

HİDROJEN YAKITLI MOTOR TEKNOLOJİSİ

Erdal ORAL *

Veli ÇELİK **

Sanayi devriminin lokomotif rolünü üstlenmiş olan fosil yakıtlar (petrol, kömür) ve devamı olan doğal gaz rezervleri sınırlıdır. Aynı zamanda çevre problemlerinde de en büyük etmenlerdendir. Tüm bu nedenler, alternatif yakıt ya da kaynaklara gereksinimi ortaya çıkarmıştır. Hidrojen bu alternatiflerden olmaya aday; sınırsız, temiz ve verimli bir yakıttır. Diğer alternatif enerji kaynaklarının depo edilme sürecinde taşıyıcı rolü üstlenebilecektir.

Bu çalışmada hidrojen yakıtlı motor teknolojisinin tanıtılması amaçlanmıştır. Hidrojenin direkt olarak içten yanmalı motorda kullanımı ve bunun motor performansına etkileri incelenmiştir. Yeni bir enerji dönüşüm sistemi olan ve yakıt kimyasal enerjisinin direkt elektrığe dönüşümünü sağlayan yakıt pilinin yapısı, çeşitleri, çalışma prensibi araştırılmıştır. Yakıt pili teknolojisi ile hareket eden taşıt sistemi ve sistem üniteleri incelenmiştir.

Anahtar sözcükler : Alternatif enerji, hidrojen, yakıt pili, motor

Fossil fuels, (oil, coal) playing a role of industrial revolution's locomotive and natural gas are restricted with their sources. They are also great factors of the environmental problems. All these reasons require alternative fuels or sources. Hydrogen fuel is a candidate for one of them which is unlimited, clean, efficient. It may play a role as carrier for storing the other alternative energy sources.

In this study, it is aimed to introduce the hydrogen fueled engine technology. Hydrogen usage directly in the internal combustion engines and its effects of the engine performance are investigated. Fuel cell that is a new energy conversion system and directly converts the chemical energy to electrical are examined based on structural, kind and working principal. Vehicle system working fuel cell technology and system units are studied.

Keywords : Alternative energy, hydrogen, fuel cell, engine

* Arş. Gör., Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

** Prof. Dr., Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

GİRİŞ

Enerji, insanlığın dünyadaki birincil ve ikincil ihtiyaçlarını karşılamada gereksinim duyduğu en önemli olgudur. Bu gereksinim günümüze kadar farklı kaynaklardan karşılanmıştır. Son yüz-yüzelli yılı dikkate aldığımızda ise; kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kökenli yakıtlar bu ihtiyaçta temel kaynak rolünü üstlenmişlerdir.

Dünyadaki enerji ihtiyacı; nüfus artışı, sanayileşme ve yeni ihtiyaç portföyü ile hızla artmaktadır. Buna karşın günümüz dünyasının temel enerji kaynağı olan fosil yakıtlarda artış olamamakta, yani kaynakların ihtiyacı karşılayamadığı bir noktaya doğru gidilmektedir [1]. Bütün bu nedenler, yeni enerji kaynakları gereksinimini doğurmaktadır. Yani alternatif enerjiler arayışı, kaçınılmaz hale gelmektedir.

Alternatif enerji kaynaklarına geçişteki en önemli neden fosil yakıtların sınırlı olması yanında, ekolojik çevreye verdikleri telafisi güç zararlardır. Fosil yakıtların kullanımı ile birlikte yer kürenin ortalama sıcaklığı 500 bin yılın en yüksek seviyesine ulaşmıştır [1]. Bu ise son yıllarda yoğun hava kirliliği, sel, fırtına ve doğal afetlerin artışında etkili olmakta, yükselen yer küre ortalama sıcaklığı ile beraber buzullarda erimeler oluşmaktadır. Yani çevresel faktörler de alternatif yakıtları gündeme taşımaktadır.

Alternatif enerji kaynakları uzun süredir bilim adamlarının gündeminde yer almaktadır. Özellikle çevreye zararı en az, yenilenebilir ve düşük maliyetli olması alternatif bir enerji kaynağının taşınması gereken belli başlı niteliklerdir. Bu anlamda bugüne kadar; güneş, rüzgar, hidrolik, hidrojen, biyokütle, jeotermal ve okyanus termal enerjisi vb. gibi alternatif enerjilere yönelinmiştir. Elbetteki bu kaynakların tamamı şartlar çerçevesinde önem taşımaktadır. Yani; verimlilik, düşük maliyet, amaca uygunluk gibi kriterleri optimize eden çözüm, bu şartları oluşturur. Bu anlamda hidrojen enerjisi; yani hidrojen kaynaklı enerji de bu alternatiflerden birisini oluşturmaktadır.

Ulaşımın baş aktörü, taşıtlarda kullanılan enerji de bugüne değin hemen hemen tamamen fosil yakıtlardan karşılanmıştır. Yani taşıtlarda da alternatif yakıt zorunluluğu doğmaktadır. Bu amaçla taşıtlarda

elektrik, güneş, hidrojen enerjisi kullanımına yönelik araştırma çalışmalar tüm dünyada sürdürülmektedir. Yapılan çalışmalarda hibrid taşıtlar, bu yeni teknolojilerin adapte edilmesi sürecinde bir aracı rolü üstlenebilir görünmektedir. Bu amaçla tüm dünyada büyük otomotiv firmaları yoğun AR-GE, prototip üretim ve hatta seri üretim amaçlı perspektifler ortaya koymaktadırlar. Bu çalışma ve projeler arasında hidrojen de önemli bir yer tutmaktadır. Bundaki en önemli neden ise bir enerji kaynağı olarak hidrojenin sınırsız ve temiz olmasıdır. Yerkürenin 3/4'ünü oluşturan suda ve birçok gezegende bulunan hidrojenin, oksijenle yakılması sonucu su oluşur. Bu hidrojene temiz bir yakıt olma, sudan elektroliz metodu ile ayrıştırılabilmesi ise tersinir olma niteliği kazandırır.

Hidrojenin yakıt olarak kullanımı düşüncesi 19. yüzyılın başına kadar uzanır. Fakat bu düşünce, 1974 yılında ABD Florida'da Miami Üniversitesi Temiz Enerji Enstitüsü tarafından düzenlenen "Hidrojen Ekonomisi Miami Enerji Konferansı" (THEME) ile bilimsel platforma taşınmıştır. Sonrasında ise "Uluslararası Hidrojen Birliği" (IHEA) kurulmuştur. Bu birliğin kurulmasının ardından, bazı ülkeler de ulusal hidrojen örgütlerini oluşturmuşlar; böylelikle hidrojen üzerine yapılan çalışmalar destek bularak hız kazanmıştır. İstanbul'da Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi'nin (ICHET) kurulmasına ilişkin anlaşma, Türkiye Cumhuriyeti hükümeti ile Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü (UNIDO) arasında, Ekim 2003 tarihinde imzalanmıştır [2]. Günümüze kadar özellikle uzay araçlarındaki motorlarda yakıt olarak kullanılan hidrojen, bugün aynı niteliğini diğer ulaşım araçlarına da taşıma yolundadır. Bu amaçla özellikle otomotiv sektörünün önde gelen kuruluşlarınca, hidrojenin araçlarda yakıt olarak kullanımı konusunda araştırma ve geliştirmeler sürdürülmektedir. Bu çerçevede geleneksel (içten yanmalı) motorlar/taşıtlar ve daha da ötesinde modern (yakıt pilli) motorlar/taşıtlar üzerinde

yoğun bir biçimde çalışılmaktadır. Yani çalışmaların geleneksel ayağı; hidrojenin içten yanmalı motorlarda tıpkı benzin, dizel yakıtı, LPG, CNG ya da kerosen gibi yakılmasıdır. Modern ayağını ise; direkt güç üretim sistemi olan yakıt pili (yakıt hücresi) oluşturmaktadır. Bu yeni güç üretim sisteminde klasik sistemdeki yakıt kimyasal-ısı-mekanik enerji dönüşüm süreci yerini, yakıt kimyasal-elektrik-mekanik enerji almaktadır. Bu çalışmada direkt hidrojenin kullanıldığı yakıt pilli motor teknolojisi konu edilmiştir. Fosil yakıtların kullanıldığı yakıt pili sistemi de dizayn edilebilmektedir. Fakat taşıt uygulamalarında (metanol hariç) dizayn güçlükleri nedeni ile pek tercih edilmemektedir. Hidrojenden enerji dönüşümü çalışmaları; hidrojenin elde edilmesi (üretilmesi) ve depolanması üzerine yapılan çalışmalarla bağlantılı yürütülmektedir.

HİDROJEN

Hidrojenin Genel Özellikleri

Doğadaki en hafif element olan hidrojen, 1766 yılında İngiliz bilim adamı Sir Cavendish tarafından keşfedilmiştir.

Renksiz, kokusuz, tatsız ve saydam bir yapı sergileyen hidrojen periyodik tabloda "H" sembolü ile ifade edilir. Atom ağırlığı 1,00797 kg/kmol ve atom sayısı 1 olan elementtir. Hafif olması nedeniyle (0 °C ve atmosfer şartlarında 1 litre hidrojen 0,0898 gr kütlede dir.) yeryüzünde serbest halde çok az bulunur. Hidrojen sıvılaştırılması oldukça güç olan bir elementtir. Yaklaşık olarak 20 K sıcaklık ve 2 bar basınçta sıvı faza geçer [4]. Oldukça iyi bir ısıl iletkenidir. (Hidrojenin genel özellikleri- Tablo 1)

Yakıt Olarak Hidrojen

Özellikle içten yanmalı motorlar için büyük önem taşıyan yakıtların bazı özelliklere sahip olması istenir. Bu özellikler idealize edilecek olursa şöyle sıralanabilir:

Tablo 1. Hidrojenin Genel Özellikleri [3]

		Birimi
Molekül Ağırlığı	2.016	Kg/kmol
Yoğunluğu	0.0838	Kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141.9	MJ/kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11.89	MJ/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119.9	MJ/kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10.05	MJ/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20.3	K
Sıvı Yoğunluğu	70.8	Kg/m ³
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32.94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12.84	bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31.40	Kg/m ³
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% hacimsel
Havada Stokiyometrik Karışım	29.53	% hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0.61	cm ² /s
Özgül Isısı	14.89	KJ/kg.K

- Kolaylıkla ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli
- Her yerde (sanayide, evlerde, taşıtlarda) kullanılabilir, depolanabilir
- Birim kütle başına yüksek ısı değerinde, temiz, güvenli, hafif olmalı
- Isı, elektrik ve mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilir

Tablo 2. Hidrojen ve Diğer Yakıtlarla Karşılaştırılması [3]

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk, (kg/m ³)	4.4	0.65	0.0838
Hava içindeki difüzyonu ^a , (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Sabit basınçtaki özgül ısı ^a , (kJ/kg.K)	1.20	2.22	14.89
Havada ateşlenme sınırı, (% hacim)	1.0-7.6	5.3-15.0	4-75
Havada ateşlenme enerjisi, (mJ)	0.24	0.29	0.02
Ateşlenme sıcaklığı, (°C)	228-471	540	585
Havada alev sıcaklığı, (°C)	2197	1875	2045
Alev yayılması (emisivitesi), (%)	34-43	25-33	17-25
Isıl kapasitesi, (MJ/kg)	45.5	50	141.9
(MJ/m ³)	38.65	23	11.89
Patlama enerjisi ^b , (gr TNT/kJ)	0.25	0.19	0.17

^a Normal basınç ve sıcaklıkta

^b Maksimum teorik; gerçek, teoriğin %10'u

- Yüksek verimle enerji üretilebilmeli ve ekonomik olmalı

İdeal şartlarda yukarıdaki özellikler istenir. Gerçekte bu özelliklerin tamamına sahip bir yakıt yoktur. Fakat denilebilir ki hidrojen bu kategoriye en uygun olan yakıttır.

Hidrojen çok hafif bir gaz olması nedeniyle herhangi bir olağanüstü durumda ortamdan uzaklaşır ve tehlike riskini azaltır. Uygun şartlar sağlandığında sıvı ve gaz fazında depolanabileceği gibi tankerler ve boru hatlarıyla da sevk edilebilecek bir yakıttır. (Hidrojen ve diğer yakıtlarla karşılaştırılması- Tablo 2.)

Hidrojenin kimyasal yapısı itibariyle karbon ve kükürt içermemesi, zararlı atıklar olarak bilinen CO, CO₂ ve SO₂ oluşumunu da önler. Yalnızca havada yer alan azot nedeniyle NO_x oluşumu söz konusu olmaktadır.

Geniş bir aralıkta tutuşabilir olması, geniş bir aralıkta düzgün olarak yanmasını sağlar. (HFK 0,15-4,35 değerlerine çıkmaktadır.) Hidrojende NO_x oluşumunu minimum düzeye indirebilmek için fakir karışımda bir yanma sağlanabilir. Hidrojenin yüksek bir alev hızına sahip olması, ideale yakıtın bir yanma sağlayarak ısı verimi artırır. Düşük alev parlaklığı ile yanıyor olması, radyasyon yolu ile gerçekleşen ısı transferini de azaltacaktır.

Hidrojenin en yüksek yanma sıcaklığı olan 2318 °C'ye, % 29 hacimsel hidrojen/hava karışım oranında ulaşılır.

Şayet oksitleyici olarak hava yerine oksijen kullanılırsa bu değer, 3000 °C'ye çıkar ki; bu sıcaklık değeri bugünkü yakıtlarda da yaklaşık bu seviyededir [5].

Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı yüksektir. Buna karşın, hidrojen-hava karışımlarının tutuşturulabilmesi için gerekli enerji miktarı diğer yakıtlara oranla oldukça düşüktür. Kütlesel olarak bakıldığında ısıl değerce rakipsiz denilebilecek hidrojen, hacimsel olarak oldukça düşük ısıl değerdedir.

HİDROJENİN ÜRETİLMESİ

Hidrojen doğada saf halde bulunmaz. Bu nedenle çeşitli bileşiklerden ayrıştırılması gerekir. Bu anlamda temel olarak hidrojenin; mevcut fosil yakıtlardan, biyokütleden ve elektroliz yöntemiyle sudan üretimi üzerinde çalışılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan yöntem, hafif karbonların özel olarak da doğal gazın reformasyonu yöntemidir [6]. Ancak bir fosil yakıt olan doğal gazın tükenen olması nedeniyle alternatif bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır.

Günümüzde tek potansiyeli olan yöntem elektroliz olarak öngörülmektedir. Enerji olarak elektrik bağımlısı olan elektroliz yöntemiyle hidrojen üretiminin, günümüzde maliyetli de olsa yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişmesiyle, öneminin artması beklenmektedir. Hidrojen sayesinde, mevcut santrallerde ya da yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilecek fazla enerji depo edilebilecektir. Böylece depolanması daha zor ve verimsiz olan elektrik enerjisi, elektroliz yoluyla hidrojen biçiminde depo edilebilecektir. İstenildiği yer ve zamanda bu enerji, farklı enerji üretim metotları ile (yakıt pilleri, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, buhar türbinleri vb.) tekrar açığa çıkarılabilecektir.

HİDROJENİN DEPOLANMASI

Hidrojenin üretilmesini takiben depolanması gerekir. Genel olarak hidrojenin kullanıldığı her yerde depolanmasına ihtiyaç vardır. Taşıtlarda hidrojenin

kullanılması durumundaysa depolama daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bakımdan üretilen hidrojen iki ayrı grupta depolanması şeklinde incelenebilir. Birincisi merkezi bir jeneratör, güneş -hidrojen enerji sistemi, rüzgar-hidrojen enerji sistemi, hidrolik - hidrojen enerji sistemi vb. gibi merkezi olarak üretilen hidrojenin depolanması; ikincisiyse ısınma, pişirme ya da taşıtlardaki kullanım amaçlı depolanmasıdır.

Merkezi olarak depolamada boşaltılmış doğal gaz yatakları, mağaralar ve büyük depolama tankları kullanılmaktadır.

İkinci tip dediğimiz ve daha çokta taşıtlar için tasarlanan depolama şekilleridir ki yaygın olarak 3 yöntem üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlar; gaz hidrojen, sıvı (karyojenik) hidrojen ve metal hidritler şeklinde depolamadır.

HİDROJENİN TAŞITLARDA KULLANIMI

Hidrojen yakıtlı motorlar güç üretim yöntemi bakımından 2 kategoriye ayrılabilir.

- Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlar
- Hidrojen Yakıt Pili Motorlar

Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlar

Hidrojen, aynen klasik içten yanmalı motorlarda kullanılan; benzin, dizel yakıtı, LPG, doğalgaz ve kerosen gibi içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir. Yakıt içerisindeki kimyasal bağ enerjisi yanma sonrası ısıya ve buradan da mekanik enerjiye dönüştürülmektedir.

Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığının yüksek oluşu (1Atm basınçta 847-867 K) ve oktan sayısının yüksekliği hidrojenin dizel motorlardan çok, karbüratörlü otto motorlarda daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir [7].

Hidrojen yakıtlı motorlarda, fosil yakıtlarda görülen buhar tıkaçı, soğuk yüzeylerde yoğunlaşma, yeterince buharlaşmama, zayıf karışım gibi sorunlar yoktur.

Yüksek alev hızına, geniş alev cephesine ve yüksek detenasyon sıcaklığına sahip olup, kontrolsüz yanmaya karşı dayanıklıdır. Sahip olduğu bu yüksek alev hızı, otto motorlarda ideale yakın bir yanma ve ısıl verimde artışlar sağlar. Ayrıca düşük alev parlaklığı ile yanıyor olması radyasyon yoluyla gerçekleşen ısı transferi miktarını da azaltmaktadır. Hidrojen yakıtlı motorun ısıl verimi benzin motorunununkine oldukça yakındır. Hatta sıkıştırma oranının artırılması ve fakir karışım sağlanmasıyla ısıl verim % 25'lik bir artış sağlanabildiği tespit edilmiştir [7]. Hidrojen-hava karışımını ateşlemek için gerekli enerji miktarı da diğer yakıtlara oranla çok düşüktür ve bu da tutuşma garantisini sağlayarak özellikle benzinli motorlarda bir avantaj oluşturmaktadır. Yanma sonunda fosil yakıtlarda söz konusu olan CO, CO₂, C_nH_m, NO_x vb. zehirli ve zararlı atıklardan yalnızca NO_x'in oluştuğu hidrojenli motorlarda bu emisyonun miktarı da karışım oranının ayarlanmasıyla azaltılabilmektedir. Hidrojenin yanması sonucu partikül madde oluşmadığından bujiler de kirlenmez. Dolayısıyla hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorlarda yalnızca NO_x ve su oluşmaktadır. Bu da, günümüz fosil yakıtlarının önemli bir dezavantajı olan O₃ tabakası, ekolojik dengeye zararlı emisyon salınımının yok denecek kadar az olmasını sağlayarak, çevreye uyumluluğunu da göstermektedir. Genellikle NO_x hava fazlalık katsayısı ve karışım yerel sıcaklığına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden zengin ($\lambda < 0,9$) ve fakir ($\lambda > 1,7$) karışımlarda NO_x oluşumu önemli ölçüde azalacaktır.

Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılmasıyla birlikte bir takım problemler de oluşmaktadır. Bunlardan en önemlileri; geri tutuşma ve erken ateşlemedir [8]. Yanma odasına gönderilen hava-yakıt karışımının silindire girmeden önce tutuşması sonucu, motor emme manifoldu içinde geriye doğru alev tutuşması meydana gelmektedir. Bu ise emme sisteminde yer alan elemanları tahrip etmekte ve bu da emniyet sorunları doğurmaktadır. Motorun yüksek yükte çalışması durumunda; yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine

sebeplendirir [8]. Hidrojenin düşük tutuşma enerjisine sahip olması erken ateşlemeye yol açabilmektedir. Buna; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, motor yağından gelen sıcak partiküller yol açabilmektedir. Bunun önlenmesi için yanma odasını sıcaklığının düşürülmesi yoluna gidilir ki bu amaçla; karışımın bir miktar fakirleştirilmesi, egzoz gazları resirkülasyonu (EGR), sıvı hidrojen kullanımı (düşük sıcaklıkta olması nedeniyle) gibi çeşitli yöntemlere başvurulmaktadır. Ancak erken ateşlemeyi önlemeyi öngören bu tedbirler; verimde ve motorun düzenli çalışmasında bir takım olumsuzlukları da beraberinde getirecektir.

Hidrojen Yakıt Pili Motorlar

Yakıt pili ve tarihçesi

Yakıt pili (yakıt hücresi), enerji üretiminde kullanılan verimli, sessiz, çevre ile uyumlu ve elektrokimyasal prensipte yakıt enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güç üretim elemanıdır. (Yakıt pili - Şekil 1)



Şekil 1. Yakıt pili (BALLARD)

İlk yakıt hücresi 1839 yılında Sir William Grove tarafından tasarlanmıştır [5]. Grove önce seyreltik sülfürik asit çözeltisine daldırılmış iki platin elektrottan oluşmuş bir sistemde hidrojen ve oksijen üretmeyi başarmıştır. Yaptığı çalışmalarla suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda sabit akım ve gücün üretildiğini fark eden Grove, böylece tesadüfi olarak büyük bir buluş

gerçekleştirmiştir. Sonraki yıllarda ise önceki çalışmasında kullandığı sistemin bir dizisini seri bağlayarak daha fazla elektrik akımı üretmeyi başarmıştır.

Friedrich Wilhelm Ostwald, yakıt pili içindeki her elemanın yakıt pilinin çalışmasındaki görevini ve etkisini araştırmıştır. William W. Jacques, eriyik elektrolitli yakıt pillerinin temelini atmıştır. Kömürün elektrokimyasal enerjisinden doğrudan elektrik üretmeyi başarmıştır. 1900 yılında Emil Baur, bir diğer bilim adamı Nerst'in başlattığı katı oksit elektrolitle çalışan bir yakıt hücresi projesinin başarıya ulaşmasını sağlamıştır. Bu konudaki en önemli çalışma Thomas Bacon tarafından alkalın yakıt pilleri üzerinde yapılan çalışmalardır. Bu çalışmanın önemini anlayan Pratt ve Whitney şirketi bu projeye lisans vererek, NASA 'da kullanılmasını sağlamıştır. 1950'li yıllarda uzay çalışmaları yarışıyla yakıt pillerine ilgi artmıştır. 1958 'de ise NASA, Hidrojen-oksijen pilini uzay çalışmalarında kullanmaya başlamıştır [9].

Petrol krizi sonrasında ise hidrojen ve hidrojenli yakıt pilleri daha da önem kazanmıştır.

Yakıt pili çalışma prensibi

Yakıt pilinde gaz yakıtlardaki kimyasal enerji, düşük enerjili minimum hareket içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir prensiple temel olarak elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülür. Yakıt pili, yakıt (direkt kullanımda; hidrojen, dolaylı kullanımda ise; doğal gaz, LPG, metanol vb.) ve oksitleyicinin (hava veya oksijen) kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda enerjiye çeviren güç üretim cihazıdır.

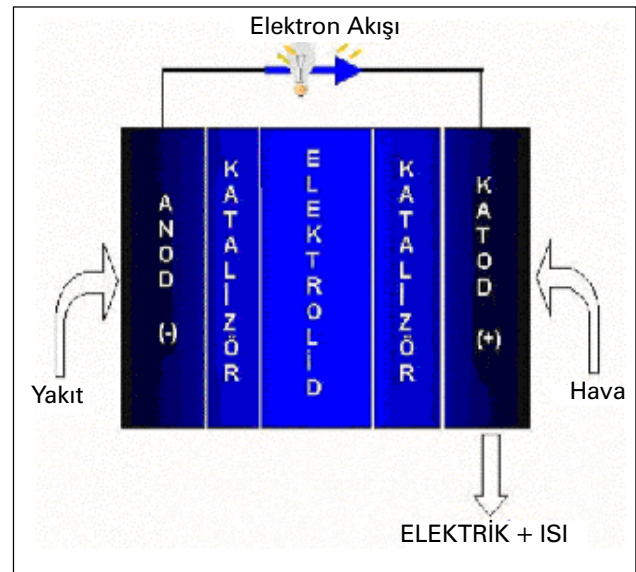
Yakıt pilleri düşük gürültü seviyesinde az kirlenici açığa çıkararak yüksek verimle çalışabilmektedirler. Direkt hidrojen kullanımında tek yan ürünleri saf sudur. Termik makinalarda, Carnot çevrimine göre verim $\eta_c = 1 - T/T_0$ 'dır. Yani işlem sıcaklığı (T_0), arttıkça verim artmaktadır. Fakat bu sıcaklık, malzeme dayanım limitleri ile sınırlanmıştır. Yakıt pilinde ise bu sınırlama söz konusu değildir. Yakıt pili genel verimi $\eta_{fc} = \Delta G / \Delta H$

şeklinde ifade edilir ki, bu da Gibbs serbest enerjisinin yakıt ısıl değerine oranı şeklindedir [5].

Temel olarak bir yakıt pili; anot, katot ve elektrolit kısımlarından oluşur. Ayrıca reaksiyonu hızlandırmak için yakıt pili tipine göre farklı katalizörler kullanılır. (Şematik yakıt pili - Şekil 2)

Sistemde; anoda gönderilen yakıttan ayrılan elektronlar, bir dış devre üzerinden yoluna (katoda doğru) devam ederken, iyonlar (elektronları ayrılan yakıt) elektrolit üzerinden katoda doğru hareket eder ve burada anottan gelen elektronlar ve hava ile reaksiyona girer ve devre tamamlanır. Böylelikle dış devreden dolaştırılan elektronların bulunduğu akım kolunda elektrik akımı oluşur. Yakıt pilinin tipine göre sistemde, farklı katalizör malzemeler de kullanılır. Örneğin, taşıt uygulamalarında daha çok tercih edilen PEM (ilerde açıklanacak) yakıt pilinde elektrolitin her iki yüzeyinde de preslenmiş olarak genellikle Platinyum malzemenin katalizör kullanılır. (Şematik yakıt pili - Şekil 2)

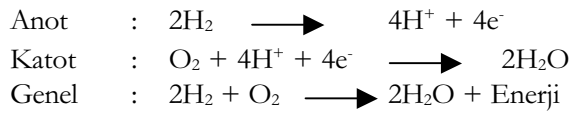
Yakıt pilinde tek bir hücre gerilimi 1 volttan daha az olduğundan, gerekli elektrik enerjisini üretmek için birden fazla yakıt hücresini seri bağlayarak kullanmak gereklidir. Bu hücrelerin arasına iki kutuplu levhalar yerleştirilmelidir. Bu levhalar, elektrotlara gazın sağlanması ve hücrelerin



Şekil 2. Şematik Yakıt Pili

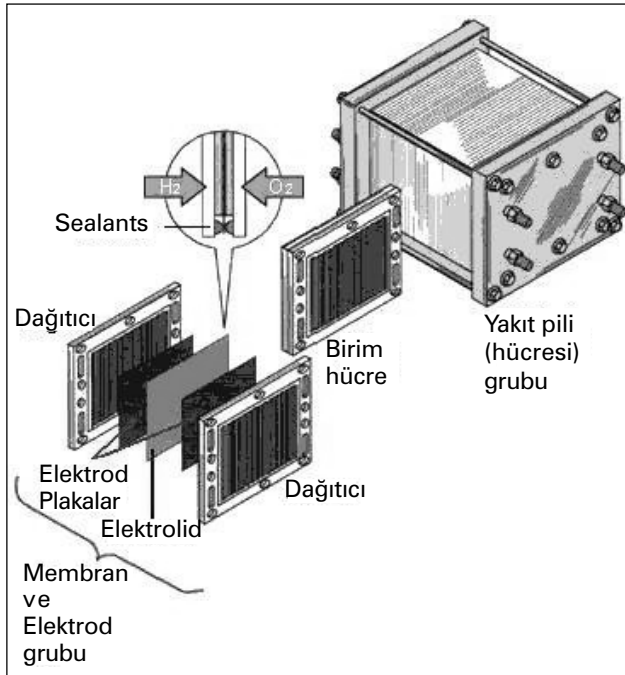
elektriksel olarak bağlanmasını sağlarlar. Sandviç şeklindeki bu hücre ve levha grubuna "Yakıt hücresi grubu" adı verilir. (Yakıt pili birimleri - Şekil 3)

Bu elektrokimyasal işlemde çıkan yan ürün sadece su ve ısıdır (Yakıt olarak hidrojen kullanılması halinde). Bu sistemi, pilden ayıran en önemli fark ise, güç üretimi için şarja gereksinim olmaması ve yakıt sağlandıkça güç üretiminin devam ediyor olmasıdır. Yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonlar (örnek; PEM yakıt pili);



Reaksiyon sıcaklığının sağlanması için bu kümenin içine birkaç tane soğutucu levha yerleştirilir. Hücrelere gaz temini ve su çıkışı her hücre için ayrı olabileceği gibi kümenin sonundaki levhalardan da sağlanabilir.

Teorik olarak yakıt hücreleri, okside olabilen tüm akışkanları dönüştürebilirler. Pratikte ise hidrojen ve hidrokarbon yakıtlar arasında farklar meydana gelmektedir. Bütün yakıt hücresi çeşitleri, yukarıda



Şekil 3. Yakıt Pili Birimleri (THREE BOND)

anlatılan yöntemle hidrojeni dönüştürebilirler. Fakat hidrokarbonların kullanılmasında, dönüşüm için ya çok büyük katalizör yüzeyi ya da çok yüksek sıcaklık gerektiren oksidasyon problemleri vardır. Bu nedenle hidrokarbon yakıtlar, yakıt hücresinde önce su buharıyla reforme edilerek hidrojen üretiminde kullanılmasıyla, yani dolaylı yollardan kullanılabilir. Bu nedenle de hidrokarbon yakıt kullanılan yakıt pillerinin verimi direkt hidrojen kullanılan yakıt pillerine göre daha düşüktür. Yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları da özetlenecek olursa :

Avantajları : Yüksek verim, yüksek güç yoğunluğu, modülerlik, geniş yakıt yelpazesi, düşük emisyon, yüksek güvenilirlik, kolay kurulum, hızlı enerji dönüşümü.

Dezavantajları : Yüksek maliyet, özellikle taşıt uygulamaları için avantajlar taşıyan hidrojenin dağıtım ağının kurulu olmaması.

Yakıt pili tipleri

Yakıt pilleri genellikle çalışma sıcaklıklarına göre; düşük, orta ve yüksek sıcaklık yakıt hücreleri olarak sınıflandırılabilirler. Esas olarak ise kullanılan elektrolite göre sınıflandırılırlar. Buna göre üzerinde çalışılan başlıca yakıt pili tipleri şunlardır:

- Alkalın Yakıt Pili (Alkaline Fuel Cell - AFC)
- Erimiş Karbonat Yakıt Pili (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC)
- Fosforik Asit Yakıt Pili (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC)
- Katı Oksitli Yakıt Pili (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)
- Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC)
- Direkt Metanol Yakıt Pili (Direct Methanol Fuel Cells - DMFC)
- Regeneratif Yakıt Pili (Regenerative Fuel Cells - RFC)

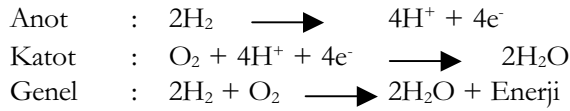
Günümüzde özellikle yakıt pilinin taşıtlarda uygulamasında Proton geçirgen membran yakıt pili (PEM) kullanılmakta olduğundan bu tip açıklanacaktır.

PEM Yakıt pili

Bu yakıt pili tipi 1950'li yıllarda General Elektrik tarafından bulundu ve ilk olarak NASA'nın Gemini Uzay Projesinde uygulandı.

Polimer elektrolit membran ya da proton geçirgen membran olarak adlandırılan PEM yakıt hücresinin elektrolit kısmı kalınlığı 50 μ m seviyesinde katı polimer membran zardan meydana gelir. Bu zarın özelliği; protonlara karşı geçirgen, elektronlara ise geçirgen olmamasıdır. Elektrotlar ise karbondan imal edilmektedir.

PEM yakıt pilindeki reaksiyon;



Çalışma sıcaklığı 80 °C civarındadır ve bu sıcaklık seviyesinde reaksiyon hızının yavaş oluşu katalizör kullanımını gerektirir. Bu amaçla da her iki elektroda da preslenmiş olarak Platinyum kullanılır. Elektrolit ve elektrotlardan oluşan kısma "Membran Grubu" denir ve bu, iki akış plakası arasında yer alır. Bu plakalar yakıt kanallarını ihtiva eder ve elektronların membran grubu

dışına iletimini sağlar. Her bir hücrede oluşan gerilim 0,7 volt seviyesinde olup yüksek gerilimlere ulaşabilmek için hücreler seri olarak bağlanarak; yakıt hücresi (yakıt pili) grubu oluşturulur.

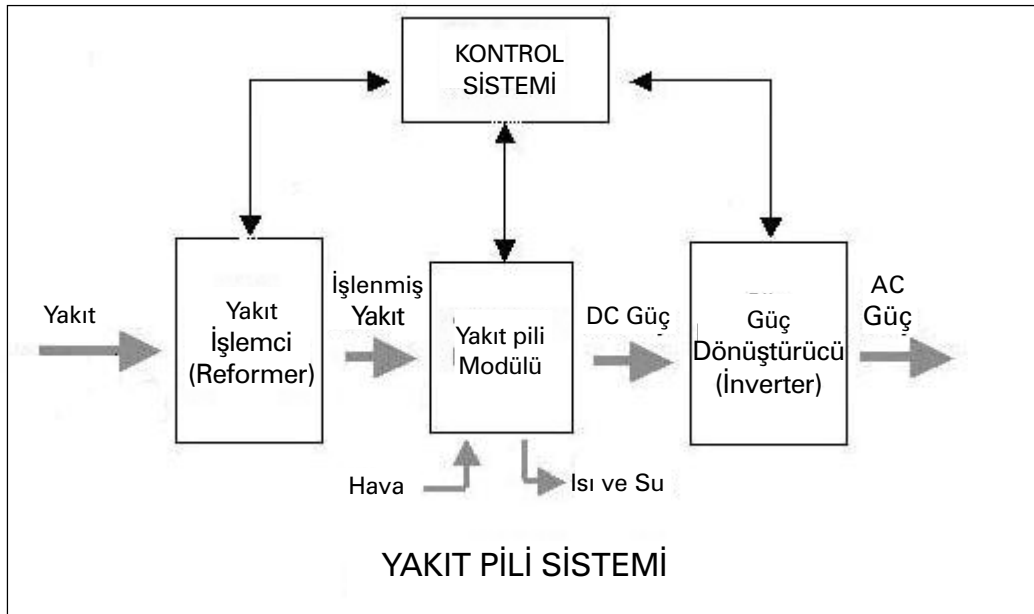
PEM yakıt pilleri; düşük sıcaklık seviyesinde çalışma, çabuk cevap hızı, yüksek güç yoğunluğu ve kompakt yapı gibi avantajlara sahiptir. Verimleri ise % 40-50 aralığındadır.

Yakıt Pili Sistemi

Genel olarak bir yakıt pili sistemi, aşağıdaki 4 üniteden oluşmaktadır. Bunlar; yakıt işleme ünitesi, güç üretim sistemi (yakıt pili grubu - modül), güç dönüştürücü (inverter), kontrol sistemi. (Yakıt pili sistemi - Şekil 4)

Yakıt İşleme Ünitesi, yakıtın yakıt piline gönderilmesi öncesinde hazırlandığı ve eğer direkt hidrojen kullanılmıyorsa, kullanılan yakıttan hidrojenin ayrıştırıldığı ünite. Yani hidrojen dışında bir yakıt kullanıldığında bunun kullanıma hazırlanması da bu ünite gerçekleştirilir.

Güç Üretim Sistemi olarak isimlendirilen bölüm bir veya birden fazla yakıt pili yığınınından meydana gelmektedir.



Şekil 4. Yakıt Pili Sistemi

Güç Dönüştürücü ünitesinde hücrede üretilen doğru akım ticari kullanım için alternatif akıma çevrilir.

Kontrol Sistemi ünitesinde sistemin tüm işleyişi denetlenir ve kontrol edilir.

Ayrıca pek çok yakıt pili sisteminde yardımcı elemanlar olarak adlandırılan bazı komponentler de söz konusudur. Bunlar; fan, kompresör, nem ünitesi, ısı değiştirici, DC/AC dönüştürücü vb. şeklinde sayılabilir.

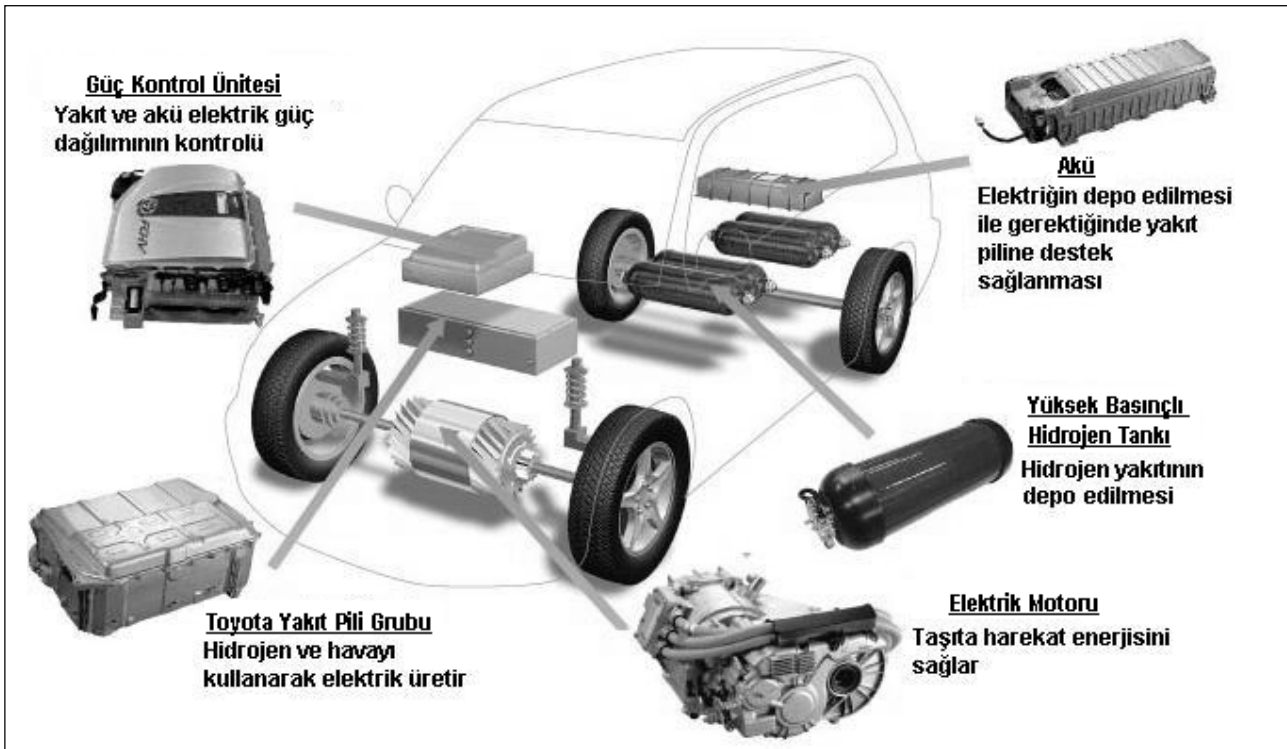
Temelde taşıtlarda uygulaması konumuzu oluşturan yakıt pilleri pek çok farklı uygulama alanına da sahiptir. Bunlar; taşıt, evsel, askeri, uzay araçları, enerji santrali ve mobil uygulama alanlarıdır.

Yakıt Pili Motor Teknolojisi

Yakıt pili taşıtlar da diyebileceğimiz yakıt pili motor teknolojisi, hidrojenin ya da reforme edilerek hidrokarbon yakıtların kullanıldığı, yakıt pili sistemleriyle üretilen ve DC'den AC'ye dönüşümü gerçekleştirilen elektrik akımının kullanılarak, AC elektrik motorları ile aracın tahriki prensibine dayanır. Yani klasik araç

teknolojisinde izlenen yanma kimyasal enerjisi-mekanik enerji dönüşümü ve böylelikle aracın tahrik edilmesi yerine, elektro kimyasal-elektrik dönüşümüyle aracın tahriki temin edilmektedir. Böylece çok yüksek sıcaklık ve basınçlarda, çok yüksek gürültü seviyelerinde gerçekleştirilen, oldukça fazla, kompleks parçaların oluşturduğu, büyük atalet kuvvetlerinin ve titreşimlerin meydana geldiği bir mekanizma ortadan kalkmaktadır. Bunun yerini nispeten oldukça düşük sıcaklıklarda çalışan, çok düşük gürültü seviyesine ve kompleks hareketli parçalar içermeyen, düşük titreşim seviyeli bir sistemle güç üretilmektedir. Bu güçle aracın hareketi gerçekleştirilmektedir. (Şematik yakıt pili taşıt sistemi - Şekil 5.)

Sistem temelde; yakıt tankı, yakıt pili sistemi, AC/DC akım dönüştürücü ve elektrik motor/motorlarından oluşmaktadır. Bununla birlikte; sistemin genel kontrol ünitesi, akü, soğutma sistemi ve çeşitli aktarma organları sistemin temel tamamlayıcı donanımlarıdır. Ayrıca direkt hidrojen kullanılmayan hidrojen yakıt pili sistemlerde, kullanılan yakıtın (metanol, doğalgaz vb.) yeniden





Şekil 5.Şematik Yakıt Pili Taşıt Sistemi (TOYOTA)

şekillendirilerek (reformation) hidrojen yakıt piline hazır hale getirildiği şekillendirici (reformer) bulunur. Yakıt pilli motorlarda verim, geleneksel motorların 2 misli düzeylerine çıkabilmektedir.

Günümüzde başta büyük otomobil üreticileri olmak üzere pek çok otomobil üreticisi, yakıt pilli taşıt konusunda önemli düzeyde araştırma ve ortaklıklar gerçekleştirmekte, bu konuya büyük bütçeler ayırarak ve prototip üretimlerinin de ötesinde bu tip taşıtları piyasaya sürme noktasında önemli vaatlerde bulunmaktadır. Hatta bazı şirketler bu çalışmalarının kaynağını oluşturan hidrojenin ve depolanmasının da bu teknolojiye geçişte belki de eşdeğer öneme sahip olduğundan; büyük petrol şirketleri, depolama teknolojileri üzerine çalışan şirketler ve yakıt pilli üreticileri ile ortak çalışmalar gerçekleştirmektedirler. Aşağıda bu tür üretimlere dair birkaç taşıt ve özellikleri sunulmuştur. (Yakıt pilli taşıt örnekleri - Şekil 6.)

duyacağı aşıkardır. Üstün özellikleriyle hidrojenin de en azından bu alternatifler arasında yer alabileceği artık pek çok bilim adamı ve politikacı tarafından dile getirilmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerin ve çok uluslu petrol şirketlerinin de bu sektöre girmeleriyle bu geçişin ve başta maliyet olmak üzere taşıdığı bir takım problemlerin aşılması mümkün görülmektedir.

Günümüz dünyasını tehdit eden küresel çevre sorunları ve bunun gün geçtikçe ekolojik dengeye verdiği onarılması güç tahribatlar, seçilecek enerji kaynağına sadece maliyet perspektifinden bakışın uzun vadede ekonomik olamayacağını göstermektedir. Bugün benzin, motorin, LPG, doğalgaz, kerosen vb. fosil kökenli yakıtların kullanıldığı geleneksel motorlarda en azından geçiş döneminde hidrojenin ilave yakıt olarak kullanımı ve böylelikle emisyonlarda daha iyi sonuçlar alınması ve geçiş dönemi sonrası zaman içinde bu yakıtların yerini hidrojene bırakmaları sağlanabilir.

TOYOTA FCHV	FORD P2000
<p>Özellikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> •Yakıt - Sıkıştırılmış hidrojen (35 MPa) •Maks. Hız – 155 km/h •Menzil - 300 km •Yakıt Pili - Proton Dönüşüm Membran •Elektrik Motoru - AC (Alternatif akım) •Maks. Güç - 80 kW (109 HP) •Maks. Tork - 260 Nm 	<p>Özellikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> •Yakıt - Sıkıştırılmış hidrojen •Maks. Hız – 128 km/h •Menzil -160 km •Yakıt Pili - Proton Dönüşüm Membran •Elektrik Motoru - AC (Alternatif akım) •Maks. Güç - 67 kW (90 HP) •Maks. Tork - 190 Nm •Maks. Akım - 280 Amper •Maks./Min. Gerilim - 385/200 volt
	

Şekil 6. Yakıt Pilli Taşıt Örnekleri (TOYOTA, FORD)

SONUÇ ve ÖNERİLER

Geleneksel yakıt ve yakıt sistemlerine bağlı motor teknolojilerinin, bugünkü yakıt kaynaklarıyla çok uzun bir zaman ayakta duramayacağı ve alternatiflere ihtiyaç

Uzay araçlarında elektrik vb. enerji ihtiyaçları için bugüne kadar kullanılan ve fakat yüksek maliyet ve hidrojen yakıtının yaygınlaşmamış olması nedeniyle günlük hayatta karşılaşılmayan yakıt pilli ve yakıt pilli motor teknolojisi de geleceğin teknolojileri arasında

görülmektedir. Zamanla rekabet ve çalışmaların sürmesiyle maliyetlerinin daha da düşeceği başta otomobil ve yakıt pili üreticileri tarafından vadedilmektedir.

Bazı otomotiv firmaları ise özellikle hidrojen taşıyıcısı olarak sodyum borhidrat (NaBH₄) üzerinde çalışmalar yürütmektedirler. Bu şekilde katı ya da sıvı fazda kolaylıkla depo edilebilir olması ve kontrollü bir kimyasal reaksiyonla hidrojen gazının kullanım anında üretilmesi bu çalışmaların temel felsefesidir. Ülkemizin de bor yönünden oldukça zengin oluşu, böyle bir teknolojinin uygulanabilirliği halinde oldukça büyük avantajlar kazanmamızı sağlayabilecektir.

Tüm bu nedenlerle; hidrojen yakıtlı motorlar ve yakıt pili teknolojisine yönelik teorik ve pratik çalışmaların ülkemizde de yaygınlaşması, teknoloji üretiminde pay sahibi olmak ve gelişmelere seyirci kalmamak için gerekli görülmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Erdoğan S.**, Alternatif Enerji Kaynakları ve Türkiye'nin Enerji Potansiyeli, Electrotech, Temmuz 2003
2. http://www.eie.gov.tr/hidrojen/tr_yapilan_calismalar.html, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, 25.08.2004
3. **Veziroğlu T.**, Nejat ve Barbir Frano, Hydrogen Energy Technologies, UNIDO, A 1400 Vienne, Austria, 1998
4. **Aydemir S.**, Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne-1998
5. **Temelci F. Emre**, Taşıtlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul-2000
6. **Güvendiren M., ve Öztürk T.**, Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Depolama, Mühendis ve Makina, Ağustos 2003, 523
7. **Görgülü A.**, Hidrojenin Yakıt Olarak İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı ve Diğer Yakıtlarla Mukayesesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir-1994
8. **Dipioğlu İ.**, Hidrojenin Taşıt Üzerinde Üretimi ve Petrol Kökenli Yakıtlarla Birlikte İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya-1998
9. **Çetinkaya M., Karaosmanoğlu F.**, Yakıt Pilleri, Tesisat Mühendisliği Dergisi, Mayıs-Haziran, 2003
10. **Ünsal İ.**, Güneş ve Hidrojen Enerjisi, Electrotech, Temmuz 2003
11. **Kaya E.**, Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya-2002
12. **Atılğan İ.**, Hidrojen Enerjisi ve Uygulama Alanları, Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 14(1), 17-30, 1999
13. TOYOTA, http://www.toyota.co.jp/en/special/pdf/specialreport_10.pdf
14. DAIMLERCHRYSLER, <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7165-1-143238-1-0-0-0-0-8-7165-0-0-0-0-0-0,00.html>
15. BMW, <http://www.bmw.com/generic/com/en/fascination/technology/cleanenergy/index.html>
16. GM, http://www.gm.com/company/gmability/adv_tech/400_fcv/index.html
17. TOYOTA, <http://www.toyota.com/vehicles/future/fines.html>
18. OPEL, <http://www.opel.com/corporate/5/55.html>
19. BALLARD, http://www.ballard.com/be_a_customer/transportation/fuel_cell_engines
20. GM CORPORATION, <http://www.gmeurope.com/marathon/>
21. MILLENNIUMCELL, <http://www.millenniumcell.com/index.pl>
22. H2CARSBIZ, <http://www.h2cars.biz/artman/publish/index.shtml>
23. FORD, <http://www.ford.com/en/innovation/engineFuelTechnology/fuelCells/default.htm>
24. UTC FUEL CELL, <http://www.utcfuelcells.com>
25. BALL CORPORATION, <http://www.ball.com/aerospace/ppp1.html>
26. THREE BOND, <http://www.threebond.co.jp/en/>