



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy  
2010, Volume: 5, Number: 2, Article Number: 2A0040

**TECHNOLOGICAL APPLIED SCIENCES**

Received: June 2009  
Accepted: March 2010  
Series : 2A  
ISSN : 1308-7231  
© 2010 [www.newwsa.com](http://www.newwsa.com)

**Dinçer Buran**  
**Habib Gürbüz**  
**İsmail Hakkı Akçay**  
Dumlupınar University  
dburan@dumlupinar.edu.tr  
Kütahya-Turkey

**HİDROJENLE ÇALIŞAN İÇTEN YANMALI MOTORLAR: TEKNİK İNCELEME**

**ÖZET**

Bu çalışmada; yakıt olarak hidrojeni kullanan içten yanmalı motorlar üzerine yapılan güncel deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiştir. Bu incelemede, hidrojen yakıtı kullanan içten yanmalı motorların temel özellikleri araştırılmıştır. Yakıt olarak hidrojeni kullanan içten yanmalı motorların, konvansiyonel yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlardan daha yüksek performans ve düşük emisyon miktarına sahip olduğu, içten yanmalı motorlarda yapılacak küçük modifikasyonlarla hidrojenin yakıt olarak kullanılabilceği ve günümüzde hidrojenin yüksek üretim maliyetinin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımını sınırladığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İçten yanmalı motor, Hidrojen, Performans, Emisyon, Maliyet

**THE HYDROGEN-FUELED INTERNAL COMBUSTION ENGINES: A TECHNICAL REVIEW**

**ABSTRACT**

In this study; it has been examined the theoretical and experimental studies on hydrogen fueled internal combustion engine. The fundamental properties of hydrogen fueled internal combustion engine have been reviewed. It has been determined that the internal combustion engine fueled with hydrogen has high performance and lower emission than the engine fueled with conventional fuels. Additionally it has been noticed that hydrogen can be used as fuel on internal combustion engines having with simple modifications. However, it has also been noticed that the usage of hydrogen as fuel for internal combustion engine is restricted due to high cost-price of hydrogen.

**Keywords:** Internal Combustion Engine, Hydrogen, Performance, Emission, Cost

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada karbon oranına göre daha fazla hidrojene sahip yakıtlara doğru bir yöneliş başlamıştır. Geçtiğimiz 30 yılda otomobiller için bir alternatif yakıt olarak hidrojenin kullanımı üzerine araştırmalar yapılmaktadır [1 ve 2].

Hidrojen enerjisi; verimli, sınırsız ve yeryüzünde bolca bulunmaktadır. Yakılmasıyla doğrudan kullanılabilirdiği gibi, yakıt pili kullanan araçlarda da enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak enerji politikası uzmanlarına göre; önümüzdeki birkaç on yıl için taşımacılık sektöründe hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı daha büyük bir olasılığa sahiptir [3]. Çünkü çevrim kayıplarına rağmen içten yanmalı motorların güç-ağırlık oranları yakıt pili ile çalışan veya batarya ile güçlendirilmiş araçlardan daha fazladır [4]. Ayrıca mevcut bir motorun kolaylıkla hidrojenle çalışır hale getirebilir olması nedeniyle hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması en basit yöntem olarak tespit edilmiştir [1 ve 2].

Hidrojenin geniş alevlenme limiti, bir gaz keleşi olmaksızın motorun çalışmasını mümkün kılmaktadır [1, 2, 3, 4 ve 5]. Bu durum pompalama kayıplarının azalmasına ve motorun kısmi yüklerde çalışması durumunda termik verimin artmasına neden olmaktadır. Hidrojenin yüksek yanma hızı, yanmanın neredeyse sabit hacimde tamamlanmasını sağlamaktadır. Bu durum termodinamik açıdan iyi bir yanmayı temsil etmektedir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı oldukça yüksek olması, son gaz bölgesinde kendi kendine tutuşma olmaksızın motorun kısmen yüksek sıkıştırma oranında çalışmasını mümkün kılmaktadır. Kısmen artırılabilen sıkıştırma oranı motorun termik veriminin ve gücünün artmasına sebep olacaktır. Hidrojenin kütleli kalorifik değeri yüksek, fakat hacimsel kalorifik değeri çok düşüktür. Bu durum depolama esnasında problemlere neden olmaktadır. Burada hidrojenin otomobil motorlarında kullanımına yönelik bazı sınırlamalar ortaya çıkmaktadır. Hidrojenin düşük ateşleme enerjisi, geri tepme olarak adlandırılan emme manifoldunda hava-yakıt karışımında sıcak noktaların oluşumuna sebep olmaktadır [6].

Yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlarda yanmamış hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonu göz ardı edilebilir düzeydedir. Çünkü hidrojen motorunda tek karbon kaynağı yağlama yağıdır. Hidrojen motorunda tek kirletici emisyon kaynağı, yüksek sıcaklıklarda atmosferik nitrojenin oksidasyonundan oluşan nitrojen oksitlerdir [7]. Hidrojen yük kontrolü göz önünde bulundurulduğunda çok yönlü bir motor yakıtıdır. Hidrojen karışımının yüksek alevlenme hızı ve geniş alevlenme limiti çok fakir karışım ve güçlü bir seyreltici özelliğini sunar. Yük kontrol yöntemine karar vermede, motor verimi ve NOx emisyonu iki ana parametredir [8].

### 1.1. Taşımacılık Yakıtı Olarak Hidrojenin Alt Yapısı (Infrastructure of Hydrogen as Transportation Fuel)

Hidrojen doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil kökenli yakıtların kısmi oksidasyonu yoluyla veya buhar ıslahı ile üretilebilir. Hidrojen üretiminde kullanılan bu tip üretim yöntemleri CO ve CO<sub>2</sub> gibi karbon bileşiklerinin oluşumunu beraberinde getirmektedir [9]. Hidrojen %60-75 oranında termik verimle suyun elektrolizi yöntemi ile yakıt pili uygulamaları için kullanılabilir saflıkta üretilebilir [10]. Bu yöntemle hidrojen üretimi için elektrik enerjisi gereklidir. Kullanılan elektrik enerjisinin maliyeti elektrik üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi için fosil kökenli yakıtların yakılması ile üretilen elektrik enerjisinin kullanımı, hidroelektrik santralinde üretilen elektrik enerjisinin kullanımına oranla toplam maliyeti %35 azaltmaktadır [11].

Yakıt pilleri için buhar ıslahı ya da diğer yakıt dönüşümleri ile üretilen hidrojenin sonradan arıtma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Literatüre göre, üretilen hidrojenin, arıtma işlemi, kullanılan teknolojiye bağlı olarak toplam hidrojen üretim maliyetinin %40-60'na karşılık gelmektedir. Fakat üretilen hidrojen herhangi bir arıtma işlemine tabi tutulmaksızın içten yanmalı motor yakıtı olarak kullanılabilir. Bu nedenle üretilen hidrojenin toplam satış fiyatı, özellikle ihtiyaç duyulan benzinin ithal edildiği bölgelerde, benzinin perakende satış fiyatı ile neredeyse rekabet edebilir durumdadır [12].

Yer ve hava taşıtları, yakıt ikmali yapmadan önce belirli mesafeler için kendi yakıtlarını taşımak zorundadır. Bu nedenle mümkün olduğu kadar hafif olması ve mümkün olduğu kadar küçük yer kaplaması taşımacılık yakıtı için önemli özelliklerdir. Bu gereksinimler boyutsuz bir sayı ile birleştirilebilir ve "hareket kuvveti faktörü ( $\phi_M$ )" olarak 1 numaralı eşitlik ile tanımlanabilir. Burada "E" yakıttan elde edilen enerji miktarını, "M" yakıtın kütlesini, "V" yakıt hacmini ve "h" indeksi hidrojeni tanımlamaktadır [13].

$$\phi_M = \frac{\left(\frac{E}{M}\right)\left(\frac{E}{V}\right)^{2/3}}{\left(\frac{E_h}{M_h}\right)\left(\frac{E_h}{V_h}\right)^{2/3}} \quad (1)$$

Taşımacılık için en iyi yakıt  $\phi_M$  değeri en yüksek olan yakıttır. Sıvı yakıtlar arasında sıvı fazda  $H_2$ , gaz yakıtlar arasında ise gaz fazda  $H_2$  en yüksek  $\phi_M$  değerine sahiptir. Hidrojenin kullanım avantajları göz önünde bulundurulduğunda, hidrojen geleceğin en iyi taşımacılık yakıtı olarak görülmektedir [14].

Hidrojeni taşıtlarda; yüksek basınçlı tanklarda sıkıştırılmış gaz halinde depolanmış halde, on-board taşıtlar ve içten yanmalı motor donanımlarında çeşitli metal hidritlerde depolanmış halde ve kriyojenik sıvı olarak depolanmış halde yakıt olarak taşınmak mümkündür. Hidrojen uygun tasarlanmış yüksek basınç tanklarında sıkıştırılmış gaz olarak da depolanabilir. Fakat diğer gaz yakıtlara oranla hidrojenin yoğunluğunun çok düşük olması, tankın yeterince kompakt hacimde ve ağırlıkta olabilmesi için çok yüksek basınçlı silindirlerin tasarımı ve kullanımını gerektirir. Gazın bu kadar yüksek basınçta sıkıştırılması için gerekli alt yapının sağlanması ve çok pahalı olan sıkıştırma işlemi depolama maliyetini artırmaktadır [15].

Hidrojen on-board taşıtlarda ve içten yanmalı motor donanımlarında, hidrojenin serbest hale geçmesi için gerekli ısının motor soğutma suyu veya egzoz gazı tarafından kontrol edildiği çeşitli metal hidritlerde taşınabilir. Fakat bu metot, taşıt için fazladan maliyet ve ağırlığın yanında düşük yakıt sistemi hassasiyeti ve emisyon miktarının artması gibi dezavantajlara sahiptir [16]. Kriyojenik sıvı olarak hidrojenin depolamasında hidrojenin sıvılaştırması işlemi, hidrojenin alt ısı değerinin yaklaşık %30'u kadar bir enerji tüketimini gerektirir [17].

## 1.2. Hidrojen Yakıtının Yanma Karakteristiği (Combustion Characteristics of Hydrogen Fuel)

Hava içerisinde hidrojenin alevlenme limiti hacimsel olarak %4,1-75 arasında iken benzinin hava içerisinde alevlenme limiti hacimsel olarak %1-7,6'dır. Bu nedenle yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlar çok lineer şartlarda çalışabilmektedir [18].

Benzin-hava karışımlarında, hava fazlalık katsayısının 0,3-1,7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken, hidrojen-hava

karışımları için bu sınır 0,14-4,35 değerlerine ulaşmaktadır. Hidrojen-hava karışımları, gaz yakıtlara göre de daha geniş tutuşma sınırlarına sahiptir. Örneğin metan-hava karışımlarının tutuşabilmesi için hava fazlalık katsayısının 0,6-1,9 değerleri arasında bulunması gerekmektedir. Hidrojenin alt ısıl değeri de öteki mevcut motor yakıtlarından daha yüksektir (hidrojen:119,93 kJ/g, benzi:43,4 kJ/g). Ancak hacimsel olarak ele alındığında hidrojenin alt ısıl değeri diğer yakıtlara göre daha azdır (hidrojen için 8,41 MJ/litre, benzin için 31,8MJ/litre, metanol için 15,9MJ/litre, metan için 20,8 MJ/litre). Hidrojenin adyabatik alev sıcaklığı (2318 K), benzin (2470 K) ve metanın (2148 K) adyabatik alev sıcaklıkları ile aynı mertebelindedir [19].

Hidrojen, 1 olan atomik ağırlığı ile elementler içersinde en hafif olanıdır. Ağırlık olarak hidrojenin ısıl değeri benzinin ısıl değerinden 2,5 kat daha büyüktür. Fakat sıvı fazda benzinin enerji yoğunluğu hidrojenden 10 kat daha fazladır [20]. Hidrojenin yanması temelde hidrokarbon yakıtının yanmasından farklıdır. Dizel yakıtının 0,7-5 alevlenme limitine karşılık hidrojen hacimsel olarak %4-75 oranında alevlenme limitine sahiptir [21].

Hidrojenin ateşlenmesi için gerekli minimum enerji miktarı yalnızca 0,02 mJ'dür ve bu hidrojen motoruna fakir karışımda iyi bir çalışma ve anında ateşleme imkanı sağlamaktadır. Fakat bu durum, bir ateşleme kaynağı olarak hizmet edebilecek silindir içindeki sıcak noktalardan dolayı oluşan erken ateşleme ve geri tepme problemini ortaya çıkarır [22 ve 23].

Hidrojenin yoğunluğu 0,087 kg/m<sup>3</sup>'dür ve havadan oldukça hafiftir. Bu nedenle atmosfere kolayca yayılabilir. Hidrojen kütleli olarak tüm yakıtlardan daha yüksek enerjiye sahiptir. Hidrojenin alev yayılma hızı 270 cm/sn' dir. Bu durum silindir içersinde ani bir basınç artışının oluşmasına sebep olur. Hidrojenin yayılma gücü 0,63 cm<sup>2</sup>/sn dir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı 858 K'dir. Bu da yüksek sıkıştırma oranlarına sahip içten yanmalı motorlarda hidrojenin kullanılabilmesine olanak sağlar [24].

## **2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)**

Bu çalışmada; yakıt olarak hidrojeni kullanan içten yanmalı motorlar üzerine yapılan güncel deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiş olup, hidrojen yakıtı kullanan içten yanmalı motorların temel özellikleri araştırılmıştır. Çalışma ele aldığı konu ve ulaştığı sonuçlar açısından bu alanda yapılacak benzer çalışmalara ışık tutması bakımından önem arz etmektedir.

## **3. İÇTEN YANMALI HİDROJEN MOTORLARI**

### **(INTERNAL COMBUSTION HYDROGEN ENGINES)**

#### **3.1. Hidrojenin Buji Ateşlemeli Motor Yakıtı Olarak Kullanılması (The use of Hydrogen as Spark Ignition Engine Fuel)**

Otomotiv endüstrisinde, hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımına yönelik araştırmaların büyük bir çoğunluğunda, hidrojenin ön karışimli (manifoltdan enjeksiyonlu veya karbüratörlü) buji ateşlemeli motorlarda kullanımı ön plana çıkmaktadır[25]. Yakıt olarak hidrojen, kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı içten yanmalı motorlarda buji ateşlemesi için en uygun yakıttır[26].

Hidrojen, karbüratör ya da enjeksiyonlu buji ateşlemeli motorlarda tek yakıt olarak kullanılabilir [27].

Bir alternatif yakıt olarak buji ateşlemeli motorlarda hidrojenin kullanılma düşüncesi, içten yanmalı motorların gelişme süreci ile karşılaştırıldığında oldukça yeni olmasına rağmen, günümüzde bu konu hakkında yapılan çalışmaların sayısı oldukça fazladır. Hidrojenin, geniş alevlenme oranı ve yüksek kendi kendine

tutuşma sıcaklığı, yanma kontrolünü, fakir yanma için geniş hava-yakıt oranlarını ve yüksek sıkıştırma oranını kullanan buji ateşlemeli yanma sistemleri için büyük oranda esneklik sağlamaktadır [12].

Hidrojen düşük ateşleme enerjisine ve konvansiyonel hidrokarbon yakıtlara oranla daha yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına sahip olması nedeniyle buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılması için daha düşük enerjili buji gereklidir [28]. Ayrıca hidrojenin bu özelliklerinden dolayı stokiyometrik karışımlara yakın karışım oranlarında motorun çalışması için erken ateşleme önemli bir sınırlamadır [8].

Yakıt olarak benzini kullanan buji ateşlemeli motorlarda güç, vuruşu oluşumu tarafından sınırlandırılırken, yakıt olarak hidrojeni kullanan buji ateşlemeli motorlarda güç, ayrıca erken ateşleme ile de sınırlandırılır [8]. Hidrojenle çalışan buji ateşlemeli motorlarda; vuruşu, erken ateşleme ve geri tepme olmak üzere üç anormal yanma rejimi bulunmaktadır [29].

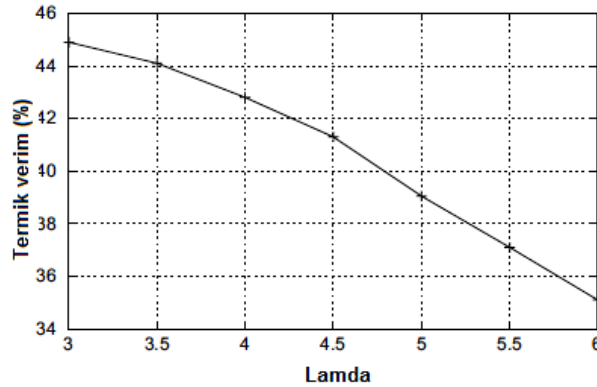
### 3.2. Hidrojenin Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motor Yakıtı Olarak Kullanılması (The use of Hydrogen as Compression Ignition Engine Fuel)

Yakıt olarak hidrojeni kullanan sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda, hidrojenin yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığından (858 K) dolayı sıkıştırma sonu sıcaklık yanma başlangıcı için yeterli değildir [2].

Hidrojenin düşük ateşleme enerjisi ve konvansiyonel hidrokarbon yakıtlara oranla daha yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına sahip olması nedeniyle sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılmasında, tutuşmanın sağlanabilmesi için yüksek sıkıştırma oranları ve/veya emme havasına ön ısıtmanın yapılması gereklidir [7]. Bu nedenle bir kıvılcım bujisi ya da kızdırma bujisi olmaksızın sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanımı uygun değildir. Bu durum, hidrojenin dizel motorlarda tek yakıt olarak kullanıma uygun olmadığını göstermektedir [30].

DeneySEL çalışmalar, hidrojenin çok düşük karışım oranında ( $0,1 < \Phi < 0,3$ ) alevlenmesine rağmen hızlı yanma karakteristikleri ve hızlı ısı açığa çıkarma oranından dolayı homojen dolgulu, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda birincil yakıt olarak kullanılabileceğini öne sürmektedir [31].

Gomes ve arkadaşları tek silindriLi homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda hidrojenin manifoldtan enjeksiyonu konumunda yaptıkları çalışmalarında tespit ettikleri  $\lambda$ 'ya bağlı termik verim değişimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Dizel motorda termik verimin  $\lambda$ 'ya bağlı değişimi [7]  
(Figure 1. Variation of thermal efficiency with  $\lambda$  in a diesel engine [7])

### 3.3. Hidrojenin İlave Yakıt Olarak Kullanılması (The Use of Hydrogen as Addition Fuel)

Hidrojenin çok düşük yoğunluğa sahip olması özellikle karışımının silindir dışından sağlandığı yakıt sistemlerinde motor gücünde azalmaya sebep olur. Hidrojen yanma karakteristiklerini geliştirmek için benzin, doğal gaz, etanol, bitkisel yağ, biyogaz, LPG gibi yakıtlara ilave yakıt olarak kullanılabilir [32 ve 33]. İlave yakıt olarak hidrojenin kullanılması durumunda, her iki yakıtın artı yönlerinin kullanılabilir olması karışım özelliğini artırma olanağı sağlar. Hidrojen, teorik olarak benzine ( $\Phi = 0,6$ ) oranla daha düşük bir hava-yakıt karışım ( $\Phi$ ) sınırına (aşırı havadan dolayı alev gelişiminin olmadığı karışım miktarı) sahiptir. Teorik olarak sıvı ya da gaz hidrokarbon yakıtına az miktarda hidrojenin ilavesi ile hava-yakıt dolgusunu, fakir karışım sınırına yaklaştırmak mümkündür. Hidrojen-hava karışımının stokiyometrik değerinden ( $H/Y=1/34$ ) daha yüksek oranlarda havanın motora alınması, fakir karışımda çalışma şartlarında ortaya çıkan problemleri ortadan kaldırır, karışımın tam yanmasını sağlar, verimi artırır, maksimum sıcaklığı düşürür ve NOx emisyonun azalmasına yardımcı olur[34].

Benzin, metan, etanol ve biyogaz ile çalışan motorla yapılan testlerde ilave yakıt olarak hidrojen kullanımının motor performansını artırdığı tespit edilmiştir[33].

Genel olarak hidrojenin çift yakıt modunda kullanılması ile motor performansında artış ve kirletici emisyonlarda önemli miktarda azalma sağlanabilir[35].

#### 3.3.1. Dizel Yakıtı-Hidrojen Karışımı (Diesel-Hydrogen Mixture)

Dizel motorlarda çift yakıt modunda hidrojenin kullanılması;

- Dizel yakıtına oranla küçük bir miktarda hidrojenin ilave edilmesi ile yanma ve emisyon karakteristiklerinin değişimi,
- Dizel yakıt enjeksiyonu yardımıyla kontrollü ateşlemenin sağlandığı sistemde enerjinin ana kaynağı olarak hidrojenin büyük bir miktarının kullanılması şeklindedir [36].

Sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda hidrojenin kullanımı için ana yakıt olarak dizelin kullanıldığı çift yakıt modunda çalışmak veya hidrojen için ateşleme kaynağı olarak di-etil eter kullanmak en basit yöntemdir. Bir çift yakıt motorunda dizel tarafından yanmanın başlatılması ile hidrojen emme havası içerisine enjeksiyon ya da karbüratör yoluyla alınır [37]. Fakat bu metotta hidrojenin büyük bir miktarı kullanılmaz. Çünkü hidrojen, havayla yer değiştirmek suretiyle dizel yakıtının yanması için mevcut bulunan havayı azaltır[38].

Çift yakıtlı motorlarda, kısmi yük ve yüksüz motor şartlarında hidrojenin kullanımı; yakıt tüketiminin azaltılması suretiyle termik verimde artış, NOx emisyonunun da ise azalma ile sonuçlanır. Yakıt olarak dizel yakıtı ve hidrojenin kullanıldığı çift yakıtlı motorda termal verimde azalma olmaksızın, minimum güç kaybı ile hidrojen hacimsel olarak %38'e kadar ilave edilebilir [37].

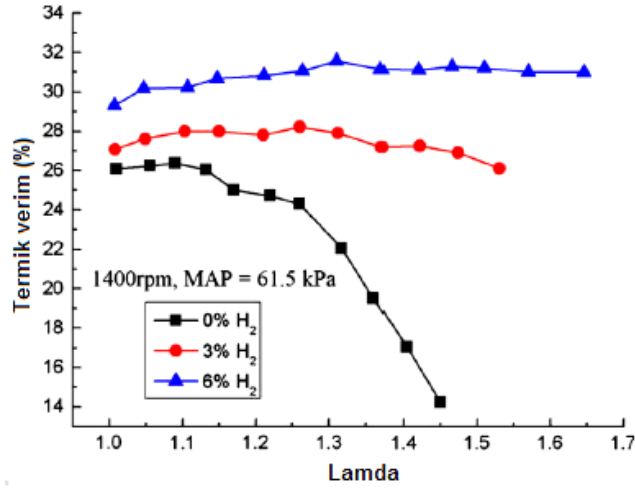
Bir gaz yakıt olarak hidrojen, hava ile iyi bir karışım oluşturur. Hidrojenle zenginleştirilmiş dizel motorlar, yaklaşık olarak dizel motorla aynı oranda fren gücü ve tüm motor çalışma şartlarında dizel motorlarından daha yüksek termik verim üretir[39].

#### 3.3.2. Benzin-Hidrojen Karışımı (Gasoline-Hydrogen Mixture)

Saf hidrojen ile çalışan motorlardan farklı olarak, bir hidrokarbon yakıtına katkı olarak hidrojeni kullanan motorlarda, her iki yakıtın da avantajlarını kullandığı için motorun verim ve emisyon performansı artarken motor gücü korunmaktadır [40].

Hidrojen benzin karışımı, benzine oranla çok daha kolay tutuşabilir. Bu nedenle hidrojenle zenginleştirilmiş benzin motoru, daha düzgün ilk hareket ve fakir karışım şartlarında daha satabil çalışma sağlayabilir. Benzinle çalışan motorlarda, hidrojen ilavesi termik verim ve emisyon performansının artırılmasında etkili bir yoldur. Aynı zamanda fakir karışım çalışma şartlarında düşük yanma sıcaklığı, soğutma ve egzoz kaybına katkıda bulunmaktadır [41].

Ji ve Wang manifoldtan enjeksiyonlu buji ateşlemeli benzin motoru ile yaptıkları deneysel çalışmada; benzine manifoldtan enjeksiyon konumunda, farklı oranlarda hidrojen ilavesi ile motorun termik veriminde Şekil 2'de görüldüğü gibi bir artış tespit etmişlerdir [42].



Şekil 2. Benzine hidrojen ilavesinin termik verime etkisi[42]  
(Figure 2. Effect of hydrogen addition to gasoline on thermal efficiency [42])

### 3.3.3. Doğal Gaz-Hidrojen Karışımı (Natural Gas-Hydrogen Mixture)

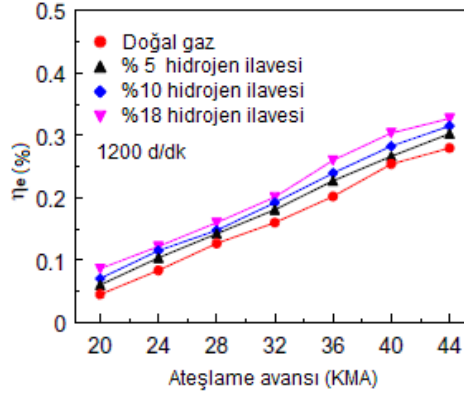
Hidrojen, yüksek yanma hızı, çok iyi fakir karışımlarda yanma kapasitesi ve küçük sönmeye mesafesi nedeniyle doğal gazın yanma problemlerinin giderilmesi için en iyi gazdır[43]. Hidrojenin laminer yanma hızı doğal gaza oranla yedi kat daha fazladır. Bu nedenle, doğalgaz-hava karışımı ile çalışan motorda, doğal gaza hidrojen ilavesi ile karışımın yanma hızı artırılabilir. Hidrojenin sönmeye mesafesinin doğal gaza oranla çok daha küçük olmasından dolayı doğal gaz içersine hidrojen ilavesi yanma odasından olan ısı kaybını artırır [44].

Buji ateşlemeli bir motorun fakir karışım çalışma şartlarında, doğal gaz içersine küçük bir miktarda hidrojen ilavesi HC ve CO emisyonunu azaltır, motorun termik verimini artırır. Fakat doğal gaz içersindeki hidrojen konsantrasyonu %20 oranını aştığı zengin karışım şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonu dikkate değer oranda artar. Bu nedenle hidrojen-doğal gaz karışımı ile çalışan motorlarda düşük NO<sub>x</sub> emisyonu elde edebilmek için hidrojen ilavesi ile birlikte oldukça fakir karışım ya da egzoz gazı re-sirkülasyonu gereklidir[45].

Doğal gazın ana bileşeni olan metanın, hava ile karışımına hidrojen ilavesi, yanabilir karışım oranı için alev gelişiminin başlangıç safhasını hızlandırır. Ayrıca metan-hidrojen karışımı, alev çekirdeğinin oluşması ile birlikte türbülanslı alev gelişim oranını önemli miktarda artırır. Bu nedenle ateşleme gecikme süresi, ateşleme avansı ve yanma süresi kısalır[46].



Huang ve arkadaşlarının direkt enjeksiyonlu buji ateşlemeli bir motorda farklı oranlarda doğal gaz-hidrojen karışımının silindire direkt enjeksiyonu şeklinde yaptıkları çalışmada tespit ettikleri ateşleme avansının termik verime etkisi Şekil 3'de verilmiştir.



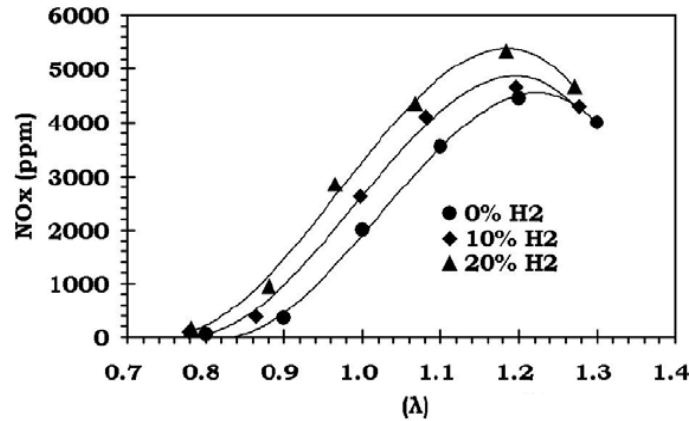
Şekil 3. Buji ateşlemeli, direkt enjeksiyonlu motorda doğal gaz-hidrojen karışımının termik verime etkisi [47]  
(Figure 3. Effect of Natural gas-Hydrogen mixture on thermal efficiency in a direct injection spark ignition engine [47])

Buji ateşlemeli doğal gaz motorunda fakir karışım çalışma şartlarında, yakıt içersine katılan hidrojen oranı ile birlikte maksimum silindir basıncı ve basınç artış oranı artmakta, çevrimler arası değişimin ise benzer şekilde azalmaktadır[48].

#### 3.3.4. LPG-Hidrojen Karışımı (LPG-Hydrogen Mixture)

Yakıt olarak LPG kullanan motorun hidrojen ile zenginleştirilmesi; sadece hidrojenle çalışan motorda meydana gelen geri tepme olayı ve emisyon miktarının azaltılması ile karakterize edilebilir [49]. Hidrojen ve benzin çok geniş bir hava-yakıt karışım oranlarında birlikte yanabilir, yüksek termik verim ve düşük kirletici emisyon üretebilir[50].

Choi ve arkadaşları, tek silindirli, buji ateşlemeli olarak modifiye ettikleri bir motorda, motorun 1400 d/dk sabit devrindeki çalışmalarında,  $\lambda=1$  olduğu yakıt-hava karışımı şartlarında, LPG yakıtı içersine hidrojenin ilavesinin %10'dan %20'ye çıkarılması ile termik verimin yaklaşık %5 arttığını tespit etmişlerdir[50]. Aynı çalışmada tespit ettikleri, LPG yakıtına hidrojen ilavesinin NOx emisyonuna etkisi şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. LPG yakıtına hidrojen ilavesinin NOx emisyonuna etkisi [32]  
(Figure 4. Effect of hydrogen addition to LPG on NOx emissions [32])



### **3.4. Motora Hidrojen Giriş Teknikleri (Hydrogen Induction Techniques to Engine)**

İçten yanmalı motor yakıtı olarak hidrojenin performans karakteristiğinin belirlenmesinde hidrojenin silindirlere alınma tekniği ve hassasiyeti çok önemli bir rol oynamaktadır[51]. Hidrojenin dağıtım sistemi karbüratörden enjeksiyon, manifoldtan enjeksiyon ve direkt enjeksiyon olmak üzere üç ana başlıkta incelenebilir[52]. Karbüratör ve manifoldtan enjeksiyon sistemi ön karışım modunda enjeksiyon olarak tanımlanabilir.

#### **3.4.1. Ön Karışım Modunda Enjeksiyon (Pre-Mixing Injection Mode)**

Manifoldtan enjeksiyon yakıt dağıtım sistemi, bir merkezi noktadan yakıtın motora alınmasından farklı olarak her bir emme kanalı içerisine emme manifoldundan hidrojenin direkt enjeksiyonu şeklindedir [52]. Hidrojenin manifoldtan enjeksiyonun yapıldığı motor çalışmaları için enjeksiyon mekanizması önemli rol oynamaktadır [2].

Genel olarak, hidrojen emme zamanın başlangıcından sonra manifold içersine sürekli veya zamanlanmış enjeksiyon şeklinde enjekte edilir [52]. Emme manifolduna hidrojenin sürekli enjeksiyonu istenmeyen yanma problemlerine sebep olur [53]. Fakat zamanlanmış enjeksiyon metodu hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanım adaptasyonunun sağlanmasında iyi bir yöntemdir [2].

Silindir dışında hidrojen-hava karışımının sağlandığı manifoldtan enjeksiyon metodu; yüksek motor verimi, geniş fakir karışım çalışma aralığı, düşük çevrimler arası değişim ve düşük NOx emisyonu sunmaktadır [54, 55 ve 56]. Fakat hidrojenin manifoldtan enjeksiyon metodu; özellikle zengin karışımlarda, erken ateşleme ve geri tepme olasılığını artırmak gibi ciddi problemlere sebep olmaktadır [57].

Manifoldtan enjeksiyonlu bir hidrojen motorunda, optimum ateşleme avansı ve stokiyometrik çalışma şartlarında, volümetrik verimin azalmasından dolayı, benzine oranla teorik güç %15 oranında azalmaktadır [58].

#### **3.4.2. Direkt Enjeksiyon (Direct Ejection)**

Sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda hidrojenin direkt enjeksiyonu aynı motorun ön karışım (karbüratör veya manifoldtan enjeksiyon) metoduyla çalışmasına oranla yaklaşık iki kat daha fazla motor gücü sağlayabilmektedir. Aynı zamanda böyle bir motorun gücü, konvansiyonel yakıtlarla çalışan motorlardan daha yüksektir. Fakat direkt enjeksiyonlu bir motorda yakıt olarak hidrojenin kullanımı hidrojenin özelliklerine bağlı olarak bazı değişiklikler gerektirir. Hidrojenin yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı, uzun tutuşma gecikme süresi ve yüksek basınç artış oranı ana değişikliklerdir. Hidrojenin yüksek alev hızı, kısa sönme mesafesi, yüksek ısı değeri ve yüksek yayılma hızı; direkt enjeksiyonlu bir motorda hidrojenin kullanılmasında ortaya çıkacak avantajlardır [1].

Direkt hidrojen enjeksiyonu tekniğinde, yüksek motor hızlarında çalışabilmek ve sıkıştırma zamanında silindir içine hidrojenin enjeksiyonu için silindir içi basınçtan daha yüksek basınçta(>80 bar) hidrojen yakıt hattı ve yüksek hidrojen akış oranına sahip enjektör kullanımı gereklidir. Ancak bu şekilde direkt enjeksiyonlu hidrojen motorunun sahip olduğu tüm avantajlardan faydalanılabilmektedir [59].

Hidrojenin direkt enjeksiyonu, özellikle yüksek motor yükleri altında karşılaşılan vuruntu ve geri tepme olayının engellenmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Fakat hidrojenin hızlı yanması sonucu oluşan yüksek ısı kayıpları, yeni nesil direkt enjeksiyonlu dizel motorlardaki kadar yüksek termik verimin elde edilmesine engel teşkil etmektedir[60].

### **3.5. İçten Yanmalı Motor Yakıtı Olarak Hidrojenin Avantajları (Advantages of Hydrogen as Internal Combustion Engine Fuel)**

- Diğer yakıtlar ile karşılaştırıldığında hidrojen ile çok fakir karışım çalışma şartlarında bile daha düşük çevrimler arası fark oluşmaktadır. Bu durum emisyon mikalarında azalmaya, verimde artışa, sessiz ve yumuşak çalışmaya sebep olmaktadır,
- Hidrojenin gaz hali mükemmel bir motor çalışması ve soğukta ilk hareket imkanı sağlamaktadır.
- Hidrojenin yüksek yanma hızından dolayı hidrojen motorları yüksek hızda çok uyumlu motor çalışmasını yerine getirebilmektedir,
- Yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlarda, daha düşük ateşleme avansı gereklidir. ÜÖN'dan hemen sonra tamamlanan yanma, yanma sonu açığa çıkan ısının büyük bir kısmını teşkil eden, yüksek motor gücü ve termik veriminin ortaya çıkmasına büyük katkı sağlar,
- İçten yanmalı motor yakıtı olarak hidrojen, diğer yakıtlara oranla daha az ısı kaybı ile çalışabilir,
- Modern yüksek sıkıştırma oranına sahip motor çalışmalarında, daha düşük hidrojen-hava karışımı ile çalışma mümkün olabilir. Bu durumda hidrojen, yüksek motor verimi ve gücünün oluşmasına olanak sağlar,
- Hidrojen diğer ticari yakıtlardan farklı olarak bilinen özellikleri ve karakteristikleri bakımından temiz bir yakıttır.
- Hidrojenin reaksiyon ısısı, geniş bir aralıkta katalizör kullanımına hassastır. Bu özellik hidrojenin yanma veriminin artırılmasına ve egzoz emisyonunun azalmasına yardımcı olur,
- Hidrojen, sahip olduğu termodinamik ve ısı transferi karakteristiğinden dolayı yüksek sıkıştırma sıcaklığının oluşmasına meyillidir. Bu durum, fakir karışımda çalışmaya ve motor veriminde artışa katkı sağlamaktadır,
- Hidrojenin yüksek yanma oranı; yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlarda, yanma odası geometrisi, türbülans seviyesi ve emme girişi swirl etkisine daha az bağımlı motor performansının oluşmasını sağlar,
- Hidrojen seyreltici kullanımına müsaade eder. Bu durum düşük ısıl değere sahip yakıt karışımının daha iyi yanmasına müsaade eder,
- Yakıt olarak hidrojeni kullanan buji ateşlemeli motorların çalışması, çoğu yakıt pili sisteminden farklı olarak hidrojenin saflığına daha az bağımlıdır,
- Hidrojenin yüksek difüzyon oranı, olası hidrojen sızıntısının hemen atmosfere yayılması nedeniyle hidrojeni yakıt olarak kullanan motorlar için yanma ve patlama riskini azaltmaktadır [15].

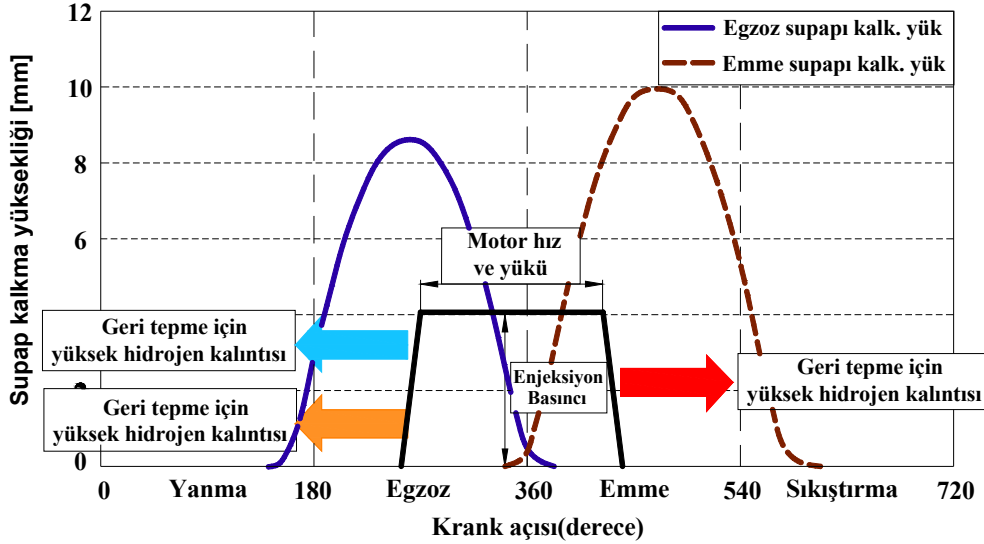
### **4. HİDROJENLE ÇALIŞAN İÇTEN YANMALI MOTORLARININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ (TECHNICAL CHARACTERISTICS OF HYDROGEN-FUELED INTERNAL COMBUSTION ENGINES)**

#### **4.1. Hidrojen Motorunda Geri Tepme ve Kontrolü (Backfire and its Control in Hydrogen Engine)**

Hidrojeni yakıt olarak kullanan içten yanmalı motorlar ile yapılan deneysel çalışmalarda geri tepme problemi ve hızlı basınç artış oranı sıklıkla karşılaşılan bir durum olmuştur. Yakıt olarak hidrojeni kullanan buji ateşlemeli motorlar üzerine yapılan literatür araştırmalarında, fakir hava-yakıt karışım oranından stokiyometrik hava yakıt oranına yaklaştıkça oluşan geri tepme ve/veya erken

ateşleme olayının en önemli sorun olduğu ve bu durumun motor torkunu sınırladığı tespit edilmiştir [8]. Geri tepme; emme portlarında hidrojenin taze dolgusunun ateşlenmesi, erken ateşleme ise silindirde emme supabı kapandıktan sonra buji kıvılcımı çakmadan önce hidrojen dolgusunun ateşlenmesi olayıdır. Emme ve egzoz olayındaki gaz dinamiği olayları göz önünde bulundurulursa, emme süreci oldukça karmaşıktır. Bu yüzden, manifoldtan enjeksiyonlu bir hidrojen motorunda özellikle ilk ateşlemede bölgesel olarak zengin hidrojen alanı oluşmalıdır [61]. Hidrojen motorunda geri tepme olayı, emme zamanında silindire alınan taze hava içersine hidrojenin püskürtülmesi ile kontrol edilebilir. Böylece hidrojenin, yanma odası içersinde bir önceki çevrimden kalan sıcak yağ partikülleri ve sıcak noktalar ile teması veya bu etkenlerden dolayı ısınması minimize edilmiş olur [62].

Liu ve arkadaşları manifoldtan enjeksiyonlu bir içten yanmalı motorda hidrojen kullanımı üzerine yaptıkları simülasyon çalışmasında; geri tepme olasılığının başlıca emme manifoldu içersindeki artık hidrojen konsantrasyonuna bağlı olduğunu ve emme manifoldu içersindeki kalıntı hidrojen konsantrasyonu azaldıkça geri tepme olasılığının azaldığını tespit etmişlerdir [61]. Şekil 5’de bu çalışmada elde ettikleri, hidrojen motoru için adapte edilmiş bir CNG enjektörünün karakterize eğrisi ve geri tepme ihtimali verilmiştir.



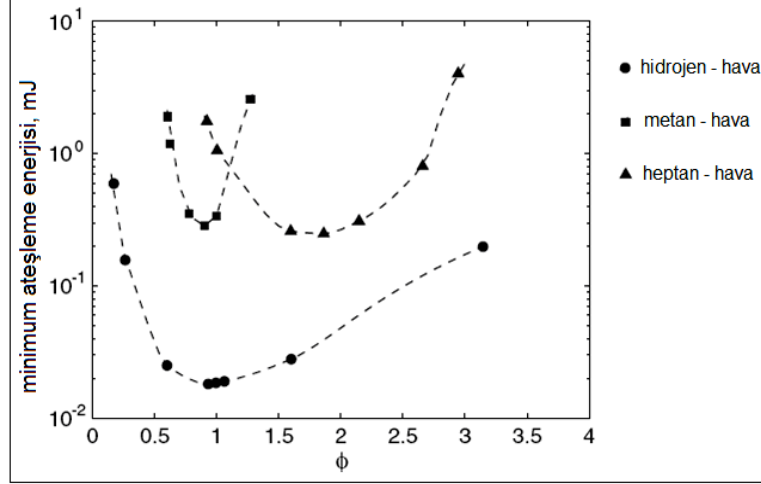
Şekil 5. Hidrojen enjeksiyonu ve geri tepme ihtimali[61]  
(Figure 5. Hydrogen injection and probability of backfire[61])

#### 4.2. Hidrojen Motorunda Erken Ateşleme ve Etkisi (Pre-Ignition and its Effect in hydrogen Engine)

Hidrojenin yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına rağmen, hidrojen-hava karışımının ateşleme enerjisi hidrokarbon-hava karışımının ateşleme enerjisinden daha düşüktür. Hidrojen-hava karışımının düşük ateşleme enerjisi, yakıt olarak hidrojeni kullanan buji ateşlemeli motorların erken ateşlemenin sınırlandırıcı etkisine katkı sağladığı anlamına gelmektedir. Erken ateşleme genellikle; buji elektrotları, supaplar veya bir önceki çevrimden kalan karbon birikintileri gibi yanma odası içersindeki sıcak noktalardan dolayı oluşan yüzey ateşlemesinden kaynaklanmaktadır. Erken ateşleme olayı, yanma başlangıcının öne alınmasını ve kimyasal ısı transferi oranında bir artışa sebep olması nedeniyle sınırlayıcı bir etkidir. Kimyasal ısı transferi oranındaki artış sırasıyla; hızlı basınç yükselmesi, yüksek maksimum basınç, akustik dalgalanma sonucu oluşan gürültü ve

yüksek ısı oluşumu ile sonuçlanmakta ve bu durum silindir iç yüzeyinde yüksek sıcaklığa sebep olmaktadır.

Erken ateşleme ile meydana gelen yanma başlangıcının öne alınması olayı gizli bir etkiye sebep olabilir ve eğer kontrol edilmezse motor yorgunluğuna neden olabilir[63]. Şekil 6'da Atmosferik basınçta hidrojen-hava, metan-hava ve heptan-hava karışımlarının  $\Phi$ 'ya bağlı ateşleme enerjilerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6. Atmosferik basınçta hidrojen-hava, metan-hava ve heptan-hava karışımlarının  $\Phi$ 'ya bağlı ateşleme enerjilerinin değişimi [64]  
(Figure 6. Variation of ignition energy of hydrogen-air, methane-air and heptane-air mixtures at atmospheric pressures with  $\Phi$  [64])

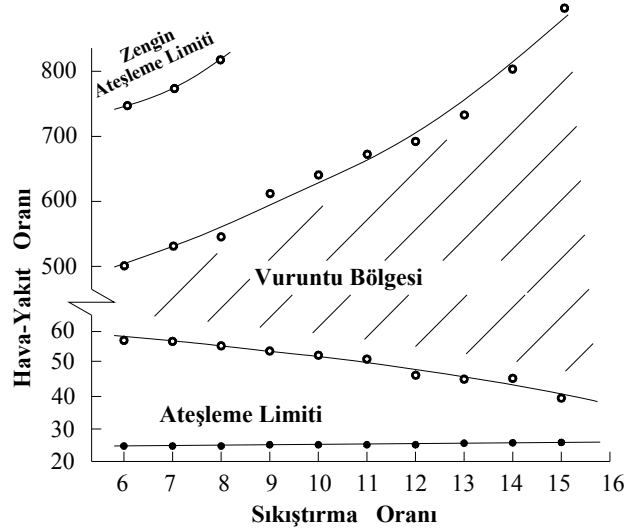
#### 4.3. Hidrojen Motorunda Vuruntu ve Kontrolü (Knock and its Control in Hydrogen Engine)

Yanma vuruntusu; yanma odası içinde gelişen alev cephesi dışında kalan son gaz bölgesinin bir kısmının kendiliğinden tutuşmasının bir sonucudur. Bu anormal yanma gerçekleştiği zaman alev cephesi dışında kalan yanmamış karışımın kimyasal enerjisi hızla serbest hale geçer. Bu durum yüksek bölgesel basınç ve yanma odası karşı duvarına doğru birkaç bar genliğinde basınç dalgalarının oluşmasına sebep olur. Bu basınç dalgaları motor bloğu boyunca yayılır ve motora çok yakın gözlemci tarafından duyulan yanma gürültüsü olarak havaya yayılır. Silindir içersindeki yanmış sıcak gazların büyük genlikteki basınç dalgaları, artan termal ve mekanik gerilmeler sonucu oluşan mekanik motor yorgunluğuna sebep olur [65]. Fakat yakıt olarak hidrojeni kullanan motorda oluşan yanma vuruntusu ile benzin motorunda oluşan yanma vuruntusu bazı farklılıklar içermektedir[66].

Hidrojen motorunda vuruntu, buji kıvılcımı ile oluşan alev cephesi dışında kalan ve hidrojen-hava karışımından oluşan son gaz bölgesinin kendi kendine tutuşması olarak tanımlanabilir. Vuruntu ve erken ateşlemenin genel anlamda neredeyse ayırt edilemez olması, hidrojen motoru ile ilgili literatür çalışmalarında ikisi arasında bir ayrımın yapılamamasının başlıca nedenidir[8].

Emme dolgusunun sıcaklığı, sıkıştırma oranı ve ateşleme zamanı hidrojen motorunda vuruntuyu kontrol altında tutmakta önemli etkiye sahiptir[67]. Argon gibi seyrelticilerin emme dolgusuna ilave edilmesi vuruntunun önlenmesi için iyi bir metottur. Daha fazla hidrojenin gönderilmesi ve karışımın zenginleştirilmesi de vuruntu meylini azaltır. Fakat bu durumda egzozdan yanmamış hidrojen çıkışı olur[68].

Şekil 7'de atmosferik şartlarda çalışan hidrojen motorunda sıkıştırma oranının değişimiyle ateşleme ve vuruntu için çalışma limitlerinin değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 7. Atmosferik şartlarda çalışan hidrojen motorunda sıkıştırma oranına bağlı olarak ateşleme ve vuruntu için çalışma limitlerinin değişimi [69]

(Figure 7. Variation of engine operating limits for ignition and knock at different compression rates in a hydrogen engine running at atmospheric conditions [69])

#### 4.4. Hidrojen Motorunda Güç, Volümetrik Verim, Çevrimler Arası Fark ve Termik Verim (Power, Volumetric Efficiency, Thermal Efficiency and Cycle-by-cycle Variations in Hydrogen Engine)

Hidrojenin fosil yakıtlara oranla yüksek yayılma hızı; karışım oluşumunu, türbülansı ve dolgunun homojenliğini artırır. Hidrojenin benzine oranla daha küçük sönme boşluğuna sahip olmasından dolayı, alev silindir duvarına ve tam yanma durumunda daha uzak girintilere yaklaşabilir[70]. Hidrojenin düşük sönme mesafesi yakıtın tam yanmasına yardımcı olur. Aynı zamanda, düşük sönme mesafesi ve yüksek yanma hızından dolayı daha yüksek yanma odası duvar sıcaklığı oluşurken soğutma suyuna geçen ısı kaybı miktarı artar[71].

Emme havası ile birlikte silindire alınan hidrojenin, havaya oranla büyük molekül hacmine sahip olması, ön karışımli veya ön yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı hidrojen motorlarında volümetrik verimi doğal olarak azaltmaktadır. Örneğin stokiyometrik hidrojen-hava karışımı hacimsel olarak yaklaşık %30 hidrojen içermektedir. Oysa tamamen buharlaşmış benzin-hava stokiyometrik karışımı hacimsel olarak yaklaşık %2 benzin içermektedir. Güç yoğunluğu ile ilgili bu kayıp, hidrojenin yüksek enerji kapasitesi ile kısmen dengelenir. Stokiyometrik hava-yakıt karışımında, bir kg hava ile hidrojenin yanma ısısı 3,37 MJ, benzinin yanma ısısı ise 2,83 MJ'dür. Ön karışımli veya ön yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı hidrojen motorlarının maksimum güç yoğunluğu, aynı motor çalışma şartlarında benzinle elde edilen güç yoğunluğunun yaklaşık %83'üne eşittir [72].

Hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğunun çok düşük olmasından dolayı hidrojenle çalışan motorlar bazen düşük motor torku üretmektedir [26]. Hidrojenin geniş kelebek açıklığında çalışması volümetrik verimin yerine karışımın zenginleştirilmesi ve pompalama kayıplarının azaltılması yönünde avantaja sahiptir. İyi bir tutuşmanın olmasından dolayı yanmamış hidrojen oluşumu; çok yüksek yüklerde yanma stabilizesinin azalması ve tam yükte ortalama seviyesinde NOx emisyonun oluşumu, geniş kelebek açıklığında çalışma için var olan sınırlamalardır [73].

Ön yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı hidrojen motoru, yüksek motor yüklerinde düşük volümetrik verim sağlarken, düşük ve orta yük aralığında içten yanmalı motorlarda kısılmaz emme girişi, volümetrik verime katkı sağlayabilir. Burada avantaj, kısılma plakası ekseninde meydana gelen basınç düşmesinin oluşturduğu pompalama kayıplarının ortadan kalkması ve yakıt veriminin artırılmasıdır [74].

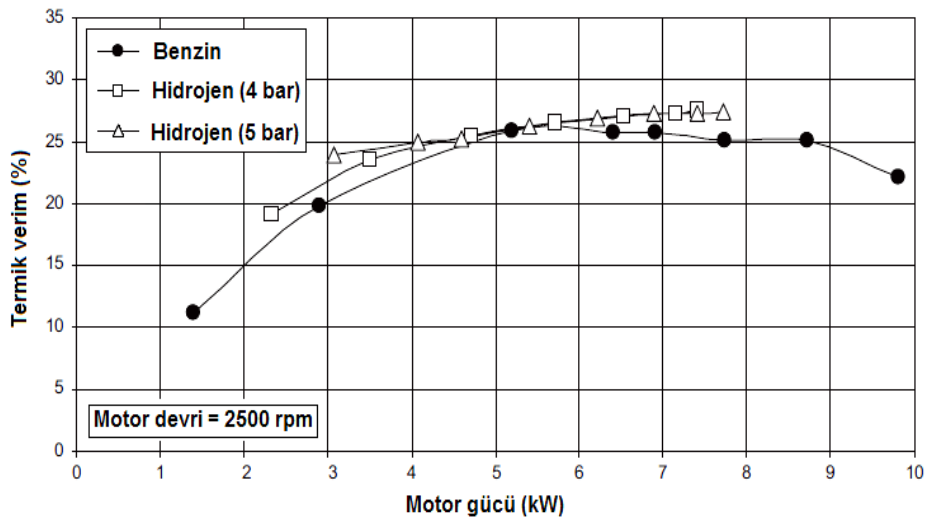
Normalde çok fakir karışım ile çalışan motorlarda çevrimler arası değişim oluşur. Fakat hidrojen ile çalışan motorlarda bu değişim diğer hidrokarbon yakıtlar ile çalışan motorlara oranla daha düşüktür [75]. Hidrojenin benzine oranla 5 kat daha fazla yanma hızına sahip olmasından dolayı hidrojenle çalışan motorlarda çevrimler arası fark, benzinli motorlara oranla daha düşüktür. Bu durum hidrojen için daha kısa yanma süresi sağlar [76].

Hidrojen, içten yanmalı motorda yüksek termik verimin elde edilmesi için gerekli, yüksek araştırma oktan sayısı ve düşük alevlenme limitine sahiptir [77]. Hidrojenin alev parlaklığının düşük, alev hızının yüksek olması ise Otto motorlarında ideale yakın bir yanmanın oluşmasını sağlayarak diğer karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltacağından ısı verimi arttırır [78].

İçten yanmalı motor yakıtı olarak hidrojen, hızlı yanma potansiyelinden dolayı motorun termik veriminin artırılması için büyük bir potansiyele sahiptir. Hidrojenin bu potansiyeli içten yanmalı motorlar için yanmayı ideal sabit hacimde yanma işlemine yaklaştırmaktadır [79].

Alev hızı ve adyabatik alev sıcaklığı; motor çalışmasının kontrolü, emisyon miktarı, yanma stabilizesi ve özellikle termik verim için önemli bir özelliktir[59]. Hidrojen motorunda, pompalama kayıplarının ihmal edilebileceği tam gaz keleşliği açıklık oranındaki motor çalışması termik verimin artırılması için faydalıdır [1]. Hidrojenle çalışan motorda ateşleme avansının kontrolü, termik verimi etkileyen sabit hacimde yanma derecesini dikkate değer miktarda etkiler [80].

Ganesh ve arkadaşlarının tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda yaptıkları çalışmada, hidrojen ve benzinin manifoldtan enjeksiyonu durumunda motor gücüne bağlı termik verimin değişimi Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Hidrojen ve benzinin manifoldtan enjeksiyonu durumunda motor gücüne bağlı termik verimin değişimi[26]

(Figure 8. Variation of thermal efficiency as a function of engine power at the case of manifold injection of hydrogen and gasoline [26])

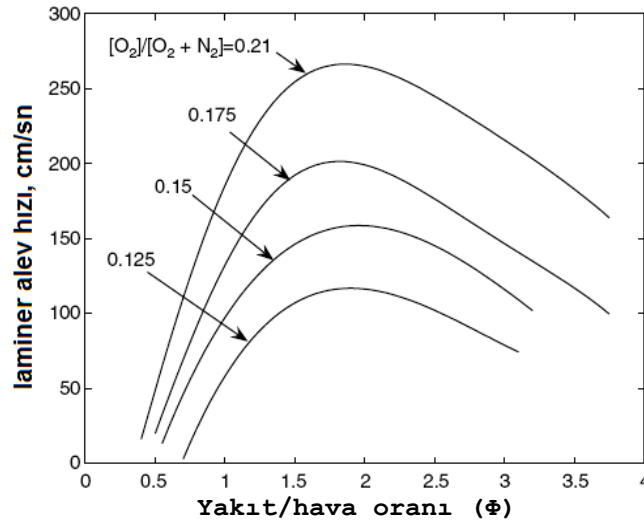
#### 4.5. Hidrojen Motorunda Alevlenme Limiti, Alev Hızı ve Adyabatik Alev Sıcaklığı (Flammability Limit, Flame Speed and Adiabatic Flame Temperature in Hydrogen Engine)

Hava içersinde hacimsel yakıt oranı bazında 298 K'de alevlenme limiti, hidrojen için %4-75 iken benzin için %1-7,6'dır. İçten yanmalı motorlar da  $\Phi$  (yakıt-hava oranı) açısından alevlenme limiti çok önemlidir. Hidrojen için alevlenme sınırı  $0,1 \leq \Phi \leq 7,1$  benzin için ise yaklaşık  $0,7 \leq \Phi \leq 4$ 'dür. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yüksek karışım şartlarında sabit çalışmaya uygun olmasından dolayı alevlenme sınırı yakıt/hava oranı ( $\Phi$ ) açısından yeniden tanımlanabilir. Bu durum, yakıt ölçümü ve emisyon miktarının azaltılması için motor çalışması üzerinde daha fazla kontrol imkanı sağlar[59].

Hidrojenin laminer alev hızı normal basınç ve sıcaklıkta 1,9 m/sn dir. Bu değer çoğu hidrokarbon yakıtının laminer alevlenme hızı olan 0,4 m/sn değerinin yaklaşık beş katıdır [15]. Hidrojenin laminer alev hızı gaz fazındaki hidrokarbon yakıtlardan büyük, alevlenme limiti ise düşüktür. Ayrıca, hidrojen çok yüksek yayılma gücüne sahiptir. Diferansiyel yayılmanın bir sonucu olarak ısı transferi oranı, termal yayılma kararsızlığı yoluyla yanma oranı ve türbülanslı alev hızı gibi genel yanma karakteristikleri değişim gösterir [31].

Hidrojenin diğer yakıtlara oranla daha çok tam yanma özelliği, yanma sıcaklığını düşürür ve kirletici emisyon miktarını azaltır [52].

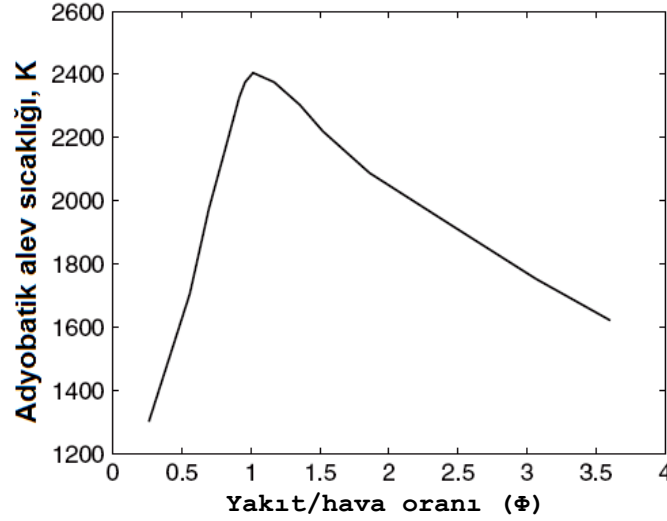
Şekil 9'da hidrojen-hava karışımı için laminer hava hızının  $\Phi$  (yakıt-hava oranı) oranına bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 9. Hidrojen- hava karışımının laminer yanma hızı [64]  
(Figure 9. Laminar flame speed of hydrogen-air mixture [64])

Hidrojenin yüksek adyabatik alev hızı, yakıt olarak hidrojeni kullanan içten yanmalı motorlarda yanmayı ideal sabit hacimde yanmaya oldukça yaklaştırır. Bu durum, motorda yüksek termik verimin elde edilmesi için oldukça faydalıdır [76]. Fakat hidrojenin yüksek adyabatik alev sıcaklığı, temiz hidrojen motorunda yüksek NOx emisyon performansına neden olmaktadır. Yüksek NOx emisyon miktarı, hidrojen motorunun ticarileşmesinde önemli bir engel teşkil etmektedir [81]. Şekil 10'da hidrojen-hava karışımı için adyabatik alev sıcaklığının  $\Phi$  (yakıt-hava oranı) oranına bağlı değişimi verilmiştir.



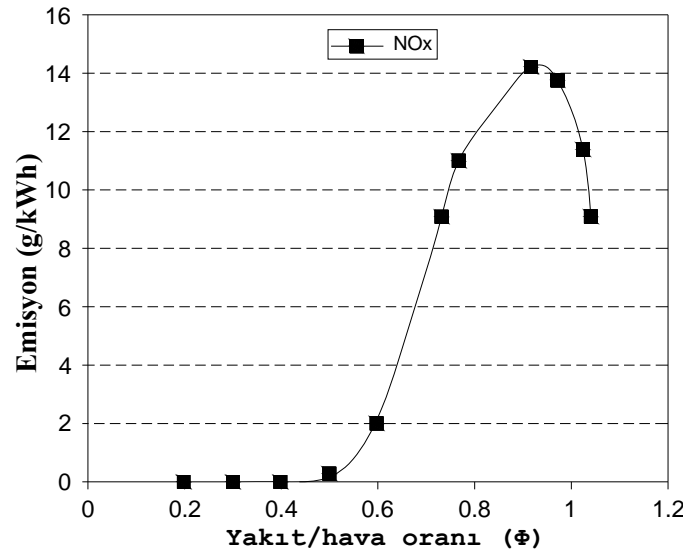


Şekil 10. Hidrojen- hava karışımının adyabatik alev sıcaklığı [82]  
(Figure 10. Adiabatic flame temperature of hydrogen-air mixture [82])

#### 4.6. Hidrojen Motorunda NO<sub>x</sub> Emisyonu ve Azaltma Yöntemleri (NO<sub>x</sub> Emission and Dimunition Methods of NO<sub>x</sub> in Hydrogen Engine)

Hidrojenin karbon ve sülfür içermemesinden dolayı hidrojenle çalışan motorun; hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO), sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>), kurşun, duman, partikül madde, ozon ve diğer kanserojen bileşikleri üretmiyor olması hidrojen motorunun ayırt edici özelliğidir. Fakat hidrojenle çalışan içten yanmalı motorların çevreye zararlı NO<sub>x</sub> emisyonunu yüksek miktarda üretiyor olması, bir dezavantajdır. Hava içersinde nitrojenin varlığından dolayı hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlarda NO<sub>x</sub> emisyonu oluşmaktadır [83]. Hidrojenle çalışan motorlarda yük artışı ile birlikte maksimum çevrim sıcaklığı hızla artar ve NO oluşum meyli hızlanır [83 ve 84].

Şekil 11'de Manifoltdan enjeksiyonlu buji ateşlemeli bir hidrojen motorunda NO<sub>x</sub> emisyonun yakıt/ hava oranına( $\Phi$ ) göre değişimi verilmiştir.



Şekil 11. NO<sub>x</sub> emisyonun  $\Phi$  bağlı değişimi[52]  
(Figure 11. Variation of NO<sub>x</sub> emission as a function of  $\Phi$  [52])

Homojen dolgulu içten yanmalı motorlarda, çok fakir karışım şartlarında nitrojen oksit emisyonları sifıra yakın bir değere düşürülebilir [7].

Yeterince fakir karışımın kullanımı ve karışım zenginliği, NO<sub>x</sub> emisyonunu 10-100 ppm arasında tutmak için bir sınırlayıcı olabilir. Fakat bu durum, maksimum motor gücünde büyük bir azalma anlamına gelir. Stokiyometrik karışımın ve NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmak için konvansiyonel üç yollu katalitik konvektörün kullanımı ile motor bu limitin üzerinde bir kelebek açıklığında çalıştırılabilir [73]. Ayrıca hidrojen-hava karışımının stokiyometrik değerden zengin karışıma doğru, egzoz içerisinde bir miktar yanmamış hidrojen oluşacak şekilde çok küçük miktarda artırılması NO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılması için iyi bir yöntemdir [85]. Fakat bu yöntem motor veriminde bir miktar azalmaya sebep olur.

NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmada kullanılacak bir diğer yöntem, yük kontrolü için kelebek açıklık oranının yerine stokiyometrik karışım kullanılarak egzoz gazı re-sirkülasyonunun (EGR) kullanılmasıdır. Burada EGR miktarı motordan istenilen güç çıkışına bağlıdır [86,87]. Bu yöntem, kelebek kontrolüne oranla daha yüksek motor verimini sağlar. Ayrıca EGR yöntemi, stokiyometrik karışımda geri tepme olmaksızın motor çalışmasına izin verirken, sınır şartlarındaki NO<sub>x</sub> emisyonu için yüksek motor gücü sağlar [88].

Buji ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda NO emisyonunu azaltmasında emme manifoldu içersine suyun enjekte edilmesi en verimli yol olarak tespit edilmiştir [89].

NO emisyonunun kontrolü için tespit edilen bir diğer verimli teknik; emme havası içersine buharın enjekte edilmesidir [90]. Heffel 4 silindirli, buji ateşlemeli, manifoldtan enjeksiyonlu bir motorda, motorun 1500 d/dk ve 3000 d/dk sabit devirlerinde yaptığı iki farklı çalışmada; 3 yollu katalitik dönüştürücü ve EGR (egzoz gazı re-sirkülasyonu) kullanımı ile NO<sub>x</sub> emisyonunu 1 ppm'den daha düşük bir değere azaltmanın mümkün olacağını tespit etmiştir [86 ve 91].

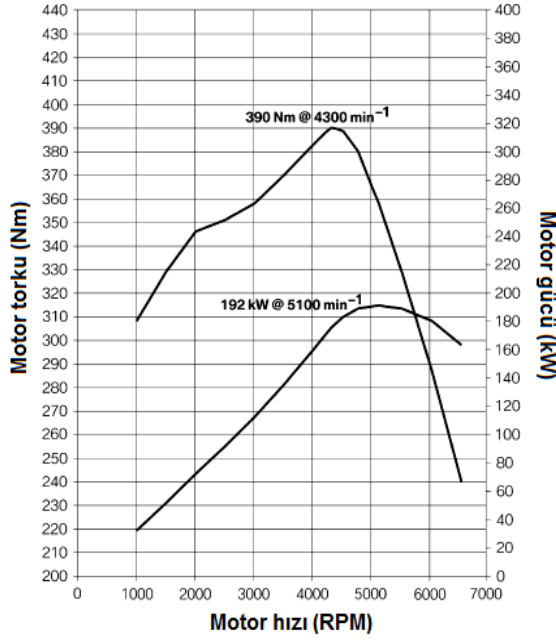
## **5. HİDROJEN MOTORU KULLANAN OTOMOBİL TASARIMI (DESIGN OF AUTOMOTIVE WITH HYDROGEN ENGINE)**

### **5.1. Çift Yakıt Modunda Hidrojen Motoruna Sahip Otomobil (The Automotive With Hydrogen Engine In Dual Fuel Mode)**

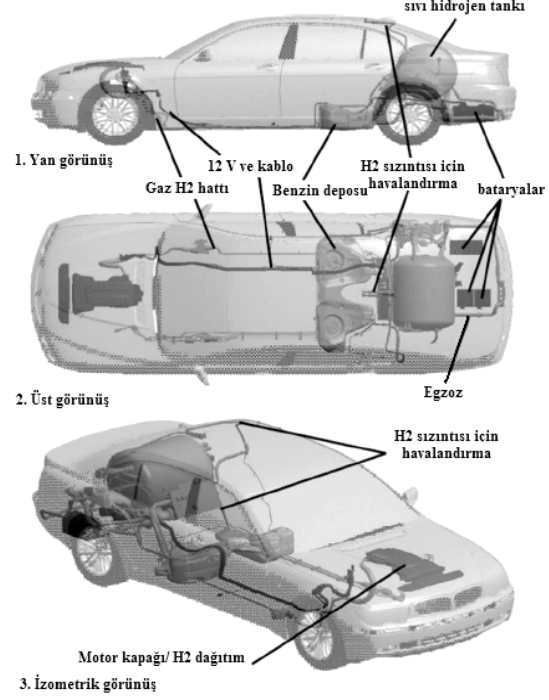
Yakıt olarak benzin ve hidrojeni kullanan çift yakıtlı otomobil tasarımı BMW şirketi tarafından tasarlanarak 2007 yılında BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel adını taşıyan 10 gösteri aracı olarak imal edilmiş ve Argonne laboratuvarında test edilmiştir. Bu otomobil, 6.0 L V12 motoruna, arka koltukların arkasına yerleştirilmiş 170 L hacminde 8 kg hidrojen depolayabilen kriyojenik hidrojen tankına ve 74 litrelik benzin tankına sahiptir. Otomobil, yaklaşık 200 km hidrojen motoru modunda ve 500 km benzinli motor modunda menzile sahiptir [92].

Aracın bi-yakıt versiyonundaki çift-mod güç ünitesi, hidrojen miktarı azalmaya başlayınca benzinli yakıt moduna geçiş yapmaktadır. Otomobilde maksimum tank basıncı (5,1 bar) bir kaynama valfiyle kontrol edilmektedir. Serbest kalan hidrojen, hidrojeni su buharına oksitleyen bir katalizör tarafından desteklenmektedir. Otomobil; birincisi stokiyometrik işlem düzenini, ikincisi ise stokiyometrik işleme geçerken oluşan NO<sub>x</sub> zirvesini azaltan iki monolite sahip geliştirilmiş katalizörlerle donatılmıştır [93].

Araç motorunun hidrojenle çalışması esnasında yapılan testlerde elde edilen motor hız karakteristik eğrisi şekil 12(a)'da, BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel aracının yakıt sisteminin parçaları şekil 12(b)'de verilmiştir



(a)



(b)

Şekil 12.(a) BMW Hidrojen 7 bi-yakıt aracının güç ve tork eğrisi  
(b)BMW Hidrojen 7 bi-yakıt aracı yakıt sisteminin parçaları[93]  
(Figure 12.(a) Variation in power and torque with engine speed for BMW Hydrogen 7 bi-fuel car (b) BMW Hydrogen 7 bi-fuel car fueling system components [93])

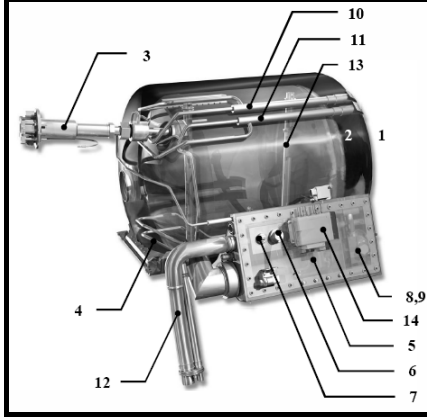
## 5.2. Araç Üzerinde Hidrojenin Depolanması (Hydrogen Storage on Vehicle)

Taşıtlarda hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında önemli teknolojilerden biri taşıt üzerinde hidrojen depolanmasıdır. Hidrojen, sıvı fazda depolanması durumunda en büyük enerji yoğunluğuna sahiptir ve bu nedenle yüksek basınçlı depolama ve katı hidrojen depolama sistemlerine göre daha uzun depolama süresine sahiptir[94].

Depo içerisindeki sıvı fazdaki hidrojene ısı radyasyonla ısı girişi depodan fiberglas malzeme ile ayrılmış yüksek reflektör özelliğine sahip yaklaşık 40 kat alüminyum folyo tabakası tarafından sağlanmıştır. 0,1 paskalın altında bir vakum basıncı ile ısı konveksiyon minimuma indirilmiştir. Dış ceket içerisinde iç tankın pozisyonu; seyahat yönünde 20 g ve seyahat yönüne dikey yönde 8 g dikey ivmelenmeye direnç gösterebilecek karbon fiber katkılı plastik malzemeden oluşan bir destek yapısı ile sağlanmıştır. Otomobil park ettiği anda depolanan hidrojen içersine yaklaşık 2,5 W sınırlı ısı geçişi iç tank basıncının artmasına sebep olur. Bu yüzden sistem yaklaşık bir güne özerk bir yapıya sahiptir. O zaman tank içerisindeki hidrojenin yaklaşık %4'ü kaynar. Kaynayan hidrojen su olarak taşıta yayılır ve kaynama dönüştürme sistemine geçer. Şekil 13'de görüldüğü gibi sıvı hidrojen yakıt tankı; aralarında bulunan termik yalıtkan vasıtasıyla tank içindeki hidrojen sıcaklığının yaklaşık 20 K'de sabit tutulduğu bir paslanmaz çelik dış ceket (1) ve bir iç tanktan (2) oluşmaktadır [94].

- **Yakıt İkmali:** Yakıt ikmali esnasında kriyojenik çıkış valfi (10) ve kriyojenik giriş valfinin (11) her ikisi de açıktır. Sıvı hidrojen Johnston-Cox bağlantısı ve iç tank (2) içerisindeki kriyojenik giriş valfi yoluyla dolun istasyonundan sıvı hidrojen yakıt tankına akar. İç tank basıncını düşük tutabilmek için buharlaşmış hidrojen gazı kriyojenik çıkış valfi yoluyla iç

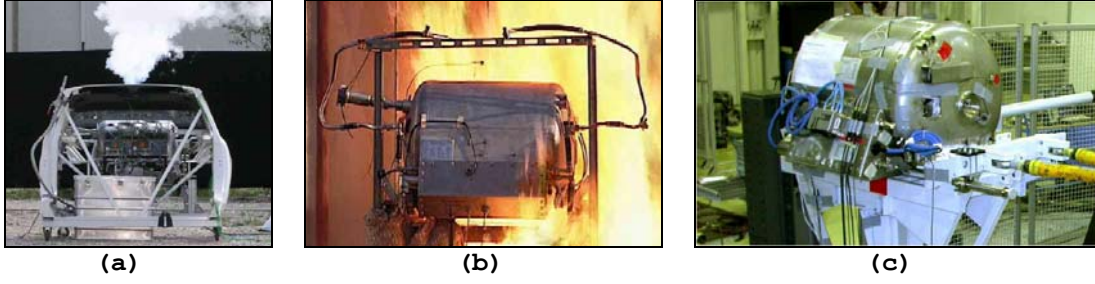
tanka gider. Bu durumda yakıt ikmali işlemi tamamlanır ve her iki kriyojenik valf kapanır.



1. Dış ceket,
2. İç tank,
3. Yakıt ikmal bağlantısı,
4. İç tank ısıtıcısı,
5. Soğutma suyu ısı değiştiricisi,
6. Basınç kontrol valfi,
7. Yakıt kesme valfi,
8. Kaynama kontrol valfi,
9. Basınç rahatlatma valfleri,
10. Kriyojenik giriş valfi,
11. Kriyojenik çıkış valfi,
12. Hidrojen boruları,
13. Sıvı seviye sistemi,
14. Elektronik devre

Şekil 13. Sıvı hidrojen yakıt tankı [94]  
(Figure 13. Liquid hydrogen fuel tank [94])

- **Sıvı Hidrojen Yakıt Tankının Çalışması:** İç tanktan hidrojenin çıkışı için kriyojenik çıkış valfi açılır. Gaz fazındaki hidrojen iç tanktan soğutma suyu ısı değiştiricisine (5) akar. Ortam sıcaklığından daha yüksek sıcaklıktaki gaz fazındaki hidrojen, basınç kontrol valfi (6) ve hidrojen boruları (12) vasıtasıyla kapatma valfi (7) üzerinden akarak sıvı hidrojen tankına bağlı içten yanmalı motor veya yakıt piline akar. Eğer iç basınç; basınç düzenleyici tarafından ayarlanan tolerans değerinin altına düşerse, basınç kontrol valfinin akış girişi kısmen açılarak iç tank ısıtıcısı (4) boyunca geçen ısınmış hidrojen gazının akışına müsaade edecektir. Isı transferinden dolayı sıvı hidrojen iç tank ısıtıcı etrafında buharlaşır. Böylece iç tankta basınç sabit bir seviyede tutulur. Motor kapandığı zaman her iki kriyojenik valf ve kapama valfi kapanır.
- **Kaynama ve Güvenlik:** Uzun dönem park esnasında, iç tank içerisindeki hidrojen basıncı, kaynama sınırı kontrol basıncı sınırında, kaynama kontrol valfi (8) açılana kadar artar. İç tankta aşırı basınç oluşmadan kriyojenik valfler açılmamalıdır. Eğer kaynama kontrol sistemi, ısıl izolasyonun azalması gibi durumlarda yeni gelen hidrojeni kontrol edemezse iç tank içerisindeki basınç artışı ilk basınç rahatlatma valfi açılana kadar devam eder. Vakum düşmesi veya bir kaza durumunda tank içerisindeki basıncın kabul edilebilir seviyede tutulması için birinci basınç rahatlatma valfi hidrojen buharını serbest bırakır[94].Daha uç bir kaza senaryosunda bile ideal güvenliği sağlamak ve hava boşluğu izolesinde bir zarara yakıt tankının güvenlik teçhizatının tepkisini ölçmek için hidrojen tankı, ateşe maruz bırakma, silahla ateş etme, çok büyük mekanik hasar gibi olağanüstü şartlar altında test edilmiştir [95]. Şekil 14'de sıvı hidrojen yakıt tankının güvenlik testlerine ait bazı resimler verilmiştir.



Şekil 14. (a) Basınç rahatlatma valf testi (b) 1000 C°'de yanma testi (c) Dinamik vibrasyon testi [94]  
(Figure 14. (a) Pressure relief valf test (b) Combustion test at 1000 °C temperature (c) Dynamic vibration test [93])

Bunlara ek olarak başka bir test serisinde hidrojen dolu tankların etrafı, 70 dakika boyunca 1000 C°'den (1830 F°) daha fazla sıcaklıktaki ateşlerle çevrilmiştir (Şekil 15a). Bu şartlar altında bile, tanklardaki hidrojen neredeyse fark edilmeyecek bir şekilde güvenli valflardan yavaşça kaçsa da, tank herhangi bir sorun çıkarmamıştır [94].

## 6. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Hidrojen karbon esaslı olamayan ve çevre dostu olan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Hidrojen bulunabilirliği, yüksek enerji bileşiği, minimum emisyon miktarı, kolay ve güvenli depolanması ve taşınması gibi avantajları ile içten yanmalı motor yakıtı olarak bazı temel kriterleri yerine getirmektedir. Hidrojen bu kriterler bakımından birçok yakıtta üstünlük sağlamaktadır. Hidrojen buhar tıkaçı, soğuk silindir duvarında alevin sönmesi, yetersiz buharlaşma veya fakir karışım ve zehirli emisyon üretimi gibi yanma problemlerine sebep olmaz. Hidrojen, diğer termo-fiziksel özellikleri ile oldukça yüksek ısı transferi karakteristiklerine sahiptir [96].

Hidrojeni içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımının incelendiği bu çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir;

- Hidrojenin kriyojenik sıvı olarak depolanmış haliyle taşıtlarda taşınması mümkündür. Bu yöntemin taşıtlarda hidrojenin depolanması ve taşınması için boyut ve güvenlik açısından en uygun yöntem olarak görülmesine rağmen depolama maliyeti yüksektir,
- Bazı küçük değişikliklerle benzin motorları hidrojen ile çalışır duruma getirilebilirler,
- Buji ateşlemeli içten yanmalı motora sahip taşıtlarda benzin ve hidrojeni çift yakıt modunda kullanmak mümkündür,
- Buji ateşlemeli hidrojen motorunun ısıl verimi benzin motorunun ısıl verimine yakındır,
- Hidrojenin geniş tutuşma aralığına sahip olmasından dolayı, hidrojen motorda bir gaz kelebeği olmadan kullanılabilir. Bu durumda, karışım silindirlere kısılmadan gönderilebileceğinden motorda pompalama kayıpları düşer,
- Buji ateşlemeli hidrojen motorunda karşılaşılan geri tepme olayı, hidrojenin emme manifoldundan kontrollü bir şekilde enjeksiyonu ile giderilebilir,
- Buji ateşlemeli hidrojen motorunda emme havasının sıcaklığı, sıkıştırma oranı ve ateşleme zamanının kontrolü ile yanma vuruntusu kontrol altına alınabilir,

- Hidrojenin, havaya oranla büyük molekül hacmine sahip olmasından dolayı özellikle ön karışımli hidrojen motorlarında ortaya çıkan düşük volümetrik verim problemi, hidrojenin motorlarda gaz keleşbeği olmadan çalışmaya uygunluğu ile sağlanan düşük pompalama kaybı ve hidrojenin yüksek enerji kapasitesi ile kısmen telafi edilebilir,
  - Hidrojenin yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda hidrojenin tek yakıt olarak kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar, hidrojenin diğer hidrokarbon yakıtlara ilave yakıt olarak kullanımı için daha uygundur,
  - Buji ateşlemeli doğal gaz motoruna düşük oranlarda hidrojen ilavesi, doğal gazın yanma problemlerinin çözümlenmesine yardımcı olabilir,
  - Stokiyometrik çalışma şartlarında hidrojen motorunda yüksek miktarda NO<sub>x</sub> oluşur. Fakat silindirlere gönderilen karışım fakirleştirilerek NO<sub>x</sub> oluşumu azaltılabilir,
  - Yakıt olarak hidrojeni kullanan motorlarda özellikle yüksek yüklerde ortaya çıkan yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu, uygun egzoz gazı re-sirkülasyonu ve 3 yollu katalitik konvektör kullanımı ile göz ardı edilebilecek seviyeye düşürülebilir,
- Yakıt olarak hidrojeni kullanan motorların, hidrojenin üretimi ve taşıtlarda depolanması için gerekli maliyetinin azaltılması ile yaygınlaşabileceği düşünülmektedir.

#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Verhelst, S. and Sierens, R., (2001). Hydrogen engine-specific properties, *Int. J. Hydrogen Energy* 26:987 - 1076.
2. Das, LM., 2002. Hydrogen engine: research and development R&D programmer in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi. *Int. J. Hydrogen Energy* 27:953 - 965.
3. Lavrive, J.F., Mahieu, V., Griesemann, J.C., and Rickeard, D.J., (2004). Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context, SAE Paper 2004-01-1924.
4. Peschka, W., (1998). Hydrogen: The futures cry fuel in internal combustion engines, *International Journal of Hydrogen Energy* 23(1).
5. Subramanian, V., Mallikarjuna, J.M., and Ramesh, A., (2005). Performance, emission and combustion characteristics of a hydrogen fuelled SI Engine an experimental study, SAE Int. Mobility Eng Congr., Exposition; 2005-26-349.
6. Lee, J.T., Kim, Y.Y., and Lee, C.W., (2001). An investigation of a cause of backfire and its control due to crevice volumes in a hydrogen fuelled engine, *Trans ASME*;123:204-213.
7. Gomes Antunes, J.M., Mikalsen, R., and Roskilly, A.P., (2008). An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine performance and operation *Int. J. Hydrogen Energy*; 33:5823-5828
8. Tang, X.G., Daniel, M.K., Robert, J.N., et al., (2002). Ford P2000 Hydrogen engine dynamometer development, SAE paper no. 2002-01-0242.
9. Appleby, A.J., (1994). Fuel cells and hydrogen fuel. *Int. J. Hydrogen Energy* 19:175-80.
10. Kukkonen, C.A. and Shelef, M., (1994). Hydrogen as an alternative fuel: 1993 update. SAE Paper #940766.
11. Steinberg, M. and Cheng, H.C., (1989). Modern and prospective Technologies for hydrogen production from fossil fuels. *Int J Hydrogen Energy*;14:797-803.



12. Gambini, M. and Vellini M., (2005). Comparative analysis of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> cycle power plants based on different hydrogen production systems from fossil fuels, *Int. J. Hydrogen Energy* 30: 593 - 604.
13. Veziroglu, T.N. and Barbir, F., (1995). "Transportation Fuel-Hydrogen," *Energy Technology and the Environment*, Vol. 4, Wiley-Interscience, 2712-2730.
14. Veziroglu, T.N., (2007). 21st Century's Energy: Hydrogen Energy System, *Springer*, 9-31.
15. Karim, G.A., (2003). Hydrogen as a spark ignition engine fuel, *Int. J. Hydrogen Energy* 28: 569 - 577.
16. Silva, E.P., Gallo, W.L.R., Szajner, J., Amaral, E.G., and Bezerra, C.R., (1993). State of the art in the use of hydrogen as an automotive fuel. SAE Paper # 931706E.
17. Cox, K.E. and Williamson, K.D., (1977). Hydrogen: its technology and implications. Vols. I-V. Boca Raton, FL: CRC Press.
18. Liu, B., Huang, Z., Zeng, K., et al., (2008). Experimental study on emissions of a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends. *Energy and Fuels* 22:273-7.
19. Veziroglu, T.N. and Barbir, F., (1998). *Hydrogen Energy Technologies*, UNIDO, A1400, Vienna, Austria.
20. North, D.C., (1992). An investigation of hydrogen as an internal combustion fuel, *Int. J. Hydrogen Energy* 17(7).
21. Heffel, J.W., Mcclanahan, M.N., and Norbeck, J.M., (1998). Electronic fuel injection for hydrogen fueled internal combustion engines, *SAE Trans*, 981924.
22. Yamin Jehad, A.A., Gupta, H.N., Bansal, B.B., and Srivastava, O.N., (2000). Effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of a spark ignition engine using hydrogen as a fuel, *Int. J. Hydrogen Energy*; 25:581-589.
23. Jie, M., Yongkang, S., Yucheng, Z., and Zhongil, Z., (2003). Simulation and prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine, *Int. J. Hydrogen Energy* 28:77-83.
24. Lee, J.T. and Kim, YY., (2002). The development of a dual injection hydrogen fueled engine with high power and high efficiency, In: Fall technical conference of ASMEICED, 8 - 11 September 2002.
25. Tsujimura, T., Mikami, S., and Achicha, N., (2003). A study of direct injection diesel engine fueled with hydrogen. SAE paper 2003-01-0761.
26. Ganeshb, R.H., Subramanian, V., Balasubramanian, V., Mallikarjuna, J.M., Ramesh, A., and Sharma, R.P., (2008). Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study, *Renewable Energy*, 33:1324-33.
27. Verhelst, S. and Sierens, R., (2005). Hydrogen fuelled internal combustion engine, PhD Thesis of Gent University.
28. Boyano, A., Fernandez, A., and De la Vega, P., (2009). Hydrogen internal combustion engine for stationary applications, *Applied Energy*.
29. McCarley, C.A., (1981). A study of factor influencing thermally induced backfiring in hydrogen fuelled engines, and methods for backfire control, In: 16th Intersociety energy conversion engineering conference (IECEC), Atlanta, USA.
30. Barreto, L., Makihiro, A., and Riahi, K., (2003). The hydrogen economy in the 21st century a sustainable development scenario, *Int. J. Hydrogen Energy* 28:267-84.
31. Lipatnikov, A.N. and Chomiak, J., (2002). *Prog. Energ. Combust.*, 28:1-74.



32. Choi, G.H., Chung, Y.J., and Han, S.B., (2005). Effect of Hydrogen Enriched LPG Fuelled Engine with Converted from a Diesel Engine, Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 13-15 July 2005 Istanbul, Turkey.
33. Al-Baghdadi, M.A.S. and Al-Janabi, H.A.S., (2000). Improvement of performance and reduction of pollutant emission of a four-stroke spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline fuel mixture. *Energy Conversion & Management* 41(1):77-91.
34. Jingding, L., Linsong, G., and Tianshen, D., (1998). Formation and restraint of toxic emissions in hydrogen-gasoline mixture fueled engines. *Int J Hydrogen Energy*;23(10):971-5.
35. Saravanan, N., Nagarajan, G., Dhanasekaran, C., and Kalaiselvan, K.M., (2007). Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 4071 - 4080
36. Shirk, M.G., McGuire, T.P., Neal, G.L., Haworth, D.C., (2008). Investigation of a hydrogen-assisted combustion system for a light-duty diesel vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy* 337237- 7244
37. Saravanan, N., Nagarajan, G., Sanjay, G., Dhanasekaran, C., and Kalaiselvan, K.M., (2008). Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen in dual fuel mode, *Fuel* 87 3591-3599
38. Guo, L.S., Lu, H.B., and Li, J.D., (1999). A hydrogen injection system with solenoid valves for a four cylinder hydrogen fuelled engine, *Int. J. Hydrogen Energy* 24:377-382.
39. Haragopala, R.B., Shrivastava, K.N., and Bhakta, H.N., (1983). Hydrogen for dual fuel engine operation. *Int. J. Hydrogen Energy* 8(5):381- 384.
40. Andrea, T.D, Henshaw, P.F., and Ting, D.S.K., (2004). The addition of hydrogen to a gasoline-fueled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*; 29(14):1541-52.
41. Rankin, D.D., (2008). *Lean combustion technology and control*, Elsevier.
42. Ji, C. and Wang, S., (2009). Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions, *International journal of hydrogen energy* 1-12.
43. Akansu, S.O, Dulger, A., and Kahraman ,N., (2004). Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*;29(14):1527-39.
44. Shudo, T. and Suzuki, H., (2002). Applicability of heat transfer equation to hydrogen combustion. *JSAE Rev*;23:303-8.
45. Allenby, S., Chang, W.C., Megaritis, A., and Wyszynski, M.L., (20001). Hydrogen enrichment: a way to maintain combustion stability in a natural gas fuelled engine with exhaust gas recirculation, the potential of fuel reforming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*;215(3):405-18.
46. Karim, G.A., Wierzba, I., and AlAlousi, Y., (1996). Methane-hydrogen mixtures as fuels. *Int J Hydrogen Energy*;21(7):625-31.
47. Huang, Z., Wang, J., Liu, B., Zeng, K., Yu, J., Jiang, D., (2007). Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under different ignition timings, *Fuel* 86 381-387
48. Wang, Ji., Chen, H., Liu, B., and Huang, Z., (2008). Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends, *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 4876-4883.

49. Kumar, M.S., Ramesh, A., and Nagalingam, B., (2003). Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine. *Int J Hydrogen Energy*;28:1143.
50. Choi, G.H., Chung, Y.J., and Han, S.B., (2005). Performance and emissions characteristics of a hydrogen enriched LPG internal combustion engine at 1400 rpm, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 77 - 82
51. Suwanchotchoung, N., (2003). Performance of a spark ignition dual-fueled engine using split injection timing. Ph.D. thesis, Vanderbilt University, Mechanical Engineering. ISBN 049633606X
52. COD (College of the Desert) (2001). Hydrogen fuel cell engines and related technologies, module 3: Hydrogen use in internal combustion engines. Rev. 0, pp. 1-29.
53. Das, L.M., (1990). Fuel induction techniques for a hydrogen operated engine. *Int. J. Hydrogen Energy*,15(11):833-842.
54. Yi, H.S., Min, K., and Kim, E.S., (2000). The optimized mixture formation for hydrogen fuelled. *Int. J. Hydrogen Energy*, 25(7):685-690.
55. Rottengruber, H., Berckmüller, M., Elsässer, G., Brehm, N., and Schwarz, C., (2004). Direct injection hydrogen SI-engine operation strategy and power density potentials. SAE Paper No. 2004-01-2927.
56. Kim, Y.Y., Lee, J.T., and Caton, J.A., (2006). The development of a dual-Injection hydrogen fueled engine with high power and high efficiency. *J. Eng. Gas Turbines Power, ASME*, 128(1): 203-212.
57. Kabat, D.M. and Heffel, J.W., (2002). Durability implications of neat hydrogen under sonic flow conditions on pulse-width modulated injectors. *Int. J. Hydrogen Energy*, 27(10):1093-1102.
58. Das, LM., (1990). Hydrogen engines: A view of the past and a look into the future. *Int J Hydrogen Energy*;15:425-43.
59. White, C.M., Steeper, R.R., and Lutz, A.E., (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review, *Int. J. Hydrogen Energy* 31:1292-1305.
60. Mohammadi, A., Shioji, M., Nakai, Y., Ishikura, W., and Tabo, E., (2007). Performance and combustion characteristics of direct injection SI hydrogen engine, *International Journal of Hydrogen Energy* 32,296-304.
61. Liu, X., Liu, F., Zhou, L., Sun, B., and Schock, H.J., (2008). Backfire prediction in a manifold injection hydrogen internal combustion engine, *Int. J. Hydrogen Energy* 33 :3847 - 3855.
62. Swain, M.R., et al., (1996). Design and testing of dedicated hydrogen fueled engine. SAE paper no: 961077; 1996.
63. Berckmüller, M., Rottengruber, H., Eder, A., Brehm, N., Elsässer, G., Müller-Alander, G., et al, (2003). Potentials of a charged SI-hydrogen engine, SAE paper; 2003-01-3210.
64. Lewis, B. and von Elbe, G., (1987). Combustion, flames, and explosions of gases, Orlando, Fl: Academic Press.
65. Brunt, M., Pond, C., and Biundo, J., (1998). Gasoline engine knock analysis using cylinder pressure data, SAE 980896.
66. Szwaja, S., Bhandarya, K.R., and Naber, J.D., (2007). Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine. *Int J Hydrogen Energy* 2007;32(18):5076-87.
67. Hailin Li, Karim G.A., (2004). Knock in spark ignition hydrogen engine, *Int. J. Hydrogen Energy* 29(8):859 - 865.
68. Hailini Li, Karim G.A., 2002. The performance of hydrogen oxygen SI engine, SAE paper 21-2688.

69. Karim, G.A. and Klat, S.R., (1966). The Knock and auto ignition characteristics of some gaseous fuels and their mixtures, *J Inst Fuel* 39:109 - 127.
70. Bell, S.R. and Gupta, M., (1997). Extension of the lean operating limit for natural gas fuelling of a spark ignited engine using hydrogen blending. *Combust Sci and Tech*;123:23-48.
71. Shudo, T., Nakajima, Y., and Fatakuichi, T., (2000). Thermal efficiency analysis in a hydrogen premixed combustion engine. *JSAE Rev*;21:177-82.
72. Furuham, S., Hiruma, M., and Enomoto., Y., (1978). Development of a liquid hydrogen car. *Int. J. Hydrogen Energy* 3:61 - 81.
73. Berckmüller, M., Rottengruber, H., Eder A., Brehm, N., Elsasser, G., Guo, LS, Lu, H.B., and Li, J.D., (1999). A hydrogen injection system with solenoid valves for a four cylinder hydrogen-fueled engine. *Int J Hydrogen Energy* 1999;24:377-82.
74. Swain, M.R., Pappas, J.M., Adt Jr R.R., and Escher, W.J.D., (1981). Hydrogen fueled automotive engine experimental testing to provide an initial design-data base, *SAE paper* 1981; 810350.
75. Kim, Y.Y., Jong, T.L., and Gyeung ,H.C., (2005). An investigation of the cycle to cycle variation in direct injection hydrogen fueled engine. *Int. J. Hydrogen Energy*, 30: 69-76.
76. Ma, F., Wang, Y., Liu, H., Li, Y., Wang, J., and Ding, S., (2008). Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2008;33:823-31.
77. Swain, M.R, Adt Jr R.R, and Pappas, J.M., (1983). Experimental hydrogen fueled automotive engine design data base project. Technical report, A Facsimile Report, Prepared for U.S. Department of Energy, DOE/CS/51212,.
78. Kondo, T., Lio,S., and Hiruma, M., (1997). A Study on The Mechanism of Backfire in External Mixture Formation Hydrogen Engines, *SAE Paper No: 971704*.
79. Verhelst, S., Sierens, R., and Verstraeten, S., (2006). A critical review of experimental research on hydrogen fuelled SI engines. *PAPER SAE* 2006-01-0430.
80. Toshio, S., Nakajima, Y., and Fatakuichi, T., (2000). Thermal efficiency analysis in a hydrogen premixed combustion engine. *JSAE Rev*;21:177-82.
81. AI-Janabi and AI-Baghdadi, (1999). A prediction study of the effect of hydrogen blending on the performance and pollutants emission of a four stroke spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*;24:363-75.
82. Drell, I.L. and Belles, F.E., (1958). Survey of hydrogen combustion properties. Technical Report 1383. National Advisory Committee on Aeronautics.
83. Lee, S.J, Yi, H.S, and Kim ,E.S., (1995). Combustion characteristic of intake port injection type hydrogen fuelled engine, *Int J Hydrogen Energy*; 20:317 - 338.
84. Al-Baghdadi M.A.S. Et al., (2003). A prediction study of a spark ignition supercharged hydrogen engine, *Energy Conversion and Manage* 44:3143 - 3150
85. Rottengruber, H., Berckmüller, M., Elsässer, G., Brehm, N., and Schwarz, C., (2004). A high-efficient combustion concept for direct injection hydrogen internal combustion engine. In: 15th World hydrogen energy conference, paper nr 28J-01. Yokohama, Japan.
86. Heffel, J.W., (2003). NOx emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using

- exhaust gas recirculation, International Journal of Hydrogen Energy 28;901- 908
87. Verhelst, S. and Sierens, R., (2007). Combustion studies for PFI hydrogen IC engines. SAE, paper nr 2007-01-3610; 2007.
  88. Bleechmore, C. and Brewster, S., (2007). Dilution strategies for load and NOx management in a hydrogen fueled direct injection engine. SAE, paper nr 2007-01-4097.
  89. Lanzafame, R., (1999). Water injection effects in a single cylinder CFR engine, SAE paper 01-0568.
  90. Morse, N.T., Brueckner, S.R., and Bohac, S.V., (2002). Effect of fuel humidity on the performance of a single cylinder research engine operating on hydrogen, SAE paper 2002-01-2685.
  91. Heffel, J.W., (2003). NOx emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation, International Journal of Hydrogen Energy 28;1285-1292.
  92. BMW Hydrogen 7 Rescues Guidelines, (2007). 6th ed. November 2006. Revised for USA.
  93. Rybin H., Krainz G., Bartlok G., and Kratzer E., Safety Demands For Automotive Hydrogen Storage Systems, Magna Steyr Fahrseugtechtink AG&Co KG 8041 Garz, Austria.
  94. Wallner, T., Lohse-Busch, H., Gurski, S., Duoba, M., Thiel, W., Martin, D., and Korn, T., (2008). Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles, Int. J Hydrogen Energy, 33: 7607-7618
  95. Amaseder, F., and Krainz, G., (2006). Liquid hydrogen storage systems developed and manufactured for the first time for customer cars. SAE paper : 2006-01-0432.
  96. Das, L.M., Gulati, R., and Gupta, P.K., (2000). Performance evaluation of a hydrogen-fuelled spark ignition engine using electronically controlled solenoid- actuated injection system, Int. J. Hydrogen Energy 25: 569-579.