.

### **3.2 Yakıt Sağlama Sistemi**

Yakıt pilinde yakıt olarak saf hidrojen kullanılır. Hidrojen oksijenle reaksiyona girerek su ve elektrik oluşturur. Hidrojen düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu için bir otomobil için gidebileceği bir mesafe için ( 500 km ) 5 kg hidrojen gerekir. Bu hidrojenin depolanması ve günümüz istasyonlarında doldurulması bir problemdir. Hidrojen bir dağıtım alt yapısına sahip olmadığından bu alt yapının kurulması için milyarlarca dolar yatırım yapılması gerekir. Bu yakın zamanda mümkün görülüyor. Bu yüzden yakıt pili teknolojisi gelecek on yıllık zaman diliminde hidrojeni benzin, metanol, doğalgaz, etanol, dizel gibi hidrokarbon yakıtlardan elde edilmesi için çalışmalar sürdürülüyor. Bu yakıtlar buhar dönüştürme, kısmi oksidasyon dönüştürme ve ototermal dönüştürme olmak üzere 3 yolla sağlanır. Hidrojen üretiminde yakın dönemde doğalgazdan merkezi santrallerde doğalgaz boru hattının hemen hemen dünyanın her yerine dağılması ve bu hattın santrale gelme maliyetinin çok az olması yüzünden doğalgazdan hidrojen üretimi düşünülüyor. Doğalgaz uygulamaları dışında

otomobillerde metanol ve benzinden hidrojen üretilmeye başlanmıştır. Metanolün buhar dönüştürme işlemi ile % 67–75 arası hidrojen elde edilebilir. Bunun yanında bu yakıtlar karbon içerdiği için bu dönüşüm esnasında CO ve CO<sub>2</sub> de görülür. CO yoğunluğu 10 ppm in üzerinde olduğu zaman PEM yakıt pillerinde katalist zehirlenmesine yol açar. Bu yüzden dönüştürme işleminden sonra sentez gazının CO yoğunluğunun azaltılması gerekir. Benzinin hidrojene dönüştürülürken kısmi oksidasyon veya ototermal dönüştürme işlemi kullanılır. Diğer hidrokarbon yakıtlarda genelde ototermal dönüştürme kullanılır.

Yakıt pili otomobillerinde hidrojen üç şekilde depolanır. Sıkıştırılmış hidrojen depolama, sıvılaştırılmış hidrojen depolama ve metal hidrid depolamadır.

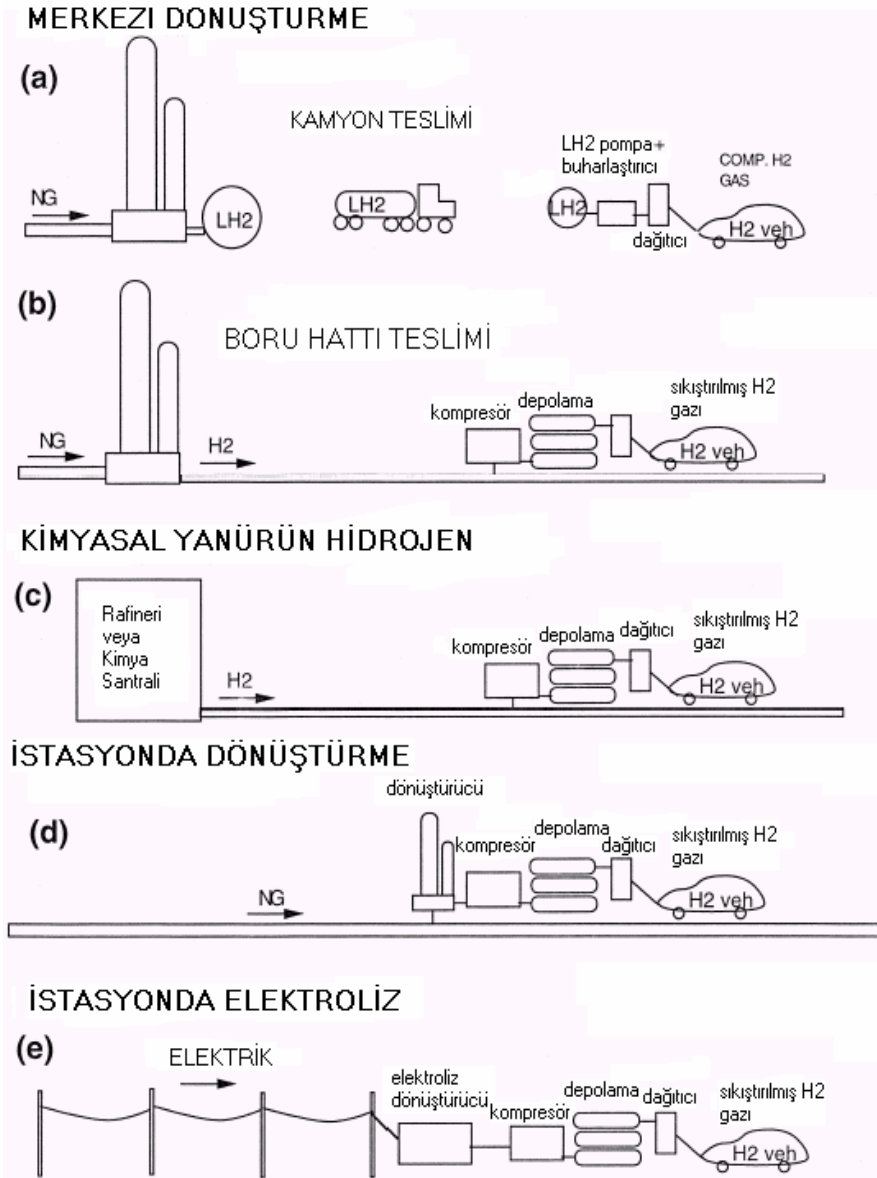
### **3.2.1 Direk Hidrojen Kullanımı**

#### **3.2.1.1 Hidrojenin Doldurma İstasyonlarına Sağlanması veya Bu İstasyonlarda Üretilmesi**

Yakın dönem için doğalgaz, metanol ve benzin hidrojen kaynağı olarak kullanılır. Metanol ve benzin günümüz doldurma istasyonlarında araçlara dağıtılıp taşıt içinde hidrojene dönüştürülür. Hidrojenin direk olarak taşıtta kullanılması için yeni dağıtım istasyonları şekil 3.2 de gösteriliyor.

a) Büyük ölçekli merkezi hidrojen üretimi, burada doğalgazın dönüştürülmesi ile üretilen hidrojeni sıvı olarak kamyonlarla doldurma istasyonuna dağıtılır. b) Büyük ölçekli merkezi santralde üretilen hidrojen boru hattıyla doldurma istasyonuna dağıtılır. c) Rafineri veya kimyasal endüstri kaynaklarından yan ürün olarak çıkan hidrojen boru hattıyla doldurma istasyonlarına dağıtımı. d) Hidrojen doldurma istasyonlarında boru hattıyla gelen doğalgazın küçük ölçekte buhar dönüştürme işlemiyle üretilmesi. e) Hidrojenin doldurma istasyonlarında elektrik enerjisiyle suyun elektrolizi yoluyla üretilip taşıtlara dağıtımı.

Uzun dönemde ise biokütle, kömürün, belediyelerde katı atıkların gazlaştırılmasıyla, rüzgar, güneş ve nükleer enerji ile suyun elektrolizi işlemiyle hidrojen üretimine geçilebilir.



Şekil 3.2 Hidrojen dağıtım ve üretimi için yakın dönem seçenekleri ( Ogden vd., 1999 ).

### 3.2.1.2 Hidrojenu Taşıtta Depolama Yöntemleri

Hidrojen üç yolla depolanır. Sıkıştırılmış hidrojen, sıvılaştırılmış hidrojen ve metal hidrid depolama. Bu işlemler içinde şu an tavsiye edilen sıkıştırılmış hidrojendir. Yalnız metal hidrid depolama gelişmenin sağlanması ile en üstün depolama yöntemi olma potansiyeline sahiptir.



### 3.2.1.2.1 Sıkıştırılmış Hidrojen Depolama

Saf hidrojeni depolamanın en az karmaşık olan metodu, yüksek basınç silindiri içinde sıkıştırılmış gaz olarak depolamaktır. Gaz çevre sıcaklığında depolandığından maliyetten ve hacmin ısı yalıtımından sakınılmış olur. Gazın boşaltılması için yalnızca valfin açılması yeterlidir. Yüksek basınçlı hidrojen gazını depolama basit, kabul edilebilir derecede hafif, ticari olarak rahatlıkla elde edilebilir ve emniyetlidir. Yakıt doldurma işlemi çok hızlıdır. Depolama maliyeti düşük olup gazın taşınması kolaydır. Bu tekniğin tek dezavantajı küçük hacim yoğunluğuna sahip olmasıdır. 6,8 kg hidrojeni 34,5 MPa da depolamak için gereken hacim 360 l ve ağırlığı 73,2 kg dır. Bu basınçlı kap çelik veya alüminyum gibi metalden yapılır. Tüm metal kap karbon fiber ile örtülüdür. Bunun dışında 5 kg hidrojeni 20 MPa da depolamak için 390 l hacim istenir. Bu çelik tank 20 MPa da 0,01 H<sub>2</sub> kg/kg gravimetrik hidrojen yoğunluğunu sahip olup, bu tankın yakıt pili taşıtında kullanılması için çok ağırdır. Yine dışta dışı karbon fiber tabaka ile takviye edilmiş alüminyum veya plastik astardan yapılan alaşımlı yüksek basınç kabı 35 MPa da 5 kg hidrojeni depolamak için 250 l veya daha fazla hacim gerekir. Alaşım tipi basınç kaplarının gravimetrik hidrojen yoğunluğu 0,113 H<sub>2</sub>kg/kg ( 11,3 wt% ) 'dır ( Takeichi vd., 2003 ). Hidrojeni 34,5 MPa da sıkıştırmak için % 15 enerji kaybı söz konusudur.

Toyota' nın 2001 yılında geliştirdiği FVHV-4'de sıkıştırılmış hidrojen kullanıldı. 25 MPa da 4 basınç silindirinde 12 kg hidrojen depolanır ve 350 km yol alır. Daihatsu 2001 yılında geliştirdiği Move FCV K II mini hibrid yakıt pili aracı 25 MPa da sıkıştırılmış hidrojen kullanır. Yine Toyota/Hiro Motors'un 2001 yılında geliştirdiği FCHV-BUS 1 otobüsü 25 MPa da sıkıştırılmış hidrojenle 300 km den fazla yol alır. DaimlerChrysler' in 1994'de geliştirdiği NeCar 1'de 30 MPa da sıkıştırılmış hidrojen depolamak için 150 L cam elyafı takviyeli alüminyum kaplamalı basınçlı silindir kullanırken 130 km yol alır. DaimlerChrysler' in 1996'da geliştirdiği NeCar 2'de sıkıştırılmış hidrojen kullanırken 250 km yol alıyor. DaimlerChrysler' in 2000'de geliştirdiği Advanced NeCar 4'de 35 MPa da 2,5 kg sıkıştırılmış hidrojenle 200 km yol alır. Ford 1999 yılında geliştirdiği P2000 FC EV taşıtında karbon-fiberle sarılmış 41 L iki tank kullanır. Tank 24,8 MPa da 1,4 kg sıkıştırılmış hidrojenle 160 km yol alır. Ford'un 2001 yılında geliştirdiği Ford Focus FCV aracı 24,8 MPa da 1,4 kg hidrojenle 160 km yol alır. Ballard firmasının 1993'de geliştirdiği Fuel cell Bus P1 otobüsü cam elyafı takviyeli alüminyum kaplamalı otobüsün çatısına yerleştirilmiş 7 adet

Çizelge 3.1 Toyota FCHV-4 teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	FCHV-4 ( Haziran 2001 )
Taşıt aslı	Toyota SUV Kluger V/Highlander
Boyutlar	4735 mm(l) x 1815 mm(w) x 1685 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	>150 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Toyota PEMFC / 90 kW
Motor tipi / anma gücü / tork	Senkronize manyetoelektrik motor / 80 kW / 260 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub> , 25 MPa 4 basınç silindirler, 12 kg H <sub>2</sub>
Yardımcı batarya	NiMH/ Panasonic EV Energy
Sürüş mesafesi	250 km

Çizelge 3.2 Daihatsu Move FCV K II teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Move FCV K II ( 2001 )
Taşıt aslı	Special Daihatsu
Boyutlar	3395 mm(l) x 1475 mm(w) x 1670 mm (h)
Oturma kapasitesi	4
Maksimum hız	105 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Toyota PEMFC / 30 kW
anma gücü	32 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub> , 25 MPa 1 basınç silindiri
Yardımcı batarya	NiMH/ Panasonic EV Energy

sıkıştırılmış hidrojen tankı kullanır. Tankların toplam hacmi 1050 L 300 barda 21 kg hidrojenle 250 km yol alır. Ballard'ın 1998 de geliştirdiği yakıt pili otobüsü Fuel cell Bus P3'de sıkıştırılmış hidrojen kullanılıyor. Nissan 2001 yılında geliştirdiği Nissan Xterra FCV taşıtı sıkıştırılmış hidrojen kullanıyor. Honda 2000 yılında geliştirdiği Honda FCX-V3 taşıtı 25 MPa da 25 L hacimli 2 kg sıkıştırılmış hidrojenle 176 km yol alıyor. Honda 2001 yılında geliştirdiği Honda FCX-V4 taşıtı 35 MPa da sıkıştırılmış hidrojen kullanıyor. 130 L 'lik tank arka tekerlik altına yerleştirilmiş olup 330 km yol alır. Hyundai 2001 yılında geliştirdiği

Hyundai Santa Fe 35 MPa da sıkıştırılmış hidrojen kullanırken 160 km yol alır (Gregor, 2002).

DaimlerChrysler'in Sprinter ( 2001 ) taşıtı 85 kW PEM yakıt pili kullanır. 34,5 MPa da sıkıştırılmış hidrojen tankıyla 150 km yol alır. Maksimum hızı 120 km/h'dir. DaimlerChrysler 'in F-Cell ( 2002 ) taşıtı 85 kW PEM yakıt pili kullanır. 34,5 MPa'da 1,8 kg H<sub>2</sub> depolayıp 145 km yol alır. Maksimum hızı 140 km/h'dir. Esoro 'nın Hycar ( 2001 ) taşıtı ve Fiat'ın Sciento Elettra H<sub>2</sub> Fuel Cell ( 2001-2003 ) taşıtı sıkıştırılmış hidrojen kullanır. GM'nin Advanced HydroGen3 ( 2002 ) taşıtı 94 kW PEM yakıt pili kullanır. 70 MPa da 3,1 kg sıkıştırılmış hidrojenle 270 km yol alır. Mitsubishi'nin Grandis FCV ( 2003 ) taşıtı 68 kW PEM yakıt pili kullanır. Sıkıştırılmış hidrojen tankı taşıtın 150 km yol almasını sağlar. Nissan'ın X-TRAIL taşıtı ( 2002 ) taşıtı 75 kW PEM yakıt pili kullanır. Hidrojen tank içinde 34,5 MPa da depolanır. PSA-Peugeot-Citroen 'in Peugeot Hydro-Gen ( 2001 ) taşıtı 55 kW PEM yakıt pili kullanır. hidrojen tank içinde 30 MPa da depolanırken 400 km yol alır. Peugeot'nun Fuel Cell Cab "Taxi PAC " ( 2001 ) taşıtı 55 kW PEM yakıt pili kullanır. Taşıt 30 MPa da depolanmış hidrojenle 300 km yol alır. Toyota'nın FCHV ( 2002 ) taşıtı 90 kW PEM yakıt pili kullanır. Hidrojen 34,5 MPa da depolanırken 290 km yol alır. VW'nin HyPower ( 2002 ) taşıtı 40 kW PEM yakıt pili kullanırken sıkıştırılmış hidrojenle 150 km yol alır. Hyundai Tucson FCEV (2004 ) taşıtı 34,5 MPa da 3,5 kg hidrojenle 300 km yol alır.

Çizelge 3.3 Toyota/Hino Motor FCHV-BUS 1 teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	FCHV - BUS ( Haziran 2001 )
Taşıt aslı	Hino motors şehir otobüsü HU2PMEE
Boyutlar	10515 mm(l) x 2490 mm(w) x 3360 mm (h)
Oturma kapasitesi	63
Maksimum hız	>80 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Toyota PEMFC / 90 kW
Motor tipi / anma gücü / tork	2 x Senkronize manyetoelektrik motor / 80 kW / 260 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub> , 25 MPa basınç silindiri
Yardımcı batarya	NiMH/ Panasonic EV Energy
Sürüş mesafesi	>300 km

Çizelge 3.4 NeCar 1'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NeCar 1 ( 1994 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz 180 van
Ağırlık	3500 kg
Oturma kapasitesi	2
Maksimum hız	90 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	12 Ballard Mark 5 yakıt pili grup/ 50 kW
Motor tipi / anma gücü / tork	-
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub> , 150 l, 30 MPa
Yardımcı batarya	yok
Sürüş mesafesi	130 km

Çizelge 3.5 NeCar 2'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NeCar 2 ( 1996 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz V- class MPV
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	110 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	2 Ballard Mark 700 yakıt pili grubu / 50 kW
Motor tipi / anma gücü / tork	-
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub>
Yardımcı batarya	Yok
Sürüş mesafesi	250 km

Çizelge 3.6 NeCar 4- Advanced'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NeCar 4- Advanced ( 2000 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz A class
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	145 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 900 / 75 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	35 MPa 2,5 kg sıkıştırılmış hidrojen
Yardımcı batarya	yok
Sürüş mesafesi	200 km

Çizelge 3.7 Ford P2000'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	P2000 FC EV ( 1999 )
Taşıt aslı	Ford P2000
Boyutlar/Ağırlık	4,747 m (l) x 1,755 m (w) / 1514 kg
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	>128 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	3 x Ballard Mark 700 ( 381 pil )
Motor tipi/anma gücü/tork	67 kW AC indüksiyon motor ( Ecostar ), 190 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	24,8 MPa 1,4 kg sıkıştırılmış hidrojen
Yardımcı batarya	Yok
Sürüş mesafesi	160 km

Çizelge 3.8 Ford Focus FCV hidrojen güçlü taşıtının teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Ford Focus FCV ( 2001 )
Taşıt aslı	Ford Focus
Boyutlar/Ağırlık	4338 mm (l) x 1758 mm (w) / 1727 kg
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	>128 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 901 / 75 kW
Motor tipi/anma gücü/tork	67 kW AC indüksiyon motor ( Ecostar ), 190 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	24,8 MPa 1,4 kg sıkıştırılmış hidrojen
Sürüş mesafesi	160 km

Çizelge 3.9 Ballard 1993 32-Foot Bus'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	1993 Fuel cell Bus ( P1 )
Taşıt aslı	-
Uzunluk	9,75 m
Oturma kapasitesi	20
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard PEMFC , 90 kW
Motor tipi/anma gücü/tork	-
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen
Sürüş mesafesi	160 km

Çizelge 3.10 Ballard 1995 40-Foot P2'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	1995 Fuel cell Bus ( P2 )
Taşıt aslı	Ford P2000
Uzunluk	12,19 m
Oturma kapasitesi	60
Maksimum hız	-
Yakıt pili tipi / anma gücü	20 x 13 kW Ballard Mark 513 / 205 kW
Motor tipi /anma gücü/tork	DC / 160 kW/ 330 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	24,8 MPa sıkıştırılmış hidrojen
Yardımcı batarya	Yok
Sürüş mesafesi	400 km

Çizelge 3.11 Ballard P3 Yakıt pili otobüsünün teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Fuel Cell Bus ( 1998 )
Oturma kapasitesi	60
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 513 PEMFC / 205 kW
Motor tipi /anma gücü/tork	-
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen
Yardımcı batarya	Yok

Çizelge 3.12 DaimlerChrysler NEBUS yakıt pili otobüsünün teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NEBUS ( Mayıs 1999 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz düşük tabanlı dizel şehir otobüsü o 405 N2
Boyutlar/Ağırlık	11,8 m (l) x 2,5 m (w) x 3,5 m (h) / 18000 kg
Yolcu kapasitesi	62 ( 39 koltuk + 23 ayakta )
Maksimum hız	80 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard PEMFC / 250 kW
Motor tipi /anma gücü/tork	75 kW asenkron elektrik motor ( Ecostar ), 190 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	300 bar, 21 kg H <sub>2</sub> , 1050 l, 7 adet sıkıştırılmış hidrojen tankı
Yardımcı batarya	NiMH, Panasonic EV Energy
Sürüş mesafesi	250 km

Çizelge 3.13 Nissan 2001 Xterra Yakıt pili taşıtının teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Nissan Xterra FCV ( 2001 )
Taşıt aslı	Nissan Xterra
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	120 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 900 / 75 kW
Motor tipi	Neodimyum senkronize manyetoelektrik motor
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	sıkıştırılmış hidrojen
Yardımcı batarya	Li-ion
Sistem	Rejeneratif frenleme



Çizelge 3.14 Honda FCX-V3'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Honda FCX-V3 ( Eylül 2000 )
Taşıt aslı	Honda EV Plus
Ağırlık	1750 kg
Oturma kapasitesi	4
Maksimum hız	130 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Honda 70 kW
Motor tipi/anma gücü	Senkronize manyetoelektrik motor / 60 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	25 MPa, 2 kg sıkıştırılmış hidrojen, 25 litre
Yardımcı batarya	Ultra kondansatör ( ultra-capacitor)
Sürüş mesafesi	176 km

Çizelge 3.15 Honda FCX-V4'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Honda FCX-V4 ( eylül 2001 )
Taşıt aslı	Honda EV Plus
Boyutlar/Ağırlık	4045 mm (l) x 1810 mm (w) / 1740 kg
Oturma kapasitesi	4
Maksimum hız	140 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 900 / 78 kW
Motor tipi /anma gücü/tork	AC senkronize manyetoelektrik motor / 60 kW / 238 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen, 35 MPa, 130 litre
Yardımcı batarya	Ultra kondansatör ( ultra-capacitor )
Sürüş mesafesi	330 km

Çizelge 3.16 Hyundai Santa Fe yakıt pili taşıtının teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Hyundai Santa Fe ( Mart 2001 )
Taşıt aslı	Hyundai SUV
Ağırlık	3571 kg
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	124 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	IFC ( UTC ) Series 300 PEMFC/75 kW
Motor tipi /anma gücü	AC 3 evreli indüksiyon motor / 65 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış hidrojen, 35 MPa
Yardımcı batarya	Kurşun asit
Sürüş mesafesi	160 km

Çizelge 3.17 Hyundai 'nın Tucson FCEV teknik verileri.

Yakıt pili taşıt adı	Tucson FCEV ( 2004 )
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	150 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	PEMFC / 80 kW
Motor tipi / anma gücü	3 aşamalı AC / 80 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıkıştırılmış H <sub>2</sub> , 34,5 MPa 3,5 kg H <sub>2</sub>
Yardımcı batarya	LiPB
Sürüş mesafesi	300 km

### 3.2.1.2.2 Sıvılaştırılmış Hidrojen Depolama

Hidrojen gazı  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  de sıvı olarak depolanır. Çok düşük sıcaklığa sahip olması yüzünden hidrojenin buharlaşmasını engellemek için çok iyi yalıtılmış tanklar içinde depolanır. Tank yalıtılmadığı zaman günde hidrojenin % 1-2 'si buharlaşır. Bunun yanında hidrojenin sıvılaştırılması için büyük miktarda ( % 29 ) enerji gerekir ( Simmons JR 2003). Sıvılaştırılmış hidrojen depolama diğer depolama yöntemlerine göre daha yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğuna ve gravimetrik hidrojen yoğunluğuna sahip olması yönünden tercih edilir. General Motors 2000 yılında geliştirdiği HydroGen 1 aracı 75 L/5kg sıvılaştırılmış

hidrojen kullanıp 400 km yol alır. Depolama tankının hacmi ve ağırlığı 130 L / 50 kg 'dır. GM ' un 201 yılında çıkardığı HydroGen 3 63 L/4,6 kg sıvılaştırılmış hidrojen ile 400 km yol alır. DaimlerChrysler 1999 yılında gösterdiği NeCar 4 aracında 5 kg sıvılaştırılmış hidrojen kullanılırken 450 km yol alır. Bu tankta günlük buharlaşma kaybı % 1 'dir ( Gregor, 2002).

Çizelge 3.18 GM's HydroGen1'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	HydroGen1 ( 2000 )
Taşıt aslı	Opel Zafira
Boyutlar	4317 mm(l) x 1742 mm(w) x 1684 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	140 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	GM Gen7 PEMFC/75kW/200 pil/125-200V
Motor tipi / anma gücü / tork / çalışma voltajı / ağırlık	AC / 60kW / 251-305 Nm /250-380 V/ 68 kg
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıvı hidrojen, 75 l / 5 kg, 1000 mm (l) x 40 mm (çap)
Yardımcı batarya	Var
Sürüş mesafesi	400 km

Çizelge 3.19 GM's HydroGen3'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	HydroGen1 ( Eylül 2001 )
Taşıt aslı	Opel Zafira
Boyutlar	4317 mm(l) x 1742 mm(w) x 1684 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Tüm ağırlık	1590 kg
Maksimum hız	150 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü / ağırlık /	GM Stack2000/ 94-129 kW / 200 pil 125-200 V / 90 kg
Motor tipi / anma gücü / tork / çalışma voltajı / ağırlık	DC / 60 kW / 215-305 Nm /250-380 V / 92 kg
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Sıvı hidrojen, 68 l / 4,6 kg
Sürüş mesafesi	400 km

Renault'un EU FEVER ( 1997 ) taşıtı 30 kW yakıt pili kullanıyor. Sıvılaştırılmış hidrojen tankıyla 400 km yol alır. VW'nin HyMotion ( 2000 ) taşıtı 75 kW PEM yakıt pili kullanır. Sıvılaştırılmış H<sub>2</sub> tankıyla 350 km yol alır.

Çizelge 3.20 NeCar 4'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NeCar 3 ( Mart 1999 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz A class
Boyutlar / Ağırlık	3,57 m (l) x 1,72 (w) x 1,58 (h) / 1750 kg
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	145 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 700 / 70 kW
Motor tipi/anma gücü	55 kW / Asenkron motor
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	5 kg sıvı hidrojen tankı, %1 günlük buharlaşma kaybı
Yardımcı batarya	yok
Sürüş mesafesi	450 km

### 3.2.1.2.3 Metal Hidrid Depolama

Metaller düşük sıcaklıklarda orta basınç altında hidrojeni hidrid adı verilen hidrojen bileşikleri şeklinde emebilir. Depolama tankı hidrojene tankta basınç uygulandığı zaman hidrojeni emen ve ısıyı serbest bırakan öğütülmüş metaller içerir. Hidrojen basınç azaltılıp ısı uygulandığı zaman bileşikten serbest bırakılır.

Metal hidrid depolama şarj işlemi başlangıçta sabit sıcaklıkta hidrojen hızlı bir şekilde metal parça çubukları içine gönderilir ve basıncın artması ile fiziksel emme başlar. Sonra hidrojen daha yavaş hızda metal alaşımına reaksiyona girerek metal hidrid oluşturur. Bu sırada basınç yavaşça artar ve reaksiyon sona erer. Reaksiyon ekzotermik olduğu için dışarı ısı verilir. Metal kalıp, hidrojen metal hidrid tarafından emildiği zaman ısının kaldırılmasıyla hidrid şarj sıcaklığının altında tutulur. Hidrojenin serbest bırakılması için metal hidrid' in boşaltma sıcaklığının üzerinde ısı girişi ister. Hidrojen şarjı metal hidrid yatağın soğutulmasını isterken hidrojenin serbest bırakılması için hidrid yatağın ısıtılması istenir. Hidrid yatak içindeki metal alaşım tozlarının boyutu 5-100 µm arasında olması, birim tank hacmi başına yüzey alanını

artırdığından hidrid tankın hidrojen emme kapasitesi artar. Metal hidrid depolama sistemine sahip yakıt pili taşıtının şarj zamanı 5 dakikadan daha azdır.

Çizelge 3.21 Bazı metal hidridlerin depolama özellikleri ( Ananthachar, 2002 ).

Metal Alaşım	H <sub>2</sub> depolama yoğunluğu kgH <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> wt% kgH <sub>2</sub> /kg	Serbest bırakma özellikleri		
			Sıcaklık (°C)	Basınç (atm)	Isı oluşumu ( MJ/kgH <sub>2</sub> )
MgH <sub>2</sub>	101	7,6	290	1	37,0
TiFeH <sub>1,9</sub>	96	1,8	50	10	12,0
Ti <sub>0,8</sub> Zr <sub>0,2</sub> Cr <sub>0,8</sub> Mn <sub>1,2</sub> H <sub>3</sub>	-	1,8	20	5	9,5
MmNi <sub>4,5</sub> Mn <sub>0,5</sub> H <sub>6,6</sub>	89	1,5	50	4	2,6
TiCoH <sub>1,4</sub>	-	1,3	130	1	4,2

Çizelge 3.21 de bazı hidridlerin özellikleri ve hidrojeni ayırmak için istenen ısı enerjisi gösteriliyor. Magnezyum alaşımlı bileşikler daha yüksek hidrojen boşaltma sıcaklığı ister. Çünkü magnezyum bileşikleri hidrojenle güçlü kovalent bağ oluştururlar. Ağır metal hidridler hidrojenle daha zayıf kovalent bağ oluşturduğu için daha düşük hidrojen boşaltma sıcaklığı ister.

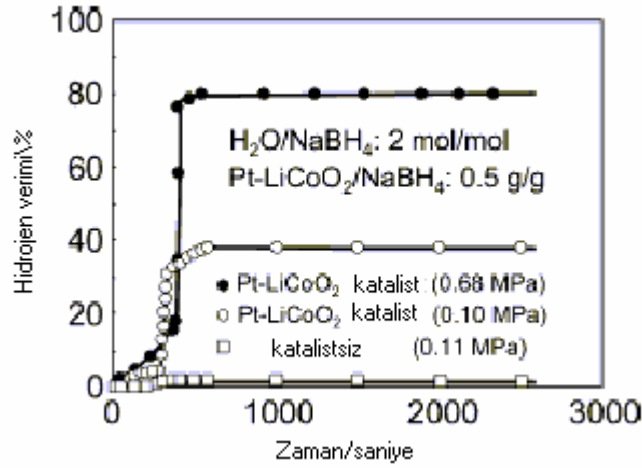
Hidrojen NaBH<sub>4</sub> , NaH, LiH veya NaAlH<sub>4</sub> gibi kimyasal hidridler içinde de depolanabilir. Bunlar içinde ağırlığının %10,9'u gibi büyük teorik hidrojen miktarı yüzünden NaBH<sub>4</sub> tercih edilir (Kojima vd., 2004 ).

Oda sıcaklığında teorik hidrojen miktarının küçük bir yüzdesi NaBH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub>O'un hidroliz reaksiyonu tarafından serbest bırakılır. Ancak hidroliz katalist kullanımıyla hızlandırılır.

Kojima vd. (2004) Metal-metal oksit ( Pt-LiCoO<sub>2</sub> ) NaBH<sub>4</sub> çözeltisinin hidrolizi tarafından hidrojenin serbest bırakılması için en mükemmel çalışan katalist olduğunu buldular. Katalist aşırı su ( H<sub>2</sub>O/NaBH<sub>4</sub> oranı 210 mol/mol ) kullanarak teorik hidrojen miktarının % 100 'ünü üretti. NaBH<sub>4</sub> hidrojen verimi şu formülle hesaplanır.

$$\text{Hidrojen verimi;} \frac{W_h}{(0,213W_s)} \quad (3.1)$$

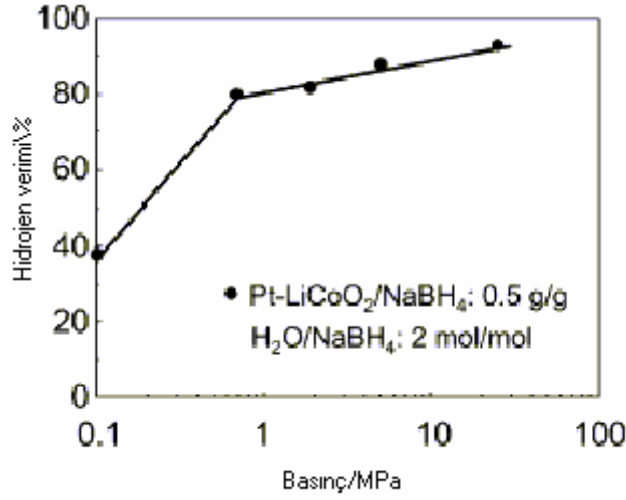
Burada  $W_h$  ; üretilen hidrojenin kütlesi,  $W_s$ ;  $\text{NaBH}_4$ 'ün kütlesi, 0,213 değeri  $\text{NaBH}_4$  birim ağırlık başına üretilen teorik hidrojen miktarı. Katalist kullanımı olmaksızın ısıtma hidroliz deneyi atmosfer basıncında 296 K sıcaklığında yalnızca % 2,4 hidrojen verimi sağladı. Buna karşın hidrojen verimi sıcaklıkla arttı ve 473 K sıcaklığında maksimum değeri olan % 37'ye ulaştı. Bu yüzden katalist kullanmaksızın hidrojen verimi yeterli değildir.



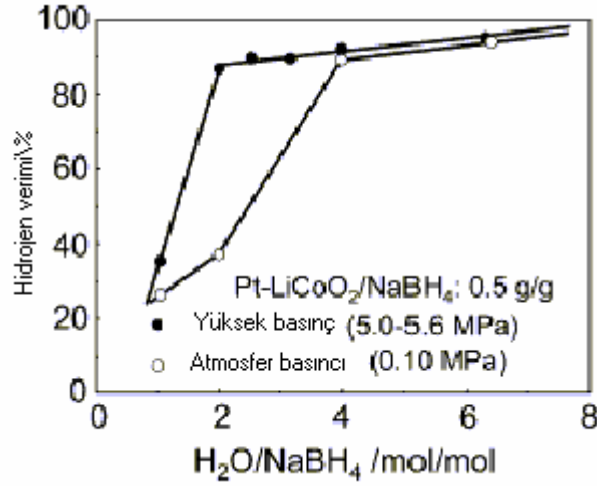
Şekil 3.3 296 K sıcaklıkta farklı basınçlarda zamanın fonksiyonu olarak hidrojen verimi (Kojima vd., 2004 ).

Şekil 3.3 de 296 K sıcaklığında farklı basınçlarda hidrojen verimini zamanın fonksiyonu olarak gösteriyor. Su,  $\text{NaBH}_4$  ve  $\text{Pt-LiCoO}_2$  katalistin karıştırıldığı sisteme 296 K sıcaklığında püskürtüldüğü zaman, hidrojen üretimi derece derece artar. 400 s 'den sonra hidrojen üretimi basıncın 0,1 MPa ( 1 atm ) den 0,68 MPa 'a artırılması yüzünden % 80'e ulaştı. Aynı sistem atmosfer basıncı altında hidrojen üretimi 330 s % 37'ye ulaştı. Bu sonuç yüksek basınçlı kapalı sistemde  $\text{Pt-LiCoO}_2$  katalistli  $\text{NaBH}_4$  'in hidroliz reaksiyonu atmosfer basıncında ve açık sistemle karşılaştırıldığında onun iki katı hidrojen verimi sağlar. Şekil 3.3 de katalistin kullanılmadığı kapalı sistemde hidrojen verimi 0,11 MPa'da yalnızca % 2 dir. Bu hidrojen veriminin yalnızca kapalı kap kullanımıyla hızlanmadığını gösterdi.

Şekil 3.4 de 296 K sıcaklığında hidrojen veriminde basıncın etkisini gösteriyor. Yüksek basınçlarda ( 0,7 MPa - 25 MPa) % 80-93 hidrojen verimi elde edilir. Şekil 3.5 de 296 K sıcaklığında hidrojen veriminde  $\text{H}_2\text{O}/\text{NaBH}_4$  oranının etkisi gösteriliyor. Hidrojen verimi su artışının fonksiyonudur. Verim  $\text{H}_2\text{O}/\text{NaBH}_4$  oranının artışıyla artar.  $\text{H}_2\text{O}/\text{NaBH}_4$  oranı 2 'ye ulaştığında hidrojen verimi % 35'den % 87'e dik bir şekilde artış gösteriyor. Açık sistemde aynı artış  $\text{H}_2\text{O}/\text{NaBH}_4$  oranı 4 de iken gözleniyor.



Şekil 3.4 296 K sıcaklıkta hidrojen veriminde basıncın etkisi ( Kojima vd., 2004 ).



Şekil 3.5 296 K sıcaklıkta hidrojen veriminde eklenen suyun etkisi ( Kojima vd., 2004 ).

Yan ürün olarak NaBO<sub>2</sub> çıkar. Yüksek basınç altında stokiyometrik su miktarında su ve NaBH<sub>4</sub>'ün reaksiyonu;



298 K de standart sabit entalpi değişimi (  $\Delta H^\circ$  ). NaBH<sub>4</sub>'ün suyla reaksiyonu için standart entalpileri -188,6 kJ ( NaBH<sub>4</sub> ), -571,6 kJ ( 2H<sub>2</sub>O ), -977,0 kJ ( NaBO<sub>2</sub> ) ve 0 kJ ( 4 H<sub>2</sub> ). Böylelikle reaksiyonun standart entalpi değişimi -217 kJ ve reaksiyon ekzotermiktir. NaBH<sub>4</sub> 'ün ve suyun hacimsel hidrojen yoğunluğu 101 kg H<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 'dir ve 70 MPa da sıkıştırılmış hidrojen den % 160 daha çok kapasite sağlar ( Kojima vd., 2004 ).

Metal hidrid depolamanın en büyük avantajı düşük hacimli olması. Bununla beraber sistemin ağırlığı dezavantaj oluşturur. Toyota 1996 da geliştirdiği RAV4 FC EV aracında 2 kg hidrojen 100 kg'lık Metal hidrid tankında depolanıp 175 km yol alır. Yine Toyota'nın 2001 de geliştirdiği FCHV-3 aracı hidrojeni metal hidrid tankında depolayıp 300 km yol alıyor. Mazda 1997 de geliştirdiği Mazda Demio FCEV taşıtında metal hidrid depolama tankı kullanıp 170 km yol alıyor ( Gregor, 2002 ). DaimlerChrysler 'in Natrium (2001 ) taşıtı 54 kW PEM yakıt pili kullanıyor. Hidrojen sodyum bor hidrür (  $\text{NaBH}_4$  ) içinde depolanırken 483 km yol alır. Maksimum hız 129 km/h 'dir.

Çizelge 3.22 Toyota RAV4 FC EV'nin teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Rav4 FC EV ( Ekim 1996 )
Taşıt aslı	Toyota RAV4
Boyutlar	3980 mm(l) x 1695 mm(w) x 2410 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	100 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	20 kW PEMFC / 120 kg
Motor tipi / anma gücü	Senkronize manyetoelektrik motor / 45 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Metal hidrid, % 2 ( 100 kg M-H içinde 2 kg $\text{H}_2$ )
Sürüş mesafesi	175 km

Çizelge 3.23 Toyota FCHV-3 'nin teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	FCHV-3 ( Mart 2001 )
Taşıt aslı	Toyota SUV Kluger V/Highlander
Boyutlar	4685 mm(l) x 1825 mm(w) x 1720 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	>150 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Toyota PEMFC / 90 kW
Motor tipi / anma gücü /tork	Senkronize manyetoelektrik motor / 50 kW / 260 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Metal hidrid
Yardımcı batarya	NiMH/ Panasonic EV Energy
Sürüş mesafesi	300 km



Çizelge 3.24 Mazda Demio FCEV'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Mazda Demio FCEV ( 1997 )
Taşıt aslı	Mazda Demio
Oturma kapasitesi	4
Maksimum hız	90 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	4 Mazda grup, toplam 20 kW güç
Motor tipi/anma gücü	AC senkronize motor , 40 kW
Yakıt sağlama sistemi	Direk hidrojen
Yakıt depolama	Metal hidrid
Yardımcı batarya	Ultra kondansatör ( ultra-capacitor )
Sistem	Hibrid
Sürüş mesafesi	170 km

### 3.2.1.4 Hidrojen Depolama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Sıkıştırılmış hidrojen depolama, en basit ve en ucuz depolama yöntemidir. Sıkıştırılmış hidrojen tanklarının doldurma zamanı benzin tanklarıyla aynıdır. Depolanan hidrojenin miktarını artırmak için basıncın artırılması gerekir. Basıncın artırılması ise tankın ağırlığının artması demektir. En yüksek depolama basıncı 700 bar olup tank ağırlığı diğer depolama yöntemlerine göre bir dezavantaj oluşturur. Düşük basınçlarda daha büyük alan istenir. Sıvı hidrojen depolama onun yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle kullanılır. Hidrojeni çok düşük sıcaklıklarda ( - 253°C ) depolama buharlaşma problemi ortaya çıkarır. Depolanan sıvı hidrojenin % 1'i günlük olarak buharlaşır. Metal hidrid depolamada ise ağırlığın % 1-1,5 civarında hidrojen depolanır. Metal hidridlerin bazıları çok pahalı bazıları da depolanan hidrojeni serbest bırakmak için yüksek sıcaklık ister. Bor, sodyum ve kalsiyum gibi kimyasal hidridler katalitik yakıt reaktörü içinde suyla işleme sokularak saf hidrojen elde edilir. Reaksiyon yan ürünleri ise yeniden çevrime sokulur. NaBH<sub>4</sub> ağırlığının % 10,3 'ü kadar hidrojen tutabilir. Otomotiv uygulamalarında sıkıştırılmış hidrojen depolama en yaygın kullanılan yöntemdir. Yüksek basınçlı tankta sıkıştırılmış hidrojen depolamak, diğer depolama yöntemlerine göre en basit olanıdır. Gaz çevre sıcaklığında depolanır. Böylelikle maliyetten ve hacmin ısı yalıtımından kaçınılmış olur. Gazın tanktan serbest bırakılması için yalnızca valfin açılması yeterlidir.

### **3.2.2 Yerde Dönüştürme Sistemleri**

#### **3.2.2.1 Dönüştürme Sistemleri**

##### **3.2.2.1.1 Buhar Dönüştürme Sistemi**

Yakıtın suyla reaksiyona girmesi ile hidrojen elde etme yöntemidir. Sistem endotermik olup dışarıdan ısı ihtiyacı duyar. Bu ısı genellikle yakıtın bir kısmının yakılması veya yakıt pili anot çıkış egzozunda reaksiyona girmeyen hidrojenin bir yakıcıda yakılmasıyla sağlanabilir. Sistemde elde edilen hidrojen miktarı % 67-75 arasındadır. Sistem hidrojen elde etmede en yüksek verime sahip metoddur. Yalnız bu sistem yük değişimlerine hızlı cevap vermez ve sistemin başlatılması oldukça zaman alır. Buhar dönüştürme genelde hafif hidrokarbonlar ( metan ) veya metanol sisteminde kullanılır.

##### **3.2.2.1.2 Kısmi Oksidasyon Dönüştürme Sistemi**

Yakıtın oksijenle reaksiyona girerek hidrojen elde etme yöntemidir. Sistem ekzotermiktir. Bu yüzden son derece dinamik ve hızlı dönüştürme sistemleri yapmak için kullanılabilir. Kısmi oksidasyon dönüştürme sistemini kullanmanın ana dezavantajlarından biri sıcak bölgelerin oluşmasıdır. Bu yüzden katalistte bu sıcak bölgenin oluşması toplaklama ( sinterleme ) olmasıyla sonuçlanır. Böylelikle katalistin etkinliği düşer. Kısmi oksidasyon işlemi teorik olarak % 67 hidrojen üretir ( Lindström ve Petterson, 2003 ). Buna karşın otomobillerde oksijenin havayla sağlanması çok muhtemeldir. Hava içindeki azot, üretilen gazı seyreltir. Bu yüzden maksimum hidrojen yoğunluğu % 41'e düşer ( Lindström ve Petterson, 2003 ). Yakıt pilinin performansı hidrojen yoğunluğuna bağlı olduğu için bu olay bir dezavantaj oluşturur.

##### **3.2.2.1.3 Ototermal Dönüştürme Sistemi**

Ototermal dönüştürme ekonomik ve teknik sebepler yönünden hidrojen zengini gaz üretmek için en avantajlı yoldur. Ototermal dönüştürme, buhar dönüştürme ve kısmi oksidasyon tepkimelerinin birleşimidir. Ototermal dönüştürme ekzotermik kısmi oksidasyon ve endotermik buhar dönüştürmenin karşıt katkısı yüzünden düşük enerji ihtiyacına sahiptir. Bu tepkimelerin birleşimi tepkime sıcaklık kontrolünü düzeltir ve sıcak bölgelerin oluşumunu azaltır. Aynı zamanda toplaklama ( sinterleme ) ve karbon çökmesi sebebiyle oluşan katalist

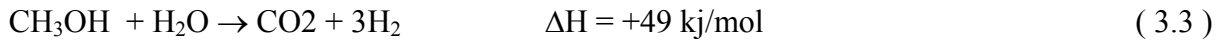
etkinsizliğinden korur. O<sub>2</sub>, su ve yakıt değişik oranlarda reaksiyona girer. Reaktantların oranları genellikle reaksiyon ya azıcık ekzotermik olmalı veya nötr yapmak amacıyla seçilir. Kısmi oksidasyon ve buhar dönüştürmenin birleştirilmesiyle oldukça yüksek hidrojen yoğunluğu üretilir. Ototermal dönüştürme sisteminde elde edilen hidrojen yoğunluğu % 50 civarındadır. Çünkü hava içinde bulunan azotun seyrelme etkisi yüzünden. Ototermal dönüştürmede buhar dönüştürme için gerekli ısı kısmi oksidasyon dönüştürme reaksiyonundan ısı transferiyle elde edilir. Huang vd. ( 2005 ) yapmış oldukları çalışmada ototermal dönüştürme yaparak % 54 hidrojen yoğunluğu elde etmiştir.

### 3.2.2.2 Yakıt Dönüştürme Sistemleri

#### 3.2.2.2.1 Metanolün Hidrojene Dönüştürülmesi

Metanolün dönüştürülmesinde genellikle buhar dönüştürme kullanılır. Çünkü oldukça düşük dönüştürme sıcaklığına sahip olması, dönüştürme işlemi esnasında küçük miktarda yan ürün vermesi, benzinde olduğu gibi kısa zamanda doldurma kapasitesine sahip olması, mevcut doldurma istasyonlarını kullanılabilir olması ve petrolden bağımsız olarak doğalgazdan üretilmesidir.

-Metanol Buhar dönüştürme



Metanolün buhar dönüştürmesi 250 °C civarında olup % 75 hidrojen yoğunluğu elde edilebilir. Buhar dönüştürmenin dezavantajları yavaş ve endotermik olması, metanolün veya anot egzozunda yakıt pilinde reaksiyona girmeyen hidrojenin yakılmasıyla telafi edilebilir.

-Metanolün Kısmi Oksidasyon Dönüştürülmesi



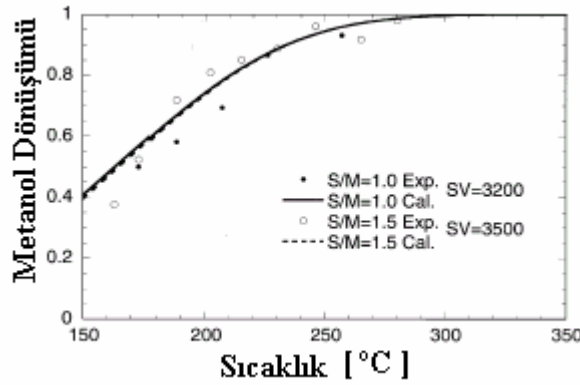
Kısmi oksidasyon reaksiyonu ekzotermik olduğu için dışardan ısı alması gerekmez. Çalıştırma zamanı bu reaktör için 60 saniyeden azdır. % 40 gibi düşük hidrojen yoğunluğu elde edilir. Yüksek ekzotermik reaksiyon dönüştürme işlemi için ana dezavantajdır. Çünkü verilen atık ısı ve reaktörün sıcaklık kontrolünün karmaşık olması yüzünden verim düşer.

### -Metanolün Ototermal Dönüştürülmesi

Buhar dönüştürme ve kısmi oksidasyon reaksiyonların birleşimidir. Net reaksiyon entalpisi sıfırdır.



Bu reaksiyon dışarıdan ısı istemez. 300 °C sıcaklıkta maksimum elde edilen hidrojen miktarı % 65'tir ( Geissler vd., 2000 ). Yüksek dönüşüm verimi ve yüksek seçicilik sağlamak için metanın oluşmadığı ve reaksiyonun terse dönerek tekrar metanolün oluşmadığı şartların seçilmesi çok önemlidir ( Han vd., 1999 ).



Şekil 3.6 Metanol buhar dönüştürme deney sonuçları ( Takeda vd., 2002 )

Takeda vd. ( 2002 ) metanol dönüştürme üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Şekil 3.6'da metanol dönüştürme 260-280°C arasında % 96 'ya ulaşır. CO yoğunluğu artar. CO yoğunluğu 260°C üzerinde artan sıcaklıkla artar. Yine aynı çalışma su miktarının artmasıyla CO yoğunluğunun azaldığı bulundu.

Han vd. ( 1999 ) yakıt pili taşıtları için metanol buhar dönüştürücü tasarladılar. Bu dönüştürücü 30 kW'lık olup sistem içinde metanol dönüştürme oranı % 95 olurken elde edilen hidrojen yoğunluğu % 75'tir. Geri kalan % 25'lik hidrojen bir yakıcı içinde yakılıp buhar dönüştürme için gerekli olan ısı elde edilir. Böylelikle hidrojen kullanımı % 100 olup burada kullanılan paladyum membran ve değişim reaksiyonları yardımıyla CO yoğunluğu 1 ppm 'den daha azdır.

Han vd. ( 2002 ) 25 kW yakıt pili taşıtı için metanol işleme sistemi geliştirdiler. Bu sistem metanol buhar dönüştürme; metal membran temizleme ve katalitik yanma birimlerinden oluşur. Metal membran yüksek saflıkta hidrojen üretirken, PEM yakıt pilinin maksimum güç üretimi ve çalışma ömrünü artırır. Sistem 25 Nm<sup>3</sup>/h ve % 99,9995 saflıkta hidrojen üretirken CO yoğunluğu 1 ppm 'den daha azdır. Yakıt işleme sisteminin verimi %75 olup PEM yakıt pili ( %60 ) ile birlikte tüm güç üretim verimi % 45'tir ve 25 kW güç üretir.

Toyotanın 1997'de geliştirmiş olduğu RAV4 FC EV taşıtında metanol dönüştürme sistemi kullanıp 500 km yol alıyor. DaimlerChrysler 1997'de geliştirdiği NeCar 3 taşıtında metanol buhar dönüştürme sistemi kullanılıyor. Tank içinde 40 l metanol depolanıp 400 km yol alıyor. DaimlerChrysler'in 2000 yılında geliştirdiği NeCar 5 taşıtında metanol dönüştürme sistemi kullanılır. Ford'un 2000 yılında geliştirdiği Ford Focus FC5 taşıtında metanol dönüştürme sistemi kullanılıyor. Mazda 2001 yılında çalıştırdığı Mazda Premacy FC-EV taşıtında metanol dönüştürücü kullanılıyor. Nissan 1999 yılında geliştirdiği R'nessa taşıtında 80 l hacminde metanol dönüştürücü kullanılıyor. Metanol tankında 40 l metanol depolanırken dönüştürücünün ısıtılması 10-20 dakika sürüyor ( Gregor, 2002 ). DaimlerChrysler'in Jeep Commander2 ( 2000 ) taşıtı 50 kW PEM yakıt pili kullanır. Metanol dönüştürme sisteminin kullanıldığı taşıt 190 km yol alır. DaimlerChrysler'in NeCar 5.2 (2001) taşıtı 85 kW PEM yakıt pili kullanır. Taşıt metanol dönüştürme sistemi kullanırken 482 km yol alır. GM-Opel EV1 FCEV ( 1997 ) taşıtı, Mitsubishi'nin SpaceLiner ( 2001, 40 kW PEMFC ) ve VW'nin EU Capri Project ( 1999 ) taşıtı metanol dönüştürme sistemi kullanır.

Çizelge 3.25 Toyota Metanol güçlü RAV4 FC EV 'nin teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	RAV4 FC EV ( Eylül 1997 )
Taşıt aslı	Toyota RAV4
Boyutlar	3980 mm(l) x 1695 mm(w) x 2410 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	125 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	25 kW PEMFC, 400 pil, 1,05 x 0,5 x 0,24 m 0.2 kW / dm <sup>3</sup>
Motor tipi / anma gücü	Senkronize manyetoelektrik motor / 50 kW
Yakıt sağlama sistemi	Metanol dönüştürme / 600 mm (l) x 300 mm ( çap )
Yakıt depolama	Metanol tank
Yardımcı batarya	NiMH/ rejeneratif frenleme
Sürüş mesafesi	Yaklaşık 500 km

Çizelge 3.26 NeCar 3'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NeCar 3 ( 1997 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz A class
Ağırlık	1750 kg
Oturma kapasitesi	2
Maksimum hız	120 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	2 Ballard Mark 700 yakıt pili grubu/ 50 kW
anma gücü	45 kW
Yakıt sağlama sistemi	Metanol buhar dönüştürme ve tercihli oksidasyon ünitesi
Yakıt depolama	Metanol, 40 l
Yardımcı batarya	yok
Sürüş mesafesi	400 km

Çizelge 3.27 NeCar 5'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	NeCar 5 ( 2000 )
Taşıt aslı	Mercedes-Benz A class
Oturma kapasitesi	2
Maksimum hız	150 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 900 / 75 kW
Yakıt sağlama sistemi	Metanol dönüştürme
Yakıt depolama	Metanol tankı
Yardımcı batarya	yok

Çizelge 3.28 Ford Focus FC5 Metanol güçlü yakıt pili taşıtının teknik verileri ( Gregor, 2002).

Yakıt pili taşıt adı	Ford Focus FC5
Taşıt aslı	Ford Focus
Boyut/Ağırlık	4,338 m (l) x 1,758 m (w ) / 1769 kg
Maksimum hız	>128 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard Mark 900
Motor tipi / anma gücü / tork / anma gücü	65 kW AC indüksiyon motor ( Ecostar ), 189,8 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Metanol dönüştürme
Yakıt depolama	Metanol

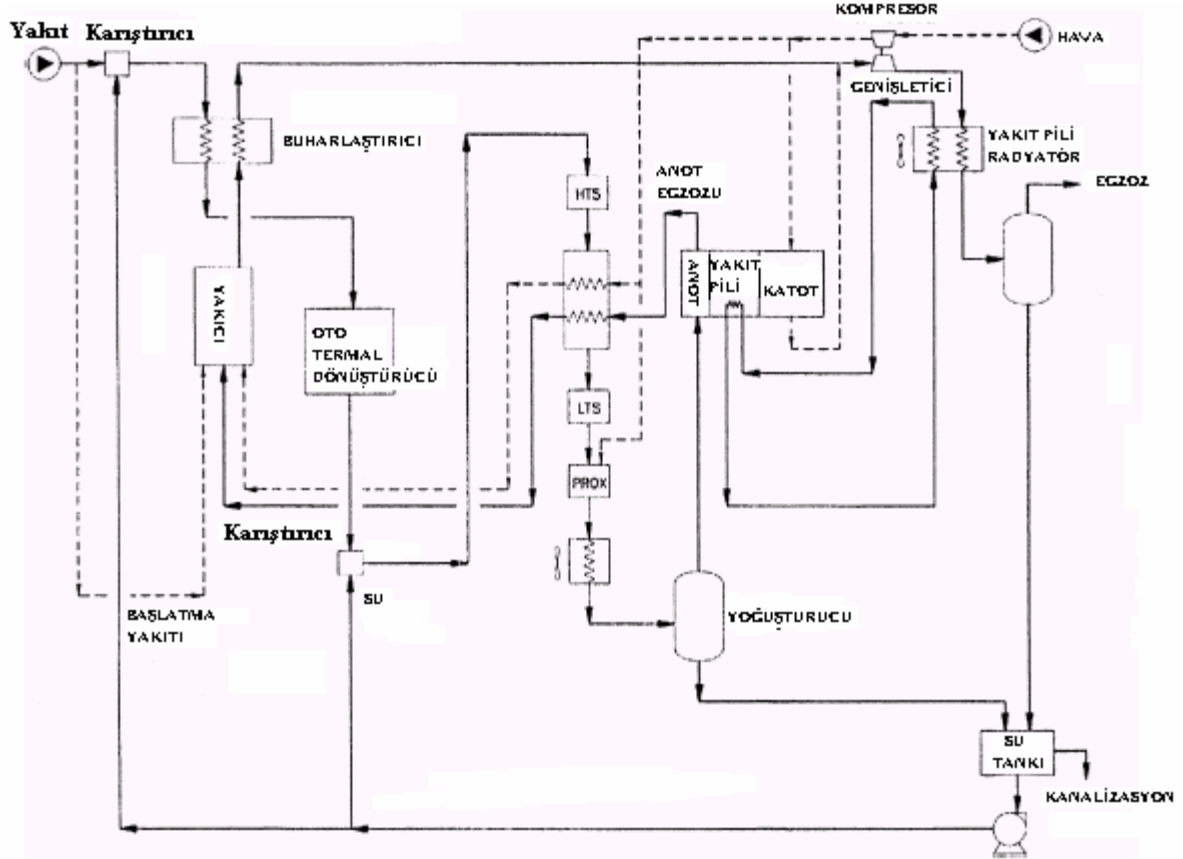
Çizelge 3.29 Mazda Premacy FC-EV'in teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	Mazda Premacy FC-EV ( 2001 )
Taşıt aslı	Ford P2000
Ağırlık	1850 kg
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	125 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard 65 kW/Mark 901
Motor tipi/anma gücü/tork	AC indüksiyon motor /65 kW / 190 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Metanol dönüştürücü
Yakıt depolama	Metanol tank

Çizelge 3.30 Nissan R'nessa Yakıt pili taşıtının teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

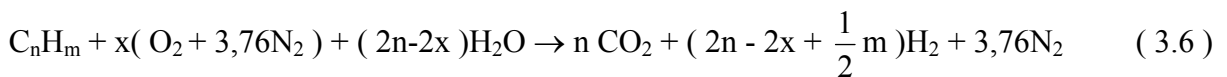
Yakıt pili taşıt adı	Nissan R'nessa FCV ( 1999 )
Taşıt aslı	Nissan R'nessa
Oturma kapasitesi	2
Maksimum hız	70 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Ballard 10 kW PEM / 41 kg
Motor tipi	Noedimyum senkronize manyetoelektrik motor
Yakıt sağlama sistemi	Metanol dönüştürücü
Yakıt depolama	40 l metanol
Yardımcı batarya	Li-ion , 100 kg

### 3.2.2.2.2 Benzinin Hidrojene Dönüştürülmesi



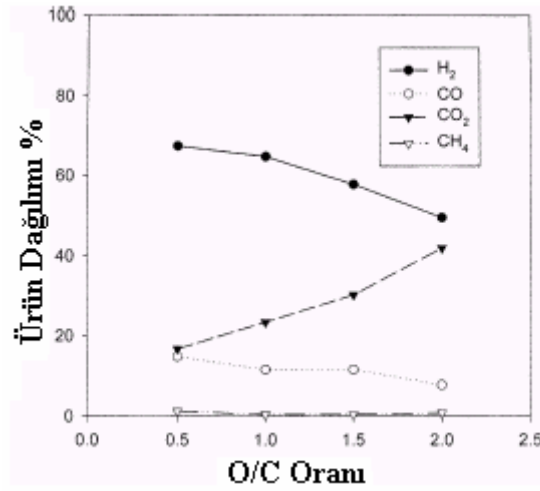
Şekil 3.7 PEM yakıt piliyle uyumlu ototermal dönüştürücülü yakıt sağlama sistemi ( Moon vd., 2001 ).

Hidrojen günümüz dağıtım altyapısını kullanmadığı için hidrojen üretmek için sıvı yakıtlar kullanılır. Metanol hidrojen üretmede en yüksek verimi sağlar. Ancak bu avantaj benzinin metanolla karşılaştırıldığında daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve benzinin çok iyi gelişmiş yakıt dağıtım altyapısına sahip olmasıyla telafi edilebilir. PEM yakıt piliyle uyumlu ototermal dönüştürücü esaslı yakıt işleme sisteminin şeması şekil 3.7 de gösteriliyor (Moon vd., 2001 ). Sistemde gazlar kütle akış kontrol sistemi tarafından dağıtılır ve yüksek O/C oranlarında ekzotermiğe dönüşür. Eğer O/C oranı 0,6'dan küçükse reaksiyon endotermik, 0,6 'dan büyükse reaksiyon ekzotermiktir ( Moon vd., 2001 ).





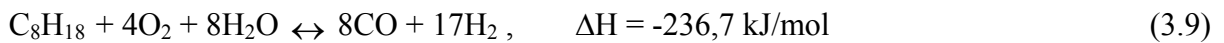
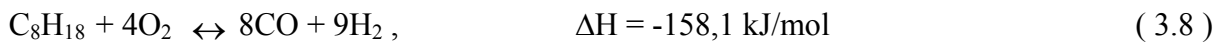
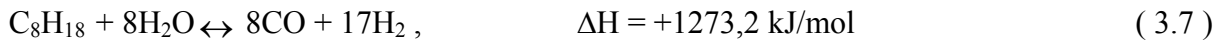
İso-oktanın kısmi oksidasyon dönüştürme reaksiyonunda ürün dağıtımında O/C oranının etkisi 700°C 'de , 8776 h<sup>-1</sup> bağlı hız ve H<sub>2</sub>O/C oranı 3/1 şartları altında şekil 3.8'te gösteriliyor. H<sub>2</sub> yoğunluğu O/C oranını artmasıyla azalırken CO<sub>2</sub> yoğunluğu artar. H<sub>2</sub> yoğunluğu O/C oranının 0,5'i iken % 67,3 ten O/C= 2 iken % 49,5'e azaldı. CO<sub>2</sub> yoğunluğu ise % 41,9 'a yükseldi. CH<sub>4</sub> yoğunluğu O/C oranının artmasıyla hemen hemen aynı kalırken O/C oranı artmasıyla CO yoğunluğu azaldı. Moon vd. ( 2001 ) yapmış oldukları çalışmada O/C = 1 ve H<sub>2</sub>O/C = 3 oranlarının en uygun olduğu gözlemlendi.



Şekil 3.8 700 °C de 8776<sup>-1</sup> bağlı hız ve H<sub>2</sub>O/C = 3 şartlarında iso-oktanın kısmi oksidasyonunda ürün dağılımında O/C oranının etkisi (Moon vd., 2001)

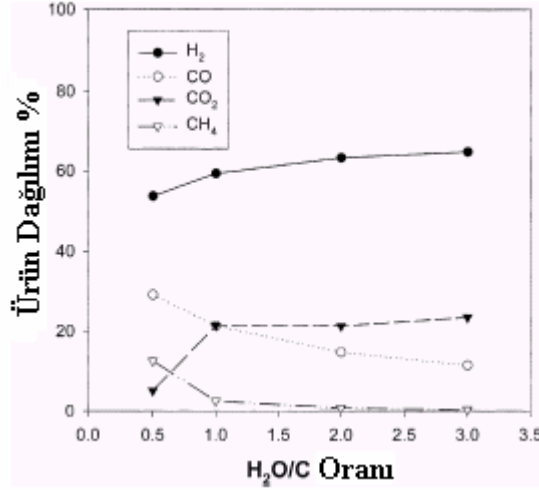
İso-oktanın kısmi oksidasyon dönüştürme reaksiyonu içinde ürün dağılımında 700°C'de H<sub>2</sub>O/C oranının etkisi şekil 3.9 te gösteriliyor. H<sub>2</sub> yoğunluğu H<sub>2</sub>O/C oranı 0,52'ten 3'e artırıldığında %53,7 den %64,7'e çıkarken , CO yoğunluğu %29'dan % 11,5'e düşüyor.

Benzinin ( iso-oktan ) dönüştürme reaksiyonudur.



Benzinin buhar dönüştürme sonucu % 75,8 H<sub>2</sub> gazı elde edilir. Elde edilen H<sub>2</sub> miktarı oksijen/benzin oranının artmasıyla azalır. Çünkü sadece H<sub>2</sub> 'nin H<sub>2</sub>O 'ya dönüşmesi değil, aynı zamanda oksitleyici olarak kullanılan hava içindeki N<sub>2</sub> 'nin seyreltme etkisi yüzündendir.

Ototermal dönüştürmede elde edilen maksimum  $H_2$  yoğunluğu  $700^\circ C$ 'de %35,5'dir (  $O/C = 1$  veya  $O/yakıt = 4$  tür ) ( Krumpelt vd, 2002 ).



Şekil 3.9  $700^\circ C$  de  $8776^{-1}$  bağıl hız ve  $O/C = 1$  şartlarında iso-oktanın kısmi oksidasyonunda ürün dağılımında  $H_2O/C$  oranının etkisi (Moon vd., 2001)

Krumpelt vd. ( 2002 ) PEM yakıt pili sisteminde kullanmak için 10 kW'lık benzin dönüştürme sistemi geliştirdiler. Dönüştürme sisteminin verimi % 70 olup elde edilen  $H_2$  miktarı % 40'tır. Hacmi 13 l olup güç yoğunluğu 0,77 kW/l dir.

Severin vd. ( 2005 ) geliştirmiş oldukları ototermal dönüştürücü sisteme dayalı yolcu taşıtı yardımcı sistemleri için benzin yakıt işleme sistemi geliştirdiler. Sistem 3-9 kW arası ısı gücü 1-3 kW arası elektrik gücü sağlıyor. Yakıt işleme sisteminin verimi % 77'dir. Başlatma zamanı 30 dakika ölçülmüş olup, bu sürenin 10 dakikaya inme potansiyeli vardır. Yakıt işleme ünitesinin hacmi 25 l olup, yakıt pil gurubu, hava sağlayıcılar ve yardımcı sistemlerin olduğu tüm sistem hacmi 44 l 'dir. Reaktörün çalışma sıcaklığı dönüştürücüde  $700^\circ C$  den, yüksek sıcaklık değişim reaktöründe  $400-500^\circ C$ 'ye , düşük sıcaklık değişim reaktöründe ve seçici oksidasyon reaktöründe  $250-300^\circ C$  'de yakıcı girişinde  $80^\circ C$  'ye düşer.

Toyota 2001 yılında geliştirdiği FCHV-5 taşıtında 120 l hacminde benzin dönüştürme sistemi kullanıyor. Yakıt tankında 35 l benzin depolanır (Gregor, 2002 ).

Çizelge 3.31 Toyota FCHV-5 teknik verileri ( Gregor, 2002 ).

Yakıt pili taşıt adı	FCHV-5 ( Ekim 2001 )
Taşıt aslı	Toyota SUV Kluger V/Highlander
Boyutlar	4735 mm(l) x 1815 mm(w) x 1685 mm (h)
Oturma kapasitesi	5
Maksimum hız	>150 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	Toyota PEMFC / 90 kW
Motor tipi / anma gücü / tork	Senkronize manyetoelektrik motor / 80 kW / 260 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Benzin dönüştürme ( 120 l hacmi )
Yakıt depolama	35 l benzin tankı
Yardımcı batarya	NiMH/ Panasonic EV Energy

### 3.2.2.3 Gaz Temizleme Sistemi

Hidrokarbon yakıtlardan dönüştürülen gaz  $H_2$ ,  $CO_2$  ve  $CO$ 'dan oluşur. Yakıt pilleri en iyi saf  $H_2$  ile çalışır. Fakat  $CO_2$  ve  $N_2$  gibi gazlara tolerans gösterebilir. Buna karşın PEM yakıt pilinde kullanılan Pt katalist yalnızca 10- 20 ppm  $CO$ 'ya tolerans gösterebilir. ( Holladay vd., 2002 )

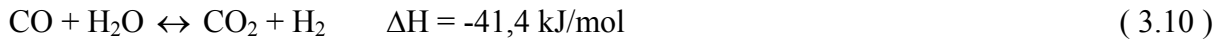
$CO$  yoğunluğu yakıt işleme sisteminden sonra gaz temizleme adımı eklenmesiyle azaltılır. Gaz temizleme iki yoldan biriyle gerçekleştirilebilir. Birincisi; su gaz değişim reaktörleri, tercihli oksidasyon ve  $CO$  metanlaştırmanın birleşimi gibi çok adımlı işlemlerden oluşur. İkincisi; yalnızca hidrojenin geçmesine izin veren membranlar veya  $CO_2$  'in geçmesine izin veren membranlar kullanılmasıdır.

$CO$  temizlemek için kullanılan membran ayırmada, Pd membran  $CO$  'i etkili bir şekilde kaldırır. Ama bu membranlar büyük basınç farkı ve yüksek sıcaklık istemesi sistem verimini azaltır. Metanlaştırma işleminde  $CO$  hidrojenle reaksiyona girerek metan ve su oluşturur (  $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$  ). Ama istenen  $H_2$  miktarı kaldırılmak istenen  $CO$ 'nın 3 katıdır. Su gaz değişim reaksiyonunun kontrolü daha kolaydır. Çünkü su gaz değişim reaksiyonu (  $\Delta H = -41,1$  kJ/mol ), tercihli oksidasyondan (  $\Delta H = - 2183$  kJ/mol ) daha az ekzotermiktir. Buna karşın  $CO$  'yu oksitlemek için gereken katalist hacmi, tercihli oksidasyon için daha azdır. Çünkü tercihli oksidasyon reaksiyonunun hızı su gaz değişim reaksiyonundan daha hızlıdır. Su gaz

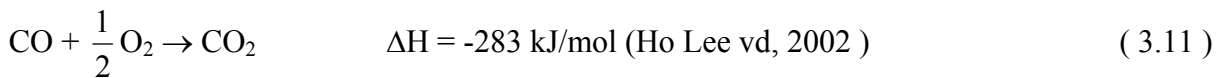
değişim reaksiyonu sonunda CO yoğunluğu PEM yakıt pili için gereken miktarların altına inmez. Tercihli oksidasyonda küçük miktarda hava, dönüştürülmüş yakıtı beslenir. CO, Rh veya Ru destekli alüminyum katalist kullanılarak CO<sub>2</sub> 'ye dönüştürülür. CO temizleme işlemi için tercihli oksidasyon, membran ayırma ve metanlaştırma işlemlerine göre daha düşük parasitik sistem yükü ve enerji istediği için istenir. Su gaz değişim reaksiyonu sonunda CO yoğunluğu % 1-2 oranındadır. Bu yüzden PEM yakıt pili dönüştürme sistemlerinde CO temizleme alt sistemi su gaz değişim reaksiyonu ve tercihli oksidasyon reaksiyonuyla beraber olmak zorundadır. Tercihli oksidasyon reaksiyonu sonunda CO yoğunluğu 10 ppm'in altına düşürülür.

CO yoğunluğu kullanılan anot maddesine ve PEM yakıt pili çalışma sıcaklıklarına göre 20 ile 100 ppm 'in altında olmalıdır ( Ho Lee vd., 2002 ). Yüksek sıcaklık PEM yakıt pillerinin geliştirilmesi ( 120- 160 °C ) ile Pt katalist CO toleransı 50 ppm'e çıkartılabilir ( Huang vd., 2005 ). CO yoğunluğu 20 ppm'in üstünde anot elektrotta kullanılan Pt katalist CO tarafından zehirlenir. Heinzl vd. ( 2005 ) geliştirmiş oldukları sistemde, tercihli oksidasyon temizleme işlemi sonunda CO yoğunluğu 20 ppm'in altına düşürüldü.

- Su gaz değişim reaksiyonu



- Tercihli oksidasyon reaksiyonu

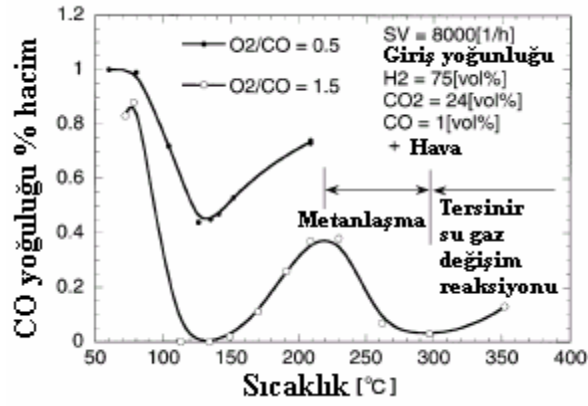


CO temizleme işlemi esnasında 300-450 °C de demir-krom oksit katalist, 160-270 °C de bakır-çinko oksit katalist kullanılabilir ( Krumpelt vd., 2002 ).

Metal membran CO temizleme sistemlerinin geliştirilmesi ile % 99,9995 saflıkta hidrojen elde edilirken CO yoğunluğu 1 ppm 'in altındadır. Böylelikle yakıt pili grubu maksimum elektrik üretim rejimine ulaşırken grubun çalışma ömrüde artar ( Han vd, 2004 ). Bu membranlar Pd alaşımlı metaller kullanır. Yalnızca H<sub>2</sub> 'nin geçmesine izin verir. Bundan başka CO<sub>2</sub> seçici membran kullanılmaya başlanmıştır. Bu membranlarda yalnızca CO<sub>2</sub> geçer. CO<sub>2</sub> 'nin sürekli kaldırılması, CO<sub>2</sub> seçici membran reaktörlerle düşük sıcaklıkta ( 150 ° C de ) hidrojen yoğunluğunu artırmak ve CO dönüşümünü artırmak için en ümit verici yaklaşımdır.

H<sub>2</sub> seçici membranlarla karşılaştırırsak, CO<sub>2</sub> seçici su gaz değişim reaktörü daha çok avantajlıdır. Çünkü H<sub>2</sub> zengini ürün yüksek basınçlarda elde edilir ve hava bu içeri giren CO<sub>2</sub> 'yi temizlemek için kullanılır.

Huang vd., ( 2005 ) yapmış oldukları çalışmada CO<sub>2</sub> seçici su gaz değişim membranlarını kullanarak CO yoğunluğunu 10 ppm 'den daha aza indirir. Reaktörün dönüştürme verimi % 97 dir. Ototermal dönüştürme için Hidrojen yoğunluğu % 54, buhar dönüştürmede ise % 96,6 'dadır.



Şekil 3.10 Tercihli oksidasyon deneyinin sonuçları ( Takeda vd., 2005 )

Takeda vd. ( 2005 ) tercihli oksidasyon üzerine yapmış oldukları çalışmada, tercihli oksidasyon deney sonuçları şekil 3.10 da gösteriliyor. Katalistte CO emilmesi yüzünden CO oksidasyonu için düşük sıcaklık bir avantajdır. 100-150 °C arasında CO yoğunluğu minimum değerindedir. Artan katalist sıcaklığıyla emilen CO miktarı azalır. CO 'nın seçici oksitlenmesi kaybolduğundan oksijen hidrojenle reaksiyona girer. Dolayısıyla CO yoğunluğu artar. CO yoğunluğu 230 °C de maksimum değerine ulaşır. Bu sıcaklığın üzerinde CO yoğunluğu CO'nın metanlaşması sebebiyle azalır. Metanlaşma büyük miktarda H<sub>2</sub> tüketir. CO yoğunluğu 300 °C 'nin üzerinde reaksiyon yönünün değişmesi ile tekrar artmaya başlar. O<sub>2</sub>/CO mol oranı CO oksitlenmesinde önemli etki yapar. CO yoğunluğu O<sub>2</sub>/CO oranı 0,5 te 1,5 takinden daha yüksektir.

Ho Lee vd. ( 2002 ) 1 kW<sub>e</sub> ve 10 kW<sub>e</sub> tercihli oksidasyon temizleme sistemi geliştirdiler. Sistemlere benzin dönüştürücünden gelen gazın % 1-2 'si CO içermektedir. 1kW<sub>e</sub> sistem için CO yoğunluğu sabit durum ve değişken şartlarda 10 ppm 'in altında olup sistem hacmi 0,26 l/kW<sub>e</sub> 'dir. 10 kW<sub>e</sub> 'lik tercihli oksidasyon sisteminde ise CO yoğunluğu sabit durumda 20

ppm 'in altında, değişken şartlar altında 30 ppm'in altına indirilmiş olup sistem hacmi 0,25 l/kW<sub>e</sub> 'dir. Bu hacmin yakıt işleme sisteminin % 20 sini oluşturmasını tahmin ediliyor ( yakıt işleme sisteminin hacmi 1,25 l/kW<sub>e</sub> 'dir). Otomobiller için en uygun yöntem şu an için su gaz değişim reaksiyonu ve tercihli oksidasyon reaksiyonun birlikte kullanıldığı sistemlerdir.

### 3.2.3 Hidrojen depolama, metanol ve benzin dönüştürme sistemlerinin karşılaştırılması

Sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemi yakıt dönüştürme sistemlerinden dizayn bakımından daha basit, daha çok verimli ve daha düşük maliyetlidir. Metanol ve benzin dönüştürme sistemlerindeki dönüşüm kayıpları yüzünden verim düşer. Hidrojeni yakıt pili taşıtı saf hidrojen kullandığı için yakıt pili sisteminde kayıplar çok azdır. Metanol ve benzin dönüştürme sisteminde ise dönüştürülen gaz sadece H<sub>2</sub> içermediği için CO ve CO<sub>2</sub> yakıt pili verimini düşürür. Dolayısıyla otomotiv uygulamalarında en çok sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemi tercih edilir.

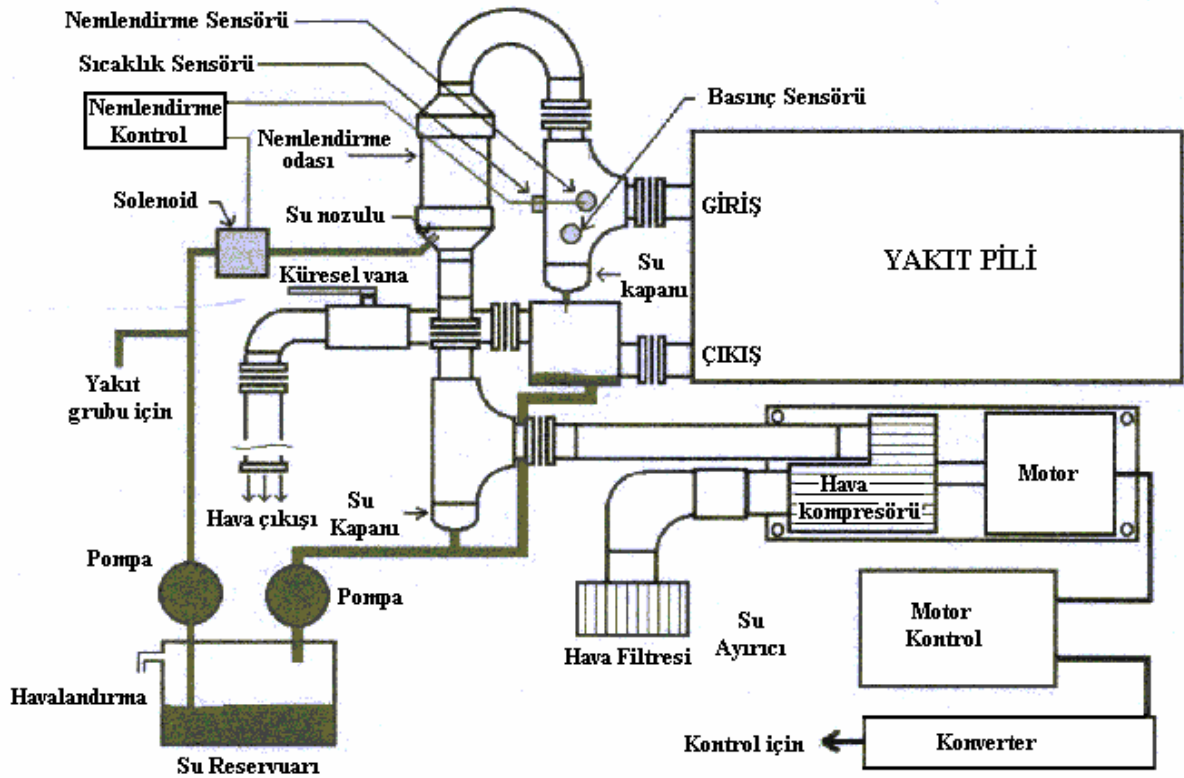
### 3.3 Hava Sağlama ve Nemlendirme Sistemi

Hava sağlama alt sistemi yakıt pilinin % 80 bağlı nemde ve maksimum 60 °C sıcaklıkta temiz hava sağlar. Hava sağlama sisteminin şeması şekil 3.11 de gösteriliyor. Nemlendirme su püskürtme ile gerçekleştirilir. Nemlendirme odasına su akışı oda çıkışında nemlendirme seviyesine dayanan su enjektörlerini kontrol eden negatif geri besleme sistemi tarafından kontrol edilir. Nemlendirme havası odanın içinden geçmesi ve soğuması yüzünden, sıvı su nemlendirme odası içinde toplanır. Su rezervuarı yoğunlaşan sıvıları toplar ve onları yakıt pili soğutma sistemine ve püskürtme nozuluna sağlar.

Reaktantların nemlendirilmesi PEM yakıt pili grubunun performansı için kritiktir. Günümüz PEM yakıt pilleri reaktant gazların nemlendirilmesine oldukça duyarlıdır. Nemlendirme sisteminden herhangi bir fazla su yakıt pili içine akarsa, bu su çıkış gücü kapasitesini azaltır ve yakıt pili grubuna zarar verir. Çok ayrıntılı hazırlanmış nemlendiriciler taşıttaki ısının kullanımı için istenir. Elektrik gücünün kullanılması tüm sistem verimini azaltır.

Çevre atmosfer şartları nemlendirme odasının dizaynında hesaba katılmalı. Yakıt pili hava sağlama sistemi çıkışı sıcaksa, nemlendirme hava akışkanı soğuk ve kuru giriş şartları bir tartışma konusudur. Sıcak ve nemli giriş şartlarıyla karşılaştırırsak, soğuk ve kuru durum daha

çok ısıtma ister ve grup çıkışında elde etmek için daha çok su eklenmesini ister. Sıcaklığın bu doğal etkisi havanın nem taşıma kapasitesini etkiler. Yani çevre atmosfer şartlarına bakmaksızın uygun çıkış şartlarını sağlayan kontrollü sistem üretmek gerekir. Çevre şartlarının hava sağlama sistemi üzerinde, altsistemlerin sıcaklık farkları mutlaka düşünülmelidir. Reaktant sıcaklıkları ve yakıt pili soğutma su sıcaklıkları arasındaki büyük farklılık, reaktant akışkanlardan suyun yoğuşması yüzünden su baskınlarına veya sıcak reaktantların yakıt pili grubu içindeki membranlardan suyun emilmesi yüzünden aşırı kuru şartlara sebep olur.



Şekil 3.11 Hava sağlama sisteminin şeması ( Nelson vd., 2000 )

Yakıt pili grubu içinde kimyasal reaksiyon yüzünden yakıt pilinin hava egzoz akışkanı su damlacıkları ve buhar içerir. İyongiderici su tankında su seviyesini devam ettirmek için hava egzoz akışkanı içindeki su elde edilmelidir. Bu su/hava ayırıcı kullanılarak gerçekleştirilir. Ayırıcıda egzoz hızı yavaşlatılır. Havanın yavaşlaması ile su damlacıkları düşmeye başlar ve onu odada toplar. Ayırma sonrası su soğutucu rezervuar tankına geri pompalanır.

Hava sağlama sistemi bağıl nemi % 80 den fazla olan temiz havayı yakıt pili grubuna sağlar (Hwang vd., 2005 ). Çevre havası oksitleyici olarak besleme hattına girer. Ventilator kullanılarak filtreden geçen hava tozdan ve yağdan temizlenir. Yük takip tekniği hava

sağlama sisteminde kullanılır. Vantilatör elektrokimyasal reaksiyon için istenen oksitleyici karşılamak için akış hızını değiştirir. Bu darbe genişlik modülasyonu kontrolü yoluyla motor hızı değişimiyle başarılır. Farklı güç şartlarında hava sağlama yolu;

-Düşük yakıt tüketimi; Elektrokimyasal reaksiyonu desteklemek için hava akış hızı sabit düzeyde tutulur.

- Yüksek güç tüketimi; hava akışı üreticilerin tavsiye ettiği 2,5 stokiyometrik oranı karşılamak için değişir. Yakıt pilinden sağlanan güç arttığı zaman, vantilatör motor hızı katoda daha çok hava sağlamak için artırılır. Bu stokiyometrik oran 2,5 dan daha az olduğu içindir. Yakıt pili gücü azaldığı zamanda vantilatör motoru yavaşlar. Bu hareket sistem verimini artırır.

-Yakıt pili sistemi başlatılıp kapatıldığı için vantilatör kısa periyot içinde tüm güçte katot içindeki suyu kaldırmak için çalışır.

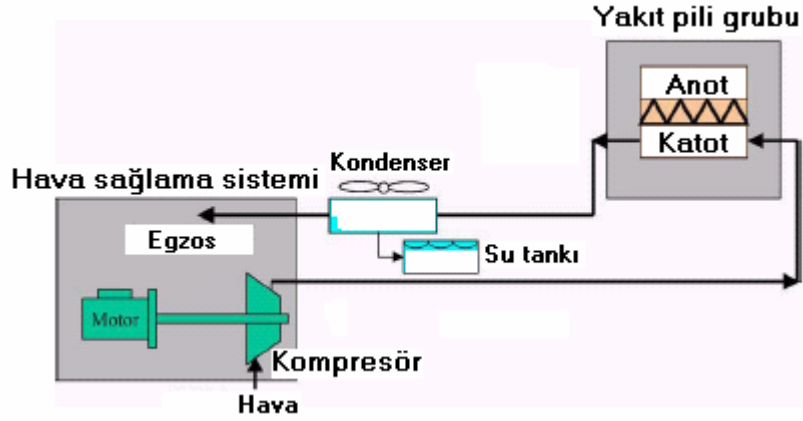
Havanın stokiyometrik oranı daima 2,5 den büyüktür. Katot içindeki yüksek hava stokiyometrik oranın amacı, yalnız katoda yeteri kadar hava sağlamak değil aynı zamanda güçlü katot akışı kullanarak katotdan yan ürün olan suyun kaldırılmasında etkili olmaktır.

Reaktantların nemlendirilmesi PEM yakıt pilinde önemli olduğundan havayı nemlendirmek için nemlendirici kullanılır. Burada egzoz su buharı nemlendirici içinde yeni gelen soğuk ve kuru havaya transfer olur. Harcanan gazlar nemlendiriciden çıkar ve su buharı asla yoğuşmaz.

Proton Motor yakıt pili sisteminde yakıt pili grubunu nemlendirme iyonu gidericideki suyun hava giriş manifolduna püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Hava çıkış sıcaklığı 60 °C 'yi geçtiğinde, püskürtme otomatik olarak harekete geçer ( Corbo vd., 2005 ).

Hava sağlama sistemi ya kompresör kullanarak yüksek basınçta yada vantilatör kullanarak alçak basınçta çalışır. Her iki dizayn otomobil uygulamalarında kullanıldı. Şekil 3.12 de hava sağlama sistemi gösteriliyor. Hava sağlama sistemi değişebilir hızda elektrik motoruyla beraber kompresör basınç ve hava kütlesi sağlar. Sıkıştırılmış hava doğrudan yakıt pili grubuna gönderilir. Kondenser katot egzozunda sıvı su elde etmek için kullanılır.





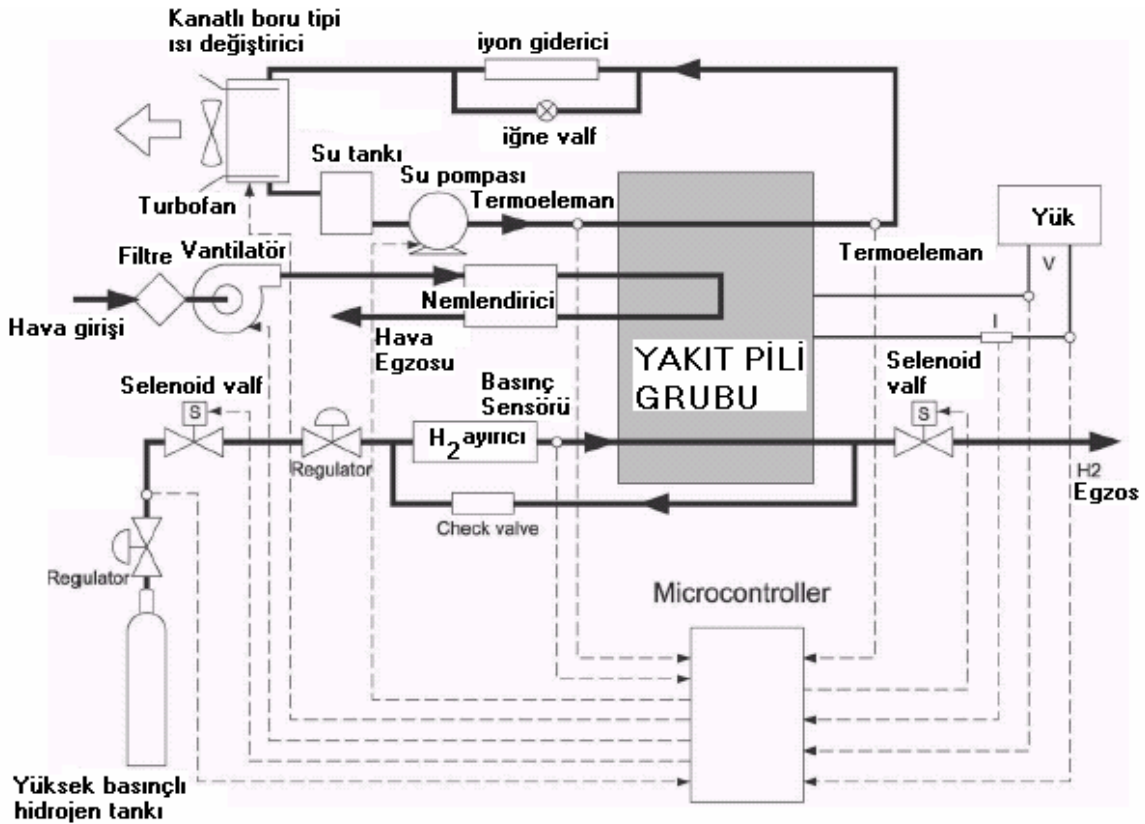
Şekil 3.12 Yakıt pili sisteminde yüksek basınçlı hava sağlama sistemi ( Moore vd., 2005 )

### 3.4 Soğutma Sistemi

Yakıt pillerinin soğutulması taşıt uygulamaları için en önemli görevlerden biridir. Taşıt radyatörünün birincil fonksiyonu yakıt pili grubunun çalışma sıcaklığını sürdürmektir. Isı kayıpları, grubun verimsizliği ve grup içinde yoğuşan su yüzünden oluşan grup ısı kayıplarının birleşimidir. Yakıt pilinin egzosu, içten yanmalı motorun egzosu gibi değildir. Bu egzos gazı beraberinde hiçbir önemli ısı akışını sürüklemeyebilir. Yakıt pili grubu içten yanmalı motorlardan daha çok verimle çalışmasına rağmen yakıt pili soğutma sisteminde kaybolan ısının miktarı çok büyüktür. Bu içten yanmalı motorun yüksek sıcaklıktaki egzosundaki uzaklaştırılan enerjinin miktarının ( $> \% 33$ ), yakıt pili egzosunda uzaklaştırılan enerjiden ( $> \% 10$ ) oldukça yüksek olmasındandır ( Moore vd., 2005 ). Bu yüzden yakıt pili sistemi tarafından yok edilmesi gereken ısı akışı içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında yaklaşık iki katıdır (Rogg vd., 2003). Bununla beraber ısı transferi içinde elde edilebilen sıcaklık farkı yaklaşık  $\% 50$  azaltılabilir. Sıcaklık farkıyla bağlantılı istenen soğutma gücü yakıt pili taşıtı için içten yanmalı motorla karşılaştırıldığında dört kat daha yüksektir. Yani yakıt pili taşıtı için içten yanmalı motoru soğutmak için istenen soğutma sisteminin aynısından dört tanesi gerekiyor (Rogg vd., 2003).

İçten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında yakıt pili altsistemlerinden ısının kaldırılması iki bakımdan problem oluşturur. İçten yanmalı motorlar çok yüksek egzos sıcaklığına sahip ve egzos borularıyla atık ısının büyük kısmı atmosfere atılır. Yakıt pili düşük egzos sıcaklığına sahip ve yakıt pili grubundan çok az ısı kaldırır. Çünkü PEM yakıt pili, yakıt pili egzosuyla aynı sıcaklıkta reaktantlar ister. Neredeyse  $\% 100$  atık ısı soğutucu su tarafından kaldırılmak zorundadır. İkinci problem yakıt pili membranının  $80-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  'nin üzerinde çalışmaması.

Hwang vd. ( 2005 ) geliştirmiş oldukları yakıt pili sisteminde yakıt pili grubu su soğutmalıdır. Şekil 3.13 de gösterilen yakıt pili sisteminde soğutma sistemi su pompası, iyongiderici, su tankı, iki termoeleman ve turbofanlı kanatlı boru tipi ısı değiştiricisinden oluşur. Rezervuardan soğutulmuş su, su pompasıyla grup içine pompalanır. Gruptan çıkan sıcak su önce iyon gidericiye, ondan sonra kanatlı boru tipi ısı değiştiriciye girer. İyon giderici evsel su arıtma sistemleriyle işleyiş ve boyut olarak aynıdır. Kanatlı boru tipi ısı değiştirici bakır kanatlı 316 paslanmaz kaynaklı elik tüpler ve düşük profil tabanlı turbofandan yapılıdır. İki termoeleman grup giriş ve çıkışına yerleştirilir. Termoelemanlar yakıt pili grubunun bir tarafından diğer tarafına sıcaklık artışını ölçer ve radyatör kullanılarak gruptan kaldırılacak ısıyı belirler. Ayrıca turbofan, grup çıkış sıcaklığındaki değişime bağlı olarak kontrol sistemi tarafından harekete geçirilir. Sıcaklık 45 C ‘yi geçtiğinde turbofan elektrokimyasal reaksiyon tarafından üretilen ısıyı kaldırmak amacı ile çalıştırılır. Grup ıkış sıcaklığı 40 C’nin altına indiği zaman turbofan gten tasarruf sağlamak için kapatılır. Proton Motor yakıt pili sisteminin soğutma sistemi, pompa sıcaklık ve akış hızı sensörleriyle donatılmış iyongiderici su devresinden oluşur.



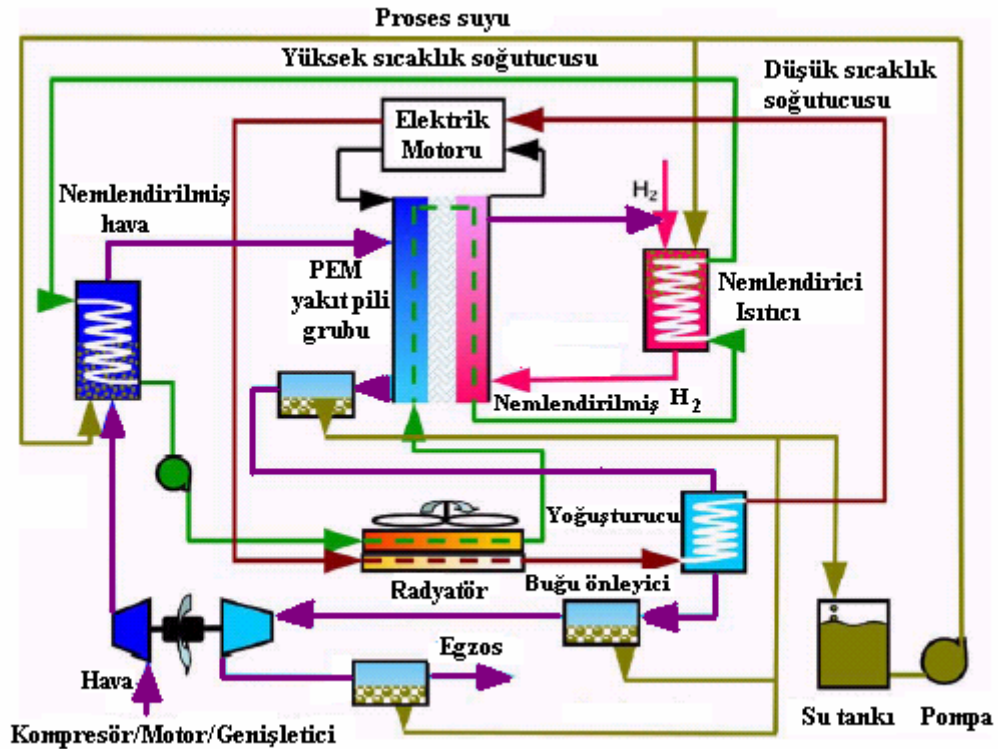
Şekil 3.13 Yakıt pili sistemi ( Hwang vd., 2005 )

### 3.5 Kontrol Sistemi

Yakıt pili çalışmasının kontrolü bütün çalışma şartları altında yakıt pilinin güvenli bir şekilde başlatılıp, izlenmesi ve kapatılmasını sağlayan algoritmaların hazırlanmasıyla birlikte küçük mikro kontrol elemanları ister. Hwang vd, ( 2005 ) geliştirmiş oldukları yakıt pili sisteminde Intel 8051 mikro işlemci sistem beyni olarak hareket eder. Mikro kontrol elemanı voltaj, akım, sıcaklık ve basınç sensör sinyalleriyle izler. O aynı zamanda hava vantilatörü, solenoid valf, su pompası ve turbofan gibi cihazları yönetmek amacı ile uygun hareket alır.

Proton Motor yakıt pili sistemi FieldPoint kontrol cihazı kullanır. Bu cihaz hava çıkışı, su çıkış sıcaklığı, hava giriş akış hızı, hidrojen giriş basıncı, toplam akım ve voltaj çıkışı gibi tüm sensörlerde üretilen sinyalleri elde ederek tüm sistemin kontrolü sağlar ( Corbo vd., 2005 ).

### 3.6 Direk Hidrojen Yakıt Pili Sistemi



Şekil 3.14 Sıkıştırılmış direk hidrojen yakıt pili sistemi ( Ahluwalia ve Wang, 2005 ).

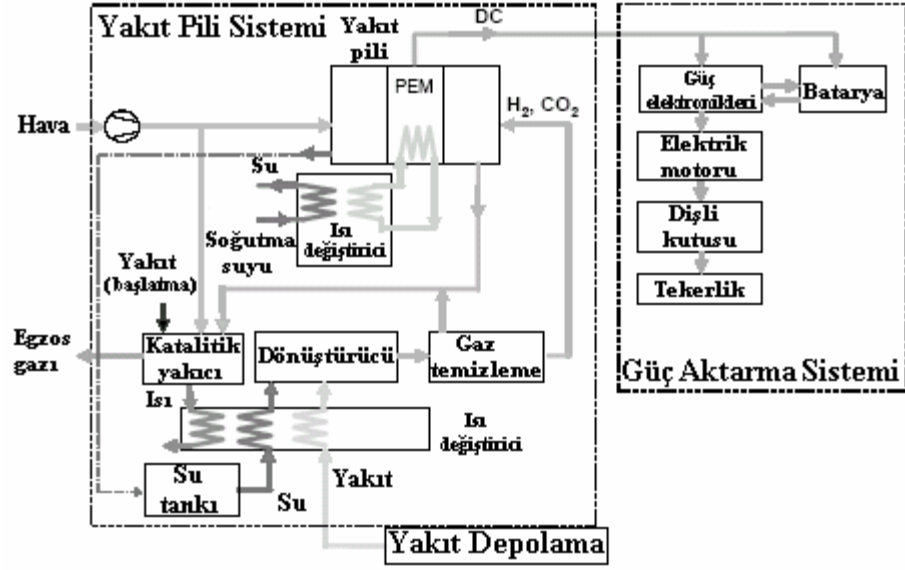
Şekil 3.14 de sıkıştırılmış direk hidrojen yakıt pili sistemi gösteriliyor. PEM yakıt pili 2,5 atm ve 80 °C de % 50 verimle çalışır. Sıkıştırılmış hidrojen ve hava, proses suyu ve yakıt pili grup

soğutucudan gelen ısının kullanılmasıyla grup sıcaklığında % 90 bağıl neme kadar nemlendirilir. Sistem basıncı kısmi yükte 2,5 atm den düşüktür. Katot havasının nominal akış hızı hidrojeni tamamiyle oksitleyecek ihtiyacın iki katıdır ( % 50 oksijen kullanımı ). Proses suyu, grubun aşağı akışkanında hareketsiz ayırıcı içinde yoğuşturucuda ve buğu önleyicide kullanılan havadan elde edilir. Grup içinde soğutucuya transfer edilen atık ısı ya anot ve katot akışkanlarının nemlendirilmesinde kullanılır veya radyatörden dışarı atılır.

Isı ve su yönetim sistemi iki soğutucu devre ve bir proses su devresinden oluşur. Yüksek sıcaklık devresi gruba 70–80 °C de soğutucu ( etilen glikol ve su karışımı ) teslim eder ve grup atık ısısı hava soğutma radyatöründen atılır. Yüksek sıcaklık soğutucu katot ve anot akışkanlarının ön ısıtır ve nemlendirme gizli ısısı sağlar. Düşük sıcaklık devresi kovanlı borulu kondensere 55–70 °C de soğutucu teslim eder ve tahrik inverter motorunu soğutur. Taşıt hava soğutma ( a/c ) sisteminin kondenseri düşük sıcaklık soğutucu ile soğutabilir. Düşük sıcaklık soğutucusuna yakıt pili sistemi kondenseri, tahrik inverter motoru ve a/c kondenserde transfer edilen ısı hava soğutma radyatöründe çevreye atılır. İki yüksek sıcaklık ve bir düşük sıcaklık devresi ayrı radyatörler içerir, ama bir soğutucu rezervuarı paylaşır. Proses su devresi, anot ve katot akışkanlarını nemlendirmek için iyongidericideki su kullanılır. Sürdürülebilir sürüş şartları altında sistem, nemlendirici içinde kullanılan proses suyunu yakıt pili sisteminden elde edilir. Tüm sürüş şartlarında, özellikle hızlı yavaşlama veya çok düşük yüklerde proses suyunu tamamiyle elde edilmesi mümkün değildir. Buna rağmen istenen sürüş şartlarında ( yüksek yükler ve hızlanma ) altında grup içinde üretilen fazla suyun elde edilmesiyle istenmeyen sürüş şartları ( düşük yükler ve hızlı yavaşlama ) altında tüketilen net suyu telafi etmek için sistem nötr yapılıdır.

### **3.7 Yakıt Dönüştürücülü Yakıt Pili Sistemi**

Şekil 3.15 de yakıt dönüştürücülü yakıt pili sistemi gösteriliyor. Sistem; yakıt pili sistemi, güç aktarma sistemi ve yakıt tankından oluşur. Yakıt dönüştürücü içinde hidrokarbon yakıtlar hidrojen, karbondioksit ve karbonmonoksit'e dönüştürülür. Dönüştürücü yakıtın özelliklerine bağlı olarak 300 ve 750 °C arasındaki sıcaklıklarda olmalıdır. Dönüştürme işlemleri için gerekli ısı katalitik yakıcıdan ısı değiştirici yoluyla sağlanır. Katalitik yakıcı yakıt olarak yakıt pilinde reaksiyona girmeyen fazla hidrojeni kullanır. Başlatma sırasında ek yakıt gerekli dönüştürücü sıcaklığını sağlamak için katalitik yakıcıya gönderilir.



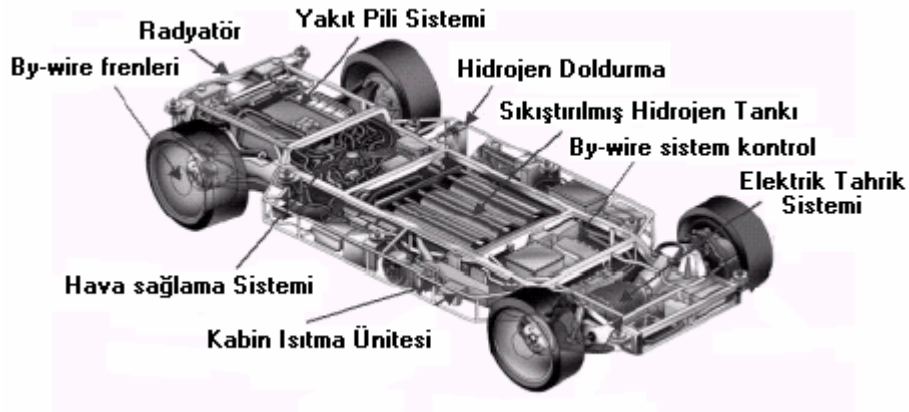
Şekil 3.15 Yakıt dönüştürücülü yakıt pili sistemi ( Schlect, 2003 ).

#### 4. YAKIT PİLİ TAŞITLARI

Yakıt pili taşıtları sadece yakıt pili kullanan taşıtlar ve hibrid yakıt pili taşıtları olarak sınıflandırılır. Sadece yakıt pili kullanan taşıtlar batarya kullanmaksızın güç kaynağı olarak yalnızca yakıt pili sistemi kullanılır. Yakıt pili sistemi taşıtın güç aktarma sistemine elektrik sağlar. Güç aktarma sistemi, yakıt pili gücünü değişebilir frekans ve değişebilir voltajda AC gücüne dönüştüren inverter, AC tahrik motoru ve gücü motordan tekerliklere aktaran transmisiyondan oluşur.

Hibrid yakıt pili taşıtı, yakıt pili sistemi ile paralel bir şekilde batarya kullanır. Hibrid yakıt pili çalışma sistemi, yakıt pilinin yüksek enerji yoğunluğu ve bataryanın yüksek güç yoğunluğunu çok verimli kullanmasını sağlar. Taşıtın hızlanması gibi güç isteğinin yüksek olduğu zamanlarda batarya istenen gücü sağlar. Güç isteği seyir halinde olduğu gibi düşükse yakıt pili istenen gücü sağlar. Batarya düşük yüklerde çalışma esnasında şarj edilir. Yani güç ve enerji isteğine bağlı olarak, yakıt pili taşıtın seyir halindeki gücünü karşılayacak ve bataryada maksimum gücü sağlayacak şekilde dizayn edilir.

Yakıt pili taşıtları içten yanmalı motorlar gibi yakıt pili sistem parçaları taşıtın önünde toplanmasına gerek yoktur. General Motor Hy-wire şasisinde sistem parçalarını esnek biçimde yerleştirirken by-wire teknolojisini de kullanır. By-wire teknolojisi taşıtın hızlanması, frenleme ve direksiyon fonksiyonlarını elektronik olarak kontrol edilmesidir. Şekil 4.1 de yakıt pili taşıtında GM Hy-wire şasisi, elektrik güç aktarma ve sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemi gösteriliyor.



Şekil 4.1 GM Hy-wire şasisi ( Helmolt, 2003 )

Yakıt pili sistemleri gelecekte içten yanmalı motorlar ve elektrik taşıtlarıyla rekabet edebilmesi için daha iyi yakıt ekonomisi, dönüştürücülü yakıt pili sistemleri için daha temiz emisyonlar, aynı güçte performans ve tank mesafesi, aynı derecede güvenilirlik, her türlü atmosfer şartına, sıcaklığa ve yüksekliğe uyumlu olmalı, yaklaşık olarak aynı maliyeti sağlamalı, motor bölümüne ve taşıtın altına yerleştirilebilir olmalı, hızlı başlatma ve hızlı transit cevap verebilme gibi özellikleri karşılayabilmelidir. Özellikle başlatma problemi çözülmelidir. Soğuk başlatma taşıtın  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta çalıştırılmasıdır. Taşıtın çalışma zamanı içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında bir problemdir. Soğuk çalışma için 100 kg ağırlığındaki yakıt pili grubunu  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  den  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa çıkartmak için gereken ısı 1200 kJ 'dur ( Konrad vd., 2003 ). 5 kW yakıt pili gücüyle karşılaştırıldığında, eğer hiçbir ısı kaynağı yoksa ısınma zamanı dört dakikadır. Yakıt pili taşıtlarında açma-kapama işlemi esnasında hiçbir mekanik güç veya elektrik güç harcanmaz. Dolayısıyla kimyasal güçte harcanmaz. Yani hiçbir kütle veya enerji transferi olmaz. Kabul edilebilir bir sistem 1 saniyenin altında sistemi çalıştırabilmeli ve ihmal edilebilir seviyede gürültü çıkartacak şekilde dizayn edilmelidir.

Yakıt pili sistemine hızlı başlatmaya iki problem engel olur. Birincisi dondurucu sıcaklıkların altında sistem içinde kalan suyun veya yakıt pili grubunun çalışmaya başlamasıyla üretilen suyun donmasıdır. İkincisi yakıt pili performansına bağlı olan sıcaklık, normal çalışma sıcaklığına (  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ) gelene kadar gelen sürenin kısaltılması. Direk hidrojen yakıt pili sistemin için DOE 'nin 2010 yılı  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de soğuk çalışma hedefi 30 saniyede maksimum güce ulaşmaktır ( Sundaresan ve Moore, 2005 ).

PEM yakıt pilleri otomobillerde düşük sıcaklıkta çalışmaları, daha kısa başlatma zamanı ve iyi dinamik ve transit cevap özelliklerine sahip olduğu için seçilir. Yakıt pili taşıtlarda kullanıldığında yakıt pilinde üretilen elektrik enerjisi bir motor yardımıyla mekanik güce çevrilmek zorundadır. Bu motor genellikle DC-DC konverterdir. Yakıt pili sistem performansında yakıt pili motoru, DC-DC konverter ve tahrik güç motoru çok önemlidir.

Yakıt pili sisteminde ana kayıplar yakıt pili grubunda gerçekleşir. Burada tüketilen enerjinin bir kısmı direnç kayıpları ve diğer kayıplar yüzünden ısıya dönüşür. Yakıt pili sisteminde ikincil büyük kayıp hava kompresöründe havayı sıkıştırmak için, pompalarda suyu pompalamak için tüketilen elektrik enerjisinden kaynaklanmaktadır. Yakıt dönüştürme sistemli yakıt pillerinde seyreltik hidrojen ( Yani % 100 hidrojen kullanılmaz. Dönüştürücü

gaz içinde CO ve CO<sub>2</sub> 'de bulunur.) kullanılır. Buradaki kayıplar benzin ve metanolün dönüştürülmesi sırasındaki kayıplar ve dönüştürülen gazın temizlenmesi sırasındaki kayıplar. Bunun yanında yakıt pili sisteminde seyreltik hidrojen kullanımıyla sisteme giren hidrojenin tamamının reaksiyona girmemesi. Yakıt kullanımı genelde % 85 dir ( Rajashekara, 2000 ).

#### **4.1 Hibrid Yakıt Pili Taşıtı ( Yakıt Pili + Batarya )**

##### **4.1.1 Hibrid Yakıt Pili Taşıtı Özellikleri**

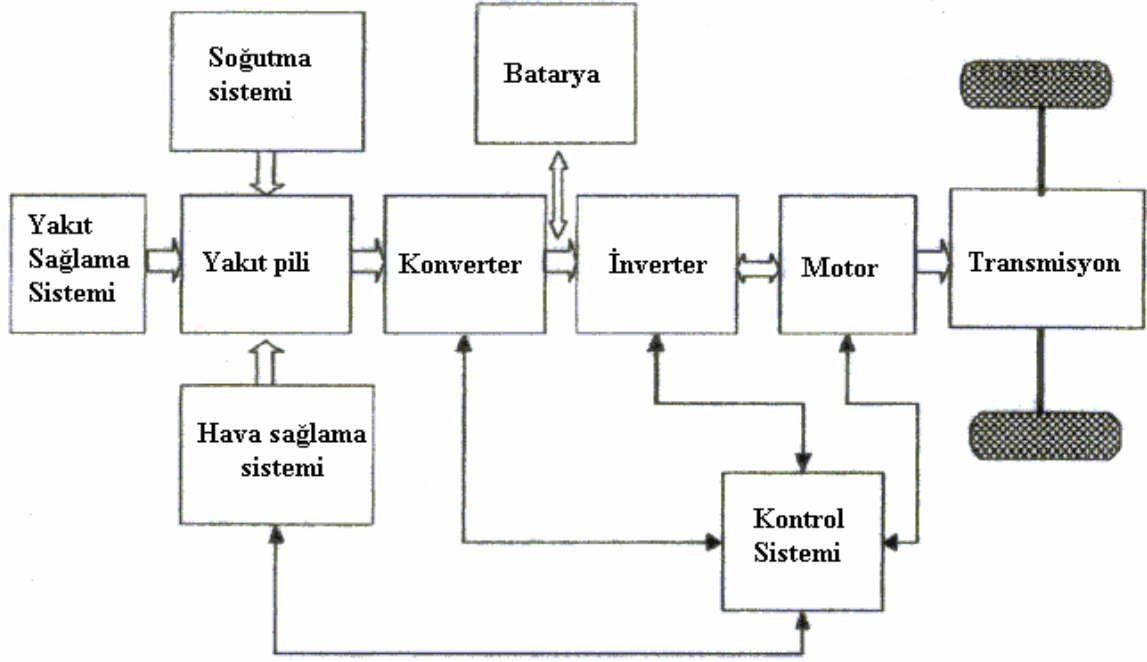
Yakıt pili taşıtlarının hibridleşmesi, yakıt pilinin boyutunu batarya kullanarak azaltmaya imkan verir. Yüksek yüklerde ve hızlanma gibi istenen güç yüksekse, hibridleşme yakıt pili sistemini çok verimli bir şekilde çalışmasını sağlar. Taşıtı üretiminin başlangıç maliyeti, pahalı yakıt pili maliyetinin düşürülmesi ile azaltılmış olur. Taşıtı istediği güç düşükse yakıt pili istenen gücü sağlar. Batarya kullanımı yakıt pilinin hızlı başlatılması ve rejeneratif frenleme enerjisinin elde edilmesini sağlar. Hibridleşmenin dezavantajı taşıtı sisteminin karmaşıklığı, ağırlık artışı sağlaması, kontrol sisteminin karmaşıklığı ve fazladan batarya maliyetidir.

Hibrid yakıt pili sisteminde iki enerji durumu vardır. Birincisi yakıt pili sistemi seyir hali için istenen tüm gücü taşıtı sağlarken batarya yalnızca taşıtı başlatılması ve maksimum güç sağlamak için kullanılır. Yakıt pili gücü batarya şarj durumuyla etkilenir. Çünkü bataryanın tamamıyla boşalması veya aşırı şarj edilmesi önlenmelidir. Güç isteklerinde ani artışlar minisaniye ölçekli zamanda meydana geldiği zaman, büyük miktarda elektrik gücü bataryadan alınır. Çünkü dinamik cevap zamanı 100 ms civarında olup yakıt piline istenen yükü sağlayacak yakıtın sağlanması mümkün olmadığından bu istek yakıt pili sisteminde ani olarak gerçekleştirilemez ( Braun vd., 2003 ). İkinci enerji durumu batarya yalnızca yardımcı olarak kullanılmaz, aynı zamanda yakıt pili sisteminden istenen güç dağılımını etkilemede kullanılır. Hibrid sistem içinde uygulanan ani yük değişimleri yakıt pili sistemi yerine batarya tarafından sağlanması ile önlenir.

Şekil 4.2 de yakıt pili hibrid taşıtı gösteriliyor. Taşıtı yakıt pili sistemi, yardımcı güç bataryası, motor ve kontrol sisteminin bulunduğu güç aktarma sisteminden oluşur. Yakıt pili sistemi hava sağlama, yakıt sağlama ve soğutma sisteminden oluşur. Yakıt pili voltajı genellikle taşıtınkenden daha düşüktür. Yakıt pili voltajını artırmak grup miktarının artırılmasıyla



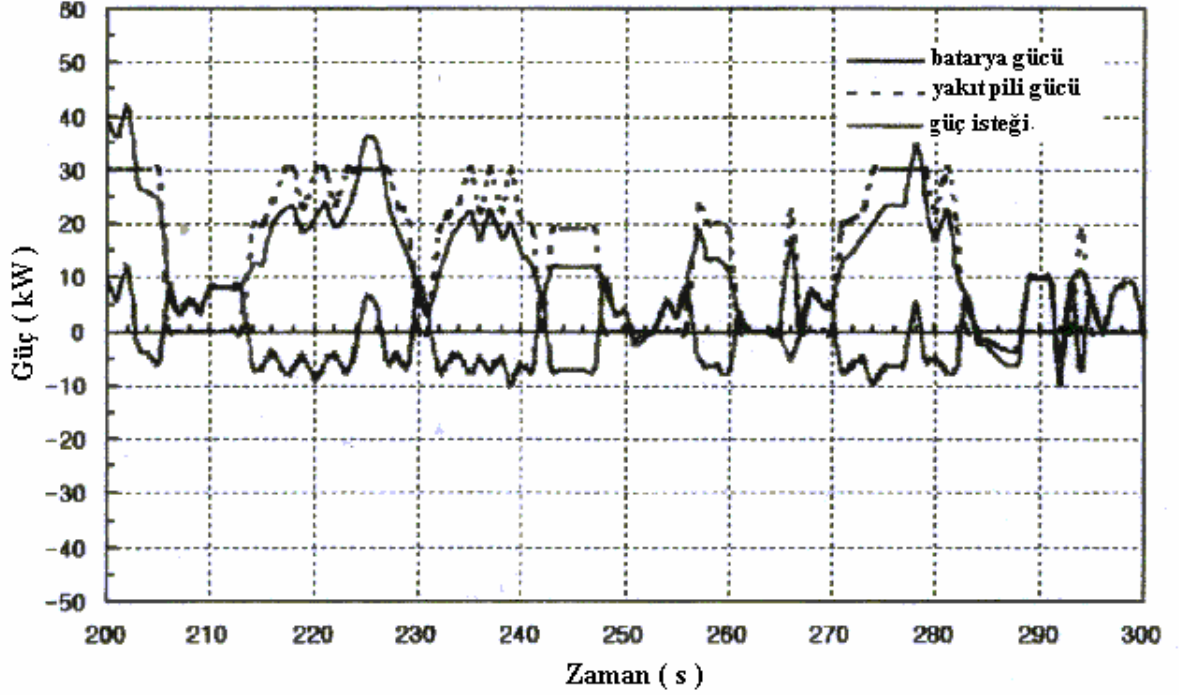
sağlanabilir. Ama genelde dc-dc konverter ve dc-ac inverter kullanılır. Aynı zamanda motor ve transmisyon bu sistemde kullanılır. Kontrol sistemi sıcaklık, basınç, nemlendirme, batarya şarj durumu, şarj-boşalma akımı, yardımcı konverter ve hibrid güç çıkışı gibi çalışma şartlarını düzenler.



Şekil 4.2 Yakıt pili hibrid taşıtı ( Jeong ve Soo Oh, 2002 ).

Yakıt pili hibrid taşıtlarında bataryanın görevi; Taşıt elektrik araçlarının enerji kaynağı, rejeneratif frenleme ile enerji depolama, düşük yüklerde yakıt pilinden üretilen elektrik enerjisini depolama, yüksek yükte yakıt pili gücüne yardım etmek, taşıt çok düşük yükte çalışırken ana enerji sağlayıcı olarak çalışmaktır.

Yakıt pilinde hibrid kontrol metodu batarya şarj durumuna bağlıdır. İstenen yakıt gücü, yakıt pili maksimum gücünün % 20 'sinden daha düşükse, batarya taşıtın tüm gücünü sağlar ve yakıt pili kapatılır. İstenen taşıt gücü yakıt pili maksimum gücünden daha büyükse batarya güç sağlamaya başlar. Batarya şarj durumu yakıt pili maksimum gücünün % 20 ile 80 'ni arasındadır. Batarya şarj durumu % 40 'ın altında ise batarya şarj edilmeye başlanır ve % 80 'in üzerinde şarj işlemi durdurulur.



Şekil 4.3 30 kW yakıt pili ve 45 kW 'lık batarya gücü için simülasyon programına göre taşıt güç isteği yakıt pili güç çıkışı ve batarya güç çıkışı gösteriliyor ( Jeong ve Soo Oh, 2002 ).

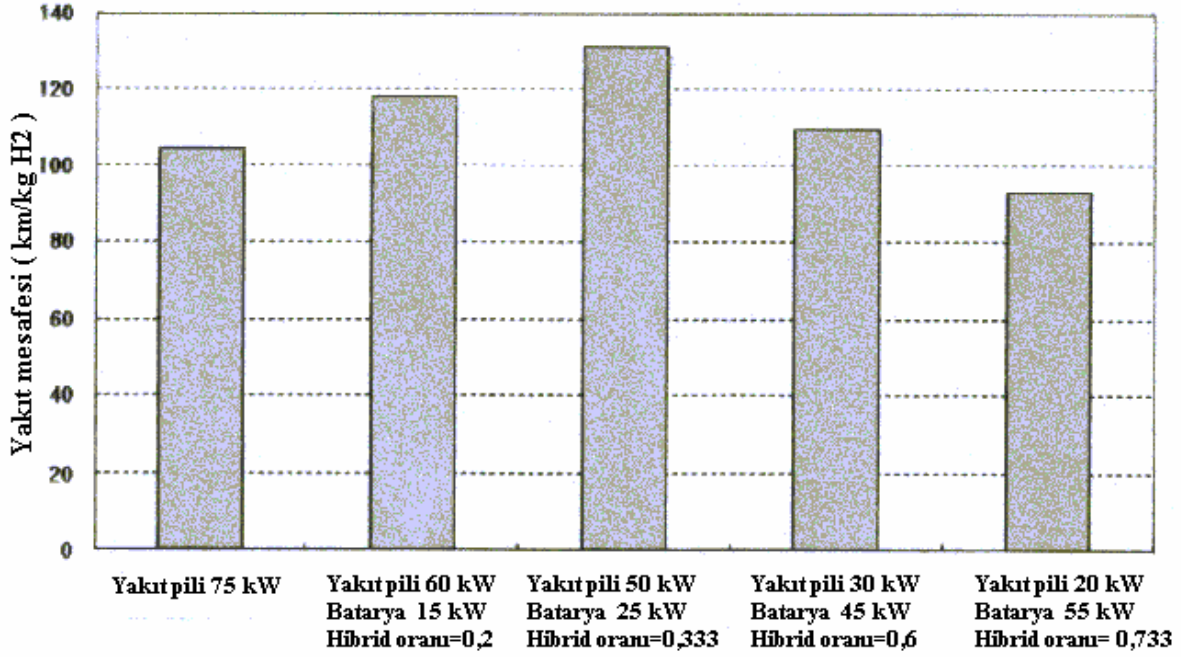
Şekil 4.3 de 30 kW yakıt pili ve 45 kW 'lık batarya gücü için simülasyon programına göre taşıt güç isteği yakıt pili güç çıkışı ve batarya güç çıkışı gösteriliyor. Yakıt pili yalnızca 6-30 kW arası güç istendiği zaman çalışır. Batarya tek başına yalnızca 6 kW dan daha az güç istendiği zaman çalışır. Batarya ve yakıt pilinin her ikisi, istenen güç 30 kW 'ı geçtiği zaman çalışır. Taşıt yavaşlama ve frenleme yaptığı zaman rejeneratif enerji elde edilir ve depolanır.

Yakıt pili hibrid taşıtının yakıt ekonomisi kontrol metodu ve çalışma şartlarıyla değişir.

Hibridleşme oranı=(Maksimum taşıt gücü–Maksimum yakıt pili grubu)/Maksimum taşıt gücü

75 kW yakıt pili hibrid taşıtının yakıt ekonomisi simülasyon sonuçları şekil 4.4 de gösteriliyor. Buna göre batarya gücünün 25 kW 'a kadar artışı yakıt ekonomisini artırır. Çünkü rejeneratif frenleme enerjisinin elde edilmesi ve bataryada depolanması yüzünden bir artış gerçekleşir. Yakıt pili verimi düşükse bataryanın çalışmasıyla yakıt pili verimli bir şekilde çalıştırılır. Yakıt ekonomisi hibrid oranı 0,2 'den 0,33 takinden daha düşüktür. Çünkü bataryanın küçük olması batarya akımının büyük olması yüzünden batarya şarz boşalma verimini düşük olması yüzündendir. Hibridleşme oranı 0,33 'den daha yüksek olduğunda yakıt ekonomisi azalır. Çünkü batarya ana taşıt güç kaynağı olduğundan şarz boşalma zamanı

ve bataryadan alınan akımın artması yüzündendir. Batarya gücü 55 kW ve yakıt pili gücü 20 kW olduğunda 75 kW komple yakıt piline göre verim daha düşüktür.



Şekil 4.4 75 kW 'lık yakıt pili hibrid taşıtının yakıt ekonomisi simülasyon sonuçları gösteriliyor ( Jeong ve Soo Oh, 2002 ).

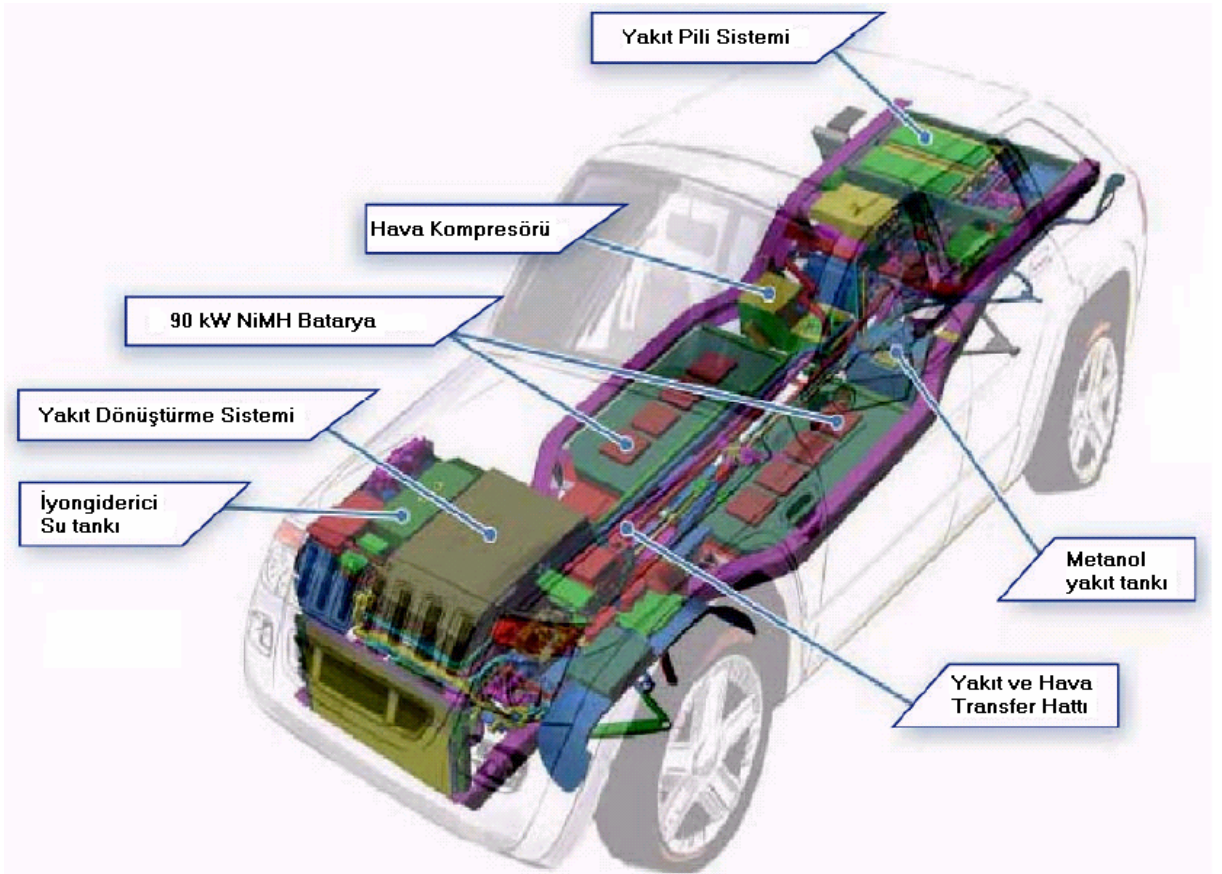
Otomotiv üreticileri tarafından üretilen hibrid yakıt pili taşıtları; Daihatsu MOVE EV-FC (1999) ve MOVE FCV K2 ( 2001 ) taşıtları, DaimlerChrysler'in Jeep Commander2 ( 2000 ) , NeCar5.2 ( 2001 ) , Natrium ( 2001 ) , F-Cell ( 2002 ) taşıtları, Esoro 'nın Hycar ( 2001 ) taşıtı, Fiat'ın Seicento Elettra H<sub>2</sub> Fuel cell ( 2001 ) taşıtı, Ford'un Advanced Focus FCV ( 2002 ) taşıtı, GM-Opel'in EV1 FCEV ( 1997 ) taşıtı, GM'nin Precept FCEV ( 2000 ) , HydroGen1 (2000), Chevy S-10 ( 2001 ) , Phoenix ( 2001 ) taşıtı, Hondanın FCX-V1 ( 1999 ) , FCX-V3 (2000), FCX-V4 ( 2001 ) , FCX ( 2002 ) taşıtları, Mazdanın Demio ( 1997 ) taşıtı, Mitsubishi'nin SpaceLiner ( 2001 ) ve Grandis FCV taşıtları, Nissanın R'nessa ( 1999 ) , Xterra ( 2000/2001 ) , X-TRAIL ( 2002 ) taşıtları, ve Hyundai'nin Tuscon FCEV ( 2004 ) taşıtıdır.

#### 4.1.2 Jeep Commaner 2 Hibrid Yakıt Pili Taşıtı

Jeep Commaner 2 metanol dönüştürücülü yakıt pili taşıtı, Jeep Grand Cherokee esaslıdır. Batarya anlık güç ve frenleme enerjisini elde edilmesine sağlar. Şekil 4.5 de Jeep Commaner 2'nin yerleştirme düzeni gösteriliyor.

Yakıt dönüştürme sistemi taşıtın önünde, beraberinde iyongiderici su tankı vardır. Yakıt pili grupları, hava kompresörü ve düşük sıcaklık CO temizleme ünitesi ( tercihli oksidasyon ) taşıtın arkasına yerleştirilmiştir. Batarya taşıtın merkezine yerleştirilmiştir. Elektrik güç aktarma sistemi iki tane ön ve arka aksda beraberinde inverter ve tahrik motorundan oluşur. Çizelge 4.1 de Jeep Commander 2 nin teknik özellikleri veriliyor.

Yakıt pili motoru; PEM yakıt pili grupları ve metanol yakıt dönüştürme sisteminden oluşur. Yakıt dönüştürme sistemi Xcellis tarafından geliştirilmiş olup Ballard tarafından üretilen iki adet 25 kW yakıt pili grubu kullanılmıştır. Yakıt pili grupları anot tarafında nemlendirilmiş hidrojen ve katot tarafında nemlendirilmiş hava istiyor. Basınçlı çevre havası hava kompresörü tarafından katot tarafına oksitleyici olarak sağlanır. Yakıt dönüştürme sistemi anot için basınçlı nemli hidrojen sağlar.



Şekil 4.5 Jeep Commander 2 hibrid yakıt pili taşıtı ( Tran ve Cummins, 2001 )

Metanol buhar dönüştürme, metanol dönüştürmek için düşük ısı isteği ve daha yüksek hidrojen yoğunluğu verir. Şekil 4.6 da Jeep Commander 2 'nin metanol buhar dönüştürme

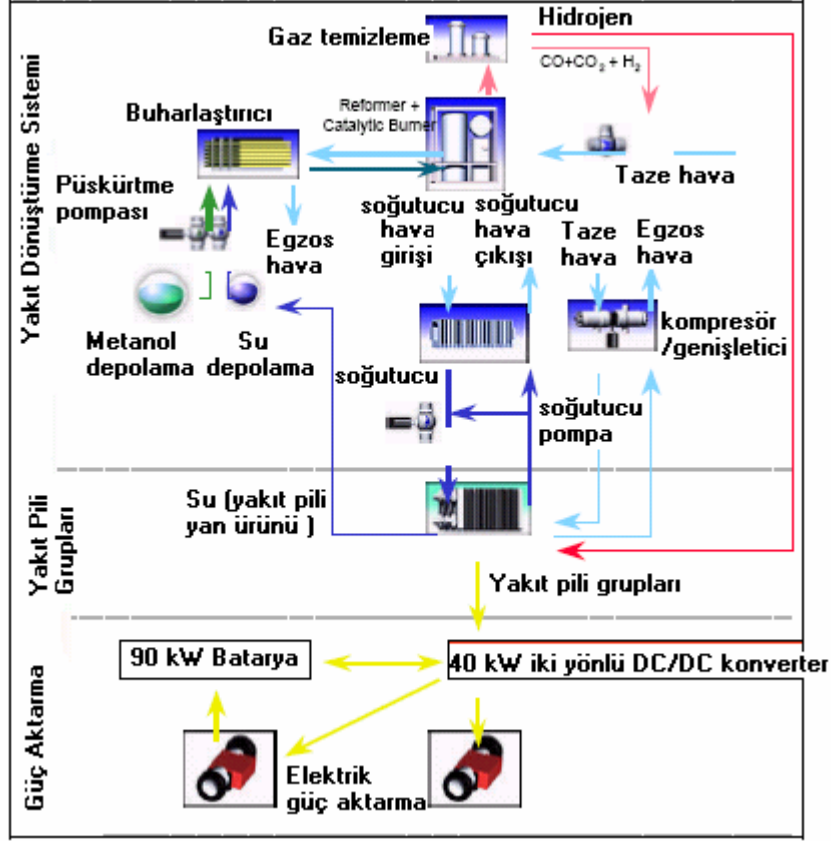
sistemi gösteriliyor. Taşıt soğuk çalıştırma ve normal çalıştırma olmak üzere iki moda çalışır. Soğuk çalıştırmada yakıt pili sistemi batarya kullanır, dışardan saf hidrojen ve metanol, yakıt dönüştürme sistemi normal çalışma sıcaklıklarına gelene kadar kullanılır. Yakıt pili motoru soğuk çalıştırmada hava kompresörü ve diğer birkaç yakıt pili yardımcı parçaları batarya gücünü iki yönlü DC/DC konverter vasıtası ile kullanır. saf hidrojen anot tarafına dışarıdan sıkıştırılmış hidrojen şişelerinden sağlanır. Yakıt pili grupları birkaç saniye içinde güç üretir ve tüm yardımcı parçalar yakıt pili grubundan gelen gücü kullanmaya başlar. Bu 6 kW anot elektrik gücü yakıt pili motorunun tümüyle ısınmasına yardım eder. Yakıt dönüştürme sistemi 240 °C sıcaklığa ısıtıldıktan sonra, metanol dönüşümü başlar. Yakıt dönüştürme parçaları onların dizayn edilen reaksiyon sıcaklığına ulaşana kadar dönüştürülmüş yakıt yanma odasında ve ardyakıcıda yakılır. Yakıt dönüştürme sistem sıcaklığı 270 °C' ye ulaşana kadar sistem ısıtılır.

Çizelge 4.1 Jeep Commander 2'nin teknik verileri

Yakıt pili taşıt adı	Jeep Commander 2
Taşıt aslı	Jeep Grand Cherokee
Boyutlar	4,72 m(l) x 2,03 m(w) x 1,76 m (h)
Ağırlık	2590 kg
Maksimum hız	140 km/h
Yakıt pili tipi / anma gücü	2 adet Ballard MK 705 PEMFC/50 kW
Motor tipi / anma gücü / tork / çalışma voltajı / ağırlık	Çift motors AC / 83kW / 229 Nm
Yakıt sağlama sistemi	Metanol buhar dönüştürme
Yakıt depolama	Metanol
Yardımcı batarya	90 kW NiMH

Normal çalışma modunda, metanol 40 l paslanmaz çelik yakıt tankından yakıt dönüştürme sistemine pompalanır. Yakıt dönüştürme sistemi buharlaştırıcı, dönüştürücü, tercihli oksidasyon üniteleri ( CO temizleme ünitesi ), yanma odası ve ardyakıcıdan oluşur. İlk olarak metanol ve su buharlaştırıcı içinde buhara dönüştürülür. Sonra dönüştürücüde metanol H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> 'den oluşan dönüştürülmüş gazı dönüştürülür. Yakıt pili sistemi CO<sub>2</sub> ile çalışabilir. Ama CO ile çalışamaz. CO PEM yakıt pilinde kullanılan Pt katalistte emilir ve PEM yakıt pili elektrotlarında hidrojen moleküllerinin reaksiyon bölgelerini tıkar. Böylelikle yakıt pili gücü azalır. CO 'i kaldırmak için tercihli oksidasyon üniteleri kullanımıyla CO, CO<sub>2</sub>'e

dönüştürülür. Tercihli oksidasyon üniteleri içinde ekzotermik reaksiyonda üretilen ısı, metanol buhar dönüştürme reaksiyonunda kullanılır. Anot egzusunda reaksiyona girmeyen hidrojen gazı yakıt dönüştürme sistemine ısı sağlamak için yanma odasına gönderilir. Bu işlem tüm sistem verimini artırır. Buna ek olarak dönüştürme sistemini çalışma sıcaklığında tutmak için istenen ısı çoksa, hava ve metanol yanma odasına gönderilerek yakılır.



Şekil 4.6 Jeep Commander 2 Metanol buhar dönüştürme sistemi ( Tran ve Cummins, 2001 ).

İki yönlü DC/DC konverter; Jeep Commander 2 de yakıt pili çalışma voltajı batarya voltajından ya düşüktür yada eşittir. Yakıt pilinin iki açık çalışma moduyla birlikte 60 kW DC/DC konverter geliştirilmiştir. Birinci olarak normal modda yakıt pili akım kaynağı olması sebebiyle DC/DC konverter akımı kontrol eder. DC/DC konverter , bataryayı şarj etmek ve iki tahrik motoruna güç vermek için çıkış voltajını artırır. İkinci modda yakıt piline başlatma modunda yardımcı parçaları çalıştırmak için batarya gücü sağlamak. 10 saniye zaman aralığında, DC/DC konverter voltaj kontrol modunda çalışır. Böylelikle konverter yakıt pili motorunun başlatılması için ana yardımcı parçalara uygun programlanmış voltaj çıkışı sağlar.



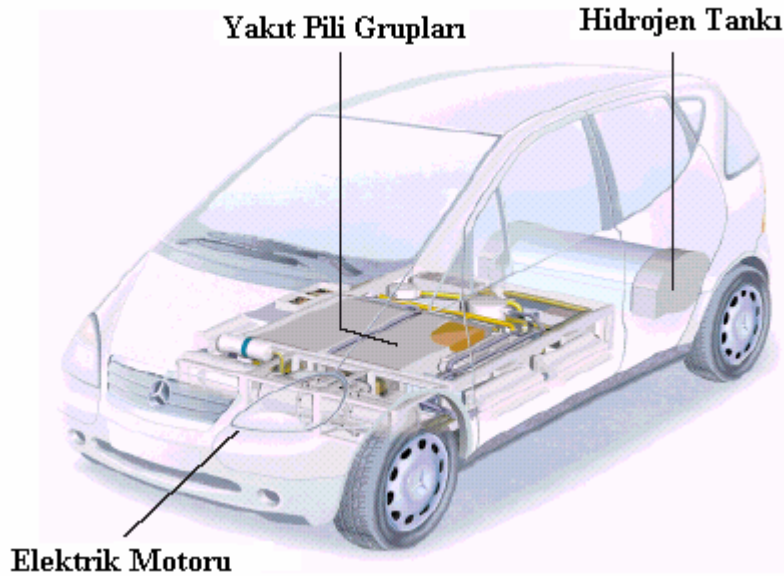
## 4.2 Sadece Yakıt Pili Kullanan Taşıtlar

### 4.2.1 Sadece Yakıt Pili Kullanan Taşıtların Özellikleri

Sadece yakıt pili kullanan taşıtları, taşıtın tüm gücünün yakıt pilinden karşılandığı taşıttır. Bu taşıtlarda batarya kullanılmaz. Sistem yakıt sağlama sistemi, yakıt pili sistemi, hava sağlama sistemi, soğutma sistemi, kontrol sisteminden oluşur. Üretilen güç elektrik motorundan tekerliklere iletilir.

Otomotiv üreticileri tarafından üretilen komple yakıt pili taşıtları; DaimlerChrysler 'in NeCar1 (1994), NeCar2 ( 1996 ) , NeCar3 ( 1997 ) , NeCar4 ( 1999 ) , Advanced NeCar4 (2000 ), NeCar5 ( 2000 ), Sprinter ( 2001 ), Jeep Treo ( 2003 ) taşıtları, Ford'un P2000 HFC (1999), Focus FCV ( 2000 ), THINK FC5 ( 2000 ), GloCar ( 2003 ) taşıtları, GM'un Sintra (1997), Zafira ( 1998 ), HydroGen3 ( 2001 ), AUTOonomy ( 2002 ), Advanced HydroGen3 (2002 ) taşıtları, Honda'nın FCX-V2 ( 1999 ) ve Kiwami ( 2003 ) taşıtları, Hyundai'in Santa Fe SUV (2000) taşıtı, Mazda Premacy FCEV ( 2001 ) taşıtı, Suzuki Covie ( 2001 ) ve Mobile Terrace (2003) taşıtı, Toyota 'nın FINE-S ( 2003 ) taşıtı ve VW'in HyMotion ( 2000 ) taşıtıdır.

### 4.2.2 NeCar4 Yakıt Pili Taşıtı



Şekil 4.7 NeCar4'ün yakıt pili sisteminin ve H<sub>2</sub> tankının yerleşimi ( Friedlmeier vd., 2001 ).

NeCar4 beş kişilik, önden tahrikli, A sınıfı Mercedes-Benz esaslı komple yakıt pili taşıtıdır. Boyutları; uzunluk 3,57 m, genişlik 1,72 m, yükseklik 1,58 m'dir. 55 kW maksimum çıkış gücü veren senkronize elektrik motoru kullanılır. Elektrik gücü 160 pilli 2 adet Ballard tarafından üretilmiş yakıt pili grubundan alınır. Saf hidrojen yakıtı kullanıldığı için egzoz ürünü olarak yalnızca su oluşur. 5 kg sıvılaştırılmış hidrojen depolama tankıyla 450 km yol alır. Yakıt pili sisteminin tamamı taşıtın zeminine yerleştirilmiştir. Sıvılaştırılmış hidrojen tankı taşıtın arkasına yerleştirilirken elektrik motoru taşıtın önüne yerleştirilmiştir.

Maksimum taşıt hızı 145 km/h dır. NeCar4 taşıtı standart A sınıfı Mercedes taşıtıdan 300 kg daha ağırdır. Ortalama hidrojen tüketimi 1,1 kg H<sub>2</sub>/100 km. Yani 37,0 kWh/100 km, 4,0 l benzin/100 km veya 3,7 l dizel/100 km'ye eşittir. NeCar4 'ün tanktan tekerliklere verimi % 37,7 dir. O'dan 100 km/h'e 26,3 saniyede ulaşır. Gürültü ölçüm değeri 69,3 dB'dir.



Şekil 4.8 NeCAR4 komple yakıt pili taşıtı ( Friedlmeier vd., 2001 ).

### 4.3 Yakıt Pili Taşıt Verimi

Şekil 4.9 da yakıt pili sistem parçalarının verimleri gösteriliyor.

$\eta_{aktarma}$  ; Güç aktarma verimi

$\eta_{motor}$  ; Elektrik motor verimi

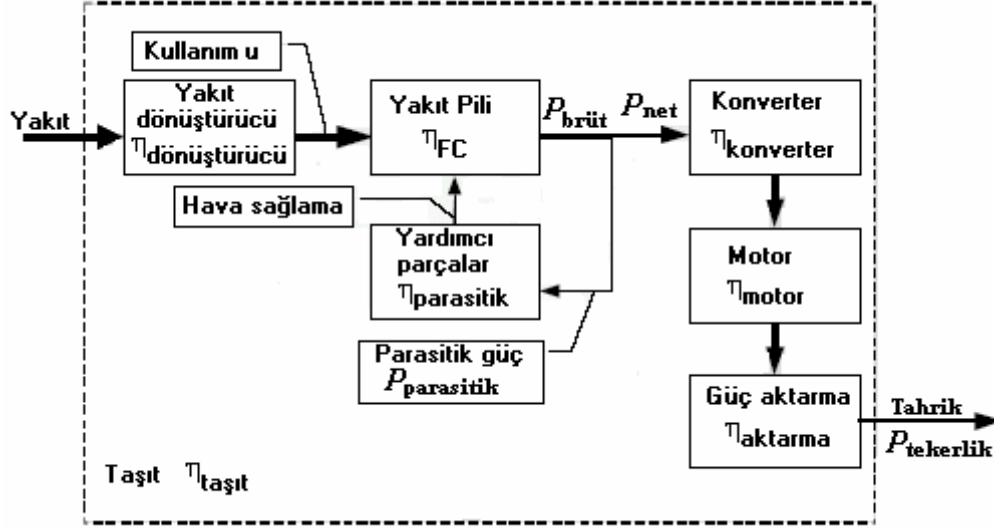
$\eta_{konverter}$  ; Konverter verimi

Yakıt pili sisteminden sağlanması gereken net güç;

$$P_{net} = \frac{P_{tekerlik}}{\eta_{aktarma} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{konverter}} \quad (4.1)$$



Sürüş gücü aynı zamanda yardımcı parçalara güç sağlar. Yardımcı parçaları tarafından tüketilen güç parazitik güç denir.  $P_{\text{parazitik}}$  şeklinde gösterilir.



Şekil 4.9 Yakıt pili sistem parçalarının verimleri ( Konrad vd, 2003 ).

$$P_{\text{Brüt}} = P_{\text{net}} + P_{\text{parazitik}} = \frac{P_{\text{net}}}{\eta_{\text{parazitik}}} \quad (4.2)$$

$$\eta_{\text{parazitik}} = \frac{P_{\text{net}}}{P_{\text{brüt}}} \quad (4.3)$$

Bu verim % 80-95 civarındadır ( Konrad vd, 2003 ).

Dönüştürücü verimi

$$\eta_{\text{dönüştürücü}} = \frac{h_{H_2} \cdot \dot{m}_{H_2}}{h_y \cdot \dot{m}_y} \quad (4.4)$$

Yakıt pili grup verimi ;  $\eta_{FC}$  dir. Yakıt pili sistem verimi

$$\eta_{\text{sistem}} = \eta_{\text{dönüştürücü}} \cdot u \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{\text{parazitik}}$$

u ; Yakıt kullanımı

$h_{H_2}$  ; Alt ısı değer ( kJ/kgK )

$\dot{m}_{H_2}$  ; Hidrojenin kütle akış hızı ( g/s )

Taşıtın toplam verimi;

$$\eta_{\text{taşıt}} = \eta_{\text{aktarma}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{konverter}} \cdot \eta_{\text{sistem}} \quad (4.5)$$

$$\eta_{\text{taşıt}} = \eta_{\text{aktarma}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{konverter}} \cdot \eta_{\text{dönüştürücü}} \cdot u \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{\text{parazitik}} \quad (4.6)$$

Yakıt pili düzeninde iki seçenek vardır. Eğer yakıt pilinde yüksek verimli hidrojen dönüşümü isteniyorsa seçilen pil voltajı oldukça yüksek olmalı ve akım yoğunluğu bu voltaja uygun olmalıdır. Bu seçenek için gerekli pil alanı, hacim, ağırlık ve grup maliyetleri daha yüksek olur. Çünkü malzeme fiyatları pil alanıyla doğru orantılıdır. Grubun yüksek güç yoğunluğuna sahip olması, hafif ağırlıklı ve ucuz olması için daha büyük akım yoğunlukları seçilmelidir. Bunun yanında pil voltajı ve dolayısıyla yakıt pili verimi azalır. Aynı zamanda daha yüksek pil yükü, grubun ve pillerin ömrünü azaltır.

$$P_{Brüt} = U_{pil} \cdot I \cdot n_{piller} = U_{pil} \cdot n_{grup} \cdot n_{piller/grup} \cdot j \cdot A_{aktif} \quad (4.7)$$

$U_{pil}$  ; ortalama pil voltajı ( V ), I ; akım ( A ),  $n_{pil}$  ; toplam pil sayısı,  $n_{grup}$  ; grup sayısı, j ; akım yoğunluğu ( A/cm<sup>2</sup> ),  $A_{aktif}$  ; aktif pil alanı ( cm<sup>2</sup> ).

Eğer toplam pil miktarı iki gruba ayrılırsa grupların akımı artırmak için paralel veya yüksek voltaj için seri olarak bağlanır. Güç sistemleri için toplam voltaj 250-400 V seviyesinde tutulur. Çünkü yüksek voltaj küçük ve etkin tahrik parçaları için gereklidir. Ama maksimum güç sırasındaki en düşük voltaj ve boş moddaki en yüksek voltaj arasındaki fark mümkün olduğunca küçük olmalı. Ortalama pil voltajı 0,7 V 'dur ( Konrad vd, 2003).

Aktif pil alanı

$$A_{aktif} = \frac{P_{Brüt}}{U_{pil} \cdot n_{grup} \cdot n_{piller / grup} \cdot j} \quad (4.8)$$

İstenen pil alanı

$$A_{pil} = \frac{A_{aktif}}{\alpha_{aktif}} \quad (4.9)$$

$\alpha_{aktif}$  = Aktif alanın iki kutuplu levha alanına oranı olup % 80-86 dır.

Bütün pil alanları  $A_{pil}$

$$A_{pil} = h_{grup} \cdot w_{grup} \quad (\text{yükseklik x genişlik}) \quad (4.10)$$

Grup uzunluğu

$$L_{grup} = n_{piller/grup} \cdot d_{pil} + 2d_{son\ levha} \quad (4.11)$$

$d_{pil}$  = bir pilin kalınlığı,  $d_{sonlevha}$  = son levha kalınlığı

$$\text{Grup hacmi ; } V_{grup} = ( n_{piller/grup} \cdot d_{pil} + 2d_{sonlevha} ) \cdot h_{grup} \cdot w_{grup} \quad (4.12)$$

$\eta_{aktarma} = 0,93$ ,  $\eta_{motor} = 0,9$ ,  $\eta_{konverter} = 0,95$ ,  $u = 0,8$  yakıt kullanımı

5 kW ortalama güç isteğinde

$$\eta_{FC} = 0,65 - 0,75 \text{ , } \eta_{dönüştürücü} = 0,75 - 0,82, \eta_{parasitik} = 0,8 - 0,9$$

Tüm taşıt verimi  $\eta_{\text{taşıt}} = 0,25 - 0,35$  'tir.

Yakıt pili taşıtında batarya kullanımı yakıt pili boyutunu azaltmasıyla maliyetin azalmasını, güç transistlerini azaltmasıyla veriminin artmasını, taşıtın başlatılmasını sağlaması ve rejeneratif frenleme enerjisinin elde edilmesiyle verimin artırılmasını sağlar. ENEA tarafından Altra otobüsünde yapılan yol testinde yakıt tüketimi 1,4 kWh/km iken frenleme enerjisinin elde edilmediği zaman yakıt tüketimi 1,8 kWh/km 'ye çıkmıştır. Argonne National laboratuvarı ( ANL ) Toyota, Prius ve Honda insight taşıtlarında frenleme enerjisinin elde edilmesiyle yakıt tüketiminde % 3,5 ile % 20 arasında kazanç elde edilmiştir ( Pede vd, 2004). Heinzl vd. ( 2005 ) 2,5 kW'lık doğalgaz buhar dönüştürücü ve 1 kW 'lık PEM yakıt pili ile birlikte bir sistem geliştirdiler. Yakıt pili grubunun yakıt kullanımı % 80 ve yakıt pili verimi  $\eta_{\text{FC}}$  % 50 'dir. Sistemde yakıt pili egzoz gazı dönüştürücüdeki yakıcıda yakılmasıyla dönüştürücü verimi  $\eta_{\text{dönüştürücü}}$  % 88,5 'dir. Yakılmazsa verim % 75'dir. Yakıt pili anot egzoz gazının dönüştürücü verimine katkısı % 13,5 dir. Bu sistemde dönüştürülmemiş metan hesaba katılmamıştır. Böylelikle toplam verim

$$\eta_{\text{toplam}} = \eta_{\text{FC}} \cdot \eta_{\text{dönüştürücü}} = ( 0,80 \times 0,50 ) \times 0,885 = 35 \%$$

Anot egzoz gazı kullanılmazsa

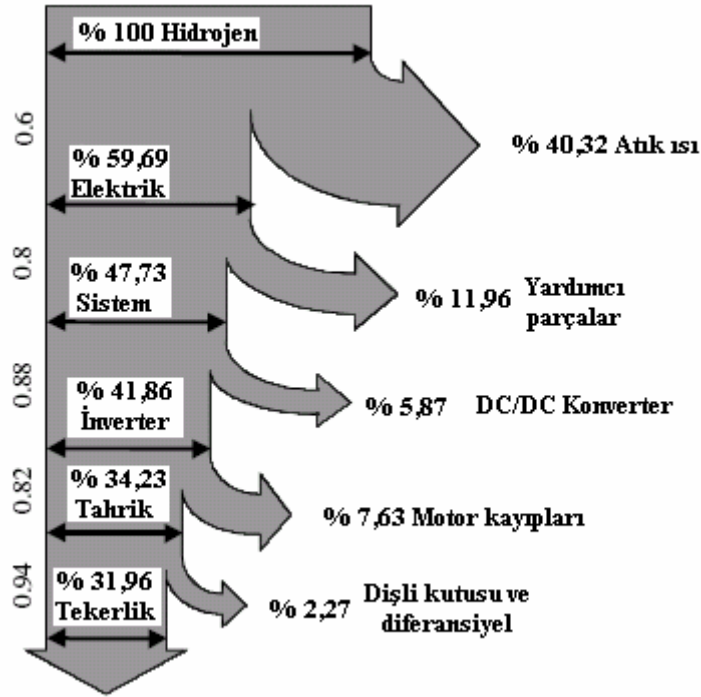
$$\eta_{\text{toplam}} = ( 0,80 \times 0,50 ) \times 0,75 = 30 \%$$

Günümüzde benzinli içten yanmalı motorlar kaynaktan tekerliklere yaklaşık % 17–18 'dir. Tanktan tekerliklere tüm taşıt verimi % 19–20 'dir ve kaynaktan tanka yakıt verimi % 90 'dır. Buna karşın doğalgazdan metanol üretimi için yakıt verimi % 67-71 dir. Metanol dönüştürücülü yakıt pili taşıtının içten yanmalı motorlarla rekabet edebilmesi için taşıt verimi en az % 25–27 olmalıdır ( Geissler vd., 2000 ).

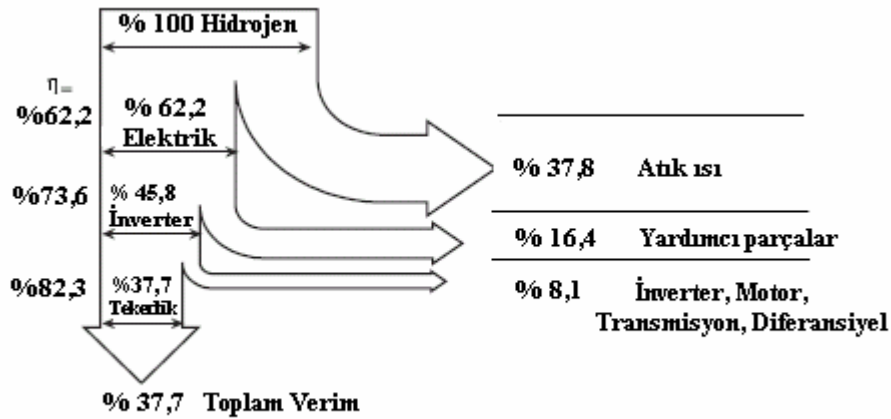
Yakıt pili sistemi gücüyle verim arasındaki bağlantı şöyledir. Düşük yükte, yakıt pili sistem verimi çok düşüktür. Çünkü hava sağlamak için hava kompresörünün çalışması, soğutma sisteminin çalışması ve nemlendirme sisteminin çalışması verimi azaltır. Yakıt pili verimi orta yükte yüksektir. Yüksek yükte yakıt pili verimi yakıt pili akım artışları yüzünden düşüktür.

Şekil 4.10 da NeCar 2 nin Sankey diyagramı gösteriliyor. Hidrojenin enerjisinin % 40,32 si atık ısı olarak atılır. % 59,69 elektriğe çevrilir. Enerjinin % 11,96 yardımcı parçalarda, % 5,87 'si DC/DC konverterde, % 7,63 elektrik motorunda, % 2,27 'si dişli kutusu ve diferansiyelde

kaybolur. Taşıtın tekerliklerine hidrojenin enerjisinin yalnızca % 31,96 'dır. Yani NeCar2 taşıtının toplam verimi % 31,96 'dır.



Şekil 4.10 NeCar 2 nin Sankey diyagramı ( Konrad vd., 2003 ).



Şekil 4.11 NeCar 4 nin Sankey diyagramı ( Friedkmeier vd., 2001 ).

Şekil 4.11 de ise NeCAR 4 taşıtının Sankey diyagramı gösteriliyor. Tüketilen hidrojenin enerjisinin % 62,2 si yakıt pili sisteminde elektriğe dönüştürülürken % 37,8 si atık ısı olarak atılır. Hidrojen enerjisinin % 16,4 'ü yardımcı parçalarda, % 8,1 'i inverter, elektrik motoru, transmisyon ve diferansiyelde kaybolur. Hidrojenin enerjisinin yalnızca % 37,7 si tekerliklere ulaşır. NeCar 4'ün taşıtının toplam verimi % 37,7 dir.

HydroGen 3 taşıtının veriminde % 36 dır ( Winter ve Hermann, 2003 ). Hwang vd. ( 2005 ) tarafından geliştirilen Mingdao hidrojen taşıtı seyir halinde % 30 verimle çalışır.

#### 4.4 Yakıt Pili Taşıtlı Maliyeti

Günümüzde taşıtlı maliyeti 500 \$/kW 'dır ( Browning, 2001 ). Yani bu 50 kW PEM yakıt pili motoru için 25000 \$'dır. Bu değer 70 kW içten yanmalı motorlarda 3500 \$ civarındadır. Ballard şirketi yılda 300000 yakıt pili grubu üretilmesiyle maliyetin 50-60 \$ civarına düşeceğini tahmin ediyor. Bu sayının artmasıyla maliyetin daha düşeceği biliniyor. 50 kW yakıt pili için yakıt dönüştürme maliyeti 16200 \$'dır ( Browning, 2001 ). Bu değerlerin gelecekte yakıt dönüştürme sistemleri için 7900 \$'a, 50 kW yakıt pili sistemi için 5550 \$'a düşmesi tahmin ediliyor. Günümüzde ortalama bir taşıtlı maliyeti 18900 \$ 'dır ( Browning, 2001 ). Bu değer direk hidrojen yakıt pili taşıtlı için 9170 \$ daha fazla, metanol dönüştürmeli yakıt pili taşıtlı için 9950 \$ ve benzin dönüştürmeli yakıt pili taşıtlı için 11100 \$ daha fazladır ( Browning, 2001 ).

Çizelge 4.2 Yakıt pili taşıtlı maliyetleri ( Orta dönem için ) ( Browning, 2001 ).

Taşıtlı tipi	Benzin Taşıtlı	Direk Hidrojen YP taşıtlı	Metanol dönüştürmeli YP taşıtlı	Benzin dönüştürmeli YP taşıtlı
Motor/Yakıt pili gücü ( kW )	107	58,1	62,2	61,5
Batarya net gücü (KW)		9,0	9,0	9,0
Motor gücü (kW)	107	67,1	71,2	70,5
Gövde ( \$ )	13000	13000	13000	13000
Motor/Yakıt pili ( \$ )	3130	5480	8390	8900
Transmisyon/Kontrol/Yardımcılar (\$)	2260	5280	5460	5430
Enerji depolama ( \$ )	70	2950	880	860
Değerli metaller ( \$ )	440	1460	1120	1810
Taşıtlı Satış Fiyatı ( \$ )	18900	28170	28850	30000
Artış Fiyatı ( \$ )	0	9170	9950	11100
Yakıt ekonomisi (mpgge)	30,6	76,2	49,0	45,5
Yakıt ekonomi oranı	1	2,5	1,6	1,5

## 5. YAKIT PİLİ TAŞITLARININ İÇTEN YANMALI MOTORLAR ve BATARYA ELEKTRİK TAŞITLARIYLA MALİYET, AĞIRLIK, HACİM, EMİSYON ve VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRILMASI

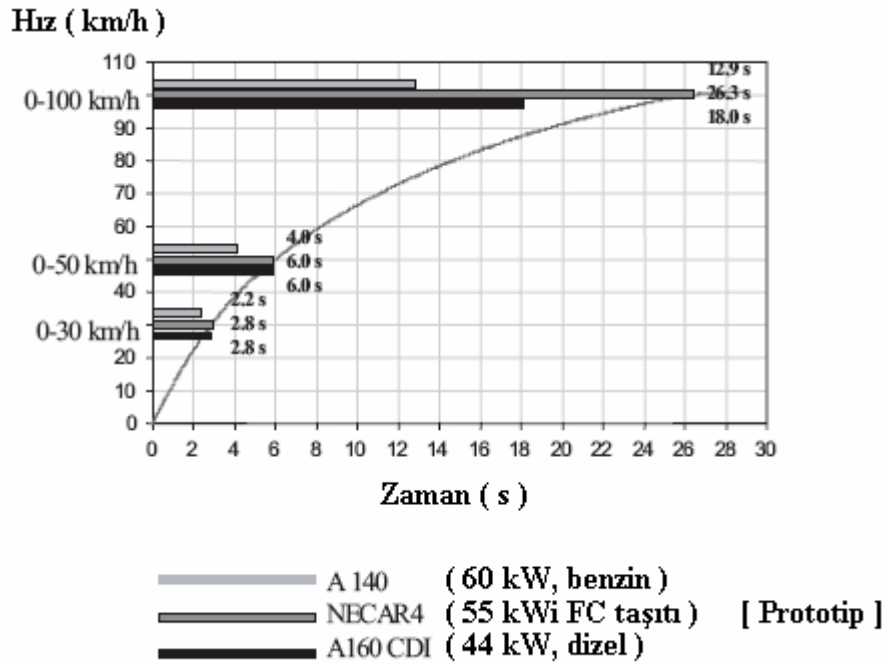
Mizsey ve Newson, ( 2001 ) yapmış oldukları çalışmada 5 güç aktarma sistemini karşılaştırdı. Bunlar günümüz içten yanmalı motoru, hibrid dizel güç aktarma merkezi santralde doğalgazdan üretilen hidrojenin taşıtta sıkıştırılarak kullanıldığı yakıt pili sistemi, metanol dönüştürmeli yakıt pili sistemi ve benzin dönüştürme yakıt pili sistemi. Bu sistemler ilk kaynaktan tekerliklere verimler, CO<sub>2</sub> emisyonları ve güç aktarma maliyeti bakımından karşılaştırıldı. İçten yanmalı motorlu taşıtlar yatırım maliyeti en düşük olandır. İlk kaynaktan tekerliklere en yüksek verim hibrid dizel sistemdir. Sıkıştırılmış hidrojen yakıt pili sistemi ve hibrid dizel sistemi kaynaktan tekerliklere en düşük CO<sub>2</sub> emisyon değerlerine sahiptir.

Yakıt pili sistemi, sistemin bölünmesi ve yerleştirilmesi bakımından içten yanmalı motorlardan daha esnektir.

Yakıt pili ve içten yanmalı motorları yakıt tüketimi olarak karşılaştırsak yakıt pilinin yakıt tüketimi çok düşüktür. NeCar 4 taşıtının ortalama hidrojen tüketimi 1,1 kg H<sub>2</sub>/100 km. Bu 37,0 kWh/100 km, 4,0 l benzin/100 km veya 3,7 l dizel/100 km 'ye eşittir. Bu değerler içten yanmalı motorlu A sınıfı standart model özellikleri, A140 60 kW benzin taşıtı için 7,1 l benzin/100 km, A160 CDI 44 kW dizel motoru için 4,5 l dizel/100 km ( Friedlmeier vd, 2001).

Yakıt pilinin içten yanmalı motorlarla hızlanma durumlarını karşılaştırsak yakıt pilleri içten yanmalı motorlarla rekabet edebilir. Yalnızca yüksek hızlarda hızlanma zamanı biraz daha azaltılmalı. NeCar 4 taşıtı 30 km/h 'e 2,8 saniyede, 50 km/h 'e 6,0 saniyede ve 100 km/h'e çıkma zamanı ise 26,3 saniyededir. Şekil 5.1 de 30 km/h 'e A140 benzin taşıtı 2,2 saniyede, A160 CDI dizel taşıtı ise 2,8 saniyede ulaşıyor. 50 km/h'e çıkma zamanı A140 benzin taşıtı için 4,0 saniye A160 CDI dizel taşıtı 6,0 saniyedir. 100 km/h'e A140 benzin taşıtı 12,9 saniyede, A160 CDI dizel taşıtı 18,0 saniyede ulaşır. NeCar4 yakıt pili taşıtı 50 km/h'e kadar benzin ve dizel yakıtıyla başedebilirken 50 km/h den 100 km/h 'e çıkma zamanı çok kötüdür. Yani yakıt pili taşıtlarının hızlanma kapasitesi yüksek hızlarda düzeltilmelidir. Bunun yanında

General Motorun HydroGen3 taşıtı 0 dan 100 km/h 'e 16 saniyede ulaşır ( Winter ve Herrmann, 2003). HydroGen3 taşıtı içten yanmalı motorlarla rekabet edebilir.



Şekil 5.1 0 'dan 100 km/h hıza 9 hızlanma testin zamana göre profili ( Friedlmeier vd. 2001 ).

Yakıt pillerinin içten yanmalı motorlarla gürültü açısından karşılaştırsak yakıt pili taşıtları daha sessizdir. NeCar 4 yakıt pili taşıtının gürültü seviye ölçümü 69,3 dB 'dir. Bu değer A140 benzin taşıtı için 72 dB ve A160 CDI dizel taşıtı için 71 dB 'dir ( Friedlmeier vd., 2001 ).

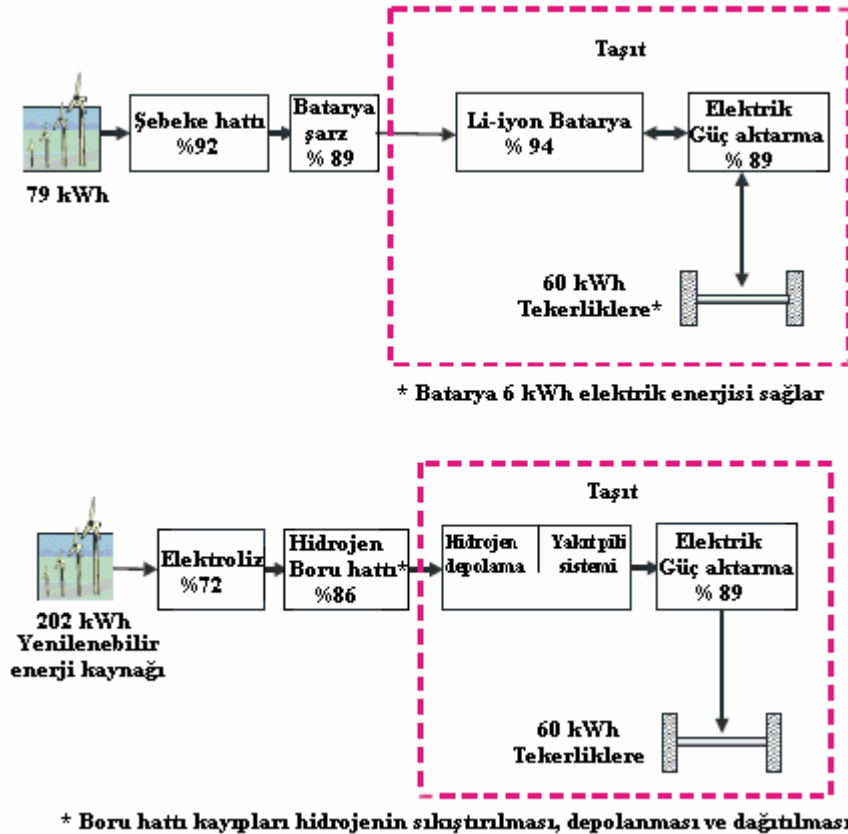
Yakıt pillerinin içten yanmalı motorlarla verim bakımından karşılaştırsak yakıt pilleri verim bakımından çok üstündür. HydroGen3 taşıtının verimi % 36, bu aynı performansdaki dizel taşıtında % 22, benzin taşıtında % 19-20 dir. NeCar2 nin verimi % 31,9 ve NeCar 4 'ün verimi % 37,7 dir. Bu verimler oldukça yüksektir.

İçten yanmalı motorlara zıt olarak, yakıt pili sistemi verimi kısmi yükte ve daha yüksek yükte azalmaz. Bu özellikler otomotiv uygulamaları için avantajdır. Çünkü taşıtlar çoğunlukla kısmi yük şartlarında çalışır. Örneğin Amerikada ortalama talep motor anma gücünün % 20 sinden daha azdır. Hidrojen yakıt pili taşıtlarının yakıt ekonomisi, içten yanmalı motor taşıtlarının yakıt ekonomisinin 2,5 - 3 katıdır ( Ahluwalia ve Wang, 2004).

Yakıt pilleri içten yanmalı motorlarla CO<sub>2</sub> emisyonu açısından karşılaştırsak direk hidrojen kullanıldığında hiçbir CO<sub>2</sub> emisyonu çıkmazken aynı performansdaki dizel taşıtımda km başına 177 g'dır ( Winter ve Herrmann, 2003).

Yakıt pili taşıtlarının içten yanmalı motorlara göre avantajları; Direk enerji dönüşümü (yanma yok ), enerji dönüşümünde hareketli parça yok, sessiz olması ve yakıt esnekliği sağlaması, yakıt pili taşıtları daha düşük enerji kullanımı, daha düşük hava kirliliği ve alternatif yakıtların kullanımının artmasını sağlaması, yakıt pili verimi sistemin boyutunun azalmasıyla keskin bir şekilde azalmaz, İçten yanmalı motor yerine yakıt pili sistemi konulmasıyla % 60 birincil enerji tüketimi tasarrufu sağlaması, CO<sub>2</sub> emisyonları yaklaşık olarak % 75 azaltılmasını sağlamasıdır.

Bataryalarla karşılaştırıldığında yakıt pillerinin enerji yoğunluğu daha büyüktür. Yakıt pili taşıtı bataryadan daha hızlı doldurulur. Bu zaman içten yanmalı motorlarla aynıdır.



Şekil 5.2 Batarya elektrik taşıtı ve yakıt pili taşıtı için ilk kaynaktan tekerliklere enerji kaynağı (Stephen ve James Eaves, 2004 ).



Stephen ve James Eaves, ( 2004 ) yapmış oldukları çalışmada yakıt pilleri ve batarya elektrik taşıtlarını maliyet açısından karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada batarya elektrik taşıtları için elektrik bataryaya şebeke güç hatlarıyla sağlanır. Şekil 5.2 de gösterilen batarya elektrik taşıtı ve yakıt pili taşıtı için ilk kaynaktan tekerliklere enerji kaynağını gösteriyor. Batarya elektrikli taşıtlar iki dönüşüm aşamasından oluşur. Birincisi hidroelektrik, güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektriğin üretilmesi ve ikinci aşama elektriği mekanik enerjiye dönüştürme. Tüm sistem verimi % 77 dir ( Çünkü rejeneratif enerji depolama ile 6 kW enerji elde edilir.). Yaklaşık olarak 79 kWh enerji arabanın tekerliklerine iletilmesi gereken 60 kWh enerjiyi teslim etmek için üretilir. Yakıt pili taşıtı için santralden gelen enerji hidrojen üretmek için suyun elektrolizi işleminde kullanılır. Hidrojen gazı sıkıştırılıp doldurma istasyonlarında dağıtılır. Bu istasyonlarda taşıta depolanır. Yakıt pili taşıtı enerji yolu dört dönüşüm aşamasından oluşur. 1. aşama yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi, 2. aşama elektrikten elektroliz yoluyla hidrojen üretimi, 3. aşama hidrojenen elektriğe dönüşme, 4. aşama elektrikten mekanik enerjiye dönüştürmedir. Yakıt pili taşıtı, batarya elektrikli taşıtlardan fazla olarak iki ek aşama vardır. Bu aşamalarda hidrojenen elektrik üretme verimi % 54 ve yakıt pili taşıtının tüm verimi % 30 dur. Yakıt pilleri yakıt pili başına 182 W güç teslim edebilir. Yakıt pili sistemi, elektrik güç aktarma sistemi ve depolama tankı istenen performansı sağlaması için 721 kg olmalıdır. Batarya taşıtında batarya ve elektrik güç aktarma ağırlığı 504 kg'dır. Yakıt pili 95 W/l güç teslim edilir. Yakıt pili sistemi, depolama tankı ve elektrik güç aktarma sistemiyle birlikte tüm hacim 1465 l 'dir. Lityum-iyon batarya 161 Wh/l güç teslim eder. Elektrik güç aktarma ve bataryanın hacmi 469 l'dir. Yakıt pili maliyeti kW başına 205 \$ dır. Buna elektrik güç aktarma ve hidrojen depolama tankıda eklenirse toplam maliyeti 29147 \$ dır. Elektrik güç aktarma batarya taşıtı ve yakıt pili taşıtı içinde aynı olup 3826 \$ dır. Batarya elektrikli taşıtı için Lityum-iyon batarya maliyeti 250 \$/kWh ve batarya taşıtının toplam maliyeti 19951 \$ dır. Sonuç olarak yakıt pilleri (yenilenebilir enerji kaynağı ana kaynak olmak üzere ) batarya elektrik taşıtından 2,6 kat daha çok enerji istiyor. Yakıt pili taşıtı batarya taşıtında % 43 daha ağır, 3 kat daha fazla yer işgal eder ve % 46 daha maliyetlidir.

## 6. SONUÇLAR

PEM yakıt pili çalışma sıcaklıklarında 10-20 ppm 'in üzerinde CO 'ya duyarlıdır. Bunun üzerindeki değerlerde katalist zehirlenmesi ortaya çıkar.

PEM yakıt pilinde iyonik iletkenliği sağlamak için elektrolit nemlendirilmelidir. Elektrolit içindeki su miktarının çok olması elektrotların suyla taşmasını dolayısıyla elektrotlara olan gaz iletimini engeller. Elektrolit içindeki suyun az olması iyonik iletkenliği azaltır.

PEM yakıt pilleri yüksek akım yoğunluğunda çalışması, oldukça çabuk çalıştırma ve talep edilen değişiklikler için oldukça hızlı cevap vermesi yüzünden otomobillerde tercih edilir.

Hidrojenin taşıtta yeteri kadar depolanması ve hidrojen dağıtım altyapısının olmaması yüzünden hidrojeni yakın dönem içinde metanol, benzin, etanol, dizel, nafta ve doğalgaz gibi hidrokarbon yakıtlardan dönüştürülerek elde edilmelidir. Uzak dönemde ise hidrojen hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal ve nükleer enerjiden elde edilen elektriğin suyun elektrolizinde kullanılmasıyla hidrojen üretilir ( 3.2 ).

Yüksek basınçlı tankta sıkıştırılmış hidrojen depolama diğer depolama yöntemlerine göre en basit olanıdır. Gaz çevre sıcaklığında depolanır. Böylelikle maliyetten ve ısı yalıtımından kazanılmış olunur. Gazın tanktan serbest bırakılması için yalnızca valfin açılması yeterlidir (3.2.1.4 ).

Ototermal dönüştürme ekzotermik kısmi oksidasyon ve endotermik buhar dönüştürmenin karşıt etkisi yüzünden düşük enerji ihtiyacına sahiptir. Bu sistem yüksek hidrojen yoğunluğuna sahip olması ve dışarıdan ısı ihtiyacı olmaması yüzünden yakıt dönüştürme sistemlerinde kullanılmalıdır.

Yakıt dönüştürme sisteminde dönüştürülen gazın içindeki CO 'yu PEM yakıt pili için uygun olan 10 ppm 'in altındaki CO değerine getirmek için en iyi yöntemin önce su-gaz değişim reaksiyonu ondan sonrada tercihli oksidasyon sistemi kullanılmasıdır (3.2.3.3 ).

Hidrojen depolama sistemi metanol ve benzin dönüştürme sistemlerinden daha basit, daha çok verimli ve daha düşük maliyetli olduğu için otomobillerde tercih edilmelidir ( 3.2.3 ).

Hava sağlama sisteminde taşıt tarafından istenen gazı sağlamak için yeterli hava sağlanmalıdır. Bunun içinde kontrol sistemi kullanılarak vantilatör motor hızı üreticiler tarafından tavsiye edilen 2,5 stokiyometrik oranı sağlamak için değiştirilmelidir ( 3.3 ).

Yakıt pili içten yanmalı motordan daha çok verimle çalışmasına rağmen yakıt pili soğutma sisteminde kaybolan ısının miktarı daha büyüktür. Bu yüzden yakıt pili sisteminde kullanılan radyatörler içten yanmalı motorlardakinden daha büyük olmalıdır ( 3.4 ).

Yakıt pili taşıtları gelecekte içten yanmalı motorlar ve elektrik taşıtlarıyla rekabet edebilmesi için daha iyi yakıt ekonomisi, dönüştürücülü yakıt pili sistemi için daha temiz emisyonlar ve aynı güçte performans ve tank mesafesi, aynı derecede güvenilirlik, her türlü atmosfer şartına, sıcaklığa ve yüksekliğe uyumlu olmak, yaklaşık olarak aynı maliyeti sağlamalı, hızlı başlatma ve hızlı transit cevap verebilme gibi özellikleri karşılamalıdır.

Yakıt pili taşıtında batarya kullanımı taşıttaki elektrikli araçların enerji kaynağı olması, rejeneratif frenleme ile enerji depolaması, düşük yüklerde yakıt pilinden üretilen elektrik

enerjisini depolaması, yüksek yükte yakıt pili gücüne yardım etmesi ve taşıt çok düşük yükte çalışırken ana enerji sağlayıcı olarak çalışmasını sağladığı için batarya kullanılmalıdır ( 4.1.1). Şimdilik yakıt pili maliyetinin yüksek olması sebebiyle batarya kullanımı yakıt pili boyutunun azaltmasıyla maliyeti azaltır.

Yakıt pili maliyeti gelecekte seri üretime geçilmesi ile içten yanmalı motorlardan 10000 \$ daha fazla olacaktır ( orta dönem içinde ). Buda bize bu araçların gelecekte herkez tarafından alınabileceğini gösteriyor ( 4.4 ).

Yakıt pili taşıtları içten yanmalı motorlardan daha az yakıt tüketir. Hızlanma süresi içten yanmalı motorlarla rekabet edebilecek seviyededir. Yalnızca yüksek hızlarda hızlanma zamanı biraz daha azaltılmalıdır ( 5 ).

İçten yanmalı motor yerine yakıt pili sistemi kullanılması ile % 60 birincil enerji tüketimi tasarrufu sağlanır. CO<sub>2</sub> emisyonları yaklaşık % 78 azalır ( 5 ).

Yakıt pilleri ( yenilenebilir enerji kaynağı ana kaynak olmak üzere ) batarya elektrik taşıtıdan 2,6 kat daha çok enerji ister. Yakıt pili taşıtı batarya taşıtıdan % 43 daha ağır, üç kat daha fazla yer kaplar ve % 46 daha maliyetlidir ( 5 ).

**KAYNAKLAR**

Ahluwalia ve Wang, ( 2005 ) “Direct hydrogen fuel cell systems for hybrid vehicles”, Journal of Power Sources, 139: 152-164.

Ananthachar, ( 2002 ) “Efficiencies of hydrogen storage systems on board fuel cell vehicles”, [www.umi.com](http://www.umi.com) , Umi Number: 1411281.

Browning, ( 2001 ) “Projected automotive fuel cell use in california”, California Energy Commission.

Corbo vd, ( 2005 ) “Experimental study of a fuel cell power train for road transport application”, Journal of Power Sources.

Friedlmeier vd., ( 2001 ) “Test experiences with the DaimlerChrysler fuel cell electric vehicle NeCar4”, Fuel Cell 2001, 1, No:2, 92-96.

Geissler vd., ( 2001 ) “Autothermal methanol reforming for hydrogen production in fuel cell applications”, PCCP, 3: 289-293.

Gregor Hoogers, ( 2002 ) “Automotive Applications”, Fuel Cell Handbook, 10. Bölüm.

Han vd., ( 2002 ) “Metal membrane-type 25-kW methanol fuel processor for fuel-cell hybrid vehicle”, Journal of Power Sources, 112: 484-490.

Han vd., ( 2000 ) “Purifier-integrated methanol reformer for fuel cell vehicles”, Journal of Power Sources, 86: 223-227.

Heinzel vd., ( 2005 ) “Increasing the electric efficiency of a fuel cell system by recirculating the anodic offgas” , Journal of Power Sources .

Holladay vd., ( 2002 ) “Microfuel processor for use in a miniature power supply”, Journal of Power Sources, 108: 21-27.

Huang vd., ( 2005 ) “Modeling of CO<sub>2</sub>-selective water gas shift membrane reactor for fuel cell”, Journal of Membrane Science.

Hwang vd., ( 2005 ) “Development of a lightweight fuel cell vehicle”, Journal of Power Sources, 141: 108-115.

Jacob Brauwer, (2001) "Fuel Cells"

Jeong ve Soo Oh, ( 2002 ) "Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle", *Journal of Power Sources*, 105: 58-65.

Kojima vd., ( 2004 ) "Compressed hydrogen generation using chemical hydride", *Journal of Power Sources*, 135: 36-41.

Konrad vd., ( 2003 ) "System design for vehicle applications: Daimler Chrysler", *Handbook of Fuel Cells*, Chapter 58.

Krumpelt vd., ( 2002 ) "fuel processing for fuel cell systems in transportation and portable power applications", *Catalysis Today*, 77: 3,16.

Lindztröm ve Pettersson, ( 2003 ) "Development of a methanol fuelled reformer for fuel cell applications", *Journal of Power Sources*, 118: 71-78.

M. Arita, ( 2002 ) "Technical issues of fuel cell systems for automotive application", *Fuel Cells* 2002,2,No:1, 10-14.

Mizsey ve Newson, ( 2001 ) "Comparison of different vehicle power trains", *Journal of Power Sources*, 102: 205-209.

Moon vd., ( 2001 ) "Studies on gasoline fuel processor system for fuel-cell powered vehicles application", *Applied Catalysis A: General*, 215: 1-9.

Moore vd., ( 2005 ) "A dynamic simulation tool for hydrogen fuel cell vehicles", *Journal of Power Sources*.

Nelson vd., ( 2000 ) "Systems integration, modelling and validation of a fuel cell hybrid electric vehicle" , Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.

Ogden vd., ( 1999 ) "A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles; implications for vehicle design and infrastructure development", *Journal of Power Sources*, 79: 143-168.

Pede vd., ( 2004 ) “FC vehicle hybridisation: an affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train”, Journal of Power Sources, 125: 280-291.

R.v. Helmolt, ( 2004 ) “Fuel cell vehicles at General Motors”, Fuel Cells 2004, 4, No:4, 264-268.

Rajashekara, ( 2000 ) “Propulsion system strategies for fuel cell vehicles”, Fuel Cell Technology for Vehicles, 2000-01-0369: 179-187.

Rogg vd., ( 2003 ) “Cooling modules for vehicles with a fuel cell drive”, Fuel Cells 2003, 3, No:3, 153-158.

Schlecht, ( 2003 ) “Competition and alliances in fuel cell power train development”, International Journal of Hydrogen Energy, 28: 717-723.

Severin vd., ( 2005 ) “Compact gasoline fuel processor for passenger vehicle APU”, Journal of Power Sources.

Simmons JR, ( 2003 ) “Characteristics of hydrogen production via iso-octane autothermal reforming for fuel cell vehicles”, University of Florida.

Stephen ve James Eaves ( 2004 ) “A cost comparison of fuel cell and battery electric vehicles”, Journal of Power Sources, 130: 208-212.

Sundaresan ve Moore, ( 2005 ) “Polymer electrolyte fuel cell stack thermal model to evaluate sub-freezing startup”, Journal of Power Sources.

Takeda vd., ( 2002 ) “Performance of a methanol reforming system for a fuel cell powered vehicle and system evaluation of a PEFC system”, JSAE Review, 23: 183-188.

Takeichi vd., ( 2003 ) “Hybrid hydrogen storage vessel, a novel high-pressure hydrogen vessel combined with hydrogen storage material”, International Journal of Hydrogen Energy, 28: 1121-1129.

Tran ve Cummins, ( 2001 ) “Development of the Jeep Commander 2 fuel cell hybrid electric vehicle”, Society of Automotive Engineers, 2001-01-2508.

Vanston ve Elliot, ( 2003 ) “Fuel cells: a technology forecast”, Texas State Technical College.

Winter ve Herrman, ( 2003 ) “Hydrogen automobile heads toward series production  
HydroGen3 puts fuel cells on the road”, Fuel Cell 2003, 3, No:3, 141-146.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi	13.09.1980	
Doğum Yeri	İstanbul	
Lisans	1998-2002	Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi İngilizce Hazırlık
	2003-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı