

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA YAKIT
OLARAK KULLANILMASI VE PERFORMANSA ETKİLERİ**

Mak. Müh. K.Ercüment GÜL

**F.B.E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı :Prof. İrfan Yavaşlıo

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM-1. DÜNYA’ DA ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARI GEREKSİNİMİ VE ALTERNATİF YAKITLAR.....	2
1.1. Hidrojen Enerjisi ve Türkiye.....	8
1.2. Alternatif Yakıtların Karşılaştırılması.....	11
1.2.1. Alternatif Yakıtların Fiziksel ve Kimyasal Olarak Karşılaştırılması.....	11
1.2.2. Alternatif Yakıtların Performans Açısından Karşılaştırılması.....	13
1.2.3. Alternatif Yakıtların Hava Kirliliği ve Güvenlik Etkileri Bakımından Karşılaştırılması.....	14
1.2.4. Alternatif Yakıtların Egzoz Emisyonu Yönünden Karşılaştırılması.....	15
1.2.5. Alternatif Yakıtların Ekonomiklik Yönünden Karşılaştırılması.....	16
BÖLÜM-2. HİDROJENİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ.....	17

BÖLÜM-3. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	27
3.1. Fotobiyolojik yöntemle hidrojen üretimi.....	28
3.2. Fotoelektrokimyasal yöntemle hidrojen üretimi.....	29
3.3. Termokimyasal yöntemle hidrojen üretilmesi.....	30
3.4. Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretilmesi.....	31
3.5. Buhar yapılandırması ile hidrojen üretilmesi.....	35
3.5.1. Katalitik buhar yapılandırma (SR).....	35
3.5.2. Kısmi oksidasyon ile yapılandırma (POX).....	36
3.5.3. Ototermal yapılandırma (ATR).....	36
BÖLÜM-4. HİDROJENİN DEPOLANMASI.....	37
4.1. Tanklarda depolama.....	39
4.2. Nanotüplerde depolama.....	40
4.3. Metalhidritlerde depolama.....	42
4.4. Alanatlarda depolama.....	47
4.5. Bor esaslı depolama.....	49

**BÖLÜM-5. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA
YAKIT OLARAK KULLANILMASI.....51**

5.1. Hidrojen giriş sistemleri.....	51
5.1.1. Karıştırma (Karbürasyon).....	51
5.1.2. Püskürtme.....	53
5.1.3. Harici karışım teşkilinde yapılması gereken modifikasyonlar.....	60
5.1.4. Dahili karışım teşkilinde yapılması gereken modifikasyonlar.....	60
5.2. Egzoz, soğutma ve yağlama sistemleri.....	62
5.3. Ateşleme sistemi.....	63
5.4. Hidrojenin motor ve yanma performansına etkisi.....	64
5.5. Hidrojenin emisyonlara etkisi.....	70

**BÖLÜM-6. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA
KULLANIMINDA KARŞILAŞILACAK SORUNLAR.....72**

6.1. Erken tutuşma sorunu.....	72
6.2. Emme manifoldu geri tutuşması.....	72
6.3. Hızlı basınç artışı.....	73
6.4. Vuruntu sorunu.....	73

**BÖLÜM-7. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA
KULLANILMASIYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....74**

7.1. BMW hidrojen otomobili.....	78
7.2. 1975 Pontiac hidrojen otomobili.....	81
7.3. Mercedes-Benz hidrojen kamyoneti.....	81
7.4. Mercedes-Benz hidrojen otomobili.....	84
7.5. Toyota 2TC hidrojen motoru.....	86

**BÖLÜM-8. ÖRNEK BİR MOTORUN HİDROJENLE TAHRİK
EDİLMESİ VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....87**

8.1. Test öncesi alınması gereken güvenlik önlemleri.....	87
8.2. Uygulamada kullanılan içten yanmalı motorun özellikleri.....	88
8.3. Motorda yapılan modifikasyonlar ve kullanılan ekipmanlar.....	91
8.4. Test sonucu elde edilen sonuçlar.....	94

SONUÇ.....	95
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Küresel Isınma [3].....	4
Şekil 1.2. Üretilen kWh başına sera gazı emisyon aralıkları [3].....	5
Şekil 1.3. Dünyanın 1990 - 2030 (Tahmini) Enerji Tüketimi (Milyon Ton Petrol Eşdeğeri) [4].....	6
Şekil 1.4. Dünya Enerji İhtiyacı Arz ve Talebi (1980 - 2040) [4].....	7
Şekil 1.5. Dünya Enerji İhtiyacı Arz ve Talebi - Yıllara Göre (1980 - 2100) [4].....	7
Şekil 3.1. Elektroliz Devresi [9].....	31
Şekil3.2. Suyun elektrolizi [8].....	32
Şekil 3.3. Güneş-Hidrojen sistemi proses akım şeması [8].....	33
Şekil 4.1. Taşıtlarda kullanım için tüplerde depolanmış hidrojen [8].....	39
Şekil 4.2. Hidrojende Depolanma Şekilleri ve Elde Edilebilen Hacimsel ve Gravimetrik Yoğunluk Değerleri [10].....	45
Şekil 4.3. Magnezyumda Basınç Kompozisyon Eşsıcaklık Diyagramı ve Öğütmenin Diyagrama Etkisi [10].....	46
Şekil 4.4. Magnezyum, Magnezyum-Vanadyum ve Magnezyum-Grafit Sisteminde Hidrojen Emilim Hızı [10].....	48
Şekil 4.5. Sodyum Bor Hidrürün Isıl Analizi (Şekil; NaBH ₄ ' de ayrışmanın 500° C ve üstü sıcaklıklarda gerçekleştiğini göstermektedir.) [10].....	48
Şekil 4.6. NaBH ₄ - %50 MgH ₂ Sisteminde Hidrojen Emilim ve Geri Kinetiği [10].....	49
Şekil 4.7. Hidrojen üretim,dağıtım ve depolama zinciri [10].....	50
Şekil 5.1. AMC Jeep'te kullanılan emme sistemi [6].....	52
Şekil 5.2. Paralel çift karbüratör sistemi [6]	52
Şekil 5.3. Direk püskürtme için enjektör pozisyonu [6].....	53
Şekil 5.4. Direk püskürme için püskürtme gecikme süresi diyagramı [6].....	54
Şekil 5.5. Manifold püskürtme için enjektör pozisyonu [6].....	55

Şekil 5.6. Ön yanma odası kesit görünüşü [6].....	55
Şekil 5.7. Manifold ve direk püskürtme için püskürtme zamanı pozisyonu [6].....	56
Şekil 5.8. Hidrojen püskürtme sistemi [6].....	57
Şekil 5.9. Hava ile hidrojenin yanma odası dışında karıştırılması [11].....	58
Şekil 5.10. Hava ile hidrojenin yanma odasında karıştırılması [11].....	59
Şekil 5.11. Dahili karışım teşkilli bir motor kesiti ve püskürtme sistemi [12].....	61
Şekil 5.12. Hidrojen enjektörünün kesiti [12].....	62
Şekil 5.13. Alev Hızının λ 'ya Göre Değişimi [5].....	67
Şekil 5.14. Alev Hızının Sıcaklığı Göre Değişimi [5].....	67
Şekil 5.15. Minimum Tutuşma Enerjisinin λ 'ya Göre Değişimi [5].....	68
Şekil 5.16. Termik Verimin Hava Fazlalık Katsayısına Göre Değişimi [5].....	69
Şekil 5.17. Hidrojen Yakıtlı Motorlarda Performans Karşılaştırması [1].....	70
Şekil 5.18. Azot Oksit Emisyonlarının Hava Fazlalık Katsayısına Göre Değişimi [9].....	71
Şekil 7.1. Shell tarafından açılan dünyanın ilk hidrojen dolum istasyonu [13].....	76
Şekil 7.2. Mercedes-Benz'in hidrojen yakıtlı bir otobüs modeli [13].....	76
Şekil 7.3. BMW' nin hidrojen yakıtlı prototip modeli [11].....	80
Şekil 7.4. Hidrojen yakıtlı BMW modeli [14].....	80
Şekil 7.5. Hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes-Benz kamyonet [11].....	83
Şekil 7.6. Hem benzin hem hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes-Benz otomobil [11].....	85
Şekil 8.1. Deney motorunun özellikleri.....	88
Şekil 8.2. Deneyin yapıldığı CFR test motoru.....	90
Şekil 8.3. Deney için tasarlanan emme manifoldu.....	91
Şekil 8.4. Deneyde kullanılan elektronik kontrol ünitesi.....	92
Şekil 8.5. Deneyde kullanılan püskürtme sürelerinin izlendiği ekran.....	93

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Fosil Kaynaklı Yakıtların Çevre Zararının Maliyetleri (Yıl: 2000) [4].....	8
Tablo 1.2. Alternatif Yakıtların Karşılaştırılması [1].....	11
Tablo 1.3. Yakıtların Yanma Özelliklerinin Karşılaştırılması [5].....	13
Tablo 1.4. Alternatif Yakıtları Kullanan Araçların Performans Karşılaştırması [5].....	14
Tablo 1.5. Hava Kirliliği ve Güvenlik Etkileri Bakımından Karşılaştırılması [5].....	14
Tablo 2.1. Yapılan çalışmaların tarihsel sıralaması [1].....	26
Tablo 3.1. Hidrojen üretim maliyetlerinin ve kapasitelerinin karşılaştırılması [7].....	28
Tablo 4.1. Değişik Ortamlarda Depolanabilecek Hidrojen Miktarı ve Enerji Yoğunlukları [10].....	37
Tablo 4.2. Hidrojen depolama yöntemleri [7].....	38
Tablo 4.3. NaAlH ₄ 'ün Hidrojen Geri Bırakım Reaksiyonları [10].....	47
Tablo 7.1. Mercedes-Benz kamyonetin teknik özellikleri [11].....	82
Tablo 7.2. Mercedes-Benz hidrojen otomobilinin test sonuçları [11].....	84
Tablo 7.3. Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler [12].....	86
Tablo 8.1. Deney sonucunda ölçülen değerler.....	94

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında; hidrojen yakıtının önemi, içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının avantajları ve zorlukları, motorlarda kullanılabilmesi için yapılması gereken modifikasyonlar anlatılmıştır. Ayrıca tez çalışması dahilinde bir deney motorunun hidrojenle çalıştırılması amaçlanmıştır.

Yapmış olduğum bu yüksek lisans tezinde, bana destek olan değerli hocam ve tez danışmanım Prof. İrfan Yavaşlıol'a, sağlamış oldukları gerekli maddi ve manevi desteklerinden ötürü Unido-Ichet'e ve kongre direktörü Prof. Dr. Engin Türe'ye, ayrıca deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan Dr. Tarkan Sandalcı' ya, Arş. Gör. Levent Yüksek' e ve Arş. Gör. Orkun Özener'e teşekkür ederim.

ÖZET

Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanabilir. Günümüzde fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan artık gazların çevreye yaptığı olumsuz etki, hükümetleri ve bilim adamlarını alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Özellikle büyük şehirlerde taşıtlardan kaynaklanan kirletici emisyonlar tüm atmosferi kirleterek sera etkisi denilen ve gittikçe artan bir tehlikeyi de beraberinde getirmektedir.

Ayrıca fosil yakıt kaynaklarının tükenmeye başlamasıyla patlak veren enerji krizi de alternatif enerji kaynaklarının kullanılma çabası üzerinde etkili olmuştur. Bu amaçla çeşitli araştırmalar, laboratuvar ortamlarında çeşitli deneyler yapılmış ve taşıtlarda yakıt olarak benzine alternatif kaynaklar bulunmuştur. Yenilenebilir bir yakıt olan hidrojenin karayolu taşıtlarında enerji kaynağı olarak kullanımı günümüzde önem kazanmaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanımında, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Hidrojen-hava karışımlarının geniş tutuşma sınırlarına sahip olması özelliğinden yararlanılarak, motorun fakir karışım oranlarında çalıştırılması yüksek ısı verim elde edilmesini ve özellikle azot oksit (NO_x) emisyonlarının istenilen düzeye düşürülmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan hidrojen motorlarında CO, CO₂, HC ve is emisyonu yoktur. Üretimi henüz pahalı olmakla beraber, elektroliz yoluyla sudan üretilebilmesi ve sınırsız bir kaynağa sahip olması önemli bir avantajdır.

İçten yanmalı motorlarda kullanımındaki zorluklar, araç üzerinde depolama, erken tutuşma ve emme manifoldu geri tutuşması gibi sorunlar, sızdırmazlık ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınabilmesi gibi sorunlardır. Ancak çevre koşulları ve tükenme yolunda olan fosil yakıtlar, hidrojenin biran önce kullanımının başlamasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, tüm bu zorluklar teorik ve deneysel yöntemlerle aşılmalı, diğer taraftan hidrojen üretim maliyetleri düşürülerek bu konudaki çalışmalar hızlandırılmalıdır.

Anahtar kelimeler: Hidrojen enerjisi, Alternatif yakıtlar, Hidrojen motoru.

ABSTRACT

Renewable energy can be described as the energy "that could exist in the next day within the own evolution of nature". The impacts of the waste gases caused by burning of fossil fuels today force governments and scientists to search alternative energy sources. Particularly in large cities, the pollutant emissions caused by motor vehicles pollute all atmosphere and cause a gradually increasing threat so-called "greenhouse effect".

The energy crisis suffered due to ceasing fossil fuel resources also lead us to use alternative sources of energy. For that purpose, various researches and experiments were carried out in laboratory environment, and the alternative fuels to gasoline have been developed. Use of hydrogen, a renewable fuel, for the roadway vehicles as a source of energy gains importance. In using the hydrogen as a fuel, significant advantages are available depending on its physical and chemical properties. Making use of the wide firing limits of hydrogen - air mixtures, operating the engine at poor mixture ratios provide high heat efficiency and reducing particularly the nitrogen oxide (NO_x) emissions to the required level. On the other part, there is no CO, CO₂, HC or soot emissions in the hydrogen engines. Yet with a high manufacturing cost, it can be produced from water by means of electrolysis and has an unlimited source.

The difficulties faced in using the internal combustion engines are storing on the vehicle, early combustion and back firing of the suction manifold, leaks or taking the necessary safety measures. But environmental requirements and the fossil fuels which are about to cease all force us to replace such fuels with hydrogen as soon as possible. Because of that, these difficulties should be overcome using theoretical and experimental methods, while on the other hand, hydrogen production costs should be reduced and related studies should be accelerated.

Keywords: Hydrogen energy, Alternative fuels, Hydrogen engine.

GİRİŞ

Dünya nüfus artışlarıyla birlikte artan toplam enerji gereksinimine karşın, mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması alternatif kaynak arayışını son yıllarda hızlandırmıştır. Benzin ve motorin gibi petrol kökenli motor yakıtlarının da giderek tükenmekte olması, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanımını gerektirmektedir. Diğer taraftan taşıtların ürettiği kirletici egzoz gazlarının çevre kirliliği açısından yaratmakta olduğu sorunlar, emisyon bakımından da üstün niteliklere sahip alternatif yakıtların ve hatta farklı taşıt tahrik sistemlerinin kullanımını giderek zorunlu hale getirmektedir.

Yenilenebilir bir yakıt olan hidrojenin karayolu taşıtlarında enerji kaynağı olarak kullanımında günümüz teknolojisinde iki farklı yaklaşım söz konusudur. Elektrikli veya hibrid taşıtlarda, taşıt seyri sırasında yakıt hücrelerinde hidrojen ve oksijenden elektrik elde edilmektedir. Bugün için seri üretime geçildiğinde çözüm gerektiren bazı sorunları bulunan bu uygulama, orta ve uzun dönemde giderek yaygınlaşacak potansiyele sahiptir. Ancak yakın dönemde hidrojen, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılma durumundadır.

Hidrojenin yakıt olarak kullanımında, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Hidrojen-hava karışımlarının geniş tutuşma sınırlarına sahip olması özelliğinden yararlanılarak, motorun fakir karışım oranlarında çalıştırılması yüksek ısı verim elde edilmesini ve özellikle azot oksit (NO_x) emisyonlarının istenilen düzeye düşürülmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan hidrojen motorlarında CO , CO_2 , HC ve is emisyonu yoktur. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığın oldukça yüksek olması (1 atm basınçta 847-867 K) ve oktan sayısının yüksek olması, hidrojenin Diesel motorlardan çok Otto ilkesi ile çalışan motorlar için daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir. Hidrojen ayrıca benzin motorlarında karışıma belirli oranlarda katılarak motorun fakir karışım oranlarında çalıştırılabilmesini sağlamakta ve egzoz emisyonlarını da düşük düzeye indirmektedir. [1]

BÖLÜM-1. DÜNYA' DA ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARI GEREKSİNİMİ VE ALTERNATİF YAKITLAR

Günümüzde fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan artık gazların çevreye yaptığı olumsuz etki hükümetleri ve bilim adamlarını alternatif enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir. Özellikle büyük şehirlerde taşıtlardan kaynaklanan kirletici emisyonlar tüm atmosferi kirleterek sera etkisi denilen ve gittikçe artan bir tehlikeyi de beraberinde getirmektedir.

Ayrıca fosil yakıt kaynaklarının tükenmeye başlamasıyla patlak veren enerji krizi de alternatif enerji kaynaklarının kullanılma çabası üzerinde etkili olmuştur. Bu amaçla çeşitli araştırmalar, laboratuvar ortamlarında çeşitli deneyler yapılmış ve taşıtlarda yakıt olarak benzine alternatif kaynaklar bulunmuştur.

Hidrojen, metanol, etanol, LPG, çeşitli bitkisel yağlar gibi alternatif yakıt türleri taşıtlarda kullanılmış ve bazıları halen kullanılmaktadır. Bu kaynakların kullanılmasında bazı olumsuzluklar yaşanmış ve halen geliştirilmelerine devam edilmektedir. Örneğin hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında depolama problemleri ortaya çıkmıştır. Hidrojenin basınçlı gaz olarak veya metal hibrid olarak depolanması için yüksek hacim problemi varken, sıvı olarak depolanması için de yüksek maliyet ve buharlaşma kayıpları gibi problemler söz konusu olmaktadır.

İnsanların ihtiyaçlarının karşılanmasında ve gelişmenin sağlıklı olarak sürdürülmesinde gerekli olan enerji; özellikle sanayi, konut ve ulaştırma gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Ancak enerji; yaşıntımızdaki vazgeçilmez yararlarının yanı sıra üretim, çevrim, taşınım ve tüketim esnasında büyük oranda çevre kirlenmesine de yol açmaktadır.

Nüfus artışına, sanayinin gelişmesine paralel olarak kurulan büyük ölçekli enerji üretim ve çevrim sistemleri ekolojik dengeyi büyük ölçüde etkiledikleri gibi sınırlar ötesi etkileri de beraberinde oluşturmaktadır. Bu nedenle çevre sorunları ulusal olduğu gibi uluslararası nitelikler de taşımaktadır. Yine bu nedenle çevre sorunlarını gidermek için, gerekli tedbirlerin alınmasında, uluslararası işbirliğinin rolü önem kazanmaktadır. [2]

Petrol ve petrol ürünlerinin yakıt olarak kullanılması sonucu atmosfere atılan zehirli gazların küresel ısınmaya yol açması sonucu dünya ciddi bir tehdit altındadır. Zehirli gazlar atmosferde bir tabaka oluşturup dünyanın yüzeyine gelen ışınların yansıtılarak dünyayı terk etmesine engel olmakta ve bu da dünyada aşırı bir ısınmaya yol açmaktadır.

Enerji kaynakları yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki kısımdan incelenebilir.

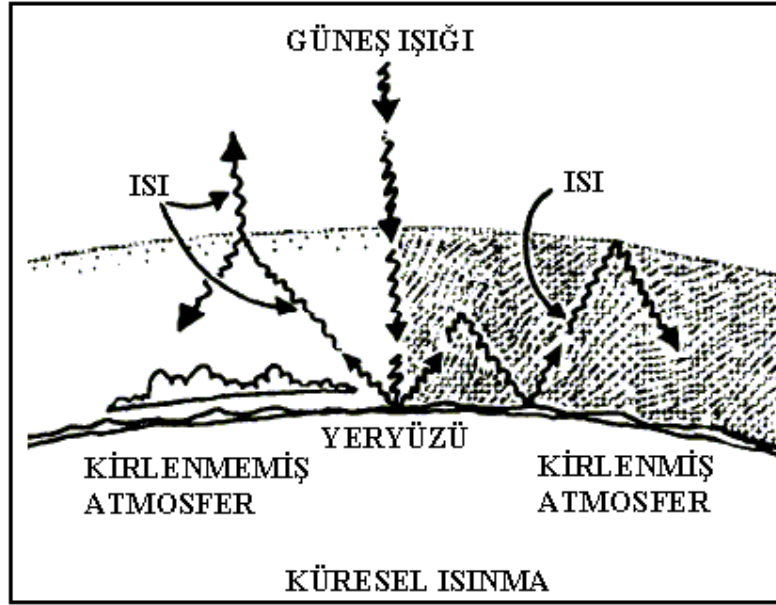
Yenilenemeyen enerji kaynakları arasında; kömür, petrol ve petrol ürünleri, doğalgaz ve nükleer enerji gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında ise biyokütle (Odun, bitki artıkları vb.), rüzgar, hidrolik, jeotermal ve güneş enerjisi ön sıralarda yer almaktadır.

Dünyada büyük ölçüde yenilenemeyen enerji kaynaklarının kullanılıyor olması, çevre sorunlarını önemli ölçüde artırmıştır. Bu nedenle çevresel etkileri az olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik her bakımdan avantajlı olmaktadır. Ancak bazı teknik sorunların çözümlenebilmesi için zamana ihtiyaç vardır ve bu da söz konusu geçişin oldukça uzun bir süre alacağını göstermektedir.

Bu yakıtlar içerisinde petrolün sınırlı rezerve sahip olması, petrol üretiminin 21. yüzyılın ilk çeyreğinden sonra azalan üretim ve artan fiyat nedeniyle düşüş göstereceği, doğalgazın 200 yıllık bir ömrünün kalması, kömürün ise 250 yıllık bir ömrü bulunmasına rağmen en kirlenici yakıt olması üzerinde yıllardır düşünülen problemlerdendir.

Bugün fosil yakıtların çevre ve insan sağlığı açısından yarattığı olumsuzluklar her geçen gün katlanarak artmaktadır. Fosil yakıtlar yakıldığında altı sera gazının açığa çıkmasına neden olur. Bunlardan en belirleyici olanları karbondioksit (CO₂) ve metandır. Diğerleri ise kükürt, partikül madde, azotoksit, kurum ve küldür.

Güneş, gün doğumundan gün batımına kadar atmosfere ısı ve ışık vermektedir. Doğal döngünün devam etmesi için bu ısının tekrar uzaya verilmesi gerekmektedir. Oysa fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan CO₂ ve metan gazı bünyelerinde ısı tutma özelliğinden dolayı ısının bir kısmını atmosferde tutmaktadır. Böylece dünya ısınmaya başlamakta ve iklim değişiklikleri meydana gelmektedir.



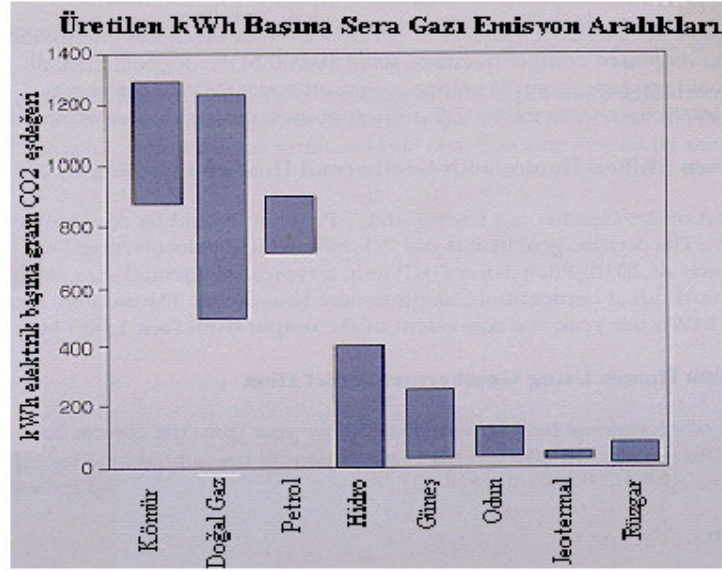
Şekil 1.1. Küresel Isınma [3]

Isı artışının sonuçları :

1900'lerden 2000'lere kadar atmosferin ortalama sıcaklığı 0.5 derece artmıştır ve iklim değişikliğinin zincirleme sonuçları yavaş yavaş yaşamı etkilemektedir. Su kaynakları kurumakta, çiçekler erken açmakta, erken yağan karlar tarım ürünlerinde zayıflığa sebep olmakta, bitkiler zamansız meyve vermekte ya da hiç vermemektedir.

Uzmanlar, fosil yakıtların etkilerini kısa ve uzun vadeli olarak değerlendirmektedir. Kısa vadede oluşan sonuçlar artık yaşamın bir parçası olmuş durumdadır. Sıcaklık arttıkça buzlar ana kütlelerden koparak erimekte, çığ olayları artmakta, fazla miktarda su dolaşıma girmekte, sel felaketleri, fırtınalar, kasırgalar oluşmaktadır.

Küresel ısınmanın, uzun vadede öngörülen sonuçları ise daha vahimdir. Ortalama sıcaklık artışı bu hızla devam ederse, 2020 yılında deniz seviyesi bir metreye kadar yükselecektir. Bu da dünyanın en büyük kentlerinin sular altında kalmasına yol açacaktır.



Şekil 1.2. Üretilen kWh başına sera gazı emisyon aralıkları [3]

1960'lı yılların sonundan itibaren dünyanın her tarafında görülen hızlı nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, ısınma, trafik, sınıai faaliyetler ve buna bağlı elektrik tüketimi için artan bir yakıt tüketimini de beraberinde getirmiştir.

Fosil yakıt emisyonları arasında SO_x, NO_x, CO₂ ve çeşitli organik bileşikler, kurum ve partikül maddeler sayılabilir.

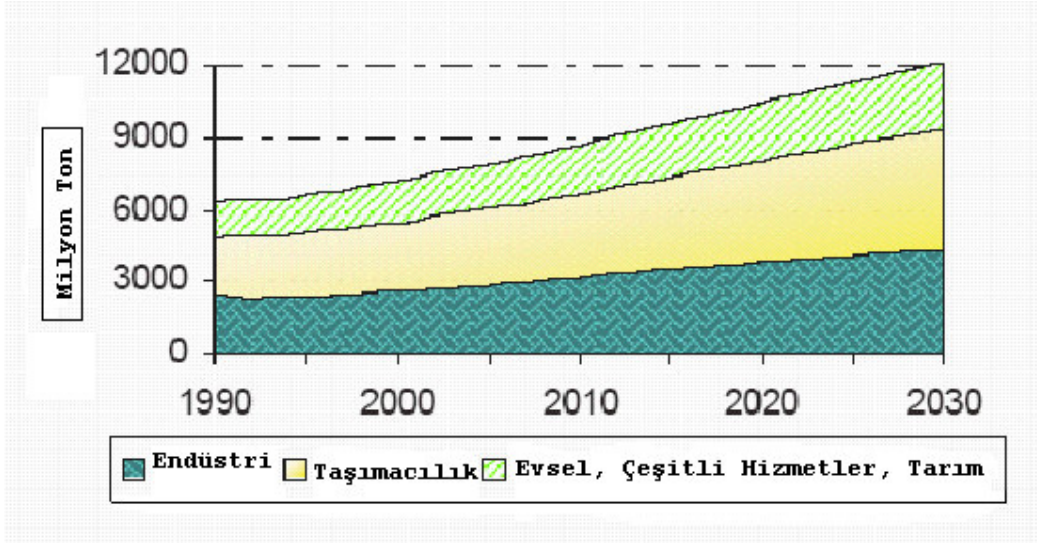
70'li yıllarda başlayan enerji darboğazları ekonomilerin enerjiye mutlak şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. Bu durumdan da en çok, gerek mevcut sanayilerini çalıştırmak, gerek yeni sermaye yatırımlarını gerçekleştirmek için bol ve ucuz enerjiye gereksinim duyan sanayileşme yolundaki gelişmekte olan ülkeler ile birlikte Türkiye de etkilenmiştir. Söz konusu enerji darboğazı, gelişmiş ülkelerde de yaşanan ekonomik durgunluk dönemi ile birlikte, 1984 yılına kadar sürmüştür. 1980'li yılların sonuna doğru ise özellikle gelişmiş ülkelerdeki sanayileşme hamleleri ile birlikte enerji talebi tüm dünyada hızla artarken Türkiye'de de artmıştır. Bu bağlamda yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır.

Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanabilir.

Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzlukların yanında, dünya fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, mevcut teknik ve ekonomik sorunlarının çözümlenmesi halinde 21. yüzyılın en önemli enerji kaynağı olacağı kabul edilmektedir.

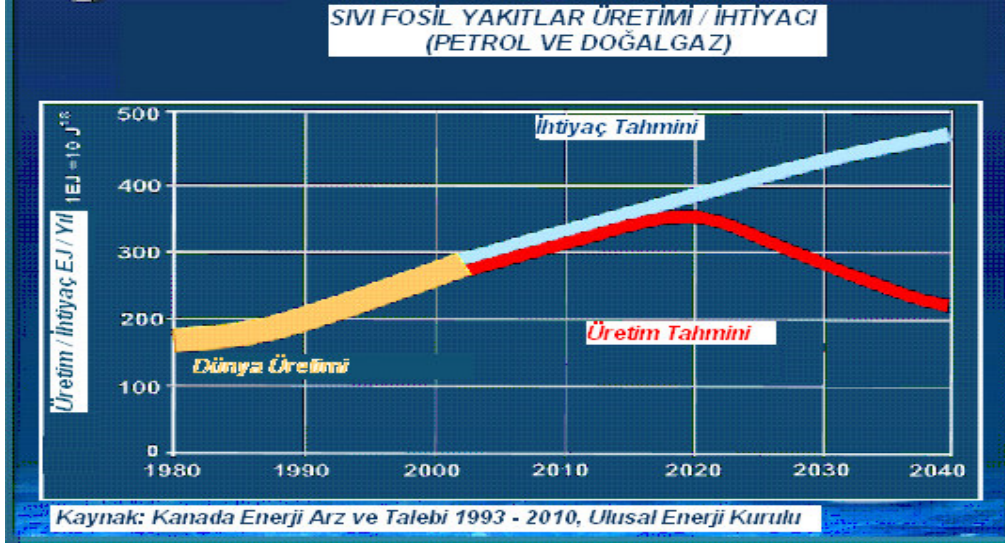
Aslında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı çok da yeni değildir. İlk çağlardan günümüze değin odun ve bitki artıkları enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Yine aynı şekilde yel değirmenleri yardımıyla enerji elde etme çalışmaları da çok eskilere dayanmaktadır.

Dünyada 1990 – 2030 yılları arasındaki enerji tüketiminin (metrik ton petrol eşdeğerinin yıl karşılığı olarak) sektörel dağılımının aşağıdaki şekilde olacağı tahmin edilmektedir.



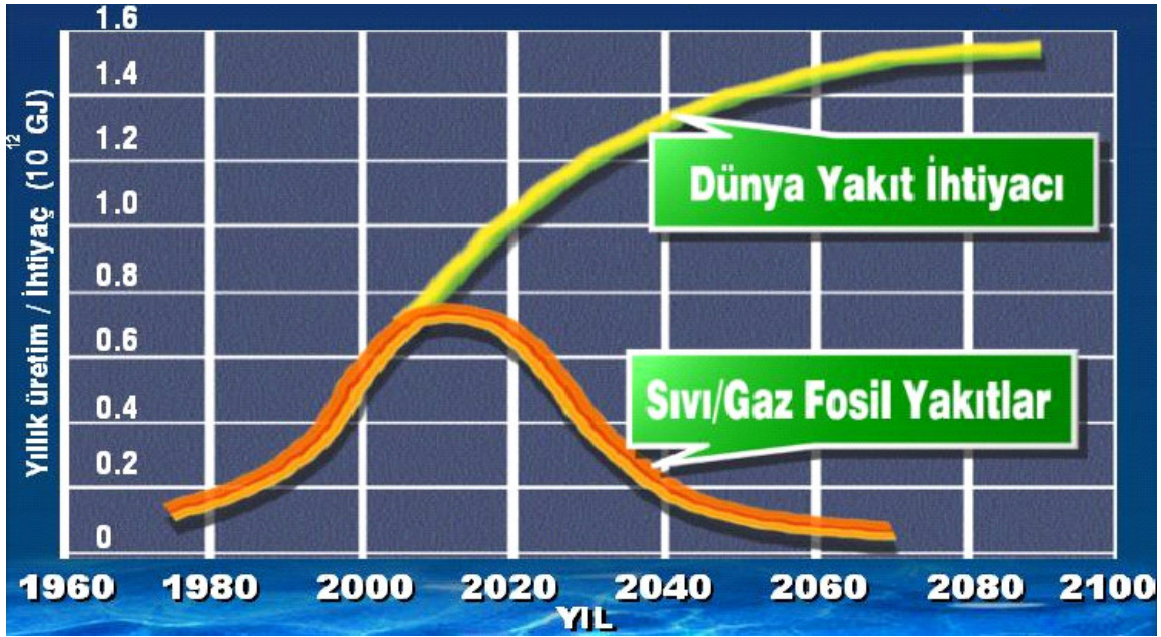
Şekil 1.3. Dünyanın 1990 - 2030 (Tahmini) Enerji Tüketimi
(Milyon Ton Petrol Eşdeğeri) [4]

Genel olarak enerjiye ve bunun paralelinde fosil yakıtlara olan talep gelişmeye ve artan nüfusa paralel olarak yükselmektedir. Bu enerjinin yaklaşık % 85 mertebesindeki çok büyük bir bölümünün fosil yakıtlardan (petrol, doğal gaz ve kömür) karşılanacağı öngörülmektedir. Enerji arz ve talebini ortaya koyan projeksiyonlarda, arz ve talep arasındaki farkın giderek artması (makasın açılması) ve bu farkın 2020'li yıllardan itibaren, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması nedeni ile çok daha büyümesi kaçınılmaz görünmektedir.



Şekil 1.4. Dünya Enerji İhtiyacı Arz ve Talebi (1980 - 2040) [4]

Özellikle 2020’li yıllardan itibaren dünya yakıt ihtiyacının hızla artmağa devam edeceği, ancak fosil kaynaklardan elde edilecek sıvı ve gaz yakıtların arzının ise tam tersine hızla azalmağa başlayacağı öngörülmektedir.



Şekil 1.5. Dünya Enerji İhtiyacı Arz ve Talebi - Yıllara Göre (1980 - 2100) [4]

Arz - talep dengesindeki açığın giderek artması dışında, fosil kaynaklardan elde edilen sıvı ve gaz yakıtların doğrudan yakılarak tüketilmeleri sonucunda çok ciddi çevre sorunları da ortaya çıkmaktadır. Örneğin, atmosferde normalde 180-280 ppm arasında değişen CO₂ seviyesi, günümüzde 370 ppm seviyesine ulaşmış bulunmaktadır. Dünyanın fosil yakıt kullanımından dolayı CO₂ emisyonunda son 40 yıl içinde 4 kat artış meydana gelmiştir. Son yirmi yılda atmosferik CO₂ konsantrasyonunda % 30 mertebesinde bir artış olduğu ve bunun da sera etkisi yaparak dünya sıcaklığının 0.5 derece artmasına neden olduğu iddia edilmektedir.

Artan nüfus ve buna bağlı olarak yükselen enerji talebi göz önüne alınarak yapılan hesaplarda CO₂ emisyonunun azaltılamaması halinde bunun atmosferdeki konsantrasyonunun 2100'de 700 ppm'e ulaşacağı hesaplanmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların yakılarak tüketilmesi sonucunda ortaya çıkan diğer önemli diğer bir çevresel sorun da kükürt ve azot oksitlerin artışıdır. [4]

Tablo 1.1. Fosil Kaynaklı Yakıtların Çevre Zararının Maliyetleri (Yıl: 2000) [4]

Fosil Yakıt Kaynağı	Çevresel Zarar (Milyar Dolar)
Kömürden kaynaklanan	1128
Petrolden kaynaklanan	1188
Doğal gazdan kaynaklanan	560
TOPLAM ÇEVRE ZARARI	2876

1.1. Hidrojen Enerjisi ve Türkiye

Türkiye'nin 7. Beş Yıllık Kalkınma Planı Genel Enerji Özel İhtisas Komisyonu Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Raporu'nda, hidrojen teknolojisine değinilmekle birlikte, resmileşen kalkınma planında hidrojen enerjisinin adı geçmemektedir. Hidrojen konusu üniversitelerimiz ve araştırma kuruluşlarımızda çok sınırlı biçimde ele alınmaktadır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde hidrojen alanında Uluslararası Enerji Ajansı programları kapsamında çalışma başlatılmak istenmişse de, söz konusu işbirliği 1996 yılında kesilmiştir.

Birleşmiş Milletler (UNIDO) desteği ile ICHET projesi kapsamında, İstanbul'da Hidrojen Enstitüsü kurulmuştur. 20-22 Kasım 1996 tarihlerinde Viyana'da yapılan 16. UNIDO Endüstriyel Kalkınma Kurulu Toplantısı'nda, UNIDO işbirliği ile ülkemizde Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (ICHET) kurulması kararı alınmıştır. Buna göre, UNIDO hukuksal çerçevesinde özerk bir kurum olarak çalışacak ICHET, İstanbul'da kurulmuştur. ICHET'in tasarlanan amacı, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında hidrojen teknolojileri köprüsünü oluşturmak, hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesini sağlamak ve uygulamalı Ar-Ge çalışmalarını yürütmektir.

ICHET'in işlevi; kısa ve uzun dönemli eğitim vermek, bilimsel toplantılar düzenlemek, danışmanlık hizmetleri sunmak ve benzeri kuruluşlarla işbirliği oluşturmak biçiminde belirlenmiştir. Merkezin çalışma konuları; hidrojen enerjisi politikaları, hidrojen ekonomisi, enerji ve çevre, hidrojen üretim teknolojileri, hidrojen depolama teknikleri, hidrojen uygulamaları ve demonstrasyonlar olacaktır. Türkiye, ilk beş yıllık dönem için arazi, tesis, ilk yatırım ekipmanı ve işletme faaliyetlerini finanse etmek üzere, 40 milyon ABD \$'ı verecektir. ICHET projesi Türkiye'nin hidrojen çağına tutarlı biçimde adım atmasını sağlayacak, Türkiye'ye avantaj kazandıracak önemli bir girişimdir.

TÜBİTAK-TTGV Bilim Teknoloji-Sanayi Tartışmaları Platformu tarafından yapılan çalışma ile 1998 yılında tamamlanan, Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu Raporu'nda, hidrojen enerjisinin önemi ve yapılması gerekenler sıralanmıştır. Hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmaların Ar-Ge alanları arasında yer alması gerektiği belirtilmiştir. Hidrojen programlarının esas itibari ile uzun döneme yönelik olduğu vurgulanmakla birlikte, mevcut enerji alt yapısıyla kısa dönemli uygulamalar üzerinde durulması, ICHET'in kurulması için başlatılmış olan çalışmaların hızla olumlu sonuca götürülmesi istenmiştir. Rapor, Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu tarafından uygun bulunarak, Başbakanlık kanalıyla Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na sunulmuştur.

Türkiye'de hidrojen yakıtı üretiminde kullanılabilecek olası kaynaklar; hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, deniz-dalga enerjisi, jeotermal enerji ve adım atılması gereken nükleer enerjidir. Türkiye gibi gelişme sürecinde ve teknolojik geçiş aşamasındaki ülkeler açısından, uzun dönemde fotovoltaik güneş-hidrojen sistemi uygun görülmektedir. Fotovoltaik panellerden elde olunacak elektrik enerjisi ile suyun elektrolizinden hidrojen

üreten bu yöntemde, 1 m³ sudan 108.7 kg hidrojen elde olunabilir ki, bu 422 litre benzine eşdeğerdir.

Türkiye'nin hidrojen üretimi açısından bir şansı, uzun bir kıyı şeridi olan Karadeniz'in tabanında kimyasal biçimde depolanmış hidrojen bulunmasıdır. Karadeniz'in suyunun % 90'ı anaerobiktir ve hidrojen sülfid içermektedir. Elektroliz reaktörü ve oksidasyon reaktörü gibi iki reaktör kullanılarak, H₂S den hidrojen üretimi konusunda yapılmış teknolojik çalışmalar vardır. Bu konuda yapılmış bir diğer teknoloji geliştirme çalışması, semikondüktör partikülleri kullanarak fotokatalitik yöntemle hidrojen üretimidir. Güneş ve rüzgar enerjisinden yararlanarak, Karadeniz'in H₂S içeren suyundan hidrojen üretimi için literatüre geçmiş bilimsel araştırma olup, Bulgaristan proje geliştirmeye çalışmaktadır.

Teknolojik verilere ve Türkiye'nin enerji-ekonomi verilerine göre, 1995-2095 arasında güneş-hidrojen sistemi ile yapılabilecek yakıt üretimi ve bunun fosil yakıtlarla rekabet olanağı, özel bir simülasyon modeli kapsamında bilgisayar çözümleri ile araştırılmıştır. Bu ulusal modelde, hidrojen üretiminin artışı için yavaş ve hızlı olmak üzere iki ayrı seçenek alınmıştır. Her iki seçenekte de 2010-2015 döneminde hidrojen enerjisi maliyetinin fosil enerji maliyetinin altına düşebileceği, ancak yapılabilecek yerli hidrojen üretiminin 2.3 Mtep'in altında kalacağı görülmüştür.

2020-2025 döneminde yerli hidrojen üretiminin 10 Mtep'in üzerine çıkabileceği, 2015 yılından sonra fosil yakıt dışalımını azaltıcı etki yapacağı bulgulanmıştır. Giderek sağlanacak hidrojen üretimi artışıyla, yerli petrol, doğal gaz ve kömür üretiminin sınırlanabileceği 2065 yılında, yaklaşık 290 Mtep hidrojen üretilabileceği görülmüştür. Hidrojen üretimine bağlı biçimde ulusal kazancın artacağı saptanmıştır. Model bulguları, diğer bazı ülkeler ve dünya geneli için yapılmış benzer çalışmalara koşut durumdadır.

ABD'nin Enerji Departmanı tarafından, 2025 yılında Amerika'nın toplam enerji tüketiminin % 10'unun hidrojenle karşılanması ve böylece petrol dışalımının yarı yarıya azaltılmasının hedeflediği göz önüne alınırsa, Türkiye için yapılmış simülasyon modeli çalışmasının bir abartma olmadığı anlaşılır. Kuşkusuz, bu bir bilimsel senaryo olup, gerçekleşmesi koşullara ve alınacak önlemlere bağlıdır. Modelin verdiği en önemli sonuç, hidrojenin ülkemiz için umut olabileceğidir.

1.2. Alternatif Yakıtların Karşılaştırılması

1.2.1. Alternatif Yakıtların Fiziksel ve Kimyasal Olarak Karşılaştırılması

Tablo1.2. Alternatif Yakıtların Karşılaştırılması [2]

	HİDROJEN	METAN	METANOL	ETANOL	BENZİN	DİZEL
Kimyasal Denklemi	H ₂	CH ₄	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₈	
C/H Oranı	0	0.25	0.25	0.333	0.556	0.520
Moleküler Ağırlığı (mol/kg)	2.02	16.04	32.04	46.07	91.4	170
Isıl Değeri (Mj/kg)	119.93	50.8	20.1	26.9	43.4	43.1
Stokiyometrik karışım için ; Hava/yakıt(kütlesel) Hava/yakıt(hacimsel)	34.32 2.38	17.2 9.53	6.44 7.14	8.96 14.3	14.7 45.79	14.5
Buharlaştırma ısısı(mj/kg)	0.447	0.509	1.102	0.856	0.272	0.3
Tutuşma sınırları % hacim λ	4.1 – 74 0.15-4.35	5-15.4 0.59–2.0	6-37 0.24–2.22	3.5-19 0.29– 1.92	1.3-7.6 0.29– 1.67	0.48- 1.35
Laminar alev hızı (m/s)	2.91	0.37	0.52		0.37	
Adyabatik alev sıcaklığı (°C)	2110	1954	1878	1924	1993	
Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	0.61	0.16			0.08	
Kaynama noktası (°C)	-252.35	-161.3	65.1	78.7	32-221	170- 350
Donma noktası (°C)	-259		-97.6	-114.1	-56	
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	574-591	632	470	392	257	
Oktan Sayısı						
ROS	130	130	110	106	91-100	
MOS		105	87	89	82-94	

Tutuşma sınırları bir yakıtın içten yanmalı motorlarda kullanımında önem teşkil etmektedir. Tutuşma sınırları sayesinde bir yakıtın fakir karışımlarda ve zengin karışımlarda motorda kolaylıkla yanıp yanamayacağı sonucuna varılabilir. Yukarıdaki verilere göre hidrojen gazının farklı hava yakıt karışım oranları için tutuşma sınırlarının çok geniş olduğu ve bunun da hidrojenin motorlarda kullanılması durumunda yarar sağlayacak önemli bir özellik olduğu sonucuna varılabilir. Tutuşma sınırları bakımından alternatif yakıtları bir sıralamaya sokarsak;

1. Hidrojen
2. Metanol
3. Etanol
4. Doğalgaz
5. Benzin

Benzin motorlarında iyi bir yanma ve yanma sonu basıncı elde edebilmek için karışımın sıkıştırılması ve sıkıştırıldıktan sonra ateşlenmesi gerekir. Sıkıştırılma anında meydana gelen ısı, yakıt ve havayı daha iyi karıştırarak yanmanın düzgün ve kolay olmasını sağlar. Aynı zamanda silindir içerisinde bulunan karışımdan en fazla yanma sonu basınca elde edebilmek için karışımın sıkıştırılabildiği kadar sıkıştırılması gerekir. Fakat benzin motorlarında sıkıştırma oranı istenildiği kadar arttırılamaz. Çünkü yükselen sıcaklık nedeni ile yakıt kendi kendine tutuşmaya başlayabilir. Bu bakımdan benzin motorlarında kullanılacak yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığının ve oktan sayısının yüksek olması motorun sıkıştırma oranının arttırılması bakımında önem teşkil etmektedir. Kendi kendine tutuşma sıcaklığı en yüksek olan yakıt doğalgazdır. Kendi kendine tutuşma sıcaklığı bakımından alternatif yakıtları bir sıralamaya sokarsak ;

1. Doğalgaz
2. Hidrojen
3. Metanol
4. Etanol
5. Benzin

Laminar alev hızının yüksek olması benzin motorlarında performans açısından güç ve verim değerlerindeki bir miktar azalmaya neden olur. Hidrojenin laminar alev hızı diğer alternatif yakıtlara göre daha yüksektir.

Tablo 1.3. Yakıtların Yanma Özelliklerinin Karşılaştırılması [5]

Yakıt	Hidrojen	Metan	Propan	Benzin	Metanol
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	585	632	510	257	470
Min. Tutuşma enerjisi (MJ)	0.02	0.28	0.25	0.25	–
Tutuşma aralığı (%hacim)	4.1-74	5-15.4	2.2-9.5	1.3-7.6	6-37
Max. Laminer alev hızı (cm/s)	291	37	40	37	–
Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	0.61	0.16	–	0.08	–

1.2.2. Alternatif Yakıtların Performans Açısından Karşılaştırması

Verilen tabloda ABD’de kullanılan alternatif yakıtlara sahip örnek taşıtların genel olarak performansları karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki değerlere göre yakıt tüketimi bakımından benzin ve dizelle alternatif olarak kullanılacak yakıtlar arasında LPG en iyi durumdadır.

Tablo’da belirtilen taşıtlar arasında metanol ve etanol yakıtlı taşıtların hızlanma kabiliyetlerinin diğer taşıtlara göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 1.4. Alternatif Yakıtları Kullanan Araçların Performans Karşılaştırması [5]

	BENZİN	DİZEL	HİDROJEN	METANOL	ETANOL	LPG	DOĞALGAZ
Hızlanma 0-100 km/h, (saniye)	12	14	18	10	10	11	12
Yakıt Doldurma Süresi, (dakika)	2	2	2	2	2	5	5

1.2.3. Alternatif Yakıtların Hava Kirliliği ve Güvenlik Etkileri Bakımından Karşılaştırılması

Tablo1.5. Hava Kirliliği ve Güvenlik Etkileri Bakımından Karşılaştırılması [5]

Yakıt	Hava kirliliğine etkilerdeki değişim	Çevresel ve Güvenlik Etkileri
Doğalgaz	Toplamda önemli düzelme fakat NO _x de az etki	Doğalgaz için yüksek sıkıştırma gerekli ve doğal kaynakların korunumu
LPG	Toplamda önemli düzelme fakat NO _x de az etki	Güvenlikli, ve en düşük sıcaklıkta depolama imkanı
Hidrojen	Çok az miktarda NO _x verir.	Eğer sudan elde edilirse doğal kaynak korunumu vardır. Ancak sıkıştırma veya soğutma gerekli
Metanol	Orta miktarda azalma	Suda çözünümü zehirleyici olabilir.
Etanol	Orta miktarda azalma	Doğal kaynak korunumu vardır.
Bitkisel yağ	CO çıkışı fazladır.	Doğal kaynak korunumu vardır.

1.2.4. Alternatif Yakıtların Egzoz Emisyonu Yönünden Karşılaştırılması

Hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile çok az miktarda oluşan HC'lar egzoz gazları arasında bulunacaktır. Diğer yandan bu motorlarda, yüksek yanma sıcaklıkları nedeni ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler, NO_x , bol miktarda üretilmektedir. Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan NO_x 'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması, oksijen konsantrasyonunun azaltılması ve yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir.

Doğalgazın yakıt olarak motorlu taşıtlarda kullanımı, özellikle şehir trafiğinde seyreden, dizel motorlarında NO_x ve HC emisyonlarında, benzin motorlarında da CO ve HC emisyonlarında azalmalar temin edecektir. Doğalgazın karbon oranının, diğer petrol yakıtlarına göre, düşük olması egzoz gazlarındaki karbondioksit oranının azalmasına sebep olacaktır. Ayrıca doğalgaz kullanımı, benzinli taşıtların egzoz emisyonlarındaki zehirli kurşun türevlerini tamamen yokedecektir. Benzin motorlarında ve dizel motorlarında doğalgaz kullanılması durumunda yanma sonu sıcaklığında bir düşme olmaktadır. Bu da NO_x emisyonlarında bir azalma sağlayacaktır. Alternatif yakıtlar içerisinde egzoz emisyonları en düşük yakıttır.

Metanolün yanması sonucu CO, CO_2 ve NO_x gazları oluşmaktadır. Ayrıca metanolün benzine göre daha düşük alev sıcaklığının olması, yanmanın iyileşmesini, yanma ürünleri içindeki azot oksitlerin NO_x ve CO'nin azalmasını sağlamaktadır. Metanol benzinin aksine yanmamış hidrokarbonlar üretmez. Metanolün yanması ile oluşan ısı azdır; dolayısıyla çok fazla miktarda NO_x meydana gelmesi için gerekli koşul oluşmaz. Diğer taraftan metanol yandığında benzine göre iki kat daha fazla formaldehit üretilir.

LPG benzine nazaran üniform bir hava – yakıt karışımı sağlayabilmesi ile yanmanın stokiyometrik orana yaklaşması sonucunda temiz egzoz gazı çıktısı vermektedir. Bu sebeple LPG'nin egzoz emisyonları oldukça düşüktür.

1.2.5. Alternatif Yakıtların Ekonomiklik Yönünden Karşılaştırılması

Bu karşılaştırma kullanılan alternatif yakıtların 100 km'lik bir menzil içerisinde enerji tüketim fiyatına bakılarak bulunur. Şu anda piyasada bulunan alternatif yakıtlar içerisinde en ucuz birim fiyatı olan LPG ve doğalgazdır. Bu iki yakıt günlük hayatımızda kullandığımız taşıtlarda kullanılmaktadır.

Diğer alternatif yakıtlar ise çok az kullanıldığı için birim fiyatları daha yüksektir. Örnek vermek gerekirse metanol, etanol ve hidrojen günlük hayatımızdaki araçlarda çok az kullandığımız için birim fiyatları çoktur.

Ayrıca motorun dönüşümü LPG ve doğalgazda kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Ancak diğer yakıtlarda aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Bu sebeple ilk maliyet yönünden bakıldığında da LPG ve doğalgaz öne çıkmaktadır.

ABD 2000 yılı tahmini benzin fiyatı	=	1.35 \$ / galon	(1 galon = 3.785 litre)
ABD 2000 yılı tahmini metanol fiyatı	=	1.44 \$ / galon	
ABD 2000 yılı tahmini etanol fiyatı	=	2.33 \$ / galon	
ABD 2000 yılı tahmini doğalgaz fiyatı	=	0.84 \$ / galon	
ABD 2000 yılı tahmini LPG fiyatı	=	0.98 \$ / galon	

Yapılan bu hesaplamalar sonucunda günümüzde motorlu taşıtlarda kullanılan benzin ve dizelle alternatif olarak kullanılan LPG yakıtının tahmini olarak en ekonomik olduğu görülmektedir.

Egzoz emisyonlarından dolayı diğer yakıtların çevre zarar maliyetleri gözönüne alınmazsa, hidrojen yakıtı, doğalgazdan 1.5-3.7, petrol kökenli yakıtlardan 1.3-3.5 kadar pahalı görülmektedir. Vergiler dahil benzinin A.B.D' de üretim maliyeti 0.33 \$ / lt iken, hidrojenin maliyeti 0.38-1.83 \$ /lt olarak görülmektedir.

Taşıtlarda kullanılacak alternatif yakıt tiplerinden en uygununu seçebilmek için çeşitli kriterlerden faydalanılabilir ve bu kriterlere dayanılarak hangi alternatif yakıtın hangi ortamlarda daha uygun veya avantajlı olduğu bulunabilir.

Dünyada ve Türkiye’de oluşan enerji açığına bir çözüm bulabilmek ve egzoz emisyonunu azaltmak için bahsedilen alternatif yakıtların tümü motorlu taşıtlarda kullanılabilir. Etanol ve yağlar tarım ürünlerinden, metanol, doğalgaz ve LPG ise fosil yakıtlardan elde edildikleri düşünülürse, bunlara geleceğin yakıtları gözüyle bakmak pek gerçekçi olmaz. Ancak suyun elektrolizi ile elde edilen hidjonin depolanması ve sudan elde ediliş maliyetinin azaltılması sorunları çözüldüğü takdirde, hidrojen gelecekte araçlarda kullanılan yakıt haline gelebilir.

Doğalgaz ve LPG ise günümüz alternatif yakıtları arasında şu anda avantajlı durumda gözükümleridir. Özellikle LPG, ekonomik olmasından dolayı, geniş bir kesim tarafından araçlarda yakıt olarak tercih edilmektedir.

BÖLÜM-2. HİDROJENİN FİZİKSEL VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

1766'da CAVENDISH "alev alan hava" adını verdiği değişik bir maddeden söz eden bir makale yayınlamıştır. Ama bu maddenin niteliğini, 1783'te suyun bileşimini bulan LAVOISIER ortaya çıkardı ve söz konusu maddeye "Hidrojenyum" adını verdi.

Havadan çok hafif olan bu gaz ilk kez 1783 yılında Paris'te bir balonun uçurulması amacıyla kullanılmıştır. Hidrojenin yakıt olarak kullanımına ilişkin düşünceler de oldukça eski yıllara kadar uzanmaktadır. Günümüzden yaklaşık 130 yıl kadar önce Jules Verne, *Esrarengiz Ada* isimli bilim kurgu romanında, hidrojenin geleceğin en önemli enerji vektörü olacağını vurgulamıştır. Gene Jules Verne üç yıl sonra yazdığı *Doktor Ox* isimli romanında, elektrik enerjisinden yararlanılarak suyun hidrojen ve oksijen moleküllerine ayrılması sonucu yakıt elde edilebileceğini belirtmiştir.

Bu konudaki bilimsel çalışmalar ise 19. Yüzyılın başlarından itibaren, iki dönem içerisinde gerçekleşmiştir. Kullanılmakta olan yakıtlara oranla hidrojenin çeşitli avantajlarının bulunduğu ilk olarak İngiltere’de Cecil tarafından 1820 yıllarında vurgulanmıştır. Cecil geliştirmiş olduğu motorda farklı karışım oranlarında hidrojen-hava karışımları kullanmıştır. Sonraki yıllarda İtalya’da Bursanti ve Matteucci tarafından serbest pistonlu bir hidrojen motoru geliştirilmiştir. 20. yüzyılın başlarında, Almanya’da Rudolf Erren hidrojen motoru üzerinde çalışmalara başlamış, savaş nedeniyle çalışmalarına İngiltere’de devam etmiştir. Bu

çalışmalarında Erren hidrojen kullanımı sonucunda ısı verimin artmasını sağlamıştır. Ayrıca hidrojen yakıtlı motorlarda karşılaşılan geri-tutuşma ve erken tutuşma sorunlarına ilişkin çalışmalar da yapmıştır. Daha sonraki yıllarda, Almanya'da Deutsche Erren Studiengesellschaft direktörü Weil tarafından, Erren'in motorlarda kademeli dolgu elde edilerek, vuruntu sorununu önlediği bildirilmiştir.

Gaz hidrojenin motorlarda kullanımına ilişkin çalışmalar Ricardo ve Burstall tarafından da gerçekleştirilmiştir. Ricardo benzin motorlarında karşılaşılan vuruntu sorununun çözümü için hidrojen kullanımını önermiştir. Geliştirmiş olduğu bir gaz karıştırıcı ile sıkıştırma oranı 7:1 olan bir motorda %43 mertebesinde ısı verim sağlamıştır. Ricardo ayrıca motorun emme kanalında oluşan geri-tutuşma sorununa ilişkin çalışmalar yapmıştır.

1940'lı yıllarda Almaya'da Oehmichen tarafından tek silindirli bir hidrojen motorunda yapılan deneylerde, bu konuda temel oluşturacak bilgiler sağlanmıştır. Bu çalışmalarda yakıt, yanma odasına sıkıştırma zamanı başlarında direkt olarak gönderilmiş, farklı sıkıştırma oranlarında ve hava/yakıt karışım oranlarında motor çalıştırılarak çok sayıda veri toplanmıştır.

Bu dönemde yapılan çalışmalarda binden fazla hidrojen motorunun geliştirilmiş olduğu Hoffmann tarafından belirtilmiştir. Ancak bu çalışmaların çoğu laboratuvar aşamasında kalmıştır. Özellikle 19. Yüzyılın başlarında karbüratörlerdeki gelişmeler sonucunda benzinin motorlarda kullanımı yaygınlaşmış ve petrol kökenli yakıtların o yıllarda geniş kaynaklara sahip olması, ayrıca üretim, depolama ve taşıma bakımından üstün yönlerinin bulunması nedeniyle, hala çeşitli sorunları bulunan hidrojenin motor yakıtı olarak kullanımı yaygınlaşmamıştır.

20. yüzyılın başlarında, hidrojenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesine ilişkin gerçekleştirilen çalışmalarda, motor yakıtı olarak kullanımında temel oluşturacak bilgiler elde edilmiştir. Bu dönemdeki çalışmalar hidrojen yakıtların avantajlarını ve sorunlarını belirlemiş, ayrıca bu sorunların çözümüne ilişkin çok sayıda çalışma da gerçekleştirilmiştir. Özellikle A.B.D.'de NASA kuruluşunun 1958 yılından başlayarak uzay projesinde yakıt olarak sıvı hidrojen kullanımına büyük ağırlık vermesi sonucu hidrojen teknolojisinde önemli aşamalar sağlanmıştır.

Hidrojen konusundaki araştırma çalışmalarının ikinci aşaması, 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi dönemine rastlamaktadır. Enerji krizini takip eden yıllarda mevcut yakıtların oluşturduğu hava kirliliği sorunu alternatif yakıtlar üzerinde bilimsel araştırmaların yoğunlaştırılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu dönemde tekrar yoğunlaşan hidrojen çalışmalarında, özellikle A.B.D., Japonya, Almanya ve eski Sovyetler Birliği'nde hidrojen yakıtlı motorlara ilişkin araştırmalar tekrar ağırlık kazanmıştır. Ayrıca uzay projelerinde hidrojen kullanımının sürdürülmesi nedeniyle, hidrojenin özellikleri ve yanma performansı konusunda veri toplama işlemleri bu dönemde yoğun olarak sürdürülmüştür.

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif elementtir. Bir litresi 0 °C 'de ve 1 atmosfer basınç altında 0.0898 gram gelir. tL biçiminde iki atomlu moleküller oluşturur. Bu renksiz kokusuz gaz, hava yada oksijen içinde kolayca parlar, patlayarak yanar ve su oluşturur. Çok kolay tepkimeye girdiğinden başka elementlerle birleşmiş halde bulunur. Su, kaya, petrol gibi ortamların ve bütün bitkisel, hayvansal yaşamın temelini oluşturan bir çok organik bileşenin içinde de bulunur. Havanın içinde az miktarda arı halde hidrojen vardır (Hacim olarak havanın %0.00005'i). Güneş dahil bütün yıldızlar da, çok büyük miktarlarda hidrojen içerir.

Hidrojen, doğal gazdan buhar reformasyonu yöntemiyle endüstriyel ihtiyaçlar için üretilebilmektedir. Bu işlemde ısı enerjisi doğal gazın karbon bileşiminden hidrojenin ayrılmasında kullanılır. Hidrojen, petrol rafinerizasyonunun yan ürünü ve kimyasal üretim metotları ile de üretilir. Zamanımızda suyun elektrolizinden sınırlı miktarda üretilmektedir. Bu oldukça pahalı bir işlemdir ve uzay programın da ihtiyaç duyulan saf hidrojenin temini ile sınırlıdır.

Amerika Birleşik Devletlerinin 1993'deki yıllık hidrojen üretimi yaklaşık 5 Milyar m³tür (178 milyar ft³). Ana kullanım alanları amonyak üretimi ve rafinerizasyon işlemi esnasında petrolde sülfürün ayrıştırılmasıdır. Hidrojen daha çok günlük 1.5 milyon m³ (50 Milyon ft³) üretim seviyelerinden daha fazla kullanılacağı yerde üretilir. Hidrojen, kimyasal işlemlerde, gıda hidrojenasyonunda, çelik ve cam imalatında ve elektronik alanlarında küçük miktarda kullanılır ve bu tür uygulamalar için sıkıştırılmış gaz yada sıvı olarak kamyonlar ile dağıtılır.

Dünya nüfusundaki ve uygarlık düzeyindeki artışlarla birlikte toplam enerji gereksiniminin artmasına karşın, günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması alternatif enerji kaynaklarına olan gereksinimi zorunlu kılmaktadır. Petrol krizinin ve çevre sorunlarının etkisi altında yakın gelecekte içten yanmalı motorlarda kullanılan benzin, mazot gibi petrol kökenli konvansiyonel yakıtlarında yerini alacak alternatif yakıtların bulunması gerekmektedir.

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerinden biri farklı hava/hidrokarbon karışım oranları için hava fazlalık katsayısının 0.3- 1.7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken, hidrojen, için bu sınır 0.15-4.35 değerlerine ulaşmaktadır.

Hidrojen-hava karışımlarını ateşlemek için gerekli enerji miktarı da diğer yakıtlara oranla çok düşüktür. Bu durum tutuşma garantisi sağlaması açısından Otto ilkesi ile çalışan motorlar da avantaj sağlamakla birlikte erken tutuşma ve geri yanma gibi sorunları da beraberinde getirmektedir.

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının oldukça yüksek olması ve oktan sayısının yüksek olması, hidrojenin Dizel motorlardan çok Otto ilkesi ile çalışan motorlar için daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir. Dizel motorlarda hidrojen tek başına veya mazotla birlikte kullanımının gerçekleştirildiği örneklerde bulunmaktadır.

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Gaz halindeki hidrojen aynı hacimdeki havadan yaklaşık 15 kez daha hafiftir. Motorlarda kullanılmakta olan diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında sıvı hidrojenin, sıvı hidrokarbonlara oranla yaklaşık 10 kat daha hafif, gaz halindeki hidrojenin ise metan gazından 10 kat daha hafif olduğu görülmektedir.

Hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanılması durumunda petrol kökenli motor yakıtlara oranla birçok önemli avantaj sağlanmaktadır. Yüksek alev hızı ve tutuşma yeteneği, düşük ateşleme enerjisi gerektirmesi, geniş tutuşma ve yanma sınırları, yüksek ısıl değer ve termik verim, kirletici egzoz gazı emisyonlarının azlığı ve sahip olduğu yüksek oktan sayısı ile vuruntu direnci hidrojeni çekici kılmaktadır. Ayrıca benzin veya motorinle çeşitli karışım oranlarında çift yakıtlı motor olarak çalışabilme olanağına sahip olması, geçiş döneminde

mevcut motorlarda önemli değişiklikler yapılmadan hidrojen kullanımını olanaklı kılacaktır.

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerden birisi, hidrojenin çok fakir karışımlardan, çok zengin karışımlara kadar uzanan geniş hava-yakıt karışım oranı aralığı içerisinde tutuşabilir olmasıdır. Hava fazlalık katsayısının 0.15 - 4.35 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmektedir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının oldukça yüksek olması (1 atm basınçta 574 - 591 °C) ve oktan sayısının yüksek olması Otto motorlarında kullanımında avantaj teşkil etmektedir. 1980 yılında yapılan bir çalışmayla hidrojen yakıtı dizel motorunda uygulanmaya çalışıldı. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması nedeni ile dizel motorlarında kullanılmasında birtakım güçlüklerle karşılaşıldı. Yüksek yükleme durumlarında eğer hava yakıt oranı stokiyometrik karışım oranına yaklaşıldığında erken tutuşma ve geri tutuşma meydana gelmekteydi. Erken tutuşma taşıt ralanti durumunda iken de olmaktaydı. Bu durum hidrojenin dizel motorlarından çok, Otto ilkesi ile çalışan motorlar için daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir. Ancak dizel motorlarında hidrojenin tek başına veya dizelle birlikte kullanımının gerçekleştirildiği örnekler de bulunmaktadır.

Hidrojenin yanması sonucu elde edilen alev hızı oldukça yüksektir. Bu değer stokiyometrik karışımlar için benzin hava karışımlarındaki alev hızının yaklaşık 4 katı düzeyindedir. Hidrojen ayrıca diğer mevcut motor yakıtlarından daha yüksek ısıl değere sahiptir. Ancak volumetrik olarak ele alındığında, hidrojenin ısıl değerinin öteki yakıtlardan çok daha düşük olduğu görülecektir. Bu durum, bazı çözümler sağlanmadığında motorun maksimum gücü açısından, eşdeğer özellikteki benzin motoruna göre bazı kısıtlamalar getirecektir.

Hidrojenin difüzyon katsayısı da öteki yakıtlardan daha fazladır. Ayrıca gaz halindeki hidrojen kağıt, kumaş, kauçuk gibi malzemelerden, platin, demir, çelik gibi bazı metallerden difüzyon yolu ile geçebilmektedir. Hidrojenin bu özelliği ise depolanmasına ilişkin bazı sorunlar yaratmaktadır.

FİZİKSEL ÖZELLİKLER

- Renksizdir.
- Kokusuzdur.
- Doğadaki en basit atom yapısına sahiptir.
- -252.77°C ' da sıvı hale getirilebilir.
- -259°C ' da gaz haline geçer.
- Havadan 14.4 kez daha hafiftir.
- Yoğunluğu havanın 1/14 ü, doğal gazın ise 1/9 u, sıvı haleden benzinin 1/10 dur.
- Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır.
- Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir.
- Üst ısı değeri 140.9 MJ/kg , alt ısı değeri $120,7 \text{ MJ/kg}$ 'dir.
- 1 kg hidrojen 2.1 kg doğal gaz veya 2.8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir.
- Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır.
- Kendi kendine tutuşma sıcaklığı 585°C 'dir.
- Tutuşma sınırları ise, hacimsel olarak % 4.1-74 arasındadır.
- Maksimum laminar alev hızı 291 cm/s 'dir.
- Difüzyon katsayısı $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$ 'dir.
- Evrende %90 'dan fazla hidrojen bulunmaktadır.
- Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1.33 kat daha verimli bir yakıttır. [6]

KİMYASAL ÖZELLİKLER

- Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur.
- Yakıt olarak kullanıldığında atmosfere atılan ürün sadece *su ve/veya su buharı* olmaktadır.
- Hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve çevresinde yalnız bir elektron bulunur.
- 5000 hidrojen atomunun birinin çekirdeğinde birde nötron bulunur.(döteryum)
- Döteryum ile oksijen ile birleştirilmesinden elde edilen suya ağır su oluşur.
- Çekirdeğinde iki nötron bulunan izotopu (tridyum) hidrojen bombası yapımında kullanılır. [6]

-Hidrojen, atomik sembolü “H” olan hidrojenin atom ağırlığı 1,00797, atom sayısı 1 olan en basit ve en hafif elementtir. Yoğunluğu benzinden 3300 kat azdır.

-Hidrojen, doğada en çok bulunan element olmasına rağmen, hafifliği sebebi ile atmosfere yükselip orada serbest kaldığından, yeryüzünde serbest halde çok az bulunur.

-Görünmez ve kokusuz bir gaz olan hidrojene yer yüzünde diğer elementlerle bileşik yapmış halde rastlanır.

-Benzine göre elde edilen enerji 2,75 kat fazladır.

-Yanma ısısı yüksektir ve zehirli etkisi yoktur.Yanma sonucu sadece su buharı meydana gelir.Sentetik yakıtlar(metanol,amonyak..) içinde en temiz olanıdır.

-Sudan elektroliz yoluyla üretilebilir. Sonsuz enerji kaynağı vardır.

-Alev hızı yüksektir ve bu Otto motorlarında ideale yakın yanma oluşturarak ısı verimi artırır. Ayrıca alev hızının yüksek olması, buji kıvılcımından sonra karışımın başka noktalardan tutuşma (detenasyon) ihtimalini azaltır. Bu durum sıkıştırma oranının artırılmasını sağlayacağından motorun gücü de artar.

-Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksek olmasına rağmen, hidrojen-hava karışımlarının tutuşturulabilmesi için gerekli enerji miktarı düşüktür. Tutuşma aralığının geniş olması, hidrojenin daha geniş karışım aralığında düzgün yanmasını sağlar ve yanma sonucunda daha az kirletici oluşur. Benzin motorları ise stokiyometrik orana daha yakın oranlarda ya da zengin karışım oranlarında çalıştırılmak zorunda olduklarından egzoz gazlarında önemli miktarda azot oksit (NO_x), karbonmonoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC)'lar oluşur. Hidrojen motorları, maksimum yanma sıcaklığını azaltacak biçimde fakir karışım ile çalıştırılabilirler. Böylece daha az NO_x oluşurken, HC ve CO emisyonları oluşmaz. Çevre dostu bir yakıttır. Küresel ısınmaya da neden olmaz.

-Hidrojenin yüksek sıkıştırma oranlarında, fakir karışım ile yanabilmesi yakıt tüketimini azalttığı gibi, yanma sonucu oluşan maksimum sıcaklığı da azaltır. Yanma sonucu partikül madde oluşmadığından bujiler kirlenmez.

-Alev parlaklığının düşük olması, diğer karbon esaslı yakıtlara göre radyasyon yolu ile olan ısı kaybını azaltacağından daha yüksek verim sağlar.

Hidrojenin alt ısıl değeri mevcut motor yakıtlarından daha yüksektir. (hidrojen için 119.93 kJ/g, benzin için 43.4 kJ/g) Ancak hacimsel olarak değerlendirildiğinde, hidrojenin alt ısıl değeri daha düşük kalmaktadır (hidrojen için 8.41 MJ/litre, metan için 20.8 MJ/litre, benzin için 31.8 MJ/litre). Bu durum belirli silindir hacmine sahip bir motordan alınacak en yüksek gücü kısıtlar. Ancak karışım oluşturma yöntemine bağlı olarak bu sorun giderilebilmektedir. Diğer taraftan, hidrojenin yüksek oktan sayısına sahip olması özelliğinden yararlanılarak vuruntu tehlikesi olmadan motorun sıkıştırma oranı artırılıp, ısıl verimin ve maksimum gücün artırılması da sağlanabilir.

Hidrojenin difüzyon katsayısı çok yüksektir. Bu nedenle hava ile yakıtın hızlı ve homojen olarak karıştırılması mümkündür. Bu özellik dahili karışım hazırlama yöntemlerinin kullanımında, homojen bir karışım elde edilmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Hidrojenin yanma hızı da oldukça yüksektir. Stokiyometrik karışım oranlarındaki hidrojen-hava karışımlarında yanma hızı, benzin-hava karışımlarındakinin yaklaşık 7 - 8 katına ulaşmakta ve bu durum yanma sürecinin kısılmasını ve ısıl verimin artırılmasını sağlamaktadır.

Hidrojen diğer yanıcı gaz ve sıvılara oranla daha tehlikeli olarak değerlendirilmektedir. 1930'lu yıllarda, zamanın teknolojisine göre bez torbalarda gaz halinde saklanmakta olan hidrojenin neden olduğu Hindenberg faciası bu düşüncenin temelini oluşturmuştur. Ancak son yıllarda, özellikle uzay projeleri kapsamında, gaz ve sıvı yakıtların özelliklerine ilişkin yürütülmekte olan yoğun araştırma çalışmaları bazı mevcut sorunlara çözüm getirmiştir. Günümüz teknolojisinde, hidrojenin doymuş sıvı halinde, yüksek basınç altında ya da yalıtılmış metal tanklarda depolanması mümkündür. Kriyojenik tanklarda 200 kPa basınçta depolanan hidrojenin emniyet sorunları da oldukça azaltılmıştır.

Sıvı haldeki hidrojenin, hasara uğrayan yakıt deposundan diğer yakıtlarda olduğu gibi sıvı halde çevreye yayılması söz konusu değildir. Bu durumda hidrojen derhal buharlaşmakta ve havadan çok daha hafif olduğundan atmosferde yükselerek yanıcı bir karışım oluşturma olasılığı azalmaktadır. Diğer taraftan, motorlarda yaygın olarak kullanılan benzin, depoda bir hasar olduğunda sıvı halde çevreye yayılarak daha fazla tehlike oluşturmaktadır. Havadan daha ağır olan LPG vb yakıtlar da zemine çökerek ortamda yanıcı bir karışım oluşturarak tehlike yaratmaktadır.

Hidrojenin kaza ile yanması durumunda çevreye olan ısıl radyasyon miktarı, yayılan duman ve zehirli gazlar diğer yakıtlara göre daha azdır. Ancak kriyojenik hidrojen depolarının ani olarak hasara uğraması halinde ortam sıcaklığı aşırı düşük değerlere ulaşmaktadır. Diğer taraftan hidrojen alevinin renksiz olması da tehlike durumunda algılanmasını güçleştirmektedir.

Hidrojen-hava karışımlarının geniş tutuşma sınırlarına sahip olması ve kolay tutuşabilmesi emniyet sorunları yaratmaktadır. Ancak diğer bütün yakıtlar gibi hidrojen de bilinçli olarak ele alındığında, mevcut teknoloji içerisinde güvenli olarak kullanılabilir.

Tablo2.1. Yapılan çalışmaların tarihsel sıralaması [1]

- 1820 - Hidrojenin yakıt olarak kullanımı ilk olarak Cecil tarafından İngiltere'de tasarlanıyor.
- 1854 - İtalya'da Bursanti ve Matteucci tarafından serbest pistonlu bir hidrojen motoru geliştiriliyor.
- 1900 - Karbüratörün geliştirilmesi sonucu sıvı yakıtlarda benzine verilen önem artıyor.
- 1920 - Almanya'da Erren hidrojen motoru ile ilgili çalışmalara başlıyor. Daha sonra bu çalışmalara İngiltere'de devam ediyor.
- 1924 - Ricardo, İngiltere'de hidrojenle çalışan bir motorda geri-tutuşma ve erken-tutuşma konularında incelemeler yapıyor.
- 1930 - Erren, Hastings ve Campbell hidrojenin hava kirliliği açısından avantajlı bir yakıt olduğunu vurguluyor.
- 1940 - Avustralya'da benzin sıkıntısı nedeniyle hidrojen kullanımı uygulanıyor. Almanya'da Oemichen hidrojen konusunda temel oluşturacak çalışmalar gerçekleştiriyor.
- 1950 - Kanada'da King erken-tutuşma ve geri-tutuşma konularında çalışmalar yapıyor. A.B.D.'de jet motorlarının hidrojenle çalışması konusunda denemeler yapılıyor. Uzay programında hidrojen-oksijen yakıtlı sistemler üzerinde çalışılıyor.
- 1960 - Uzay projesinde Atlas Centaur roketinde sıvı hidrojen yakıt uygulaması gerçekleştiriliyor (1962). Saturn roketi ile aynı çalışmalar devam ediyor (1966). A.B.D.'de Billings hava kirliliğine çözüm olarak hidrojen kullanımını öneriyor.
- 1970 - Petrol krizi nedeniyle alternatif yakıtlar konusundaki çalışmalar yoğunlaştırılıyor. A.B.D.'de Miami Üniversitesi ve UCLA'de ve GM, Billings, Los Alamos gibi kuruluşlarda, Almanya'da Mercedes, DFVLR gibi kuruluşlarda, Japonya'da Musashi Enstitüsünde hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımı üzerinde çalışmalar yapılıyor.
- 1980 - Japonya, Almanya, A.B.D. ve eski Sovyetler Birliğinde hidrojen araştırma çalışmaları devam ediyor. Türkiye' de hidrojen enerjisi üzerine çalışmalar gerçekleştiriliyor.

- 1990 - Uzay projesinde, Uzay Mekiği ile hidrojen kullanımına devam ediliyor. Motorlarda hidrojen kullanımı konusundaki araştırmalar sürdürülüyor. Özellikle taşıtlarda hidrojenin depolanması ve üretim tekniklerinin geliştirilmesi konularında çalışmalar yapılıyor. Ticari olarak üretim yapan bir firma tarafından, hidrojen-yakıtlı prototip otomobilin tanıtımı Tokyo Motor Show'da yapılıyor. (1992)
- 2000 - Hidrojenin elektrikli taşıtlarda kullanımına ilişkin çalışmalar sürdürülüyor. Hidrojen yakıtlı içten yanmalı motor içeren prototip taşıtlar üretiliyor.

BÖLÜM-3. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Bugün hidrojenin üretimi için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan yöntem doğal gazın buhar reformasyonudur. Ancak uygulamalarda ihtiyaç duyulan saf hidrojen için göreceli olarak pahalı bir teknik olan, elektroliz kullanılmaktadır.

Hidrojenin geleceğın yakıtı olması için ileri teknolojiler kullanılarak fosil yakıtlarla maliyet bakımından rekabet edebilecek yenilenebilen enerji kaynakları ile hidrojen üretimi geliştirilmektedir. Üzerinde çalışılan teknolojiler genel olarak üç kategoriye ayrılabilir.

- Fotobiyolojik hidrojen üretimi
- Fotoelektro kimyasal hidrojen üretimi
- Termokimyasal hidrojen üretimi

Bunların dışında da daha önceden geliştirilen başka yöntemlerde mevcuttur. Bunlar ;

- Elektroliz
- Buhar yapılandırması 'dır.

Hidrojenin üretim kaynakları su ,hava ,kömür ,doğal gazdır. Kömür ve doğal gaz sınırlı ve karbon içerdiğinden hidrojen üretimi için tercih edilmez. Sudan üretim en doğru seçimdir. Bununla beraber, fotosentetik mikroorganizmalar kullanılarak hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Günümüzde hidrojen ağırlıklı olarak doğal gazdan buhar reformasyonu sonucu elde edilmektedir.

Fosil yakıtlar kullanılarak hidrojen üretimi yapılabileceği gibi güneş, rüzgar, dalga enerjisi, jeotermal enerjilerden de hidrojen üretimi yapılabilir. Enerji üretimi amacıyla ticari boyutlu hidrojen üretimi mevcut değildir.

Çeşitli optik düzeneklerle yoğunlaştırılan yüksek sıcaklıktaki güneş radyasyonu doğrudan veya dolaylı olarak hidrokarbon kökenli maddelerden (özellikle kömür) ve sudan veya fotovoltaiik düzeneklerle üretilen elektrik ve elektrolizle sudan üretilen hidrojen şimdilik ticari yöntemlerle kömürden üretilen hidrojene kıyasla yaklaşık 3-15 kat, ticari elektrolizle sudan üretilen hidrojene kıyasla da 1-4 kat maliyet taşımaktadır. Zaman içinde kömür rezervlerinin azalması ve güneş teknolojilerinde görülen gelişmeler ve ucuzlama bu maliyetleri ister istemez değiştirecektir. [7]

Tablo 3.1 Hidrojen üretim maliyetlerinin ve kapasitelerinin karşılaştırılması [7]

Üretim teknolojisi	Maliyet oranı	Üretim kapasitesi (Nm ³ /saat)
Suyun elektrolizi	1.0	500
Metanolün bozunumu	0.83	500
Doğal gazın buharla bozunumu	1.17	500
Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu	0.58	>500

3.1. Fotobiyolojik yöntemle hidrojen üretimi

Çoğu fotobiyolojik sistemde, hidrojen üretimi için kullanılan bakteriler ve yeşil yosunlar, klorofil aracılığı ile güneş ışığını absorbe eder ve enzimler sayesinde hidrojenin ayrılması sağlanır. Fotobiyolojik üretim teknolojisi uzun vadede hidrojen üretimi için oldukça ümit vericidir. Ancak iki önemli sınırlama mevcuttur. Birincisi; göreceli olarak düşük solar dönüşüm verimliliğine sahip olmasıdır. Güneş enerjisinin ancak % 5-6'sı hidrojen enerjisine dönüştürülebilir. İkincisi; suda hidrojeni ayıran enzimlerin hemen hemen tümü suyun ayrışmasının sonucu diğer ürün olan oksijenin de açığa çıkmasını sağladığından, hidrojenin saf olarak üretilmesine engel olmaktadır.

Fotosentetik organizmalar, güneş enerjisini bütün dünyada çok büyük miktarlarda depolayan bir enerji depolama mekanizması oluşturulmaktadır. Normal olarak, fotosentetik sistemler CO₂ 'i karbonhidratlara indirger fakat doğrudan hidrojen vermez. Bu güne kadar H₂/O₂ üretebilen en verimli fotobiyolojik sistemlerin, yeşil alg ve cyano-bakteria gibi algler olduğu anlaşılmıştır. Yeşil alglerin havasız ortamda hidrojen ürettiği saptanmış ve verim yaklaşık %10 u bulmuştur.

3.2. Fotoelektrokimyasal yöntemle hidrojen üretimi

Bu yöntem, suyu hidrojen ve oksijenlerine ayırştırmak için, yüksek sıcaklık veya elektriğe gerek olmadan, doğrudan güneş enerjisinin mor ötesi (UV) bölgesini kullanmaktadır. Güneşten gelen UV ışınları suyun doğrudan ayırştırılması için yeterli enerjiye sahip olmakla birlikte, atmosferdeki ozon tabakası tarafından büyük miktarlarda tutulduklarından çok az bir kısmı dünya ya gelebilmektedir. Gerçekte tüm canlılar için oldukça zararlı olan UV ışınlarının, incelen ozon tabakasından daha fazla miktarda geçmesi, fotokimyasal yöntem için verimi artırıcı bir öge olarak görülse de, dünyamız için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Ancak fotokimyasal yöntem için bu ışınların güçlendirilmesi veya su tarafından soğrulmasının artırılması gerekmektedir. Bunun için, güneş ışınımını yoğunlaştırıcı bir takım düzenekler ile, su içerisine bazı mineral ve metaller eklenerek UV etkisi arttırılmaktadır. Bu yöntem çok verimli olmamakla birlikte, her hangi bir oynar parça ve ya makine kullanımı gerektirmediğinden, diğer yöntemlere göre daha ucuzdur. Fotoelektrokimyasal işlem optik enerjinin kimyasal enerjiye dönüştürülebilmesi için bir fotoelektrokimyasal pil ve yarı iletken elektrotlar kullanılır. Fotoelektrokimyasal sistemin başlıca iki tipi vardır; biri yan iletken kullanım, diğeri erimiş metal karışımlarının kullanımınıdır. [8]

Birinci tipte yan iletken bir yüzey suyun ayırştırılması için hem solar enerjiyi absorbe etmek hem de bir elektrot gibi davranacak şekilde kullanılır. Bu teknoloji ile enerji dönüşüm verimliliği 1974'te % 1' den daha az iken bugün % 8'in üstüne yükselmesine rağmen hala gelişmesinin ilk aşamalarında. Hatta daha yüksek verimlilik, kimyasal reaksiyonun süresinin azaltılmasına yardımcı olacak bir dış elektrik şarjı ile elde edilir.

Fotoelektrokimyasal sistemin ikinci tipi r katalizör olarak erimiş metal karışımlarını

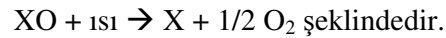
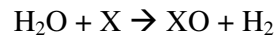
kullanır. Çözülebilir(eriyeabilen) metal karışımları enerjiyi absorbe eder ve suyun ayrıştırılmasında kullanılan bir elektrik şarjı oluşturur. Araştırmacılar suyu ayrıştırmada ve hidrojen üretimini daha verimli yapacak katalizörün saptanmasına odaklanmıştır. Bu metot günümüzde yarı iletken işleminden daha az gelişmiştir. [9]

3.3. Termokimyasal yöntemle hidrojen üretilmesi

Kömür, şehir katı atıkları ve biokütlelerin ısısından yararlanarak hidrojen içeren çeşitli gazlar üretilir. Gazların bileşimi depolama tipine, oksijenin mevcudiyetine, reaksiyon sıcaklığına ve diğer parametrelere bağlıdır. Üretilen gazdaki hidrojen, gaz karışımı içinde çok küçük yüzdelerde dolaşmaktadır.

Yenilenebilir hidrojen araştırmaları, bugün bir yakıt yada kimyasal gaz depolamada kullanmak için biokütleden orta ısıl değerde gazlara odaklanmıştır. Biokütlenin gazifikasyonu için, ya çöpler yada depolayıcı kabul edebilecek bir enerji kaynağı olarak özel olarak yetiştirilen otlar ve ağaçlar kullanılır.

Diğer bir termokimyasal üretim teknolojisi de suyun doğrudan oksijenle hidrojene ayrıştırılmasını sağlayan kapalı çevrimli termokimyasal yöntemdir. Bu teknoloji diğer yöntemlere göre daha ayrıntılıdır. Verimi daha yüksektir. Termokimyasal işlem kısaca geliştirilen çeşitli bileşiklerin suyla doğrudan reaksiyon sonucu hidrojen ve oksijenin açığa çıkartılmasıdır. İşlem iki aşamada gerçekleşir; ilk aşamada bileşik suyla reaksiyona girer ve hidrojen açığa çıkar, ikinci aşamada ilk aşamada elde edilen bileşikler yüksek sıcaklıklarda ayrıştırıldığında ise ilk bileşik ve oksijen gazı elde edilir. Bu işlem;

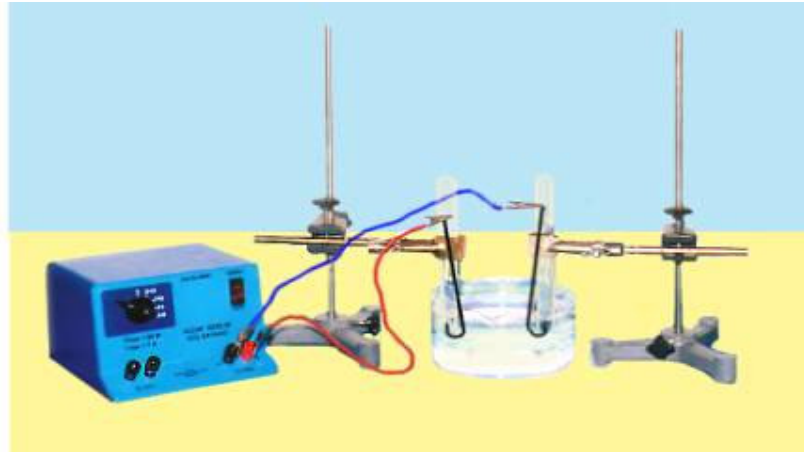


Burada "X" Al, Fe gibi su ile reaksiyona giren elementi ifade etmektedir. [9]

3.4. Elektroliz yöntemiyle hidrojen üretilmesi

Elektroliz, hidrolik, rüzgar, jeotermal güneş yada nükleer enerji ile üretilen elektrik enerjisi ile sudan hidrojen üretilmesinde kullanılmaktadır. Elektrolizle hidrojen üretebilmek için önce elektrik üretim aşamalarına ihtiyaç vardır. Bu aşamalar sonunda orijinal enerjinin yaklaşık yarısı kaybedilir, buna rağmen bu işlem günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Suyun elektrolizi elektrotlar aracılığı ile sudan doğru akım elektriğin geçirilmesiyle yapılır. Su gerçekten iletken olmadığı için KOH gibi elektrolitler ilave edilir.

Elektroliz işleminin verimliliğini yükseltmek için yeni elektrot malzemeleri üzerinde çalışılmaktadır. Kullanılan elektrolitik hücreler oldukça az bakıma ihtiyaç duyar ve 25 yıldan fazla ömürleri vardır. Bu nedenle hidrojen üretmek için güneş enerjisi ve rüzgar jeneratörleri ile şehirden uzak yerlere uyarlanması mümkündür. Bu sistem 1000 MW' ın üzerindeki elektrik enerjisi kapasiteli elektroliz fabrikalarında kullanımı planlanmaktadır. Bu tesislerin her birinde yılda yaklaşık 150.000 Ton hidrojen üretme kapasitesine sahip olacaktır.



Şekil 3.1. Elektroliz Devresi [9]

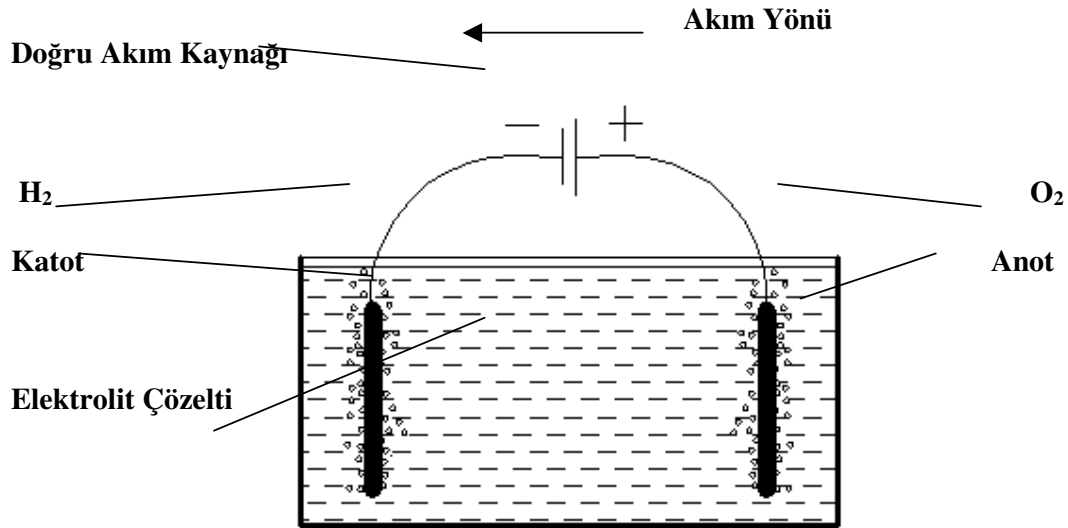
- Elektroliz için normal basınç ve sıcaklıkta 1.23 volt yeterlidir.
- Verimi %70 'den %90 'a çıkarılmıştır.

- Suyun elektrolizinde katotta (-) hidrojen, anotta(+) ise oksijen gazı toplanır. Deney sırasında bir süre sonra tüplerde toplanan hidrojen gazı hacim olarak oksijen gazının iki katı olur.

Elektrolizin verimi verilen bir akım değeri için ayrışma voltajını düşürmek ile artırılabilir. Bunu sağlamak için elektrot yüzeylerini işlemi hızlandıracak şekilde yapılmalıdır. Pratikte nikel kaplı çelik elektrotlar kullanılmaktadır. Elektrot yerleştirme yüzeyleri ve yapıları üzerinde çalışılmaktadır.

Hidrojen içermesi bakımından en zengin maddeler sırasıyla su, fosil yakıtlar ve biyomasdır. Bu ideal enerjiyi elde edip ondan yararlanabilmek için kullanılan yöntemler içerisinde en umut verici olanı, sudan hidrojen elde edilmesidir.

Suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilmesi klasik bir yöntemdir. Su oda sıcaklığında durağan olduğundan suyun elektrolizi kayda değer bir enerji gerektirir. Bu yüzden elektroliz maliyeti büyük oranda enerji maliyetine dayanmaktadır. Aşağıda elektroliz düzeneğinin basit bir şematik resmi görülmektedir. [8]



Şekil 3.2. Suyun elektrolizi [8]

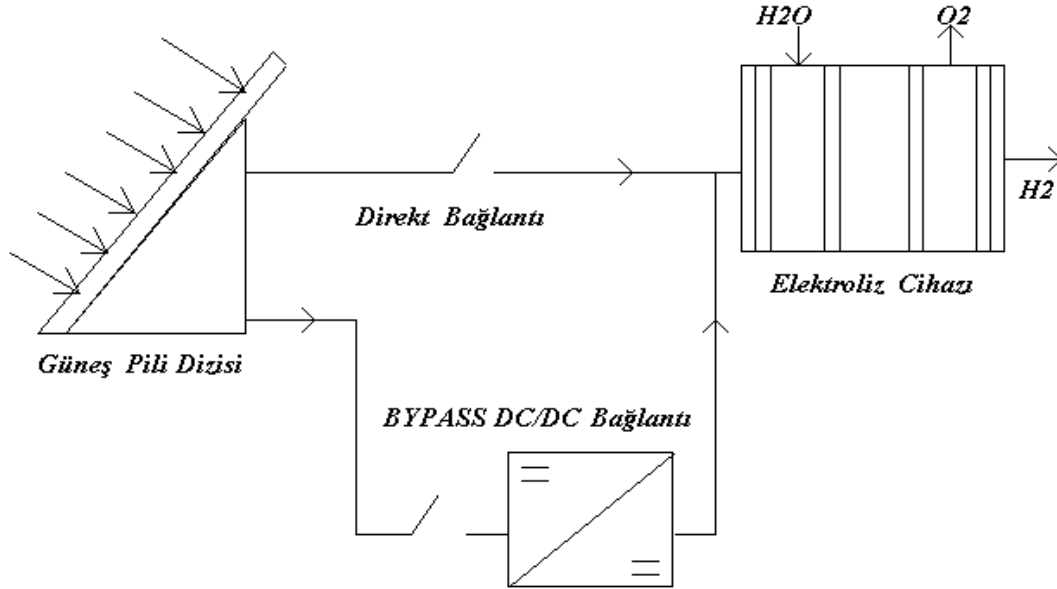
Suyun elektroliziyle ,sudaki H₂ ve O₂ yüksek saflıkta elde edilebilirler. Faraday kanunlarına göre, her bir amper saatte 0.037 gr H₂ ve 0.298 gr O₂ serbestleştirilir . Bir başka deyişle üretilen hidrojenin hacimce 1,5 katı oranında oksijen üretilmektedir. Özellikle çelik

endüstrisi ve tıbbi uygulamalarda oksijene çok ihtiyaç duyulmaktadır. Yan ürün olarak yüksek saflıkta oksijen elde edilebilmesi elektroliz yönteminin avantajları arasındadır.

Sıvı fazdaki su, gaz fazındaki oksijen ve hidrojene ayrışması aşağıdaki basit kimyasal reaksiyonla olur.



Suyun elektrolizi ile hidrojen ve oksijen gazlarının üretiminde çok basit bir yol izlenir. Elektrolizerlerin çalıştırılması kolaydır ve çok az bir bakım gerektirirler. Bütün bunlara karşılık elektrolizle çok saf ürünler elde edilir. Bir elektrolit çözeltisine iki metalik iletken daldırılır ve bunlar birkaç voltluk bir doğru akım kaynağına bağlanırsa çözüldüğü bir elektrik akımı geçer. Bu arada çözelti içinde iyonlarla akım taşınır ve her iki elektrotta bazı kimyasal değişimler olur. Elektroliz sırasında bir elektrotta çözelti ayrışarak katı, sıvı veya gaz halinde bir madde çözeltiye geçebilir. Çözeltiden akımın geçmesi ve elektrotlarda ayrışmanın olması için değişik elektrolitler için farklı olan minimum bir potansiyel farkının uygulanması gerekir. Bu minimum gerilim ayrışma gerilimidir. Elektrotlarda dönüşen madde miktarı Faraday Kanunlarına göre çözeltiden geçen akım miktarı ile orantılıdır. Elektrolizin olduğu iki elektrot ve bir ila iki çözeltiden ibaret hücreye elektroliz hücresi denilmektedir. Aşağıdaki şekilde güneş pilinden güç alan basit bir elektroliz düzeneğinin proses akım şeması yer almaktadır.



Şekil 3.3. Güneş-Hidrojen sistemi proses akım şeması [8]

Suyun elektrolizle dekompozizasyonu iki elektrodta meydana gelen iki reaksiyonla olur. Elektrotlar iyon içeren elektrolitlere ayrılmışlardır. Hidrojen negatif elektrodta yani katotta üretilirken, oksijen pozitif elektrodta yani anotta üretilir. Gerekli enerji akımı değişimi iyonlar üzerinden olur. Üretilen gazların birbirleri ile karışmasını önlemek için bir ayırıcı (diaphragm) kullanılır. Buharlaşma kaybı ihmal edilecek olursa $1\text{m}^3 \text{H}_2$ için 8 litre su gerekmektedir. Saf su elektrolizde kullanılmaz çünkü iletkenliği çok azdır. Bu nedenle oksijen asit veya bazla seyreltilir. [8]

a) Konvansiyonel Su Elektrolizi

Konvansiyonel alkalın elektrolizi sıvı alkalın elektroliti ile yapılır. Anot ve katot alanları mikro gözenekli bir diyaframla gazların karışmasını engelleyecek şekilde ayrılmıştır. Hidrojenin düşük ısınma değeriyle de bağlantılı olan bu prosesler yaklaşık 0,2 Mpa çıkış basıncıyla % 65 verimlere ulaşabilirler.

b) Yüksek Basınçta Su Elektrolizi

Özel Materyal seçimi ve optimizasyonu, yüksek basınçta elektroliz 5 Mpa basınçta hidrojen üretimine imkan verir. Geliştirme aşamasındaki proseslerde uygun kapasite optimizasyonu ve elektrolizerin düzensiz bir kaynağa bağlanması aranmaktadır.

c) Tuzlu Su Elektrolizi

Suyun dünya üzerindeki toplam miktarının %99' u tuzludur ve kutup bölgelerinde buz halindedir. Suyun elektroliziyle hidrojen üretiminde deniz suyu gibi bir elektrolit kullanmak maliyetleri düşürür. Bu kadar bol miktarda bulunan ve maliyeti çok düşük olan hidrojen kaynağının, elektrolizinde bir takım problemlerle karşılaşılmaktadır. Tuzlu suyun elektrolizi işlemi konvansiyonel alkali hücrelerle yapılmaktadır ve özel elektroliz sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Çünkü düşük akım yoğunluklarında klor oluşumu ve tuz kalıntılarının oluşturduğu tortular önlenememektedir. Deniz suyu elektrolizinde en önemli katodik reaksiyon hidrojen oluşumdur. Hidrojen oluşumu yüksek coulumbik verimle olduğu halde, lokal pH değişimine neden olmaktadır. Bu da yüksek hücre voltajıyla sonuçlanır ve tortu oluşumuna neden olur. [8]

3.5. Buhar yapılandırması ile hidrojen üretimi

- 1) Katalitik buhar yapılandırma (SR)
- 2) Non-katalitik kısmi oksidasyon (POX)
- 3) Katalitik kısmi oksidasyon (veya ototermal yapılandırma) (ATR)

Yapılandırma sistemlerinin verimi önemli oranda sistemin işletme sıcaklığına ve basıncına bağlıdır. Yapılandırma sisteminin sıcaklığı da kullanılacak yakıtın cinsine ve sistemin teknolojisine göre değişir.

Buna göre, buhar yapılandırma sistemi (SR) diğerlerine nazaran daha düşük sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Yeniden yapılandırma ile hidrojen üretiminde birçok hidrokarbon, yakıt olarak kullanılabilir. Bunların içinde öne çıkan yakıt türleri ise metan, metanol ve etanoldur. Bununla birlikte kullanılan yakıt olarak, metanol en düşük, metan biraz yüksek, etanol en yüksek yapılandırma sıcaklıklarına ihtiyaç duyarlar. Sonuç olarak metanol yakıt olarak yeniden yapılandırılması durumunda en verimli hidrojen üretimini sağlar. [9]

3.5.1. Katalitik buhar yapılandırma (SR)

Hidrokarbon yakıtların buhar yapılandırması yolu ile hidrojen ve bileşikler üretimi kullanılan en eski ve en çok uygulanmış yöntemdir. SR için yakıt türleri genelde nafta, doğal gaz ve diğer hafif hidrokarbonlardır.

Bu yöntemde, hidrokarbon yakıt katalitik yolla buharla reaksiyona girerek diğer bileşik gazlara (H₂, CO, CO₂) dönüştürülür. İşlem endotermik olduğu için sistem için gerekli ısı yakıtın harici olarak yakılması ile sağlanır. Sanayi uygulamalarında bu işlem 600 °C - 1000 °C'de ve 40-100 Atm. basınç altında, nikel esaslı katalizör kullanılarak gerçekleştirilir. Ancak sülfür zehirlenmesini önlemek için nikelin sülfür ile temasının engellenmesi veya sülfür-resistant katalizör kullanılması gerekir. Hidrojen konsantrasyonunu artırmak için bileşik gazın su gazı değişim reaksiyonuna girmesi gerekir. Su gazı reaksiyonu ise genellikle bir birine seri iki adyabatik değişim reaktörü tarafından gerçekleştirilir. Standart nikel esaslı buhar yapılandırma katalizörleri metan ve metanol yapılandırması için uygundur.

3.5.2. Kısmi oksidasyon ile yapılandırma (POX)

Kısmi oksidasyon katalizörsüz bir işlemdir. Reaksiyon için gerekli ısı yakıtın bir kısmının oksidasyonu ile sağlanır. Oksidasyonun miktarı oksijen ilavesinin kontrolü ile ayarlanır. POX işlemi için hava kullanılırsa çok az miktarda amonyak üretimi de söz konusu olur. POX işlemi genellikle ağır hidrokarbonların (Ağır nafta, rafineri artıkları veya kömür gibi) yapılandırılmasında kullanılır. POX, katalizör olmadığı için avantajlı olsa da katalizörlü yapılandırma işlemlerine nazaran yüksek sıcaklıklarda (1100-1500 °C) çalıştırılmaya ihtiyaç duyulur.

3.5.3. Ototerml yapılandırma (ATR)

Ototerml yapılandırma teknolojisi, buhar yapılandırma (SR) teknolojisinin katalizör bölümü ile kısmi oksidasyon teknolojisinin (POX) oksidasyon bölümünün bir arada kullanılması sonucu geliştirilmiştir. Oksijen katalizörü kullanılarak bir miktar yakıt kontrollü oksijen ilavesi ile oksidize edilir. Oksidasyon ısısı yakıtın Ha ve CO şeklinde yapılması için gerekli ısı ve yüksek sıcaklık ihtiyacını karşılar. ATR işlemindeki sıcaklık POX'e göre düşük, fakat SR'e göre ise yüksek durumdadır. ATR işlemi için iki ayrı tip katalizör kullanılır. Biri platin esaslı katalizör, diğeri ise buhar yapılandırma işleminde olduğu gibi nikel esaslı katalizördür. Buhar yapılandırma işleminde, buhar uygun katalizör yardımı ile hidrokarbonla reaksiyona girerek hidrojen zengin gaz üretimi sağlanır. SR, aynı anda bir yada birkaç reaksiyonun olabileceği endotermik bir işlemdir. Hidrojen üretiminde buhar yapılandırma tekniği için yüksek sıcaklık ve düşük basınç uygun görülmektedir.

Yapılandırma yöntemlerinin birbirine göre tabii farklılıklarına ilave olarak, birçok değişik faktöründe dikkate alınması gerekir. Bütün bu yapılandırma teknikleri hemen hemen aynı düzenek ve aşamalara sahiptir. Bu yöntemleri birbirinden ayıran temel farklılık endotermik reaksiyonlar için gerekli olan ısyı sağlama teknikleridir. Buhar yapılandırmasında (SR) ısı harici bir ısı kaynağı (fırın) vasıtası ile sağlanır. ATR ve POX'te ise bir miktar yakıtın oksidasyonu sayesinde olur. Bu farklılık, ATR ve POX yöntemlerine ağırlık, hacim ve reaksiyon hızı gibi avantajlar sağlar. Yeniden yapılandırma sisteminin dezavantajı, üretilen ürünlerin birbirinden ayrılmasının zorluğundan dolayı hidrojen saflığının düşük olması ve yüksek sıcaklıklara ihtiyaç göstermesidir. [9]

BÖLÜM-4. HİDROJENİN DEPOLANMASI

Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir. Hidrür şeklinde depolama; katı halde metallere olabileceği gibi, sodyum bor bileşiğinde olduğu gibi sıvı halde de olabilmektedir. Hidrojenin depolanması ile ilgili olarak birim maliyetler karşılaştırılacak olursa, sıvı halde depolama 1.48 \$ / kg, gaz halde depolama 0,29 \$ /kg, metal hidritlerde depolama 0.116 \$ / kg 'dır.

Tablo 4.1. Değişik Ortamlarda Depolanabilecek Hidrojen Miktarı ve Enerji Yoğunlukları [10]

Depolama Ortamı	Hidrojen Miktarı (ağ.%)	Hacimce Yoğunluk* (H atomu l ⁻¹) (x10 ²⁵)	Enerji Yoğunluğu*	
			MJ kg ⁻¹	MJ l ⁻¹
Gaz halde H ₂ (150 atm)	100.00	0.5	141.90	1.20
Sıvı H ₂ (-253°C)	100.00	4.2	141.90	9.92
MgH ₂	7.65	6.7	9.92	14.32
VH ₂	2.10	11.4	-	-
Mg ₂ NiH ₄	3.60	5.9	4.48	11.49
TiFeH _{1.95}	1.95	5.5	2.47	13.56
LaNi ₅ H _{6.7}	1.50	7.6	1.94	12.77
NaAlH ₄	7.40	-		8.25
NaBH ₄ (katı)	10.60	6.8	-	-
NaBH ₄ -20 Sol.	4.40	-	44	-
NaBH ₄ -35 Sol.	7.70	-	77	-
Nanotüpler	1-10(?)	-	?	?
Benzin	-	-	47.27	6.6-9.9
Metanol	-	-	22.69	5.9-8.9

Hidrojenin kullanılabilmesi için büyük ölçekli, güvenli ve pratik depolama yöntemlerinin geliştirilmesi gereklidir. Hidrojen sıvı olarak depolanabilmesine rağmen, -253 °C sıcaklığa kadar soğutulması gerektiğinden bu zor bir işlemdir. Soğutma işlemi hidrojenin depoladığı enerjinin %25-%30'u kadar enerjiye mal olur ve sıvılaştırılmış hidrojenin depolanması özel yöntemleri ve malzemeleri gerektirir. 1 kg hidrojenin soğutulması yaklaşık 10 kWh elektrik enerjisi gerektirir.

Hidrojen gaz halinde de depolanabilir. Hidrojen gazının depolanması için kullanılan basınçlı metal tanklar çok pahalıdır. Depolama için ümit vadeden bir yöntem hidrojenin hidritler içersinde depolanmasıdır. Hidrit, hidrojenin diğer maddelerle yaptığı bileşiklere verilen addır. Magnezyum-nikel, magnezyum-bakır ve demir-titanyum gibi bazı metal alaşımları hidrojeni soğurup ısıtıldıklarında yeniden açığa çıkarmaktadır.. Yüksek enerji yoğunluğunda önemli miktarda hidrojen taşıyabilen, hidrojeni bir yakıt olarak serbest bırakabilen, hızlı tepki gösteren ve uygun maliyetli bir bileşiğin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

Son yıllarda karbon nano-yapıların (nano-tüp, nano-fiber vb.) çok büyük miktarlarda hidrojen depolama kabiliyetlerinin olduğu görülmüştür. Hidrojen gazı, boyutları milimetrenin milyonda biri mertebelerinde olan tüpçüklerin içinde yüksek yoğunlukta depolanmaktadır. Nano-yapıların yüksek maliyetleri günümüzde pratik olarak kullanımlarını engellemektedir, fakat yakın bir gelecekte nano-yapıların hidrojen depolanmasında en önemli rol oynayacağı açıktır. [8]

Aşağıdaki tabloda hidrojenin depolama yöntemleri ve bu yöntemlerin hidrojen kapasitesi, enerji kapasitesi ve uygulama alanları gösterilmiştir. Tablodaki veriler deneysel olarak hesaplanmış maksimum değerlerdir. Şu an için aktive edilmiş karbon zeloitler ya da cam küreler için spesifik uygulama alanları ve pazar bulunmamaktadır ki bunun temel nedeni pratik olmayan çalışma koşulları ve düşük hidrojen depolama kapasiteleridir.

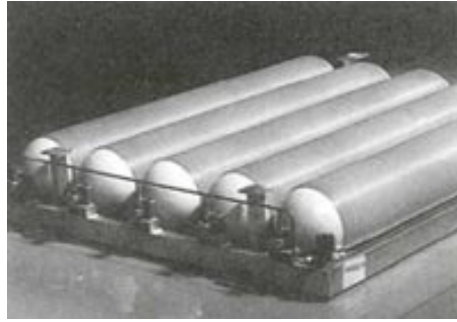
Tablo 4.2. Hidrojen depolama yöntemleri [7]

Depolama Yöntemi	Hidrojen Kapasitesi (%)	Enerji Kapasitesi (kW / kg)	Uygulama Alanları
Gaz Hidrojen	11,3	5,0	Taşıma, Güç üretimi
Sıvı Hidrojen	25,9	13,8	Taşıma
Metal Hidrit Sentezi	2 – 5,5	0,8 – 2,3	Taşıma
Kimyasal	8,9 – 15,1	3,8 - 7	Taşıma, Güç üretimi

4.1. Tanklarda Depolama

Hidrojen diğer gazlarda olduğu gibi uygun nitelikli tanklarda gaz veya sıvı olarak depolanabilmektedir. Nitekim otomotiv firmalarınca geliştirilen araçların büyük çoğunluğu hidrojenin tanklarda depolanmasını esas almaktadır. Ağırlıkça bakıldığında gaz olarak hidrojen depolama caziptir. Ancak tank ağırlığı da dikkate alınmalıdır. Etkin depolama 150 atmosfer veya daha yüksek basınç değerlerini gerektirmekte, bir taraftan yüksek basınç diğer taraftan tankın hafif olma gerekliliği tank tasarımı açısından zorlayıcı olmaktadır.

Gaz halinde depolama durumunda nispeten düşük olan hacimsel yoğunluğu artırmanın bir yöntemi gazın daha düşük sıcaklıkta, örneğin sıvı azot sıcaklığında veya iyice soğutulması ile (-253°C) sıvı olarak depolanmasıdır. Ancak sıvılaştırma için gerekli enerji küçümsenmeyecek düzeydedir, hidrojenden sağlanacak enerjinin yaklaşık ¼ ü kadardır. [10]



Şekil 4.1. Taşıtlarda kullanım için tüplerde depolanmış hidrojen [8]

Gaz Hidrojenin Sıvılaştırılması;

Hidrojenin sıvılaştırılması gaz hidrojenin kompresörlerde yüksek basınçta sıkıştırılması, sıkıştırılmış gazın sıvı nitrojen ile soğutulması ve türbinlerde genişletilmesi ile olur. Hidrojen sıvılaştırma esnasında hidrojen orto (nükleer ağırları paralel) formdan paraforma geçer. Oda sıcaklığında normal hidrojen % 75 orto hidrojen ve %25 para hidrojen karışımıdır ve sıvılaştırıldığı zaman depolama esnasında orto hidrojen egzotermik olarak yavaş dönüşür bu da kaynama kayıplarına neden olur.

Sıvılaştırma işlemi, gazın sıvı hal gelene kadar soğutulması ile gerçekleştirilir. Sıvılaştırma prosesi; istenilen soğutmayı sağlamak için kompresörlere, ısı değiştiricilere,

türbin ve kısma valfine ihtiyaç duyar. En basit sıvılaştırma prosesi Linde çevrimi veya Joule – Thompson genişleme çevrimidir. Bu proseste gaz atmosfer basıncına kadar sıkıştırılır, sonra bir ısı değiştiricide soğutulur ve sonra bir miktar sıvının elde edildiği kısma valfine verilir. Bu oluşan sıvı ortamdan alınır ve soğuk gaz ısı değiştirici yolu ile kompresöre geri yollanır.

Ancak Linde çevriminde kullanılan azot gibi gazlar oda sıcaklığında bir genişleme sınırının üzerinde soğurlar. Hidrojen ise tam tersine bu sınırdan sonra ısınır. Bu yüzden hidrojenin inversiyon sıcaklığının (202 K) altında tutulması esastır. Bu sıcaklığa ulaşmak için modern hidrojen sıvılaştırma proseslerinde, hidrojen ilk genişleme valfine gelmeden sıcaklığın 78 K civarına düşürülmesi hedeflenir. Bu da çevrim gazı olarak yine azotun kullanıldığı ön soğutmalı Linde çevrimi ile gerçekleştirilir.

İdeal sıvılaştırma prosesinde teorik olarak genişleme işi enerji tasarrufu açısından tersinir olmalıdır. Teoride ideal bir sıvılaştırma prosesinde izotermal kompresör ve izentropik türbin kullanılır. Pratikte ise türbin sadece gazın soğutulması amacıyla kullanılır, yoğunlaşmada kullanılmaz çünkü aşırı sıvı formasyonu türbin kanatçıklarına zarar verir. [8]

4.2. Nanotüplerde Depolama

Hidrojen karbon nanotüplerde de depolanabilmektedir. Karbon nanotüpler kısaca grafit tabakaların tüp şekline dönüşmüş halidir. Çapları birkaç nanometre veya 10-20 nanometre mertebesinde, boyları ise mikron civarındadır. Nanotüpler tek-duvarlı olarak üretilebileceği gibi çok-duvarlı tüplerde üretilebilmektedir. Çeşitli ilavelerle oluşturulan, örneğin alkali-ilaveli (Li-K), nanotüpler de mevcuttur.

Hidrojen, nanotüplerde iki şekilde depolanabilmektedir. Zayıf -van der Waals etkileşimi- sonucu oluşan (fiziksel) depolama ile depolanan hidrojen geri alınabilmekte ve sisteme tekrar aynı miktarda hidrojen yüklenebilmektedir. Kovalent bağların oluşumu ile (kimyasal olarak) depolanan hidrojen ise ancak çok yüksek sıcaklıklarda geri alınabileceği için faydalı kapasite dışındadır.

Karbon-bazlı hidrojen depolayıcılar üzerine yapılan teorik çalışmalar "fullerene" orijinli bazı sistemlerde hidrojen depolamanın mümkün olduğunu göstermiştir. Yine bazı çalışmalar karbon nanotüplerde ağırlıkça yüzde 4 ila 14 arasında hidrojen depolamanın mümkün

olduğunu göstermiştir. Meregalli ve Parrinello, anılan bu miktarların ne kadarının fiziksel ne kadarının kimyasal temelli olduğunu hesaplanmasının mümkün olmadığını bildirmişlerdir.

Karbon nanotüplerin hidrojen depolama kapasiteleri sırasıyla nanotüpün cinsine (tek duvarlı, çok duvarlı), tüplerin kapalı veya açık olmasına, tüp ölçülerine (tüp çapı ve uzunluğu v.b) ve tüp yüzeylerinin aktifliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Son 10 yılda karbon nanotüplerde hidrojen depolama konusunda yapılan çalışmalar, birbirinden çok farklı sonuçlar vermiştir. Chen alkali metal-ilaveli çok duvarlı nanotüplerde, 380°C 'de ve atmosferik basınçta, ağırlıkça % 20 hidrojen depoladıklarını belirtmişler, Yang ise aynı üretim metodu ve koşullar için kuru hidrojen gazında % 2.5'luk, yaş hidrojen için % 12'lik, depolama elde etmiştir. Yang, yaptığı değerlendirme sonucunda Chen ve diğerlerinin elde ettiği yüksek kapasiteyi emilen su moleküllerine bağlamış ve gerçek kapasitenin bulunan değer altında olduğunu belirtmiştir.

Çelişkili sonuçlar nedeni ile nanotüplerde depolanabilecek hidrojen miktarının güvenilir tarzda tespiti amacıyla tüm Avrupa genelinde üniversite ve araştırma enstitüleri nezdinde bir ortak program başlatılmıştır. İlk resmi sonuç Haziran 2001'de açıklanmış ve tek duvarlı tüpler için geri dönüşümlü depolama miktarı ağırlıkça yüzde 1 olarak rapor edilmiştir.

Nanotüpler konulu depolama çalışmalarında ağırlık kazanan diğer bir malzeme bor nitür (BN)dür. Bor nitürde depolama nanotüp, nanokapsül veya nanokafeslerde yapılabilmektedir. Oku ve Kuno BN'de ağırlıkça % 3 hidrojen depolamanın mümkün olabileceğini belirtmektedirler.

Wang, mekanik öğütme ile elde ettikleri nano-BN'ün hidrojen atmosferi altında yapılan öğütme sonucunda ağırlıkça % 2.6 hidrojeni depoladığını belirtmişlerdir. Buna ilaveten, depolanan hidrojenin 300 °C civarında geri bırakıldığını tespit etmişlerdir. Bando ve diğerleri (2002), benzer çalışmada 100 bar hidrojen basıncı altında gerçekleşen depolama miktarını ağırlıkça % 2.9 olarak vermektedirler. [10]

4.3. Metal Hidritlerde Depolama

Her ne kadar hidrojenin gaz veya sıvı fazda saklanması, taşınması veya kullanımı mümkünse de gaz fazında saklama veya kullanma çok büyük hacimler gerektirmektedir. Bu da hidrojenin yakıt olarak kullanılmasının düşünüldüğü cihaz ve taşıtların anormal ölçülerde olmasını gerektirir. Sıvı olarak depolama çok yüksek basınçlarda çalışmayı gerektirdiğinden maliyetlerde çok büyük artışlara neden olduğu gibi emniyetli kullanım açısından da çeşitli risklere neden olur. Diğer taraftan hidrojenin katı olarak saklanması, taşınması bütün bu sakıncaları bertaraf ettiği gibi yangın, kaza gibi tehlikeli durumlarda hidrojenin patlama tehlikesini de ortadan kaldırır.

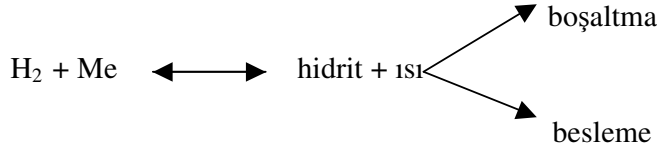
Hidrojenin metallerin içinde absorbe olma özelliği vardır ve bu şekilde metal hidritler oluşur. Bu egzotermik bir prosestir ve hidrojenin metal hidritten çıkışı yani işlemin tam tersi de endotermik bir reaksiyon oluşturmaktadır. Hidrojenin bir metal tarafından emilme ve salıverme işlemi birtakım parametrelere bağlıdır. Bu parametrelerin başlıcaları şunlardır;

- Hidrojenin basıncı
- Metalin sıcaklığı
- Hidrojenin akış oranı

Metal hidritler, kafes yapısına sahip metal atomlarıyla bu kafes yapısı içinde ara yerlerde tutulmuş hidrojen atomlarından oluşmaktadırlar. Hidrojenin tutulduğu yerler bir boşluk veya kafeste bir çizgi hatası olabilir. Çizgi hatası olması durumunda bir dizi hidrojen atomu bu çizgiyi dolduracak şekilde yapıya geçer. Metal ve hidrojen genellikle iki ayrı form oluşturur. Bu formlardan biri hidrojen depolamaya müsait iken diğeri tam dolu formdadır. Doldurma aşamasında hidrojen tam dolu yüzeyden geçerek depolamaya müsait yüzeyi oluşturacak şekilde yayılır. Boşaltma sürecinde ise hidrojen tam dolu formdan depolamaya müsait formu oluşturacak dışarı difüze olarak H_2 moleküllerini oluşturur. [8]

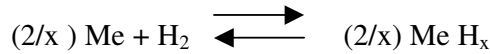
Metal hidrit depolama sistemleri hidrojen in depolanması için en güvenli sistemlerdir. Metal hidritlerde genellikle 3 ila 6 Mpa arası basınç altında hidrojen depolanabilir. Hidrojenin metallerle yaptığı kimyasal bağ ve reaksiyon ısısı birleşimiyle

hidritler sadece hidrojen değil aynı zamanda ısı da depolarlar. Hidritlerin hem hareketli hem teknik uygulamalarda kullanılabilmesi de bu ısı – hidrojen bileşimi sayesinde olmaktadır.



Metal hidritler hidrojeni ayrışabilir bir kimyasal bileşik halinde depolarlar. Gaz hidrojenle reaksiyona girerek metal hidrit oluşturabilen bir çok element, metal ve alaşım bulunmaktadır.

Bu tip reaksiyonlar genellikle aşağıdaki gibi gösterilir:

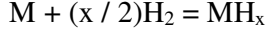


Eğer bu reaksiyon uygun sıcaklık ve basınçlarda kolayca ve tekrar geri dönüşümlü olarak gerçekleşebiliyorsa Me H_x şarj olabilen metal hidrit ve Me hidrojen depolama metal ya da alaşımı olarak adlandırılır. Bu şekilde gaz hidrojenin katı bir bileşik halinde depolanmasıyla istenen ve ihtiyaç duyulan anda tekrar gaz hidrojen elde edilebilir.

Metal hidratların hidrojen depolama amacıyla kullanılmasında ortaya çıkan problemler çoğunlukla yüzeyde oluşan olaylardan kaynaklanmaktadır. Kimyasal adsorpsiyon ve reaksiyon prosesleri küçük miktarlardaki safsızlıklardan etkilenebilirler. Bunlar katalitik zehir etkisi yaparlar. Zehirlenme prosesi hidrat oluşturabilen farklı metaller ve alaşımlar için değişiklik gösterir. Ancak yapılan çalışmalar sonucunda geçiş metalleri, nadir toprak metalleri ve aktinidlerin hidratlarının hepsinin özellikleri arasında iyi bir ilişki oluşturulması başarılmıştır.

Ayrıca metal hidritlerin güvenliği ve özellikle sıvı hidrojene çok daha basit konteynerlerde saklanabilmeleri de bir avantajdır.

Hidrojen kimyasal olarak metallerde, alaşımlarda ve ara metallerde hidrür olarak depolanabilmektedir.

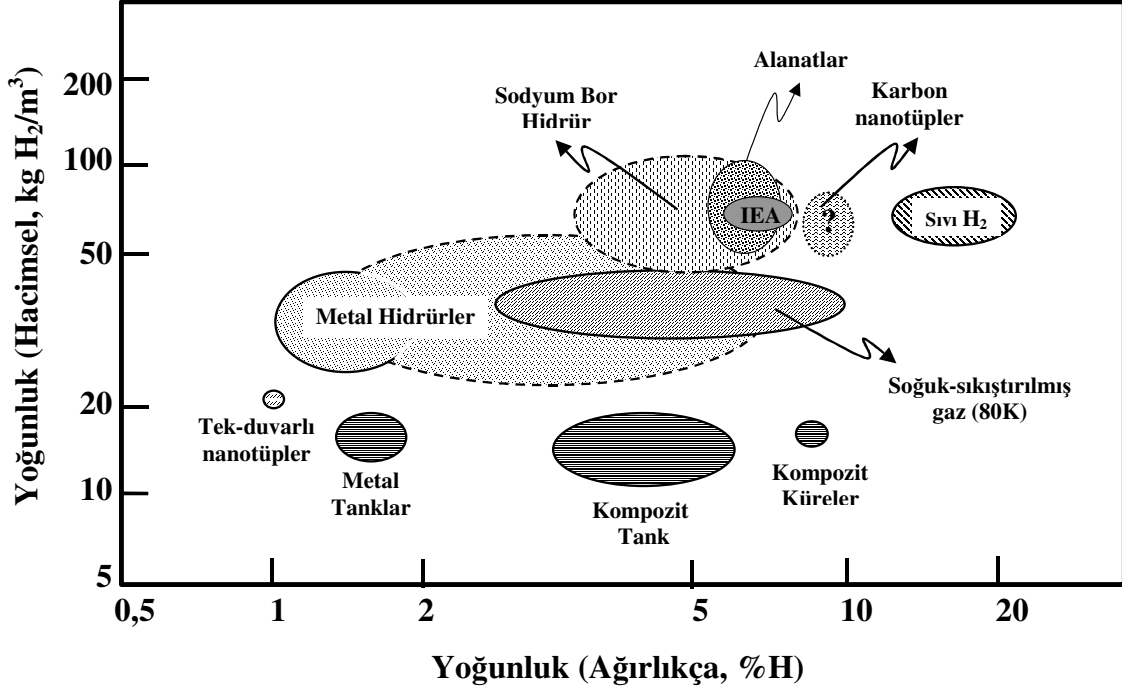


Bu reaksiyon, basınca ve sıcaklığa bağlı olarak yön değiştirmekte ve metalin cinsine göre reaksiyon endotermik veya egzotermik olabilmektedir. Metal hidrürler hidrojen depolamanın bir aracı olarak değerlendirilebileceği gibi, kendine özgü farklı uygulama alanları da mevcuttur. Bunlardan en önemlisi reaksiyonun ısısına ve reaksiyonun tersinir olma özelliğine dayalı ısıtma-soğutma (termodinamik gereç) uygulamalarıdır. Bu tür uygulamalarda "reaktör"de ısı ve sıcaklık kontrolü önem kazanmaktadır. Pratik uygulamalar esas alındığı takdirde hidrojen depolamada amaçlanan özellikler belirlidir. Bu özellikler;

- 1) Olabildiğince yüksek geri dönüşümlü depolama kapasitesi
- 2) Olabildiğince düşük geri-bırakım sıcaklığı
- 3) Zehirlenmeye karşı direnç ve bağlı olarak olabildiğince yüksek tekrarlanabilir dolum sayısı

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

AB₅ ve AB ara metalleri (örneğin, sırası ile LaNi₅ ve Fe-Ti) birkaç barlık basınçta ve oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda hidrojen depolayabilmekte, özellikle AB₅ zehirlenmeye karşı iyi bir direnç göstermekle beraber, depolayabildikleri hidrojen miktarı % 1-2'yi geçememektedir. [10]



Şekil 4.2. Hidrojende Depolanma Şekilleri ve Elde Edilebilen Hacimsel ve Gravimetrik Yoğunluk Değerleri [10]

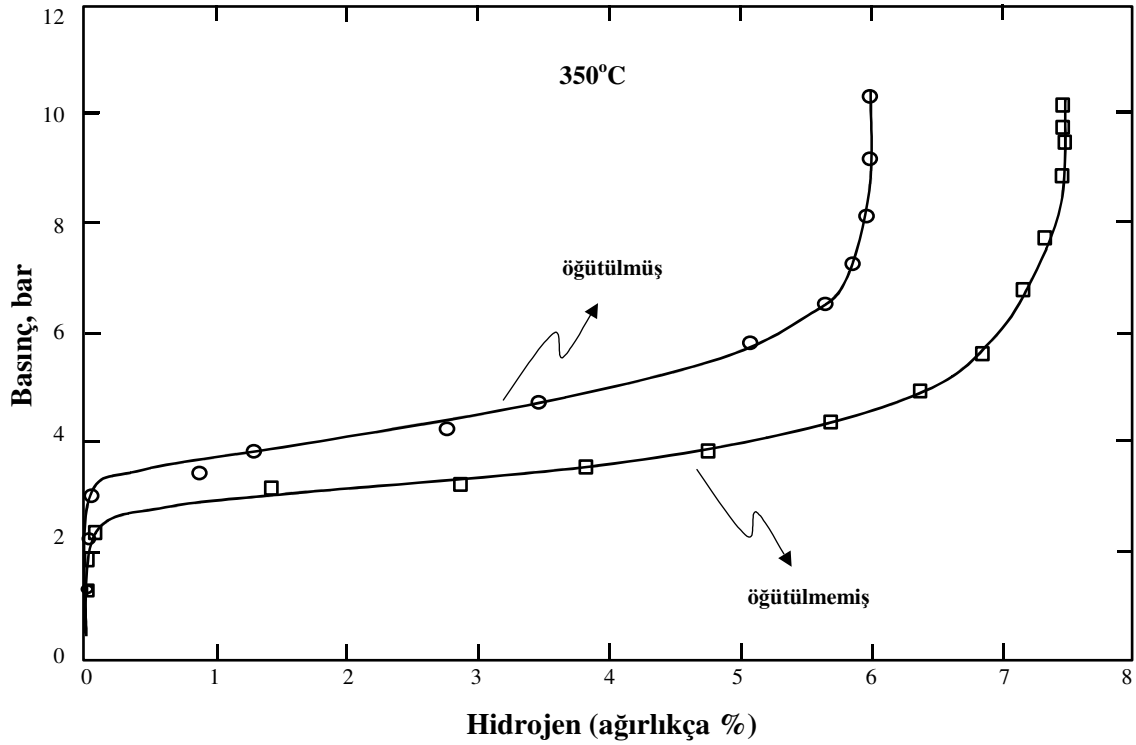
Magnezyum yüksek hidrojen depolama kapasitesi (ağ.% 7.6) ve düşük yoğunluğu ile (1.74 gr/cm^3 , hidrür halinde 1.45 gr/cm^3) ön plana çıkmaktadır. Magnezyumunun kullanımında en önemli engel ise reaksiyonun $400\text{-}450^\circ\text{C}$ 'de gerçekleşmesi ve reaksiyonun çok yavaş olmasıdır. Diğer bir engel ise aktivasyonun zorluğudur. Bu nedenle ilk yüklemelerde 30 bar üzeri basınç değerlerine ihtiyaç vardır.

Hidrojen depolama, depolayıcı malzemenin yüzey durumuna aşırı bağlılık göstermekte ve bu nedenle çoğu kez bir aktivasyon işlemi gerekli olmaktadır. Bu işlem sırası ile yüksek basınç ve vakum altında bir kaç hidrojen yükleme ve boşaltma işlemi şeklindedir.

Bu olumsuzluklara rağmen magnezyum yüksek kapasitesi ile son on yıldır yoğun geliştirme çalışmalarının odağı olmuştur. Kinetiği iyileştirme amacıyla başvurulan en yaygın yöntem mekanik öğütmedir. Öğütme saf olarak yapılabileceği gibi metal (V, Ti, Ni, Cu, Fe gibi), metal oksit (CuO , Al_2O_3 , V_2O_5 gibi), ara metal (LaNi_5 , FeTi gibi) ilaveler ile de yapılabilmekte ve bu şekilde katkılı öğütme daha olumlu sonuç vermektedir.

Yapılan çalışmada katkı maddeleri ile yapılan öğütme sonucunda magnezyumda elde edilen basınç-kompozisyon izotermi şeklinde verilmektedir. Yine aynı sistemde değişik katkı maddelerinin reaksiyon kinetiğinde oluşturduğu iyileşme emilim için şekilde gösterilmektedir. Görüleceği üzere %5'lik grafit ilavesi ile öğütülen magnezyumda %6 düzeyinde bir geri dönüşümlü depolama ve pratik uygulamalar için yeterli hızla bir kinetik elde edilmiştir. Ancak sıcaklık 350-400°C ile belirlenen hedef değerlerin çok üzerindedir.

Benzer çalışmalar magnezyumda bir miktar kapasite düşüklüğü ile 260°C' lik sıcaklıklarda hızlı bir kinetiğin mümkün olabileceğini göstermektedir. Halen magnezyum esaslı sistemlerde %6-7 düzeyinde kapasite ile hedeflenen sıcaklıklara erişme çalışmaları yoğunlukla sürdürülmektedir. 1980 'li yıllardan itibaren sürdürülmekte olan ince film esaslı çalışmalar depolayıcı malzemelerin ince film olarak üretilmesi durumunda sıcaklık ve basınç değerlerinin daha düşük olduğunu göstermektedir. İnce filmlerde hidrojen depolama Jain tarafından ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. [10]



Şekil 4.3. Magnezyumda Basınç Kompozisyon Eşsıcaklık Diyagramı ve Öğütmenin Diyagrama Etkisi [10]

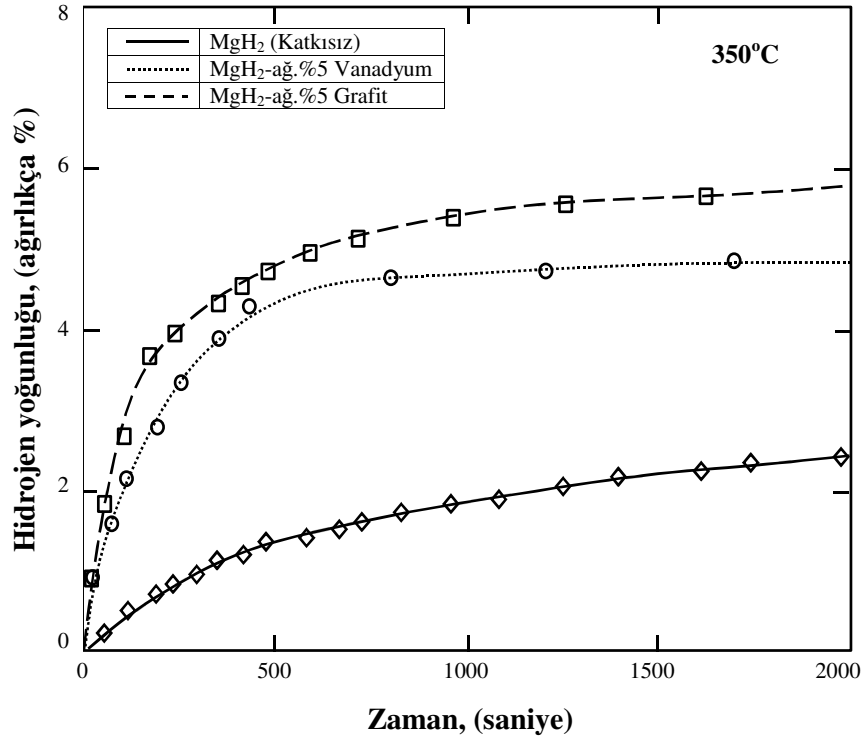
4.4. Alanatlarda Depolama

Özellikle son 10 yıldır yüksek depolama kapasiteleri nedeniyle alüminyum ve bor içeren kompleks hidrürler yoğun olarak çalışılmaktadır. Bor içeren kompleks hidrürler sıvı koşullarda kullanılmaktadır. Alanatlarda hidrojen depolama yukarıda belirtilen metal hidrürlerde olduğu gibi toz esaslı olarak yapılmaktadır. Çalışmalar ağırlıklı olarak sodyum alüminyum hidrür üzerinde yoğunlaşmakla beraber $\text{Na}_2\text{LiAlH}_6$ gibi daha kompleks alanatları konu alan çalışmalarda mevcuttur. Sodyum alanatta ağırlıkça toplam % 7.4 hidrojen depolanabilmekte, ancak oluşan hidrürden hidrojenin alınması normal koşullarda birkaç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada serbest kalan hidrojen 185°C gibi düşük bir sıcaklıkta gerçekleşmekte ancak burada geri dönüşüm kapasitesi % 3.7 düzeyinde kalmaktadır. Sodyum hidrürün ayrılması esaslı son aşama ise yüksek sıcaklıklar gerektirmekte ve pratikte kullanım dışı olarak değerlendirilmektedir. Bu koşullarda sodyum alanatlarda elde edilebilecek en yüksek kapasite ağırlıkça % 5.55 düzeyinde kalmaktadır.

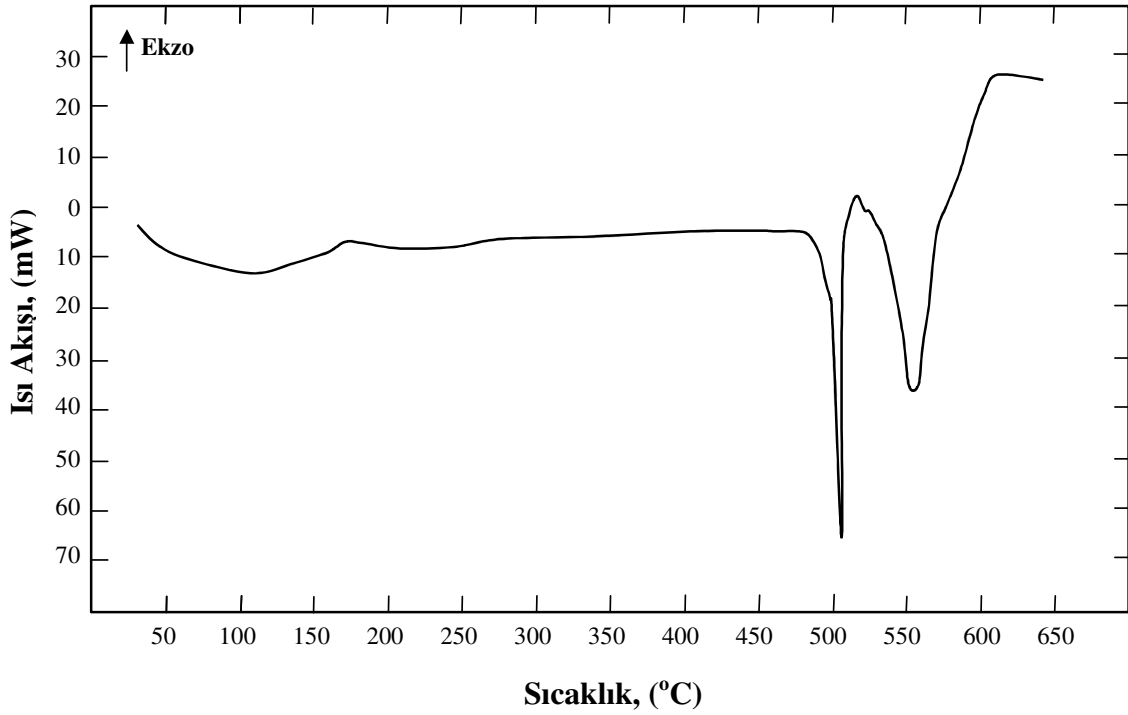
Sodyum alanatlar ile son yıllarda yapılan çalışmalar; alanatların sentezlenmesi, 1. ve 2. reaksiyonlar esas alınarak geri dönüşümlü depolamanın sağlanması, reaksiyon hızlarının artırılması odaklı olarak sürdürülmektedir. Özellikle son birkaç yıldır yürütülen çalışmalarda sodyum alanatın karbon, Ti, TiCl_3 gibi ilavelerle mekanik öğütülmesi ve bu şekilde reaksiyonun hızlandırılması hedeflenmiştir. Örneğin, Zaluska sodyum alanatı karbon ile mekanik olarak öğütürerek, $80-140^\circ\text{C}$ aralığında ağırlıkça % 2.5-3 hidrojeni dönüşümlü olarak depolayabilmişlerdir. $150-180^\circ\text{C}$ aralığında ise geri dönüşümlü olarak depolanabilecek hidrojen miktarı % 4.5-5 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada sodyum alanat hidrojenin emilimi için 80-90 barlık bir basınç düzeyi gerektirmektedir. Mg için bu değer sadece 3-5 bardan ibarettir. Mekanik öğütme ile reaksiyonun kinetiği iyileşmiş olmakla beraber süreler metal hidrürlere oranla daha uzundur. [10]

Tablo 4.3. NaAlH_4 'ün Hidrojen Geri Bırakım Reaksiyonları [10]

No	Reaksiyon	Kapasite (ağ.%)	Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)
1	$3\text{NaAlH}_4 = \text{Na}_3\text{AlH}_6 + 2\text{Al} + 3\text{H}_2$	3.7	185
2	$\text{Na}_3\text{AlH}_6 = 3\text{NaH} + \text{Al} + 3/2 \text{H}_2$	1.85	260
3	$\text{NaH} = \text{Na} + 1/2 \text{H}_2$	1.85	>425



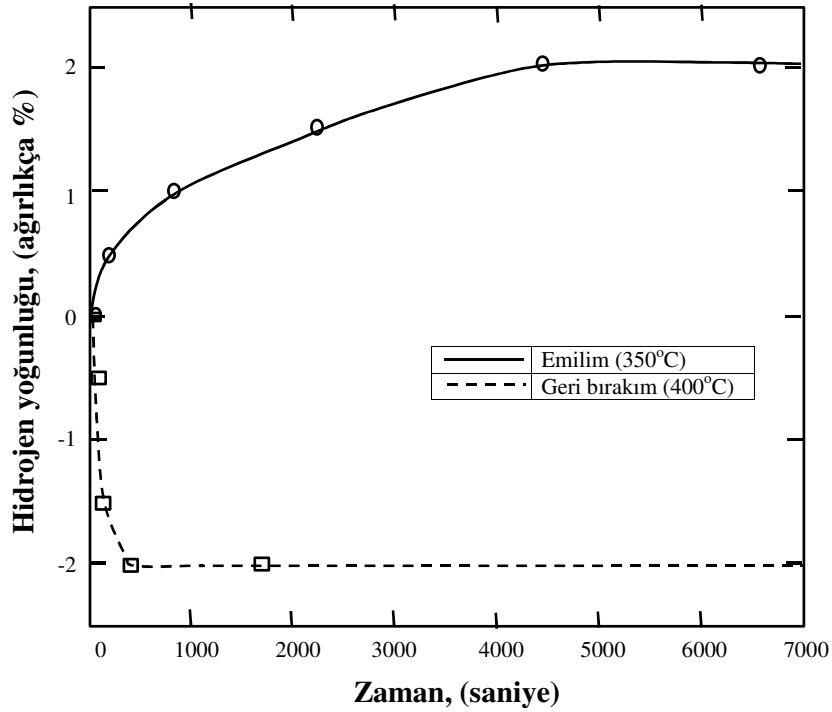
Şekil 4.4. Magnezyum, Magnezyum-Vanadyum ve Magnezyum-Grafit Sisteminde Hidrojen Emilim Hızı [10]



Şekil 4.5. Sodyum Bor Hidrürün Isıl Analizi [10]
(Şekil; NaBH₄'de ayrışmanın 500°C ve üstü sıcaklıklarda gerçekleştiğini göstermektedir.)

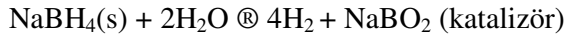
4.5. Bor Esaslı Depolama

Bor esaslı sistemler ana olarak sodyum bor hidrürü esas almaktadır. NaBH_4 , katı halde ağırlıkça %10,5 hidrojen içermektedir. Sodyum bor hidrürün kalorimetrik analiz eğrisi Şekil 5'de verilmektedir. Görüleceği üzere hidrür yaklaşık 500 °C kadar kararlılığını muhafaza etmektedir. Alanatlarda olduğu gibi sodyum bor hidrür karbon ile öğütülmüş ancak reaksiyon sıcaklığında belirgin bir düşme görülmemiştir. Mg ilavesi ile yapılan öğütmede sadece Mg'nin beklenen sıcaklıklarda hidrojen depoladığı, bor esaslı bileşenin ise reaksiyona girmediği, tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. NaBH_4 - %50 MgH_2 Sisteminde Hidrojen Emilim ve Geri Bırakım Kinetiği [10]

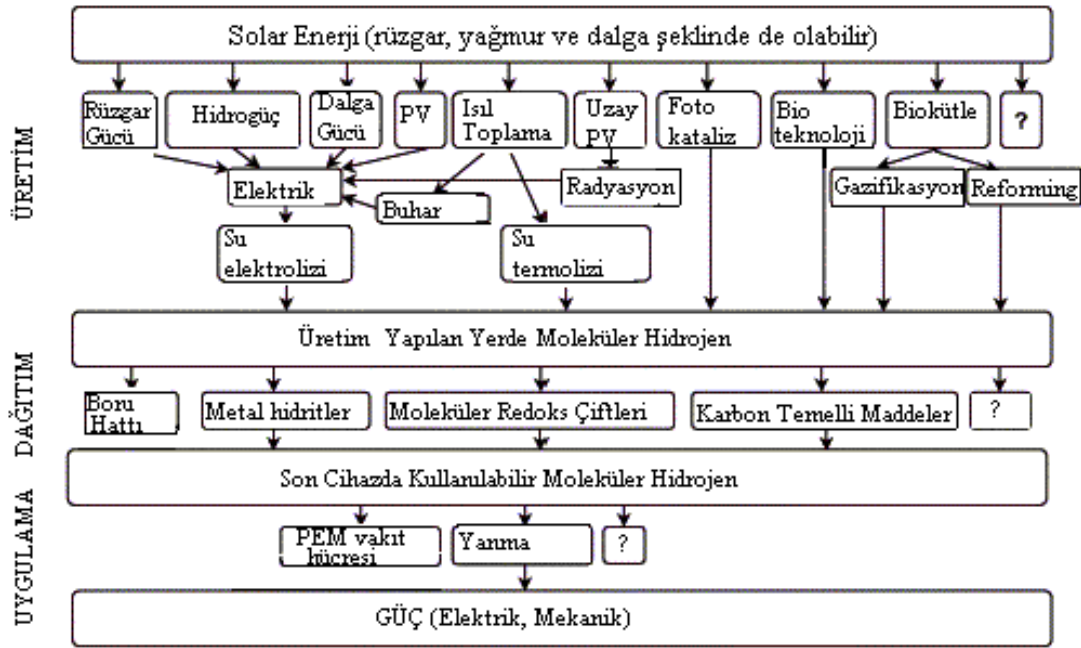
Literatürdeki sodyum bor hidrür konulu çalışmalar alanatlar ve yukarıda değinilen katı haldeki çalışmalardan farklı olarak sıvı halde kullanımı esas almaktadır. Çözelti halinde, sodyum bor hidrür, aşağıdaki reaksiyona göre;



hidrojenini vermekte ve sodyum metaborata dönüşmektedir. Görüleceği üzere reaksiyon sonucu açığa çıkan hidrojen miktarı hidrür şeklinde bağlı olan hidrojenin iki katıdır. NaBH_4 'de mevcuda eşit miktarda hidrojen suyun parçalanması ile açığa çıkmaktadır. Verilen

reaksiyon egzotermiktir. Bunun bir sonucu sistemden elde edilen hidrojenin nemli olmasıdır. NaBH_4 konusundaki çalışmalar ağırlıklı olarak; hidrürün üretimini, sisteme uygun katalizörün geliştirilmesini ve reaksiyon sonucu oluşan sodyum metaboratın tekrar NaBH_4 'e dönüştürülmesini konu almaktadır. NaBH_4 'ün üretimi Schlensinger ve Schubert tarafından incelenmiştir. İkinci çalışmada susuz boraks, kuartz ve sodyum hidrojen gazı ile $450\text{-}500^\circ\text{C}$ reaksiyona sokulmuştur. Li yaptığı bir çalışmada susuz boraksı MgH_2 ve değişik sodyum bileşikleri ile oda sıcaklığında mekanik olarak öğütürerek NaBH_4 elde etmiştir. Amendola, değişik katalizörleri konu alan çalışmalarında mevcut alternatifler içerisinde Ru esaslı tuzların en iyi sonucu verdiğini ve bu tuzların tekrar kullanılmasının mümkün olduğunu belirtmektedirler. Sodyum bor hidrürün hidrojen amaçlı kullanımında en önemli darboğaz, oluşan metaboratın tekrar NaBH_4 dönüştürülmesidir. Kojima ve Haga, sodyum metaborattan MgH_2 veya Mg_2Si ile $350\text{-}750^\circ\text{C}$ aralığında yüksek hidrojen basıncı (1-70 bar) altında 2-4 saatte NaBH_4 'ün elde edildiğini belirtmektedir. Bu reaksiyon sonucunda oluşan MgO ve benzeri diğer ürünlerin ayrıştırılarak saf NaBH_4 'ün elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

NaBH_4 'ün hidrojen depolamada yaygın tarzda kullanılabilmesi için geri dönüşümün nispeten basit ve ekonomik -tercihen ayrıştırma gerektirmeyen- yöntemlerle gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. [10]



Şekil 4.7. Hidrojen üretim, dağıtım ve depolama zinciri [10]

BÖLÜM-5. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA YAKIT OLARAK KULLANILMASI

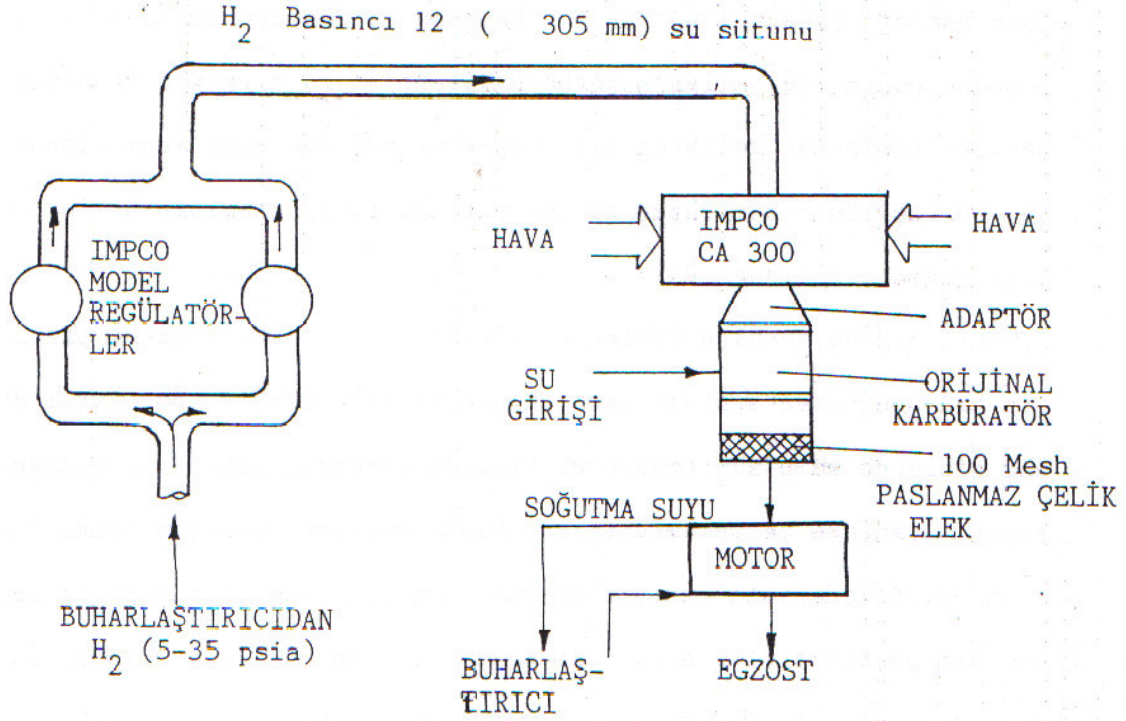
5.1. Hidrojen giriş sistemleri

5.1.1. Karıştırma (Karbürasyon)

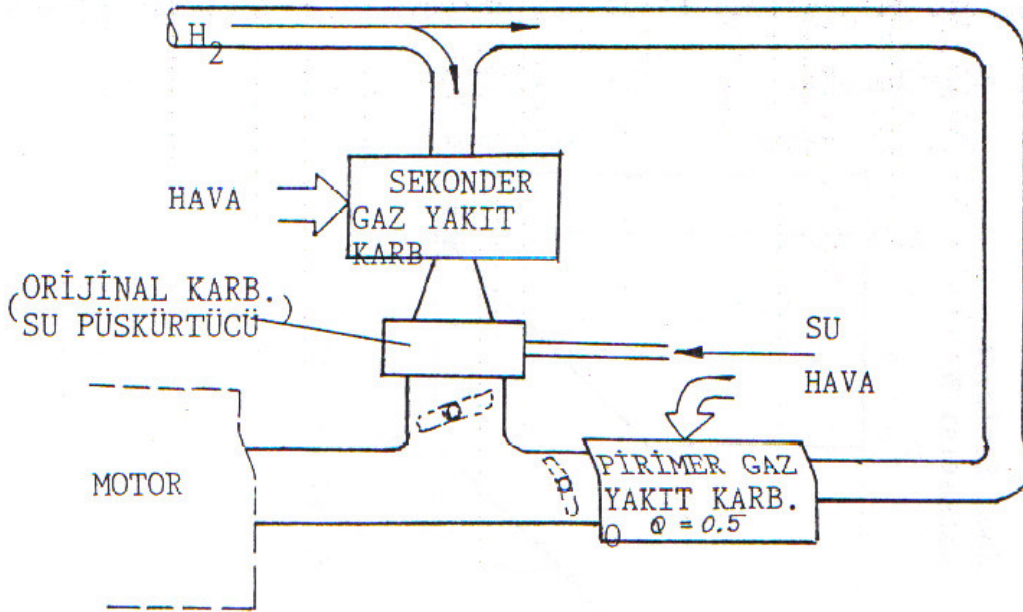
İçten yanmalı motorlarda hidrojen kullanımında, hidrojenin motora girişi 2 temel şekilde gerçekleşebilir. Bunlar karıştırma yani karbürasyon yöntemi ve püskürtme yöntemidir. Benzin motorlarında kullanılan karbüratörler hidrojen için uygun değildir. Hidrojen motorlarında, gaz yakıt karbüratörleri ya olduğu gibi ya da bazı değişiklikler yapılarak oldukça sık uygulanır. Bu karbüratörlerde besleme sisteminden gelen hidrojenin basıncı regülatörlerde düşürülür. Karıştırıcı girişinde hidrojen basıncı 304,8 mm su sütunu civarında seçilir. Sabit seviye kabı gibi elemanlar karışıma su ilave etmek için kullanılır. Su ilavesiyle vuruntu, geri tutuşma ve yüksek NO_x emisyonu gibi durumlar önlenmiş olur. İlave edilen suyun miktarı çok değişik değerlerde olabilir. Mesela Chevrolet' in V-8 bir motorunda yapılan çalışmada su-hidrojen oranı ağırlık olarak 2/1 alınmıştır. Bu değer 5'ten büyük olunca motorun verim ve gücünün düştüğü görülmüştür.

California Üniversitesi'nde (UCLA) geliştirilen bir AMC Jeep hidrojen motorunda hidrojen kriyojenik sıvı olarak depolanmış ve karbüratörden önce bir regülatörden geçirilmiştir. Depodan 0,345-2,41 bar arası basınçta gelen hidrojen, regülatörü 304,8 mm su sütunu basınçta terk eder. Sonra IMPCO CA 300 A karıştırıcısında hava ile karışıp karbüratörü besler. Buradaki karbüratör karışıma su püskürtmek için kullanılır. Depodan pompa ile emilerek karbüratöre gelen su hava ile ve hidrojenle beraber paslanmaz çelikten bir süzgeçten geçerek emme manifolduna gelir. Süzgeç, nispeten büyük su zerrelerini tutarak akışın üniform olmasını sağlar.

Şekil 5.2.'de görülen besleme sistemi, sisteme paralel bir hidrojen emme sistemi daha eklenerek elde edilir. Bu sistem düşük güçlerde su püskürtmeden ve kısılma yapmadan sabit bir eşdeğer karışım oranında çalışmayı sağlar. Düşük güçlerde karışım oranı 0.4-0.5 olan zayıf karışımla çalışma mümkün iken yüksek güçlerde devir sayısının artmasıyla birlikte karışım oranı 0.5'den 1'e kadar çıkar. Bu durumda zengin karışımın olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için su püskürtme sistemi devreye girer. Bu paralel besleme sistemindeki birinci kısım karışım oranı 0.5 değerinde tutan hava valfi IMPCO 125 karıştırıcısıdır. [6]



Şekil 5.1. AMC Jeep'te kullanılan emme sistemi [6]



Şekil 5.2. Paralel çift karbüratör sistemi [6]

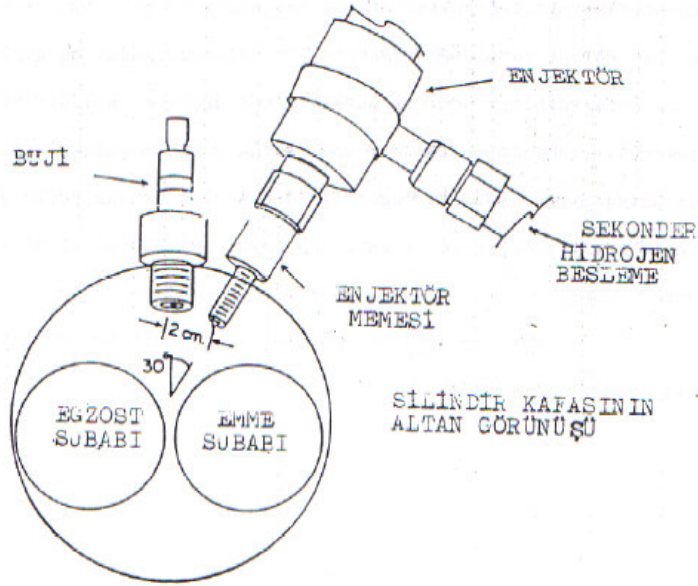
5.1.2. Püskürtme

Hidrojen motorlarında yakıtın püskürtülmesi 2 şekilde gerçekleştirilir ;

- 1- Emme sübabından önce emme manifolduna veya emme manifolduna düşük basınçta püskürtme.
- 2- Yüksek basınçla silindire direk püskürtme.

Emme manifolduna püskürtme :Bu yöntemde hidrojen emme manifolduna veya emme kanalına püskürtülerek hava ile karışıp motora girmesi sağlanmaktadır. Böyle bir sistemdeki ana özellikler ;sistemin emme strokunun başlangıcından belirli bir süre önce yakıt sevkine elverişli olması, yakıt ölçümünün hava akışı veya basınç şartlarından bağımsız olması ve emme manifoldunun yanabilir yakıt hava karışımı ihtiva etmemesidir.

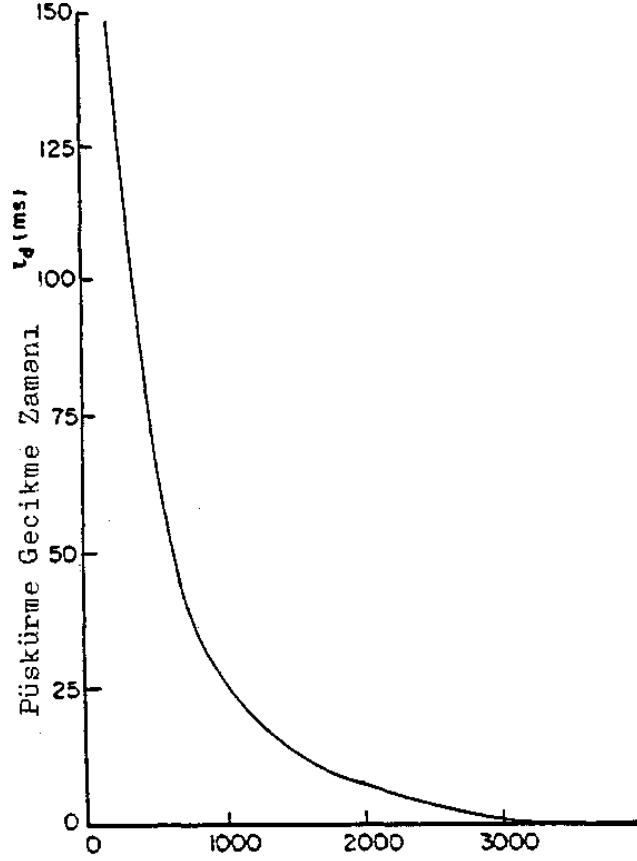
Silindire direk püskürtme :Hidrojenin özel bir püskürtme enjektörüyle basınçlı olarak silindire direk püskürtülmesidir. Silindire direk hidrojen püskürtülmesinde iki önemli ihtiyaç vardır. Bunlar; yüksek basınçlı hidrojen ile daha fazla zamanlama ve akış kontrol teçhizatıdır. Direk püskürtmenin en önemli avantajı geri tutuşmayı engellemesidir. Ayrıca erken tutuşmanın kontrol edilmesine imkan verir ve normal emmeli sistemlere oranla motorlardan daha yüksek güç elde edilmesini sağlar.Emisyonlara olan katkısı ise NO_x emisyonlarını azaltmaya yöneliktir. ÜÖN yakınında direk püskürtme yapılarak NO_x emisyonu azaltılabilir.[6]



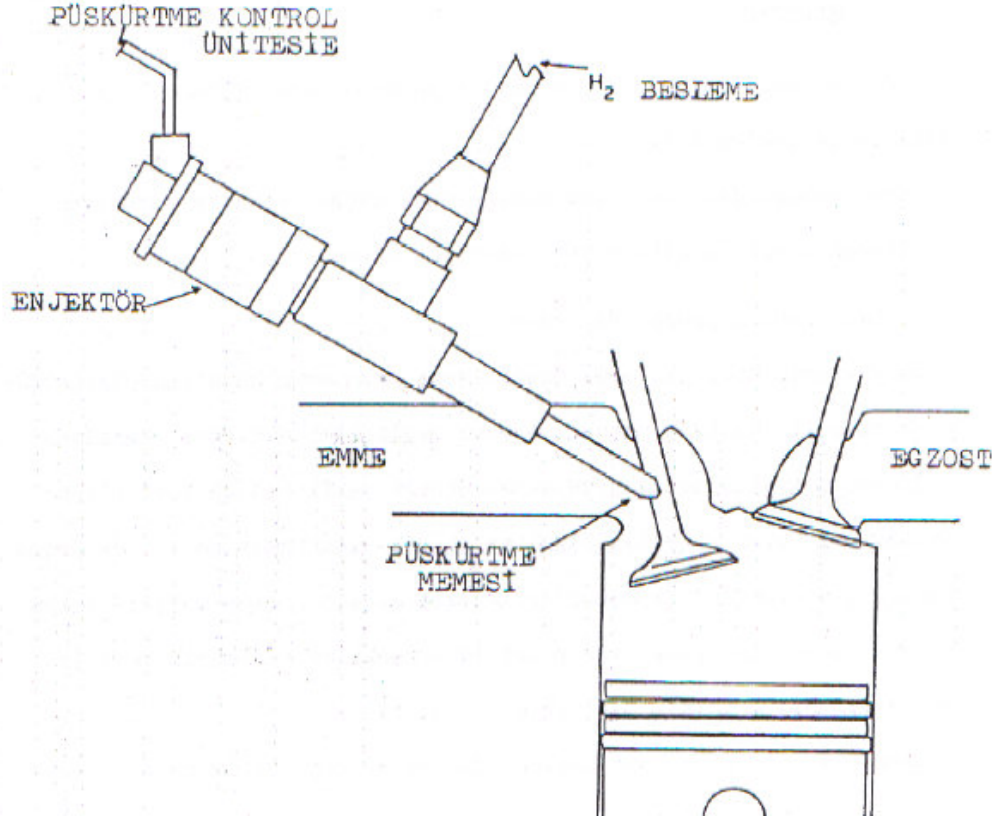
Şekil 5.3. Direk püskürtme için enjektör pozisyonu [6]

Püskürtmenin emme strokunun başlangıcından 45⁰ KMA gibi bir geciktirmeyle başlatılması, bir önceki çevrimden kalan artık yanma ürünlerinin tamamen dışarı atılmasına ve olası bir ön ateşlemeyi önlemesi için uygulanır. Direk püskürtme için ise bu uygulama emme strokunun başlangıcından 60⁰ KMA sonra başlatılarak sıkıştırma strokunun bitmesine 105⁰ KMA kala bitirilir. Fakat bu değerler enjektörden yakıtın püskürtülmeye başlaması ve bitirme uyarıları bir gecikme süresi verilerek püskürtmenin başlangıcından bu gecikme süresi kadar önce verilir. Gecikme süresi motor devrine bağlıdır ve ancak elektronik kumandayla kontrol edilir. Bugünkü uygulamalarda bu değer %1' den az bir hassasiyetle gerçekleştirilmektedir. Motor devir sayısına bağlı gecikme süresini veren formül şudur ;

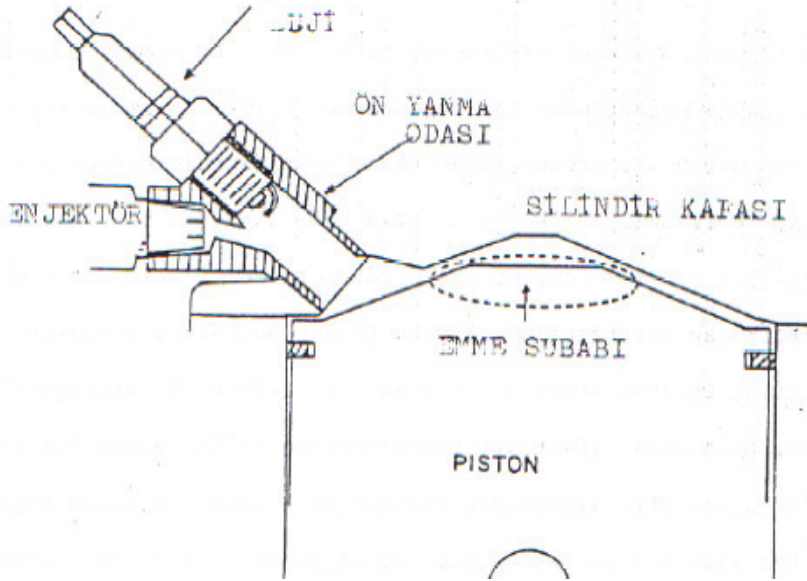
$$t_d = \left| \frac{35}{D/d} - 0.01 \right| \quad (\text{sn})$$



Şekil 5.4. Direk püskürme için püskürtme gecikme süresi diyagramı [6]

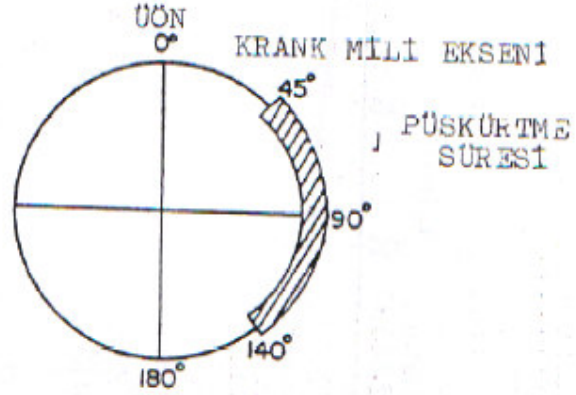


Şekil 5.5. Manifold püskürtme için enjektör pozisyonu [6]

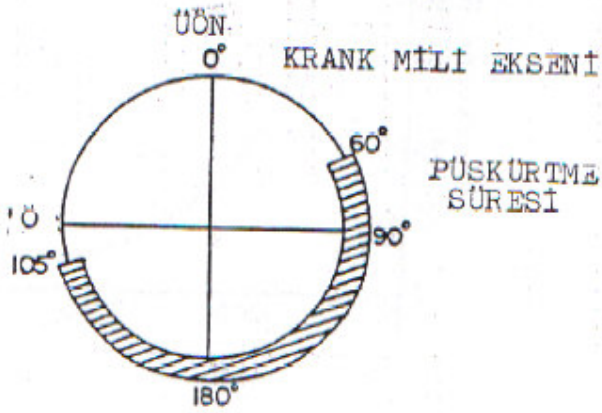


Şekil 5.6. Ön yanma odası kesit görünüşü [6]

MANIFOLD
PÜSKÜRTME
5.0^{ms} MAX PÜSKÜRTME
SÜRESİ
4000d/d MAX
MOTOR DEVİR SAYISI



DİREK PÜSKÜRTME
10.0ms MAX
PÜSKÜRTME SÜRESİ
4000 d/d MA UDN'Ö
MOTOR DEVİR SAYISI 105°

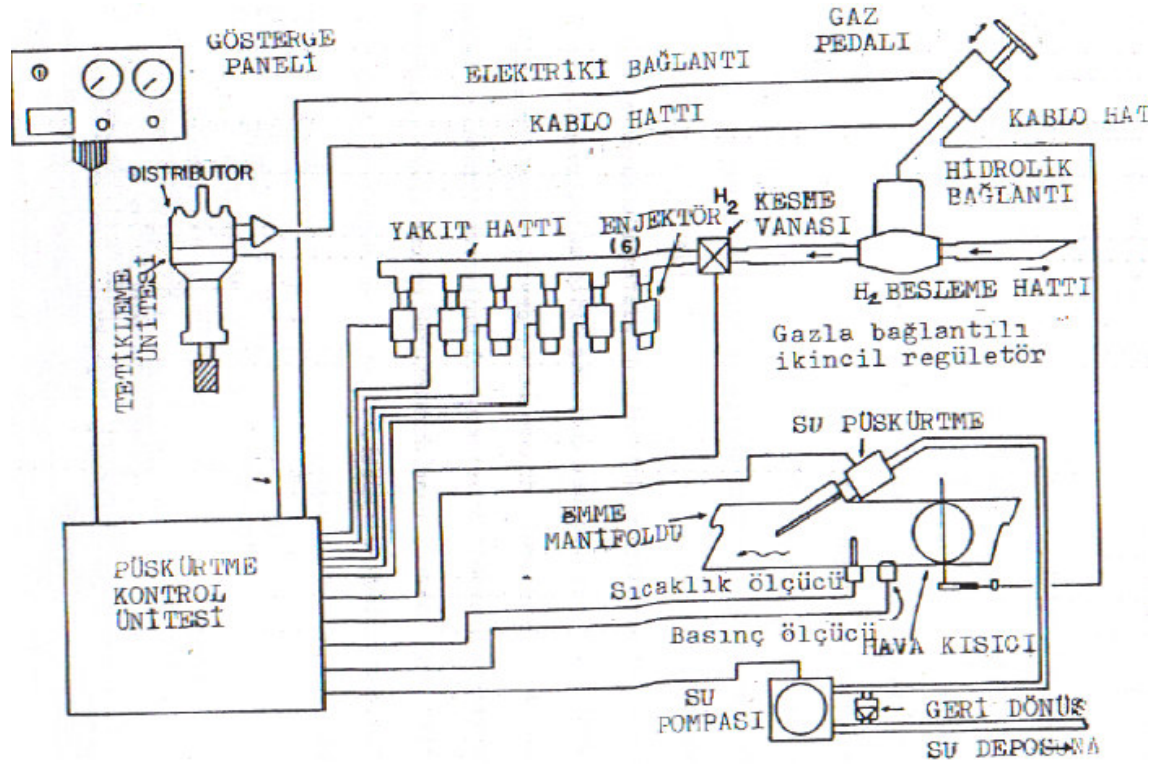


Şekil 5.7. Manifold ve direk püskürtme için püskürtme zamanı pozisyonu [6]

Püskürtmenin yapılmasında en önemli rolü şüphesiz enjektör oynamaktadır. Manifold veya direk püskürtme sisteminin kesin dizayn limitleri, enjektörün akış kapasitesine bağlıdır.

Uygulamada enjektör performansına etki eden iki değer; sabit akış katsayısı ve toplam hareket süresidir. Toplam hareket süresine Tact denir. Tact, enjektörün toplam açılış ve kapanış zamanının toplamı olarak ifade edilir.

Elektronik kontrollü bir yakıt püskürtme sisteminin çalışması şu şekildedir; gaz pedalından ve motor devir sayısından etkilenen distribütör tetikleme ünitesi, kontrol ünitesine sinyal göndermekte ve kontrol ünitesi de bundan etkilenerek enjektörlere kumanda ederek yakıt püskürtülmesini sağlamaktadır.

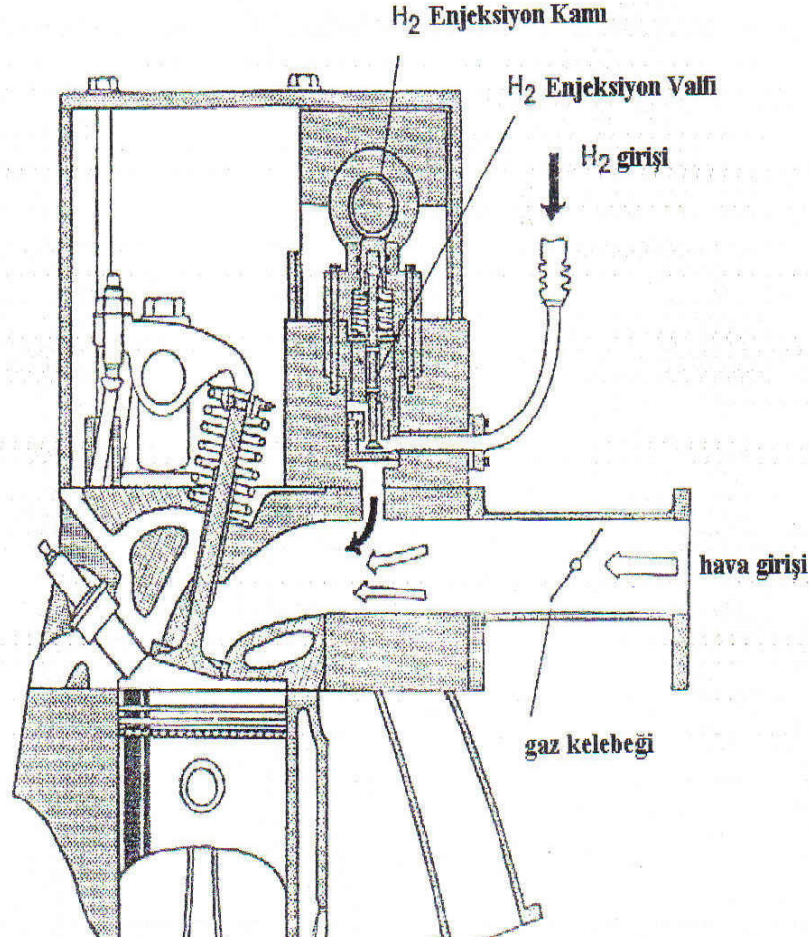


Şekil 5.8. Hidrojen püskürtme sistemi [6]

Hidrojen yakıtının yanması sırasındaki alev hızının yüksek olmasından dolayı, bundan kaynaklanabilecek birçok problemin üstesinden gelebilmek için hava ile yakıt yanma meydana gelinceye dek ayrı tutulur.

Hidrojen yakıtının tutuşturulabilmesi için gerekli olan enerji miktarının çok düşük olmasından dolayı, ön ateşleme veya alev tepmesi gibi motorda istenmeyen durumlar meydana gelebilir. Eğer yakıt hava karışımı emme sübabı kapanmadan alevlenirse, ön ateşleme meydana gelmiş olur. Hidrojenin birim hacim başına sahip olduğu enerji miktarı düşük olduğundan dolayı, motorda elde edilebilecek gücün düşmesini önlemek amacıyla motorun sahip olduğu sıkıştırma oranı yükseltilebilir.

Hidrojen ve hava karışımı yanma odası dışında meydana geldiğinde, hidrojen yakıtının hafifliğinden dolayı homojen bir karışım meydana gelmez ve bunun sonucunda benzine kıyasla motorda % 20-30 civarında bir güç düşüşü gözlenir. Yapılan çalışmalar sonucunda yakıt hava karışımının yanma odası dışında gerçekleştiği koşullarda, motordan elde edilen maksimum verimin düştüğü tespit edilmiştir. [11]



Şekil 5.9. Hava ile hidrojenin yanma odası dışında karıştırılması [11]

Yakıt ile havanın yanma odasında karıştırılması durumunda ise, hidrojenin basınç altında silindirlere püskürtülmesiyle yanma odası içinde hava ile homojen bir şekilde karışacağından dolayı herhangi bir güç düşüğü olmayacaktır. Yakıt ve havanın yanma odasında homojen bir şekilde karıştırılabilmesi için, yakıt 99 atm basınç ile yanma odasına püskürtülür. Hidrojen yakıtı, emme sübabı kapanır kapanmaz ve yanma odasındaki maksimum basınçtan önce yanma odasına püskürtülür.

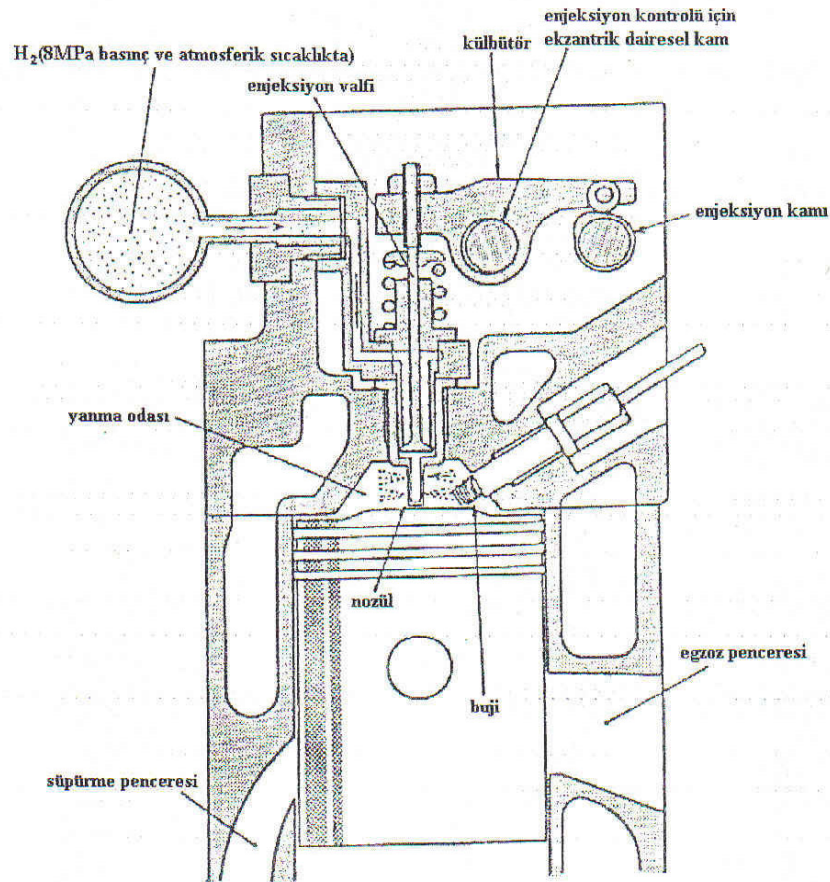
Yakıt ile havanın yanma odası içinde karıştırılması 2 şekilde meydana gelebilir. Bunlar erken püskürtme ve gecikmeli püskürtmedir. Erken püskürtme yönteminde yakıt sıkıştırma stokunun başında yanma odası içine püskürtülmeye başlanır ve bu püskürtme işlemi 90⁰ KMA kadar devam eder. Gecikmeli püskürtme yönteminde ise hidrojen yakıtı ÜÖN' dan 5⁰ KMA kadar önce püskürtülür. Buna karşın kısa sürede yakıtın tamamının yanma odasına püskürtülebilmesi için 99atm gibi yüksek bir basınca ihtiyaç vardır. Ayrıca direk püskürtmede

homojen bir yakıt hava karışımı oluşabilmesi için gerekli sürenin kısa olmasından dolayı bazı dezavantajlar meydana gelir. [11]

Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir;

- Egzoz emisyonlarındaki azot oksit oluşumu artar.
- Ateşleme zamanında düzensizlikler ve tutuşma gecikmesi meydana gelir.
- Yanma odasına püskürtülen yakıtın tamamının yanamaması sonucunda eksik yanma olur.
- Yanma tam olarak ÜÖN' da tamamlanamaz.

Meydana gelebilecek bu problemlerin giderilebilmesi için türbülans şiddeti artırılır. Bu amaçla yanma odası geometrisi ve yakıt enjektör sistemlerinde bazı düzenlemeler yapılır.



Şekil 5.10. Hava ile hidrojenin yanma odasında karıştırılması [11]

5.1.3. Harici karışım teşkilinde yapılması gereken modifikasyonlar

Karışımın yanma odasından önce hazırlanmasına harici karışım teşkili denir. Hidrojenin motorlarda kullanılma potansiyelinin araştırıldığı ilk senelerde karışım, doğalgaz ve LPG karbüratörlerine benzer bir karbüratör ile emme kanalına yapılırdı. Bu gibi sistemlerde hidrojenin basıncı 0.0348 bar değerine düşürülerek karıştırıcıya verilir. Ayrıca karışıma su ilave etmek için benzin karbüratörü kullanılır. Güç ihtiyacına karşı karışım teşkilini daha düzgün yapmak için ikinci bir hidrojen besleme devresi kullanılabilir. Birinci devre karışım oranını 0.5 değerinde tutarken, artan güç ihtiyacı için gerekli olan karışım oranı artışı ikinci devre tarafından sağlanır. Ancak karbürasyon sisteminin en önemli dezavantajı, karışım teşkil zamanının kontrol edilememesi ve motorun hidrojenle çalışmasında ortaya çıkan problemler çalışmaya sebebiyet vermesidir.

İkinci bir yöntem, düşük basınçlı bir enjektör yardımıyla hidrojenin emme kanalına püskürtülmesidir. Bu sistemde, karbürasyonda karşılaşılan sorunlar, emme sübabı açıkken püskürtme yapılması sayesinde, emme kanalının büyük bölümünde karışım bulunması engellenerek giderilmiştir.

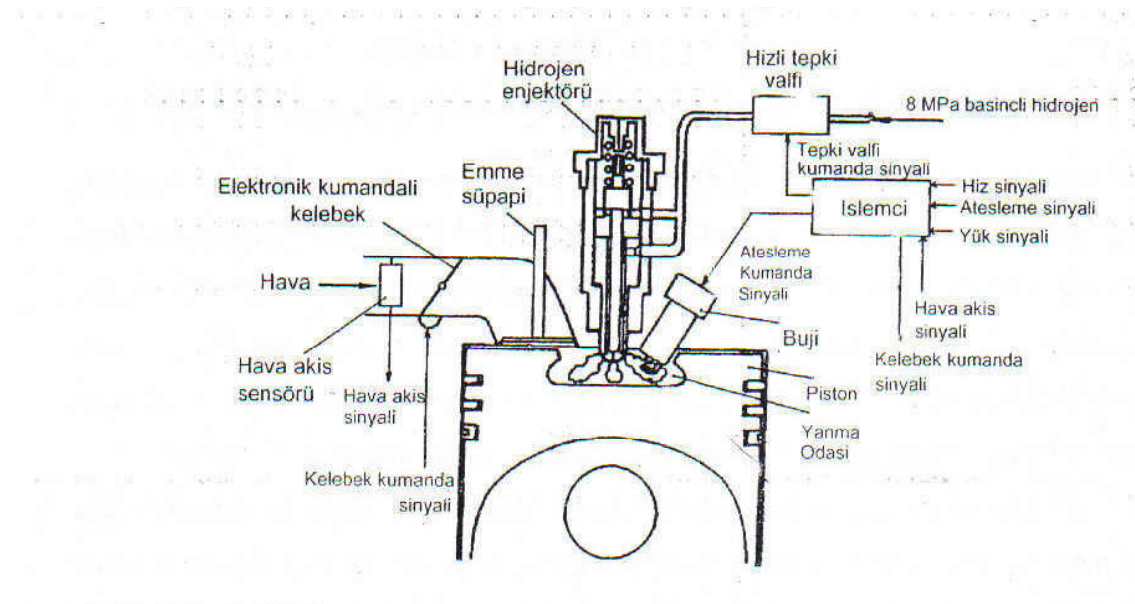
Ancak her iki yöntemde de, harici karışımın en büyük dezavantajlarından olan volumetrik verim düşüşü, dolayısıyla motor gücü düşüşü yaşanmaktadır. Ayrıca çeşitli problemleri engellemek için, sübaplar, segmanlar, bujiler ve soğutma sisteminde değişiklikler yapılmalı, sıcaklık artışları yağın buharlaşmasına ve ateşlemeye, dolayısıyla erken tutuşmaya yol açacağından buharlaşması en az olan yağ seçilmelidir. Bütün bunlarla beraber, stokiyometrik karışım oranlarında yüksek enerji açığa çıkışına karşı düşük türbülans yaratan bir silindir kafanın yeniden tasarlanması gerekmektedir.[12]

5.1.4. Dahili karışım teşkilinde yapılması gereken modifikasyonlar

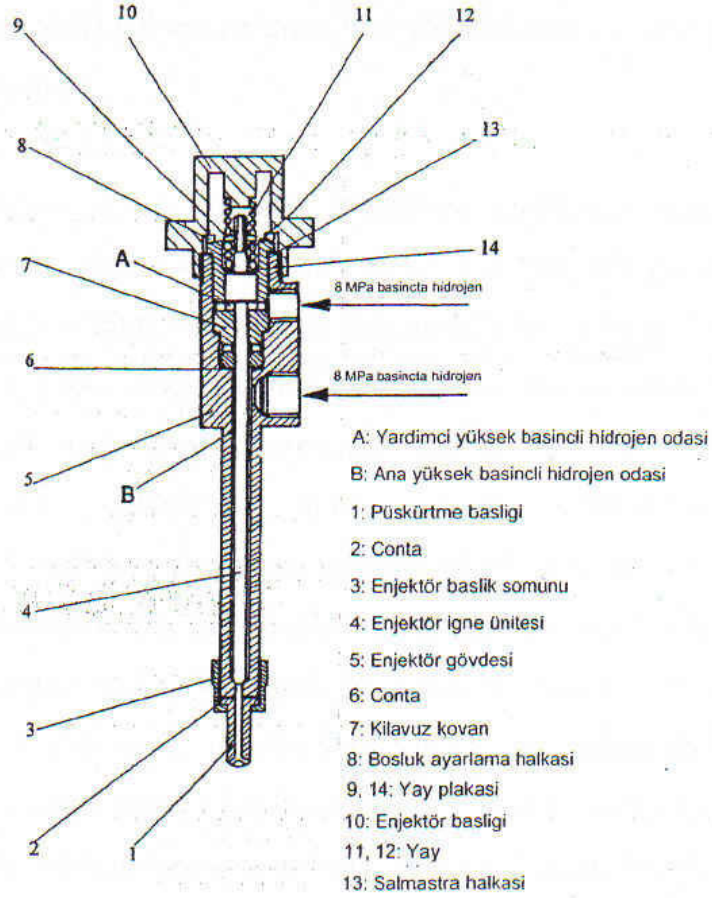
Dahili karışım teşkilinde, yakıt emme sübabı kapandıktan sonra silindir içine püskürtülür. Emme periyodunda silindir içine sadece hava alındığından volumetrik kayıp olmaz. Dahili karışım teşkilinde yanma problemleri oluşmaz, fakat püskürtme sıkıştırma stokunda olduğu için karışımın oluşabilmesi için çok kısa bir zaman kalmaktadır. Bu yüzden homojen olmayan karışım, tutuşma gecikmesi, tam yanmama ve azot oksit emisyonlarında artış görülebilir. Bu

ise, silindir içinde türbülans oluşumu sağlanarak veya yakıt püskürtme sisteminde homojen karışım teşkil edecek şekilde modifikasyonlarla giderilebilir. Püskürtme, erken ve geç püskürtme olarak yapılabilir. Erken püskürtme sıkıştırma periyodunun başında başlar ve ÜÖN 90° öncesine kadar devam eder. Geç püskürtme ise ÜÖN 5° öncesine kadar devam eder.

Dahili karışım teşkilinde en önemli eleman püskürtme sistemidir. Püskürtme sistemi, hem yüksek basınçlara çıkabilmeli, bu basınçta hidrojen kaçağı yaratmamalı, hem de yanma kalitesi için iyi bir karışım teşkili sağlayabilmelidir. [12]



Şekil 5.11. Dahili karışım teşkilli bir motor kesiti ve püskürtme sistemi [12]



Şekil 5.12. Hidrojen enjektörünün kesiti [12]

5.2. Egzoz, soğutma ve yağlama sistemleri

Deneysel olarak hidrojen motorlarında sıkıştırma oranı 4.2 ile 29 arasında gerçekleştirilebilir. Piston segmanlarının yüksekliği yağlama yağının yanma odasına geçmesini önlemek için artırılmalıdır. Motor içindeki yüksek sıcaklıktan ötürü oluşacak erken tutuşmayı önlemek için soğutma iyi olmalı ve sodyum soğutmalı egzoz sübabı kullanmak uygundur. Hidrojen motorlarında diğer motorlara nazaran daha etkili bir soğutma uygulanmalıdır. Su ile soğutma, hava ile soğutmaya göre daha uygundur. Daha kalın sübaplar ve konikleştirilmemiş oturma yüzeyleri seçilmelidir. Geri tutuşmayı asgariye indirmek için sübap bindirmesi azaltılmış, bağlı olarak kam mili değiştirilmiştir.

Egzoz sisteminde yapılan en önemli değişiklik egzoz resirkülasyonu, yani egzoz gazının tekrar çevrime sokulmasını sağlayacak ek donanımlardır. Taşıtlarda % 25-34.5' e kadar egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) yapılabilir. Ancak bu sistem, motordan alınan gücün azalmasına yol açar. Diğer bir yaklaşımda ise, karışıma su ilave etmek ve bu suyun egzoz gazlarında bulunacak suyu sıvılaştırarak tekrar kullanmak söz konusudur. Bu da özel egzoz sistemleriyle gerçekleştirilebilir.

Hidrojen motoru için ölçülen egzoz sıcaklıkları benzinli motorlardakinden çok yüksek değildir. Egzoz sübabı yakınında gaz sıcaklığı $260^0 - 927^0 C$ arasındadır. Metal hidridler şeklinde depolama yapılan sistemlerde artık ısı hidrojeni hidridden ayırmak için kullanılır.

Bir çok hidrojen motorunda yağlama yağının yanma odasına geçmesi, egzoz emisyonlarında HC ve CO bulunmasına, ayrıca yanma odasında çökelti oluşmasına neden olur. Bu çökelti sonucunda ise erken tutuşma ortaya çıkar. Dolayısıyla yağlama sisteminde karşılaşılan en önemli problem sızdırmazlıktır. Bunu önlemek için sübap sızdırmazlığının önlenmesi ve segmanların kullanılması ön görülür. Fakat bu şekilde de motorun alıştıırılma zorluğu ortaya çıkar. Bu durumda göze alınmalıdır.

5.3. Ateşleme sistemi

Hidrojen motorlarında ateşleme sistemleri diğer konvansiyonel motorlara benzerdir. Bir hidrojen motorundaki optimum ateşleme zamanlaması; motor yükünün, motor hızının ve karışım oranının bir fonksiyonudur. En uygun ateşleme avansı devir sayısı ve eşdeğer orana göre belirlenir.

Hidrojen motorunda standart buji, özel yüksek enerjili çok deşarjlı buji, akkor buji veya sıcak buji kullanılabilir. Ayrıca diesel tipi basınçla ateşleme, çok uygun olmamakla beraber uygulanabilir. Konvansiyonel bujili ateşleme hidrojen motoru içinde uygundur. Ancak zamanla, buji tipi ve tırnak aralığında değişiklik yapmak gerekir. Zengin karışım için fazla ateşleme avansı erken tutuşma ve dalgalı yanmaya sebep olur. Mekanik veya vakum kumandalı avans tertibatı kullanılır. Genellikle otomobil motorlarının hidrojen ile çalıştırılmasında $15-21^0 KMA$ ateşleme avansı uygundur.

Hidrojenin erken tutuşma eğilimini engellemek için çok defa soğutulmuş buji kullanılır. Buji tırnak arası, benzin motoruna göre üç defa daha küçüktür.

Ateşlemenin sıkıştırma yoluyla, yani diesel tipi çalışma ile sağlanması sıkıştırma oranının 29 : 1 değerinde bile başarılı olamamıştır. Dolayısıyla bu yol, hidrojen motorunda pratik bir yaklaşım değildir. Bu tip ateşleme, ancak hidrojen-motorin karışımı kullanılan diesel motorlarında olumlu sonuç verir. [6]

5.4. Hidrojenin motor ve yanma performansına etkisi

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma karakteristiklerini, emisyon miktarını ve dolayısı ile motor performansını etkileyen en önemli etken karışımın hazırlanış yöntemidir. Hidrojen ile hava karışımı, sırasıyla dahili ve harici olarak adlandırabileceğimiz yöntemlerle motorun yanma odası içerisinde veya motorun giriş manifoldunda hazırlanmaktadır. Her iki yöntemde de hidrojenin difüzyon hızının yüksek olması nedeni ile, yüksek motor devir sayılarında bile homojen bir karışım sağlamak olasıdır. Harici karışım hazırlama yönteminde, basit bir gaz karıştırıcı içerisinde, düşük basınçlarda, hidrojenin hava ile karıştırılması veya hidrojenin büyük basınçlarda motorun emme manifolduna sürekli veya aralıklı olarak gönderilmesi söz konusudur. Aralıklı olarak yakıt gönderilme durumunda, dizel ilkesi ile çalışan motorlardaki gibi yüke göre karışım ayarı yapılacaktır. Bu durumda karbüratördeki gaz kelebeği ortadan kalkacağı için motorda kısılma kayıpları da kaldırılacak ve volumetrik verim, dolayısı ile motorun maksimum gücü artacaktır. Benzin motorlarından farklı olarak, karışım oranının böyle değiştirilmesine olanak sağlayan etken, hidrojen hava karışımlarının yeni tutuşma sınırlarına sahip bulunmasıdır. Harici karışım hazırlama yöntemlerinin sağladığı bazı avantajlar yanında getirdiği önemli sorunlarda bulunmaktadır. Geri tutuşma ve erken tutuşma sorunları bu yöntemde ortaya çıkmaktadır. Geri tutuşma yanma odasına gönderilen karışımın emme tamamlanmadan çeşitli etkenlerle tutuşması sonucu motorun giriş manifoldunda alevin geriye doğru ilerlemesidir. Emme sistemindeki elemanların tahrip olmasına yol açabilecek ve emniyet açısından sakıncalı bu olayın önlenmesi gerekmektedir. Önlenmesi gereken diğer bir etken de erken tutuşmadır. Erken tutuşma yanma odası içerisine ulaşmış karışımın bujide ateşleme olmadan önce tutuşmasıdır. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeni ile;

- a) Yanma odasındaki sıcak noktalar
- b) Sübap bindirmesi sırasındaki sıcak egzoz gazları
- c) Çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeniyle yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması
- d) Motor yağından gelen sıcak partiküller yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir.

Bu amaçla :

- Karışımın bir miktar fakirleştirilmesi
- Egzoz gazları resirkülasyonu uygulaması (EGR)
- Yanma odasına su püskürtülmesi
- Sübap bindirmesinin azaltılması
- Giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması

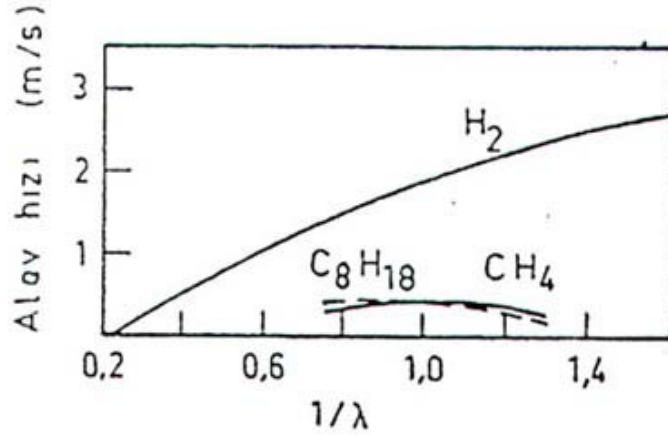
gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışımın EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları arttıracak ve motorun düzgün çalışmasını engelleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınç da düşecektir.

1920'lerden itibaren günümüze kadar, geri tutuşma ve erken tutuşma, hidrojen yakıtlı motorlarda çözülmesi gereken bir sorun olmuş ve bu nedenle çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu soruna çözüm sağlanması açısından dahili karışım hazırlama yöntemi uygulamaları oldukça etkili olmuştur. Sıvı hidrojenin 10 MP gibi yüksek bir basınçta direkt olarak her silindirin yanma odasına ayrı ayrı gönderilmesi yukarıda belirtilen sorunlardan bir kısmına çözüm getirecektir. Sıkıştırma zamanı sonuna doğru, sübaplar kapandıktan sonra yakıtın püskürtülmeye başlanması nedeni ile karışımın geç hazırlanması ve emme manifoldunda yakıt hava karışımının bulunmaması erken tutuşma ve geri tutuşma sorunlarına çözüm getirecektir. Böylece burada diesel ilkesine benzer bir şekilde, yük durumuna göre karışım oranının değiştirilmesi ve gaz keleşinin kullanılmaması sonucu kısılma kayıplarının kaldırılması, sonuç olarak da volumetrik verimin artırılması mümkün olacaktır. Benzin motorlarında, stokiyometrik karışımlarda tam buharlaşmış yakıtın yanma odası içerisinde kapladığı hacim oran %1.7 düzeyindedir. Buna karşılık gaz halindeki hidrojenin, stokiyometrik koşullarda kapladığı hacim oranı %30 civarında olacağından, eşdeğer motordan alınacak maksimum güç

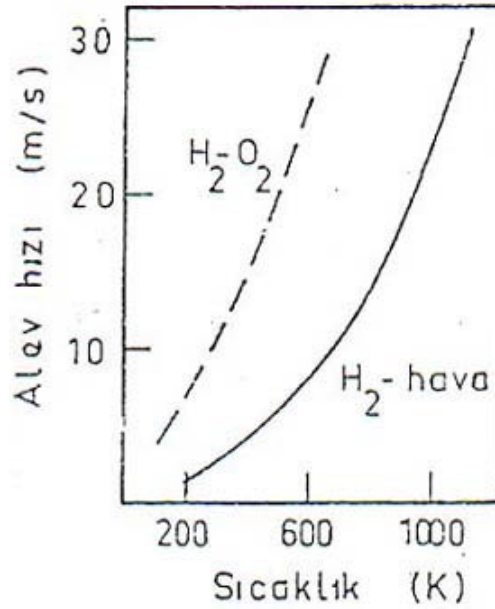
miktarında, benzine oranla %15 dolayında bir düşüş görülecektir. Sıvı halindeki hidrojenin aynı koşullar altında, ancak emme sübaplarının kapanmasından sonra yanma odasına direkt olarak püskürtülmesi sonucunda benzine oranla yaklaşık %2 dolayında, ön karışimli gaz hidrojen yakıtlı motorlara oranla da %40 düzeyinde güç artışı sağlanabilecektir. Yanma odasında iyi bir karışım sağlanabilmesi için basıncın yüksek değerlerde sabit tutularak, gönderilen yakıt miktarının ayarı için püskürtme süresinin değiştirilmesi gerekli olacaktır. Ancak bu tür sıvı hidrojen püskürtme pompalarının yağlama sorunları gibi hala araştırmaya açık noktaları bulunmaktadır.

Çok fakir karışım değerlerinde ($\lambda = 4-5$) yanma hızı önemli ölçüde düşeceğinden yanma instabilitesi ve NO_x emisyonları açısından sorunlar oluşacaktır. Bu bakımdan yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü motorlarda bile bu durumun düzeltilebilmesi için manifolduna bir gaz kelebeği eklenmektedir.

Hidrojenin motorlarda kullanımının sağlayacağı yararlarından birisi de yanma hızının öteki yakıtlara oranla yüksek olmasıdır. Laminar alev hızı, hava fazlalık katsayısının, yanmamış karışımın sıcaklığının ve basıncın bir fonksiyonudur. Karışımı fakirleştirmek yanma hızını düşürücü etki yapmaktadır. Şekilde alev hızının hava fazlalık katsayısına göre değişimi görülmektedir. Ancak hava fazlalık katsayısı, λ 'nın 2.5'den daha küçük değerlerinde yanma hızı, hidrokarbon bileşimli yakıtların stokiyometrik karışım oranlarındaki yanma hızlarından daha yüksek olmaktadır. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi yanma gazı karışım sıcaklığının azalması sonucu da azalmaktadır, ancak motorun normal çalışma sıcaklıklarındaki hızlar oldukça yüksek değerdedir. Motorun yanma odasındaki alev hızları ayrıca hava hareketleri ve türbülans etkisi ile laminar alev hızından daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Yakıtın yanma odasına püskürtülmesi sonucu oluşturulan karışımlardaki ortalama alev hızları da karışımın harici olarak oluşturulması yöntemine oranla daha yüksek olmaktadır. [6]



Şekil 5.13. Alev Hızının λ 'ya Göre Değişimi [5]

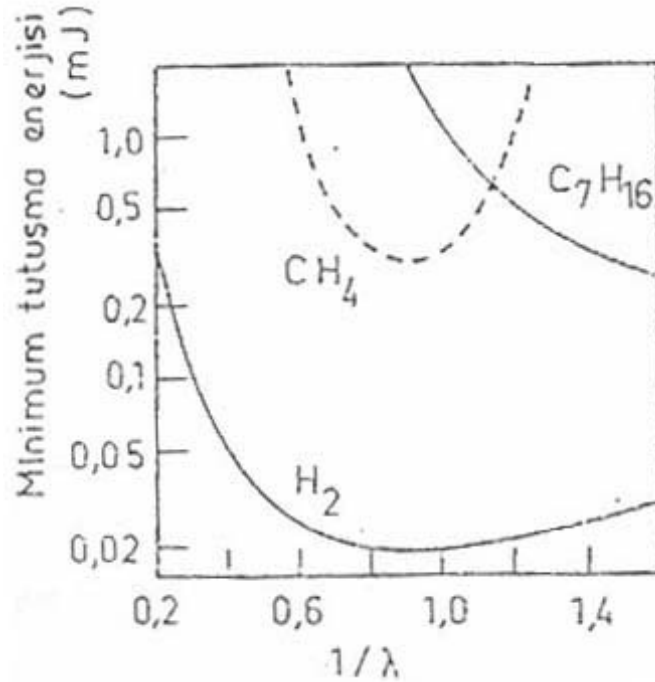


Şekil 5.14. Alev Hızının Sıcaklığı Göre Değişimi [5]

Hidrojen hava ile bütün karışım oranları için karışma özelliğine sahiptir. Elde edilen karışımın da hava fazlalık katsayısına ve sıcaklığa bağlı olan yeni tutuşma sınırları vardır. Karışımın sıcaklığının artması ile bu sınırlar da artış gösterecektir, ancak düşük sıcaklıklarda bile motoru karışım oranının değiştirilerek çalıştırmak mümkündür. Sonuç olarak termik verim artmakta ve benzin motoruna göre daha ekonomik koşullarda çalışılmaktadır. Hidrojen yakıtlı motorlarda soğuk cidardaki alev sönme bölgesi benzin motorlarına göre daha azdır. Bu bakımdan, çap/strok oranı büyük motorlar yapılarak, daha büyük çaplı veya fazla sayıda

emme ve egzoz sübapları kullanmak ve böylece volumetrik verimi arttırılarak, pompalama kayıplarını azaltmak mümkün olacaktır.

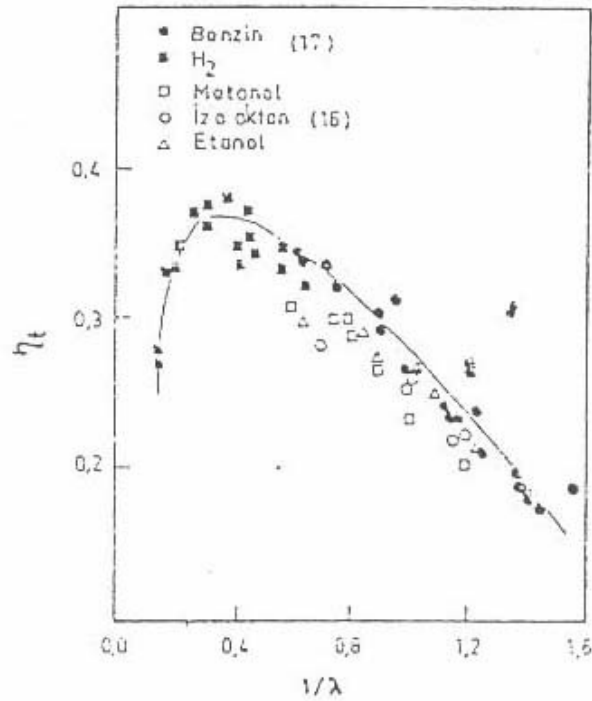
Hidrojen hava karışımlarının tutuşturulması için gerekli ateşleme enerjisi miktarı da petrol kökenli yakıtlara oranla oldukça düşük değerlere sahiptir. Şekilde minimum tutuşma enerjisinin hava fazlalık katsayısına göre değişimi görülmektedir. Örneğin stokiyometrik karışım oranları için benzin hava karışımına oranla 1/10'u dolayında enerji gerekmektedir. Bu özellik erken tutuşma ve geri tutuşma sorunlarını yaratmakla birlikte, çok fakir karışımlar için bile güvenli ateşleme sağlanmaktadır.



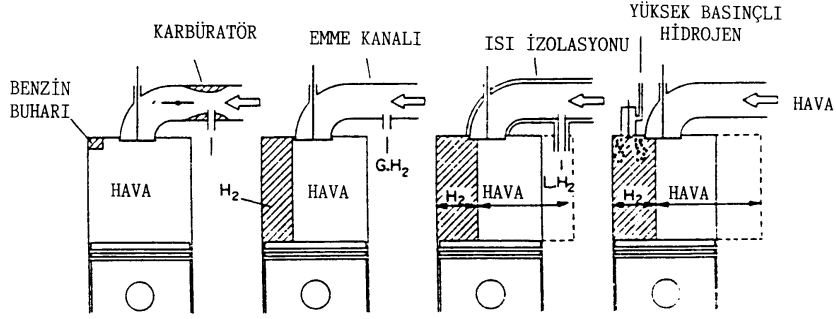
Şekil 5.15. Minimum Tutuşma Enerjisinin λ'ya Göre Değişimi [5]

Motorlarda termik verim motorun sıkıştırma oranının ve karışımın özgül ısılarının fonksiyonu olarak değişmektedir. Yanma hızının hidrojen hava karışımlarında fazla olması nedeni ile vuruntuya karşı direnç artacağından sıkıştırma oranının da daha yüksek değerlere çıkarılması ve dolayısı ile termik verimin artırılması sağlanabilmektedir. Sıkıştırma oranının artırılması sonucunda erken tutuşma sorunu ortaya çıkacaktır. Ancak bu durum yanma odasına yakıtın püskürtülmesi sonucunda çözümlenebilir. Şekilde termik verimin hava

fazlalık katsayısına göre değişimi görülmektedir. Termik verim kullanılan yakıtın cinsi ile doğrudan etkilenmemekle birlikte, hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak değiştiğinden, daha geniş tutuşma sınırlarına sahip hidrojen hava karışımlarında daha yüksek değerlere çıkabilmektedir. Örneğin benzin motorlarında karışımın fakirleştirilmesi sonucu termik verim artmaktadır. Ancak hava fazlalık katsayısının 1.6'ya ulaşmasından sonra yakıtın tutuşma sınırlarına ulaşıldığından, termik verimde düşme görülmektedir. Hidrojen yakıtlı motorlarda ise bu sınır hava fazlalık katsayısının 3.3'lük değerlerine kadar ulaşabildiğinden, termik verim daha yüksek düzeylere çıkabilmektedir. Ayrıca hidrojen hava karışımlarının sahip olduğu yüksek yanma hızları nedeniyle yanma süresi kısılacak ve dolayısı ile ısı kayıpları azalacağından termik verimde artış görülecektir.



Şekil 5.16. Termik Verimin Hava Fazlalık Katsayısına Göre Değişimi [5]



Yakıt hacmi [cm ³]	17	300	410	420
Hava hacmi [cm ³]	983	700	960	1000
Isıl değer [%]	100	83	114	119

Şekil 5.17. Hidrojen Yakıtlı Motorlarda Performans Karşılaştırması [1]

5.5. Hidrojenin emisyonlara etkisi

Hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO₂ ve HC'lar mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeni ile çok az miktarda oluşan HC'lar egzoz gazları arasında bulunacaktır. Diğer yandan bu motorlarda , yüksek yanma sıcaklıkları nedeni ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler, NO_x, bol miktarda üretilmektedir. Üretilen azotoksitlerin büyük kısmını oluşturan NO'ler egzoz sistemi içerisinde veya atmosfere çıktıktan sonra NO₂'ye dönüşmektedir.

NO_x genelde hava fazlalık katsayısının ve karışımın yerel sıcaklığının bir fonksiyonu olarak üretilmektedir. Bu nedenle zengin ($\lambda < 0.9$) ve fakir ($\lambda > 1.7$) karışımlarda NO_x emisyonu önemli ölçüde azalacaktır. Şekilde azot oksit emisyonlarının hava fazlalık katsayısına göre değişimi görülmektedir. Hidrojen yakıtlı motorların fakir karışımlarda çalışma özelliği bu konuda önemli yararlar sağlamaktadır.

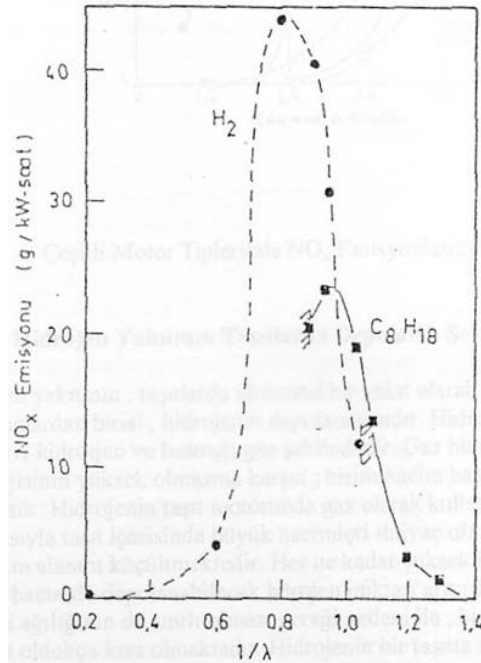
Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan NO_x'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması, oksijen konsantrasyonunun azaltılması veya yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir.

Bu amaçla;

- Egzoz gazları resirkülasyonu
- Emme manifolduna su püskürtülmesi
- Ateşleme zamanının geciktirilmesi
- Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi

gibi yöntemler kullanılmaktadır. İnert egzoz gazlarının resirkülasyonu sonucu, özellikle fakir karışımlarda oksijen konsantrasyonu düşürüldüğü için etkin bir şekilde NO_x azalmaktadır. Ancak bu durumda motorun gücü de bir miktar düşecektir. Motorun emme manifolduna su püskürtülmesi sonucunda karışım sıcaklığı düşmekte, yanma hızı azalmakta ve sonuç olarak NO_x emisyonu da azalmaktadır. Ateşleme zamanının geciktirilmesi motorun termik verimini bir miktar azaltmasına rağmen, maksimum sıcaklıkları düşürmekte ve dolayısı ile de NO_x emisyonunu azaltmaktadır. Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi de NO_x emisyonunu azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu durumda püskürtme zamanının etkileri de önem kazanmaktadır.

Hidrojen yakıtının yanma odası içerisine püskürtülmesi yönteminde, NO_x emisyonlarının azaltılmasında etkili diğer bir etkende hidrojenin püskürtülme sıcaklığıdır. Ayrıca yanma odası şekli ve motorun sıkıştırma oranı da hava hareketlerinin oluşturulması ve ulaşılan sıcaklıklar açısından NO_x emisyonu üzerinde etkili olmaktadır. [6]



Şekil 5.18. Azot Oksit Emisyonlarının Hava Fazlalık Katsayısına Göre Değişimi [9]

BÖLÜM-6. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMINDA KARŞILAŞILACAK SORUNLAR

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında sağlanan avantajların yanında bazı problemlerde bulunmaktadır. Motorun alıştırılmasının yavaş olması ve yakıt sistemi ile karmaşık ara bağlantıların olması imalat güçlüklerindedir. Bunun yanında daha önemli olan işletme problemleridir.

6.1. Erken tutuşma sorunu

Hidrojen motorlarında rastlanan en önemli güçlüklerden bir tanesidir. Erken tutuşma, bujide ateşleme olmadan önce yanma odası içindeki karışımın tutuşmasıdır. Bu olay motorda kararlı olarak bir kere başlarsa, gittikçe artan bir erken tutuşma oluşur ve sonunda motor stop eder. Yüksek yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. [6]

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksektir, fakat tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olmasıyla yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması, motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir. Erken tutuşmaya neden olan faktörler, ısınmış parçalar ve yanma odasında çökelen yağ artıklarıdır. Erken tutuşmayı önlemek için, öncelikle soğutma sistemi çok iyi dizayn edilmelidir. Yanma odasındaki yağ artıklarının nedeni ise, yanma odasına yağ kaçması ve dolayısıyla yağ yakılmasıdır. Bu durum emisyonlara da olumsuz etki yaratmakla beraber erken tutuşma sorununu da tetikler. Bu nedenle sızdırmazlık iyi sağlanmalıdır, özel segmanlar kullanılmalıdır.

6.2. Emme manifoldu geri tutuşması

Bu olay hidrojenin geniş yanma sınırlarının ve küçük sönme mesafesinin bir sonucudur. Bu olaya hidrojenin hava ile karıştırılarak motora gönderildiği veya emme manifoldunda tek noktadan besleme yapıldığı hallerde rastlanır. Hidrojen-hava karışımı sıcak silindirin veya emme bölgesindeki herhangi sıcak bir parçanın etkisiyle emme devam ederken tutuşur. Geri tutuşma genellikle bir gürültü yapar, seyrekte olsa bazen emme sistemindeki parçaları tahrip

edebilir. Geri tutuşma, karışıma su püskürtülmesi, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) veya karışım oranının uygun seçilmesi ile önlenir. Eşdeğer karışım oranının 0,65-1,05 değerleri arasında geri tutuşma eğilimi vardır. Eşdeğer karışım oranının 1,05' den büyük olduğu durumlarda ise sürekli geri tutuşma oluşur. Geri tutuşma sorunu, direk püskürtmeli sistemlerde görülmemektedir. [12]

Geri tutuşmanın sebeplerinden biri benzin ile kıyaslandığında hidrojenin tutuşturulabilmesi için daha düşük yonlaşma enerjisine ihtiyaç duymasıdır. Dolayısıyla hidrojen yakıtlı motorlarda buji kıvılcımından sonra ateşleme sisteminde kalan artık enerji miktarı daha fazla olur. Egzoz zamanı genişleme periyodundan sonra silindir içi basıncının atmosfer basıncına yakın olduğu durumlarda, sistemdeki artık enerji bujide kıvılcım oluşmasına sebep olur. Kıvılcımın oluştuğu nokta çevrimden çevrime farklılık gösterir. Eğer buji kıvılcımı emme zamanında oluşursa, diğer bazı etkenlerle birlikte geri tutuşmaya sebep olur. Artık enerji oluşumunu önlemek için ateşleme sistemi modifiye edilmelidir.

6.3. Hızlı basınç artışı

Bujide kıvılcım oluştuktan sonra, hidrojen motorunda yanma benzine nazaran çok hızlı yayılır. Bunun sonucu olarak silindir içinde basınç çok hızlı artar. Bu artış normal olarak 30-40 PSI / ⁰KMA (2,068-2,76 bar / ⁰KMA) olmalıdır. Hidrojen motorunda ise basınç artışı, bu olması gereken değer üç katı kadar olmaktadır. [12]

6.4. Vuruntu sorunu

Hidrojen motorlarında eşdeğer karışım oranı 0,9' dan büyük değerlerde olursa vuruntu veya darbeli yanma rejimi başlar. Buradaki vuruntu benzin motoru vuruntusundan farklı bir olaydır. Bununla beraber, vuruntulu yanmanın düşük güç, fazla ısınma gibi karakteristik sonuçları hidrojen motorunda da ortaya çıkar. Bu vuruntunun önlenmesinde karışıma su püskürtülmesi etkin bir yöntemdir. [12]

BÖLÜM-7. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILMASIYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Petrol fiyatlarının oldukça yüksek düzeyde seyretmesi, petrolü en çok kullanan sektörlerin başında gelen otomotivin önde gelen firmalarını harekete geçirmiştir. Yakın geçmişte, dünyanın en büyük otomotiv üreticisi General Motors (GM) ile bir başka dev BMW, sıvı hidrojenin araçlarda petrolün yerine yakıt olarak kullanılması amacıyla teknoloji geliştirmek için güçlerini birleştirdi. 2010 yılına kadar hidrojen yakıtı kullanan otomobilleri satışa sunmayı planlayan bu iki firmanın çabalarına ABD Senatosu da, aldığı bir kararla bu alandaki teknolojilerin geliştirilmesi için 3 milyar dolar para ayırarak katılmıştı. Sonunda bu gayretler meyvelerini vermeye başlamış, firmalar ardı ardına hidrojen ile çalışabilen prototip modellerini sergilemeye başlamıştır. Mitsubishi'nin prototip olarak ürettiği, hidrojen ile çalışan 'Grandis' bir depo hidrojen ile 400 kilometre yol yapabilmekte ve egzozundan çıkan tek kirlilik su olmaktadır. BMW tarafından yine sıvı hidrojen ile çalışan 750hl' adlı bir aracın tanıtımını yapılmış ve bu aracın saatte 226 kilometre hız yaptığı söylenmiştir.

Fransa'daki Miramas Deneme Pisti'nde BMW, yeni ürettiği H2R adındaki hidrojen yanmalı motora sahip prototipi ile tam 9 alanda hız rekoru kırmıştır. Piste yerleştirilen sektörleri rekor zamanlarda geçen H2R, saatte 302 kilometre hıza ulaşmıştır. Bugün BMW'nin 760i ve 760Lİ Sedan modellerinde kullanılan 6 litrelik ve 12 silindirlik motoru ile 285 beygir güç üreten araç, 0-100 kilometre hızlanma süresini de 6 saniyenin altında tamamlayabilmektedir.

Aracın tasarımını, geliştirilmesi ve ortaya çıkartılması BMW Forchung und Technik GmbH tarafından 10 ay gibi kısa bir sürede tamamlanmıştır. H2R'de çok önemli olan güvenlik unsurları da göz ardı edilmemiştir. Sürücü koltuğunun yanında bulunan ve içerisinde 11 kilo likit hidrojen bulunan tanklar vakumla kaplanmıştır. Herhangi bir çarpışmada zarar görmesini ve dolayısıyla infilak etmesini önlemek için bu tanklar güçlendirilmiş ve 5 bara kadar tanklar güvence altına alınmıştır.

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

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

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

Avrupa ve Kanada arasındaki Euro-Quebec diğer uluslar arası başarılı programdır. Bu programda nispeten ucuz olan hidrogüçten üretilerek Kanada'dan Avrupa'ya ithal edilecek sıvı hidrojenin deniz aşırı taşınımı, depolanması ve kullanım alanları araştırılmaktadır.

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



Şekil 7.1. Shell tarafından açılan dünyanın ilk hidrojen dolum istasyonu [13]

Petrol şirketlerinin enerji ortamı olarak hidrojene bakışları kuşku dolu olsa da son yıllarda bu bakış açısı değişmektedir. Bu şirketlerden Londra'da Royal Dutch Shell, Shell Hidrojen adını verdikleri şubelerine hidrojen konusunda araştırmaları için 500 milyon \$ yatırım yapmıştır. BP'de benzer bir girişimde bulunmuştur.



Şekil 7.2. Mercedes-Benz'in hidrojen yakıtlı bir otobüs modeli [13]

General Motor hidrojen enerji teknolojisinin kullanıldığı, 20 cm kalınlığında, 120 cm eninde, 240 cm boyunda bir platform ile dört tekerden oluşan bir otomobil üretimi projelendirmiştir. Projeye göre bu platforma sahip olan kişi istediği kaportayı takarak otomobilini kullanabilecektir. Bu otomobillerde içten yanmalı motor, piston ve krank

bulunmadığından bunun yerine her tekerleğin göbeğinde 20 kW'lık müstakil elektrik motorları arabaya gerekli hareketi sağlayıp, yüksek emniyet içinde sistemin süper kompakt bir yapıya kavuşmasına olanak sağlanmaktadır.

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

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

Dünyanın ilk çift yakıt sistemli rotary motorunun çalışmalarına devam eden Mazda Motor, H2RE adını verdiği (Hydrojen Rotary Engine) motoru ile çalışan RX-8 aracını tanıttı. Mazda, 2006 yılı sonuna kadar hidrojen rotary ile çalışan on adet RX-8 model aracını pazara sunmayı hedeflemektedir.10 Şubat 2006 tarihinde Japonya'nın Land Infrastructure and Transport (MLIT) Bakanlığı'ndan izin alarak pazara sunulan araç otomotiv dünyasında bir ilki temsil ediyor. Konsept aracın sunumu sonrasında, 29 ay boyunca araç ile ilgili geliştirme çalışmalarına devam eden ve geçtiğimiz günlerde başarılı bir şekilde satışa sunan Mazda Motor, ilk anlaşmalarını Idemitsu Kosan Co. Ltd. ve Iwatani International Corporation ile yaptı. Mazda H2RE, Mazda'nın birçok ödül almış RENESİS motorunun gelişmiş versiyonu ile çalışıp, aynı zamanda motor yuvasından elektronik olarak kontrol edilebilen hidrojen enjeksiyonu sistemine de sahip. Hidrojen/rotary kombinasyonu olan H2RE; aynı zamanda "0" düzeyinde CO2 atığı ve "0"a yakın NOx atığı ile çevre dostu olarak da yüksek performans sağlıyor.

Tüm bunlara ilave olarak; bu yenilikçi motor var olan parçaların ve üretim tesislerinin kullanılmasından dolayı uygun bir maliyet ile üretilebiliyor. Daha da önemlisi H2RE motoruna sahip araçlar çift yakıt sistemi sayesinde hidrojen gaz istasyonlarına bağımlı kalmayarak, özgürce yollarda dolaşabilecektir.

Daimler Chrysler firmasının Stuttgart' taki, araştırma ve geliştirme departmanı mühendislerince, hidrojenin taşıtlarda kullanım çalışmaları sürdürülmektedir. Bu çalışmalara 1972 yılında başlandı. Daimler Chrysler firması yetkililerine göre, hidrojen yakıt olarak şehir içi taşımacılıkta rahatlıkla kullanılabilir. Bu çalışmalar doğrultusunda geliştirilen hidrojen yakıtlı otobüste, hidrojeni depolamak için metil hibrit yönteminden faydalanılmıştır. Daimler Chrysler firması metal hibrit kullanan taşıtlar konusunda en dikkat çekici çalışmayı yapan firmalardan birisidir. Benz firması, FeTi ve Mg₂Ni metal hibritlerini beraber kullanarak, yakıt kaplarının ve kullanılan boruların ağırlığında bir azalma gerçekleştirdi. Taşıt için gerekli hidrojen gazı, düşük yükleme durumlarında, FeTi düşük sıcaklık hibritinden, yüksek yükleme durumlarında hem FeTi düşük sıcaklık hibriti hemde Mg₂Ni yüksek sıcaklık hibritinden sağlanmaktadır.

7.1. BMW Hidrojen Otomobili

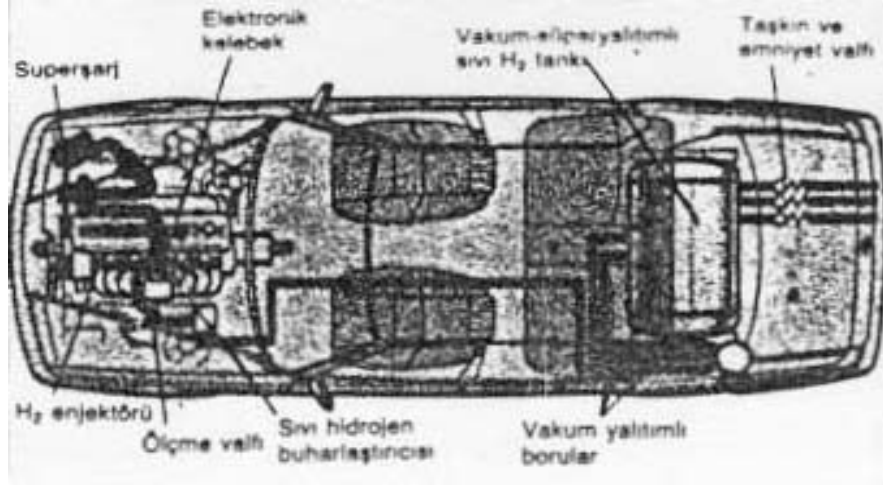
BMW hidrojen yakıtı ile tahrik edilen motorlar üzerindeki çalışmalarına 1970'li yıllarda başlamıştır. 1986 yılında hidrojen enerjisinin depolanması ve uygulama yöntemleri üzerinde araştırmalar yapan Alman Solar-Wasserstoff-Bayern Firması ile birleşmiştir. 3 yıl sonra BMW, hidrojen yakıtlı motorlar üzerinde performans testlerini gerçekleştiren ilk otomotiv firmasıdır. Bugün yapılan yoğun çalışmalar sonucunda hidrojen yakıtı ile tahrik edilen taşıtlar kullanılabilir. [11]

BMW hidrojen yakıtlı 6 silindri 735 IL model bir prototip üretti. 211 beygir gücündeki benzinli modelle karşılaştırıldığında, 140 beygir gücündeki hidrojen yakıtı kullanan motor, taşıta 170 km/h 'lik bir hız kazandırıyor. Taşıt istenildiği zaman benzinle de çalışıyor. BMW 'nin taşıtında hidrojen, sıvı olarak depolanmaktadır. Hidrojen sıvı halde en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaktadır; fakat tüm yakıt sisteminin 253⁰C 'de tutulması gerekmektedir. Vakum süper yalıtımlı 100 litrelik depoda sıvı halde bulunan hidrojen, ısı değiştiricileri yardımı ile gaz haline getirilir. Sınırlı seyahat mesafesi, doldurma esnasındaki

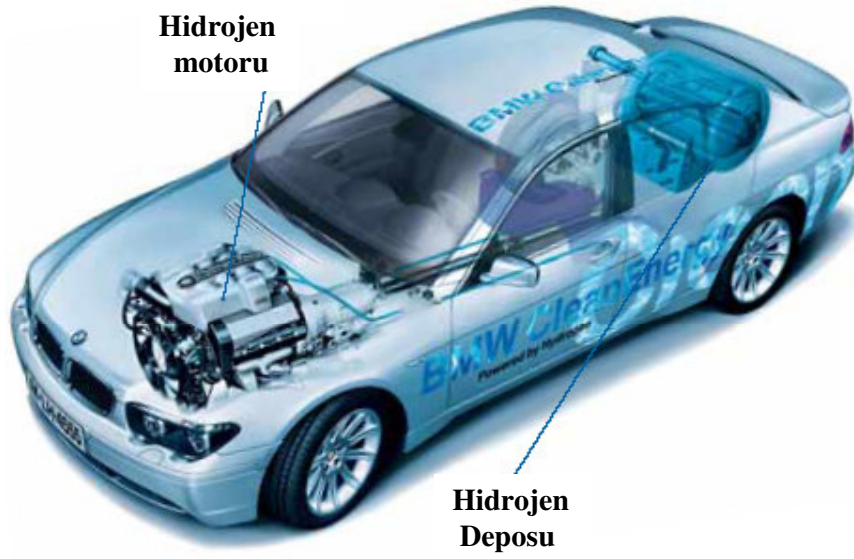
güçlükler ve tehlike riski, deposundaki yakıtın buharlaşma kayıpları gibi dezavantajları olması, BMW' nin daha çok araştırma yapmasını gerektirmektedir.

BMW hidrojen taşıtlarına yakıt ikmalinin yapılabilmesi ve hidrojenin depolanabilmesi için alt yapı sisteminin yeniden dizayn edilmesi gerekmektedir. BMW test otomobilleri için yakıt ikmal istasyonu ilk kez 1990 yılında Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH' nin binasında kurulmuştur. Sıvı hidrojen yakıt deposuna alt kısımdan girerek art hidrojen gazlarını üst kısma sürüklemiştir. Taşıtın yakıt ikmali bu şekilde 1 saat sürmüştür. Son zamanlarda gelişen teknolojiyle beraber aşırı soğutulmuş hidrojen otomobilin yakıt deposuna üst kısımdan girmektedir. Bu sayede geri kalan hidrojen gazı dışarı sürüklenmesi yerine depo içinde yoğunlaşmaktadır. Bu işlem sayesinde yakıt kaybı ortadan kalkar ve yakıt ikmali 3 dakikadan kısa bir zamanda tamamlanır. Eğer civarda herhangi bir yakıt istasyonu yok ise de, otomobil diğer depodaki benzin yakıtı ile tahrik edilmektedir.

Hidrojenin kapalı bir alanda oksijen ile bir araya gelerek tutuşabilir karışım oluşturmasını engellemek amacıyla yakıt sistemi sensörler tarafından kontrol altında tutulmaktadır. Herhangi bir durumda gaz sızması meydana geldiği anda, otomobil otomatik olarak havalandırılmaktadır. Kaza sonucunda yakıt deposunun patlamasını önlemek amacı ile yerleştirilen emniyet valfi sayesinde dışarıya sızan hidrojen gazı yukarı yönde tutuşarak etkisiz hale getirilir. Bilim adamlarına göre hidrojen istasyonlarının alt yapı sistemlerinin tamamlanabilmesi için 30 ile 50 yıl arası bir süreye ihtiyaç vardır. Henrich Heitmann' a göre bu alt yapı sistemi tamamen hazır hale geldiğinde, BMW firması hidrojen otomobili için her türlü donanıma sahip olacaktır. [11]



Şekil 7.3. BMW' nin hidrojen yakıtlı prototip modeli [11]



Şekil 7.4. Hidrojen yakıtlı BMW modeli [14]

7.2. 1975 Pontiac Hidrojen Otomobili

Billings Enerji Şirketi tarafından 1975 Pontiac' ın hidrojen yakıtı ile çalıştırılması amaçlanarak motor dönüşüm projesi gerçekleştirilmiştir. Dönüşümü yapılan aracın yakıt deposunun ağırlığı 136 kg , depodaki hidrid yakıtın ağırlığı ise 198 kg' dır. Deponun çapı 25.4 cm , uzunluğu ise 119.4 cm' dir. Bu otomobil 2.4 kg miktarındaki hidrojen yakıtı kullanarak yaklaşık olarak 241 km kadar mesafeyi kat edebilmektedir.

17⁰C' de ilk bir dakikada hidridin yaklaşık olarak %40' ı hidrojen yakıtı ile yüklenebilmektedir. 15 dakikada %80'i, 60 dakikada ise hidrid metalin tamamı hidrojen yakıtı ile şarj edilebilmektedir. Su ceketlerine sahip alüminyum deposu FeTi hidridlerini barındırır. Impeco model CA50 karıştırıcısına bağlı olarak bulunan Impeco PEV-2 regülatörü basıncı kontrol etmektedir. Motora gönderilen hidrojen miktarı selenoid bir valf tarafından kontrol edilir.

Motor yanma sıcaklığının düşürülmesi amacıyla, yanma odasına su püskürtülmüş ve böylece azot oksit emisyonları azaltılmıştır. Bu olay emme sübapları üzerine konumlandırılmış 2 püskürme memesi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Emme pompası ve selenoid valf el ile kontrol edilmektedir. Motor hava soğutmalıdır ve hidrojen miktarını kontrol eden selenoid valf sayesinde motorun sıkıştırma oranı sabittir.

Motorda, bahsedilen değişiklikler yapılarak hidrojen yakıtının kullanımı sağlandığında, motor gücü ve performansında çok az da olsa bir düşüş meydana gelmiştir. [11]

7.3. Mercedes-Benz Hidrojen Kamyoneti

Almanya' nın Daimler Benz firması tarafından geliştirilen kamyonet çift hidrid sistemiyle çalışmaktadır. Bu taşıtının imalinde FeTi ve magnezyum nikel hidridin bütün avantajlarından faydalanılması göz önünde tutulmuştur. TiFe' nin ağırlığı toplam hidrid ağırlığının yaklaşık 2/3' ünü oluşturmaktadır. Geri kalan ağırlık ise magnezyum nikelin ağırlığıdır.

TiFe hidridi ağırlığının sadece % 1,6-1,95' i kadarını hidrojen yakıtı olarak depolayabilmektedir. Hidrojen yakıtının ayrışma sıcaklığı düşük olup Mg₂Ni hidridindeki hidrojen yakıtının ayrışma sıcaklığı ise 200 ile 400⁰C civarındadır. Bundan dolayı hidrojen yakıtının

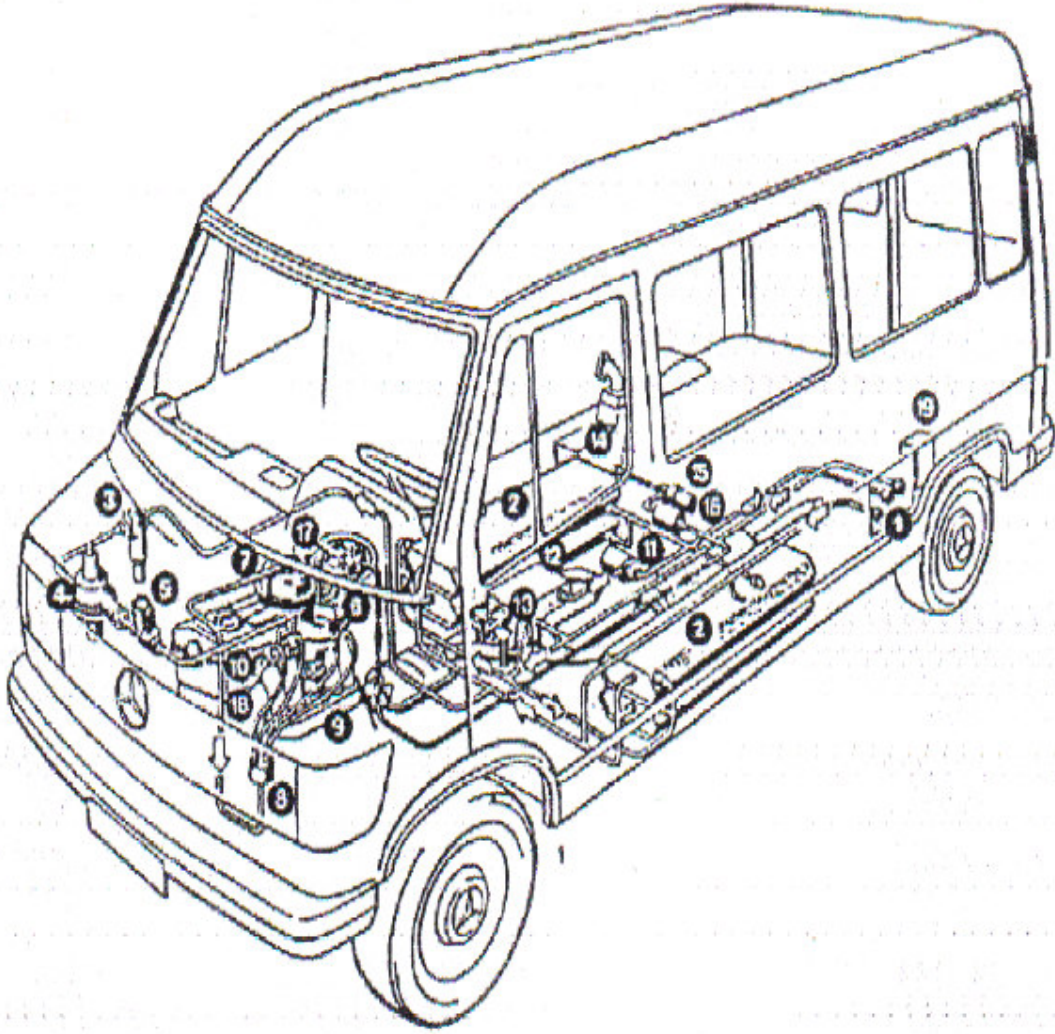
tahliyesi için gerekli olan enerji miktarı, TiFe hidridindeki yakıtın ayrışabilmesi için gerekli olan enerjinin 2 katıdır. Sonuç olarak Mg₂Ni hidridinde depolanan hidrojen yakıtının kullanılabilmesi için, motor soğutma sıvısının sıcaklığı yeterince yüksek olmalıdır. Motorda yanma odasına su püskürtülmesi vasıtasıyla erken ateşlemenin önüne geçilmiş olunur.

Hidrojen yakıtı diğer hidrid yakıtlarıyla tahrik edilen motorlardan farklı olarak belli çevrimlerde hidrid metalinden ayrıştırılır. İlk önce hidrid metaline ısı enerjisi aktarılması suretiyle hidrid deposunun basıncı artırılır. Daha sonra ısı akışının kesilmesi suretiyle, hidrojen yakıtı ayrıştırılır. Meydana gelen bu işlemler sonucunda hidridin sıcaklığı düşer ve bir çevrim gerçekleştirilmiş olunur. Sıcaklık -20⁰C ile 20⁰C arasında, basınç ise 0.99 atm ile 1.97 atm arasında değişmektedir.

Bu taşıt aynı zamanda hidrid havalandırma sistemini kullanmaktadır. Yolcu kabininden sağlanan ısı enerjisi ile hem hidridin sıcaklığı artırılır, hem de kabindeki sıcaklık düşürülerek bu bölümün soğutulması sağlanmış olunur. [11]

Tablo 7.1. Mercedes-Benz kamyonetin teknik özellikleri [11]

Silindir sayısı	4
Strok hacmi	2.3 lt
Maksimum güç	44 kW (4800 d/d)
Sıkıştırma oranı	9:1
Devreden egzoz gazı miktarı	%25
Hidrid tipi	%67 FeTi, %33 Mg ₂ Ni
Şehir dışı kat edebileceği yol	152-200 km
Şehir içi kat edebileceği yol	120 km
Isı dönüştürme mekanizması	Standart motor soğutma sıvısı
Soğutma suyu ile şarj işlemi	10 dakika içinde %75 şarj



- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Yakıt ikmal bağlantıları | 11. Su pompası |
| 2. Hidrid deposu | 12. Egzoz gazı / su ısı değiştirgeci |
| 3. Filtre | 13. Egzoz kapakları |
| 4. Basınç regülatörü | 14. Su deposu |
| 5. Selenoid valf | 15. Su basınç pompası |
| 6. Hidrojen akış regülatörü | 16. Filtre |
| 7. Diferansiyel basınç regülatörü | 17. Su akış distribütörü |
| 8. Akış distribütörü | 18. Su püskürtme memeleri |
| 9. Emme manifoldu | 19. Elektronik sistem |
| 10. Hidrojen püskürtme memeleri | |

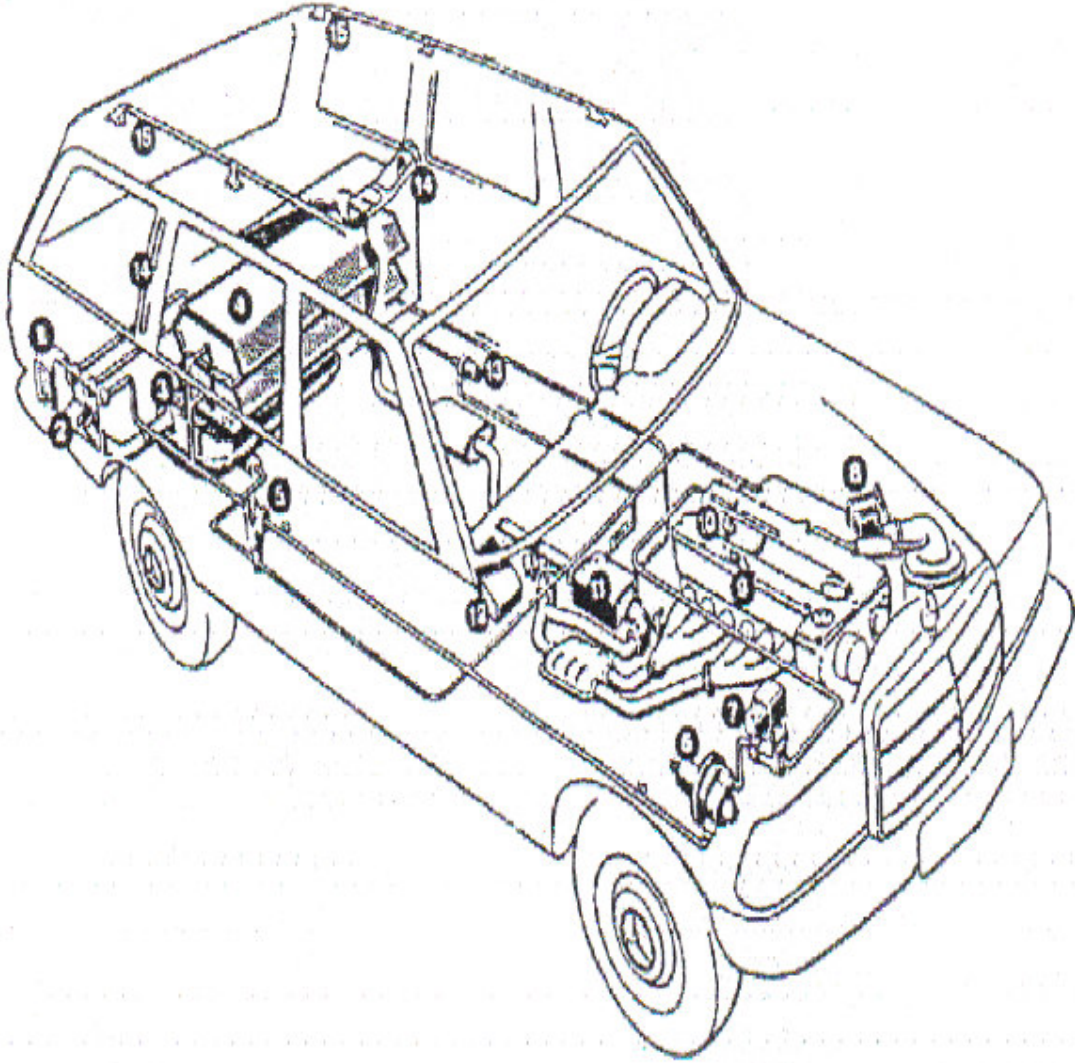
Şekil 7.5. Hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes-Benz kamyonet [11]

7.4. Mercedes-Benz Hidrojen Otomobili

Mercedes Benz bir yolcu otomobilinin, hem benzin hem de hidrojen yakıtı ile tahrik edilmek suretiyle dönüşümünü gerçekleştirmiştir. Bu araç mevcut koşullara göre benzin veya hidrid yakıt ile tahrik edilmektedir. Araç uzak mesafelerde benzini, daha kısa şehir içi kullanımlarda ise hidrid yakıtını kullanmaktadır. Hidrojen yakıtı ile tahrik edilen taşıtın çeşitli mesafelerde kullanılmasıyla elde edilen test sonuçları Tablo 7.2' de gösterilmektedir. [11]

Tablo 7.2. Mercedes-Benz hidrojen otomobilinin test sonuçları [11]

Test	H ₂ Tüketimi (m ³)	Kat edilen mesafe (km)	Hız (km/h)	Vites
1	32	88	60	4
2	40	86	70	4
3	45	81	80	4
4	48	76	60	3
5	48	79	30	3
6	48	66	30	2
7	48	69	30	4
8	48	130	70	4



1. Elektronik sistem
2. Yakıt ikmal bağlantıları
3. Benzin deposu
4. Hidrid deposu
5. Filtre
6. Basınç regülatörü
7. Akış kesme vanası
8. Gaz kelebeği hareket motoru
9. Hidrojen yakıtı enjektörleri
10. Benzin enjektörleri ve egzoz gazı ısı değiştirgeci
11. Kontrol kapakları
12. Elektronik kontrol
13. Isı değiştirgeci devridaim pompası
14. Hidrid deposuna giden hat
15. Yolcu kısmı

şekil 7.6. Hem benzin hem hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes-Benz otomobil [11]

7.5. Toyota 2TC hidrojen motoru

Örnek olarak Amerikan Enerji Bakanlığı araştırma laboratuvarlarında yapılmış olan, 9.2:1 sıkıştırma oranlı bir Toyota 2TC motorunun hidrojenle çalıştırılması için yapılan çalışmada, mevcut buji yerine daha küçük 10 mm' lik iki adet buji kullanılmış, daha iyi soğutma sağlayan iki adet egzoz sübabı, büyük sübabın yerine kullanılmış, pistonların ısınma sorununa karşı kalın etekli pistonlar kullanılmış, segmanlar, ilk segman boşluğu 0.15 mm, diğerleri sırasıyla 0.30, 0.32 mm olacak şekilde değiştirilmiş, OW30 kalitesinde yağ seçilmiş, sızdırmazlık sorunu olan orijinal sübap contaları, GM motorlarında kullanılan contalarla değiştirilmiş, ve bu değişiklikler için silindir kafası yeniden dizayn edilmiştir. Yakıt kontrolü için emme kanalına Siemens marka enjektör ve kontrol sistemi yerleştirilmiştir. Bu değişiklikler sonrası, motor sorunsuz bir şekilde çalışmıştır. Ancak güçte yaklaşık %20 kayıp gözlenmiştir. Bu motorun hidrojenle çalıştırılması sırasında ölçülen değerler aşağıda gösterilmiştir. [12]

Tablo 7.3. Hidrojenle çalıştırılan motordan ölçülen değerler (FOEB: fren ortalama efektif basınç, SOEB: sürtünme ortalama efektif basınç, IOEB: indike ortalama efektif basınç) [12]

Motor Devri	1000 d/dk	1800 d/dk	2830 d/dk	3500 d/dk	4000 d/dk
Vol. Verim (%)	79.0	84.6	87.9	88.4	74.3
FOEB (bar)	2.60	2.55	2.16	1.47	0.38
SOEB (bar)	1.48	2.14	3.00	3.53	3.97
IOEB (bar)	4.08	4.69	5.16	5.00	4.35
Termik Verim (%)	36.0	38.6	40.7	39.2	40.2
Atesleme Avansı (°KMA)	23	27	31	33	35
NO _x (ppm)	7.4	7.9	10.2	14	18

BÖLÜM-8. ÖRNEK BİR MOTORUN HİDROJENLE TAHRİK EDİLMESİ VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

8.1. Test öncesi alınması gereken güvenlik önlemleri

- Hidrojen tüpü test yapılan kapalı ortamda bulunmamalı, laboratuvarın dışında açık ortamda bulunmalı ve uygun bir boru hattı ile test motoruna hidrojen sevk edilmelidir.
- Hidrojen tüplerinin dışarıda koyulduğu alanın çevresi kapatılmalıdır.
- Laboratuvar dışında bir gaz regülatörü bulunmalıdır ve içeri yüksek basınçta hidrojen sokulmamalıdır. Regülatörde basınç 200 bar'dan 5 bar'a düşürülmeli ve o şekilde içeri sokulmalıdır.
- Test motorunu uzaktan kontrol edebilen ve acil durumlarda ani durdurma sağlayan bir sistem kurulmalıdır.
- Test yapılacak motorun mümkün olduğu kadar ufak hacimli olması güvenlik açısından tercih edilmelidir. Mümkünse tek silindirli bir motor olmalıdır.
- Hidrojenin yağlama özelliği olmadığından dolayı enjektörlü motorlarda problem olmaktadır. Motorin ve benzinde olduğu gibi hidrojen, enjektördeki yağlamayı sağlayamamaktadır. Boşluk bırakıldığı takdirde de kaçaklar olacağı için, çok hassas toleranslarda özel hidrojen enjektörü temin edilemiyorsa, testin karbüratörlü bir motorda yapılması daha uygun olacaktır.
- Ufak bir kıvılcım bile hidrojenin patlaması ile sonuçlanacağı için, test bölgesinde kesinlikle her hangi bir ısı ya da kıvılcım oluşturabilecek bir cisim bulunmamalıdır.
- Hidrojen tüpünün altında lastik ya da kauçuktan bir halka konmalıdır ve tüpü yere koyarken yavaşça koymak gereklidir. Aksi takdirde tüpün yere çok sert bırakılması halinde dahi tüpün patlama olasılığı vardır.

- Bütün bağlantı borularında, basınç dayanımı ve sızdırmazlık son derece önem teşkil etmektedir.

- Motorda olabilecek en tehlikeli durum geri tutuşmadır. Geri tutuşma, motordaki sıcak bir bölge ya da karbüratörlü motorlarda sübap bindirmesi esnasında, artık gazlarla hava dolgusunun teması nedeniyle emme devam ederken tutuşmanın başlamasıdır. Bu durum hava fazlalık katsayısının 2 ile 3 arasında olduğu durumlarda gerçekleşir. Önlemek için fakir karışım oluşturulmalı ve sübap bindirme süresi kısaltılmalıdır. Ayrıca EGR sistemi ve giriş havasının hidrojenle soğutulması bu sorunu engeller.

- Sızdırmazlıktan dolayı yağlama yağının yanma odasına kaçması, emisyonların artmasına ve erken tutuşma sorununa neden olmakta iken bu durum güvenlik açısından ise önemli bir sorun teşkil etmemektedir. Fakat aksi şekilde hidrojenin karter bölgesine kaçması durumu, tehlike arz etmektedir. Bu nedenle sızdırmazlık iyi sağlanmalıdır. Ayrıca kartere çok ufak çaplarda havalandırma delikleri açılmalıdır. Yağ sızıntıları olmaması açısından da bu delikler alüminyum folyo ile kapatılmalıdır.

8.2. Uygulamada kullanılan içten yanmalı motorun özellikleri

Uygulamada kullanılan deney motorunun özellikleri Şekil 8.1' de belirtilmiştir. Bu deney motoru TecQuipment firmasının üretimi olan DC motor ile yüklemeli değişken sıkıştırma oranlı CFR motorudur.

Silindir Çapı [mm]	90
Piston Stroku [mm]	120
Silindir Hacmi [cm ³]	765
Silindir Sayısı	1
Sıkıştırma Oranı	4.5:1~22:1
Hız Aralığı [d/d]	500~2000
Maksimum Güç [kW]	7kW (1800d/d)
Maksimum Moment [Nm]	40Nm (1100d/d)

Şekil 8.1. Deney motorunun özellikleri

Motorda kullanılan enjektörler uygun zamanda yakıtı atomize bir şekilde püskürmektedir ve elektronik kontrol ünitesinin gönderdiği sinyallerle kontrol edilmektedir. Enjektörler bir gövde içerisine yerleştirilmiş püskürtme memesi ve iğnesi ile bir manyetik bobinden oluşmuştur. Enjektör iğnesinin hareketi, kontrol ünitesinden selenoid sargılara gönderilen sinyallere bağlıdır. Selenoid sargılara sinyal geldiğinde enjektör iğnesi açılarak hidrojenin püskürtülmesi sağlanır. Selenoid bobinin tam enerjilenmesi, yani iğnenin tam açılması 1-1.5 ms civarında gerçekleşmektedir. Bir çevrimde püskürtülecek yakıt miktarı hesaplanırken bu süre elektronik kontrol ünitesi tarafından hesaplamalara dahil edilir. Sistemde kullanılan enjektörler yüksek dirençlidir ve iç dirençleri 16 ohm' dur. Voltaj kontrolü ile kumanda edilmektedir.

Öncelikle deney motorunun, test ve ölçümler için bir saat çalıştırılabilmesini sağlayacak hidrojen yakıtı miktarı teorik olarak hesaplanmıştır. Devir 600 d/d alınmıştır ve ilk olarak gerekli hava miktarı bulunmuştur.

$$G_h = [(V_h * n) / (60 * a)] * \rho_{hava} * \eta_v$$

$$G_h = [(765 * 10^{-6} * 600) / (60 * 2)] * 1,18 * 0,85$$

$$G_h = 0,003825 \text{ kg/s} = 13,77 \text{ kg/h} ; \text{ kadar hava kullanılmalıdır.}$$

Tutuşma sınırı hidrojen yakıtı için hacimsel olarak % 4.1 ile % 74 arasındadır. Yani hidrojen oldukça geniş bir tutuşma sınırına sahiptir. Fakat güvenlik açısından ve düşük NO_x emisyonlarının elde edilebilmesi açısından mümkün olduğu kadar fakir karışım oluşumu tercih edilmektedir. Bu nedenle karışım oranı % 4.1 alınacaktır.

Öncelikle hesaplanan G_h 'dan yola çıkarak gerekli benzin miktarı hesaplanacaktır. Oradan da benzin ve hidrojenin alt ısıl değerlerinin oranına göre, bir saat çalışma süresi için yakılması gereken hidrojen miktarı hesaplanacaktır.

$$G_h / G_{benzin} = 14,7$$

$$G_{benzin} = 13,77 / 14,7 = 0,93673 \text{ kg/h} ; \text{ kadar benzin kullanılmalıdır.}$$

$$\text{Benzinin alt ısıl değeri : } 43,4 \text{ MJ / kg}$$

$$\text{Hidrojenin alt ısıl değeri : } 119,93 \text{ MJ / kg}$$

$$(Hu)_{benzin} / (Hu)_{hidrojen} = 43,4 / 119,93 = 0,3618$$

$G_{\text{hidrojen}} = 0,93673 / 0,3618 = 2,589 \text{ kg / h}$; kadar hidrojen gerekmektedir.

600 dev/dk için ; $G_{\text{hidrojen}} = 2,589 / 60 \cdot 600 = 7,191 \cdot 10^{-5} \text{ kg/dev}$

Hidrojenin sıvı özgül ağırlığı : 0.07 kg/dm^3

Hidrojenin gaz özgül ağırlığı : $0.84 \cdot 10^{-4} \text{ kg/dm}^3$

$G_{\text{hidrojen}} = 2,589 / 0.84 \cdot 10^{-4} = 30822,41 \text{ lt/h} = 513,7 \text{ lt/dk}$

600 dev/dk için ; $G_{\text{hidrojen}} = 513,7 / 600 = 0,856 \text{ lt/dev}$; her bir devir için gerekli hacimsel H_2 .



Şekil 8.2. Deneyin yapıldığı CFR test motoru

8.3. Motorda yapılan modifikasyonlar ve kullanılan ekipmanlar

Deneyin yapıldığı CFR test motorunda sıkıştırma oranı 7 ile 22 arasında ayarlanabilmektedir. Başlangıçta sıkıştırma oranı 9 olarak ayarlanıp test bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sıkıştırma oranı artırılarak farklı sıkıştırma oranlarındaki çalışmada sonuçlar incelenmiştir.

Motorda ilk olarak Audi firmasının enjektörü kullanılmıştır ve püskürtme emme manifolduna yapılmıştır. Enjektörler, gaz enjektörü olmayıp benzin için dizayn edildikleri için uzun süre kullanıldığı takdirde, gaz haldeki hidrojenin benzine benzer şekilde yağlama etkisi yapmaması sonucu problem yaratabilmektedir. Fakat test sırasında uzun süreli bir kullanım söz konusu olmayıp, irdelenmesi gereken tek faktör, enjektörün gaz kaçırmadığıdır. Bu nedenle enjektörler, öncelikle LPG ile denenmiştir ve sızdırmazlığı kontrol edilmiştir. Olumlu sonuç alındıktan sonra, hidrojen yakıtı ile püskürtme denenmiştir.

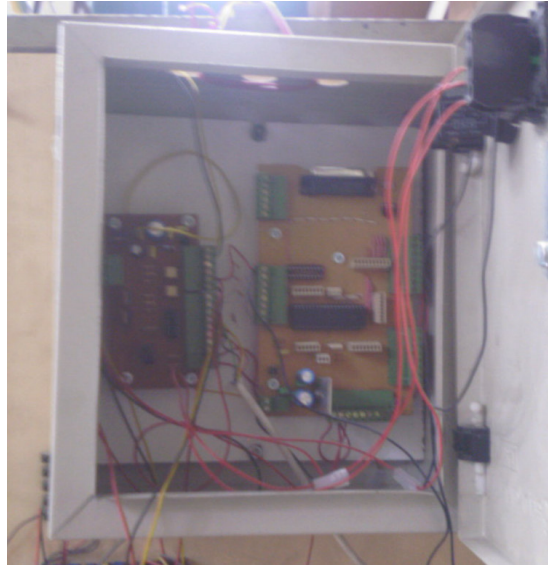
Fakat kullanılan benzin enjektöründe yeterli miktarda hidrojen silindire gönderilememiştir. Bu nedenle çalışmalara LPG gaz enjektörüyle devam edilmiştir. Ayrıca enjektör ve gaz kelebeği konumlarının ayarlanabilmesi için özel bir emme manifoldu tasarlanmıştır. Emme manifoldu, gaz kelebeği alt kısımda kalacak şekilde ve gaz enjektörünün bağlantısı yanma odasına mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 8.3. Deney için tasarlanan emme manifoldu

Enjektör ile hidrojen tüpünün üzerine direk bağlanmış olan regülatör arasına, bakır borudan hat çekilmiştir. Bakır boru hattının regülatör tarafında boru, regülatör çıkışına gümüş kaynağı ile kaynaklanmıştır. Hattın enjeksiyon tarafında ise, özel imal edilen burç, boruya kaynaklanmış ve diğer taraftan sızdırmaz, çelik telli bir hortumla enjektöre bağlanmıştır. Püskürtme zamanı ve süresi, elektronik kontrol ünitesiyle belirlenmektedir. Test motoru için özel tasarlanan kontrol ünitesinin yazılımı hidrojen yakıtı kullanılması durumu için yeniden yazılmış ve üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Gerekli hidrojen püskürtme miktarı teorik olarak hesaplanmış ve bu değere göre püskürtme süresi belirlenmiştir.

Elektronik kontrol ünitesine bağlanan bir ekranla püskürtme süresi ms cinsinden görülebilmekte ve kontrol sistemi üzerinde bulunan tuşlarla, ms cinsinden süre arttırılıp azaltılabilmektedir. Bu şekilde silindire yeterli miktarda hidrojeni gönderecek püskürtme süresi deneysel olarak belirlenebilmektedir.



Şekil 8.4. Deneyde kullanılan elektronik kontrol ünitesi

Elektronik kontrol ünitesine bağlanan ekran sayesinde ms ve KMA cinsinden püskürtme süresi ve devir izlenebilmektedir. Öncelikle gaz kelebeği kapalı konumda iken, 1.5 bar hidrojen basıncında püskürtmeye başlanmıştır. Püskürtme süresi 5ms 'den başlayarak, 0.1ms aralıklarla arttırılıp yeterli püskürtme süresi deneysel olarak belirlenmiştir.

Tutuşma başlangıcı : 11.5 ms; 35⁰ KMA; 500 d/dk 'da gerçekleşmiştir.

Motorun hidrojen ile çalışmaya başlaması : 13.5 ms; 54⁰ KMA; 665 d/dk 'da gerçekleşmiştir.

Her iki durum için de gaz kelebeği kapalı konumdadır. Gaz kelebeği açıldığında karışım fakirleşerek yanma zorlaşmaktadır. 15ms ve üzerindeki püskürtme sürelerinde, gaz kelebeği kısmi açık konumda iken motorun çalışması izlenmiştir.



Şekil 8.5. Deneyde kullanılan püskürtme sürelerinin izlendiği ekran

Deneyde B.O.S. firmasından temin edilen hidrojen kullanılmıştır. Hidrojen, gaz halde olup yüksek basınçta tüp içersinde depo edilmiştir. 46,6 lt su hacmi olan tüp içerisinde, 200 bar basınçta, normal şartlarda 8,2 m³ olan hidrojen sıkıştırılmış halde bulunmaktadır. Hidrojen tüpü, K tipidir. 152 cm yüksekliğinde, 23 cm çapında ve 70 kg ağırlığındadır. Deney sırasında kullanılan regülatör, yine B.O.S. firmasından temin edilen Lincoln marka tek kademeli özel hidrojen basınç regülatörüdür. Giriş basıncı 0-200 bar, çıkış basıncı ise 0-10 bar arasında ayarlanabilmektedir. Giriş manometresinden tüp basıncı, çıkış manometresinden de kullanım basıncı görülebilmektedir ve ayar vidası ile istenen kullanım basıncı ayarlanabilmektedir. Regülatörün aşırı basınçlanması durumunda gaz emniyet valfi vasıtasıyla tahliye edilir. ıkış Nipel, gaz çıkış bağlantı noktasıdır. Diyafram ise, gaz regülasyonunu sağlayan önemli parçalardan biridir. Regülatör bağlantı şekli ise DIN 477 NO:1 normu ile belirtilmiştir.

8.4. Test sonucu elde edilen sonuçlar

Üniversite laboratuvarındaki CFR test motorunda deney gerçekleştirilerek, motor hidrojen yakıtı ile çalıştırılmıştır. Yapılan kısa süreli bir deney için dahi alınması gereken güvenlik önlemleri, hidrojen yakıtının araç üzerinde depolanmasının pratikte oldukça zor olduğunu göstermiştir. Sızdırmazlığın sağlanabilmesi için özel bağlantı elemanları, yakıt sisteminin farklı malzemelere sahip borularının kaynakla birleştirilmesinde ise gümüş kaynağı kullanılmıştır. Erken ve geri tutuşma oluşumlarını engellemek için yağlama ve soğutma sistemi deney öncesinde gözden geçirilmiştir. Püskürtme zamanı ve süresi, ECU programında yapılan değişikliklerle hassas olarak belirtilmiştir.

Bir hidrojen motorunda, motorun yağ yakması göz önüne alınmadığı sürece CO, HC ve CO₂ emisyonları bulunmamakta, sadece NO_x emisyonu görülmektedir. Deney sonrasında farklı devir ve yüklerde, 1 bar püskürtme basıncı ve 25ms püskürtme süresi için moment ve güç değerleri belirlenirken NO_x ve emisyon ölçümleri de yapılmıştır.

Tablo 8.1. Deney sonucunda ölçülen değerler

Devir(d/dk)	Oksijen	NO _x (ppm)	Yük (N)	L (m)	Moment (Nm)	Güç (kW)
1630	7.51	370	112	0.27	30.24	5.1619
1219	8.85	214	98	0.27	26.46	3.3778
1195	9.03	166	98	0.27	26.46	3.3113
1080	8.75	241	95	0.27	25.65	2.9010
900	9.24	190	92	0.27	24.84	2.3411
820	9.48	183	90	0.27	24.3	2.0867
737	9.7	153	90	0.27	24.3	1.8754
690	9.96	138	90	0.27	24.3	1.7558
650	10.08	126	90	0.27	24.3	1.6540
610	10.37	103	89	0.27	24.03	1.5350
550	10.46	91	89	0.27	24.03	1.3840
522	10.59	82	88	0.27	23.76	1.2988

SONUÇ

Yapılan araştırmalara göre, giderek kaynakları tükenmekte olan petrol kökenli yakıtlara alternatif olarak, hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilirliği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Motor yakıtı olarak hidrojen kullanımı 1920’li yıllarda başlamış ve günümüze kadar yapılan çalışmalarla kullanım aşamasına gelinmiştir. Elektroliz ile sudan elde edilmesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve evre kirliliğini azaltıcı yönde olumlu etkileri hidrojeni önemli bir alternatif durumuna getirmiştir.

Uygulamanın yaygınlaştırılmasının önündeki engeller; hidrojen üretiminin henüz pahalı olması, erken tutuşma ve emme manifoldu geri tutuşması gibi bazı problemleri, araç üzerinde depolanma zorlukları, güvenlik sistemleri gibi konulardaki bilgi ve becerilerin teorik düzeyde kalmasıdır.

Hidrojenin retim maliyetleri, şuan için benzin ve motorine göre oldukça yüksektir. Ayrıca, sıvı halde depolanması söz konusu ise, hidrojeni sıvı hale getirmek için gerekli olan maliyet hidrojenin depoladığı enerjinin %25-%30’ u kadar enerjiye mal olur ki bu da azımsanamayacak bir maliyettir. Egzoz emisyonlarından dolayı diğer yakıtların evre zarar maliyetleri gözönüne alınmazsa, hidrojen yakıtı, doğalgazdan 1.5-3.7, petrol kökenli yakıtlardan 1.3-3.5 kat kadar pahalı gözükmektedir. Vergiler dahil benzinin A.B.D’ de üretim maliyeti 0.33 \$ / lt iken, hidrojenin maliyeti 0.38-1.83 \$ /lt olarak görülmektedir.

Ancak fosil yakıtlar tükenmekte iken, dünya enerji ihtiyacı da artmaktadır ve bu nedenle fosil yakıtların fiyatları hızla yükselmektedir. Bununla beraber hidrojen üretim yöntemleri için henüz yeterli araştırma geliştirme çalışması yapılmadığından üretim maliyetleri, ileride şuan ki duruma nazaran oldukça düşecektir. Ayrıca Türkiye’nin hidrojen rimi açısından bir şansı, uzun bir kıyı şeridi olan Karadeniz ’in tabanında kimyasal biçimde depolanmış hidrojen bulunmasıdır.

Güvenlik nlemleri, tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada yeterli düzeyde sağlanabilmiştir. Ancak araç üzerindeki kullanımda durum çok daha farklı olacaktır. Hidrojen deposu ve ara bağlantılara gelen dinamik yükler olumsuz etkiler yaratacaktır. Ayrıca, alınması gereken güvenlik önlemlerinin, olası bir kaza durumunu da düşünerek tasarlanması gerekecektir. Deneysel çalışmada, püskürtme emme manifolduna yapıldığı için güvenlik

açısından püskürtme basıncı düşük tutulmuştur ve bu nedenle enjektör debisi, püskürtme miktarını belirleyen etken olmuştur. LPG enjektörüyle başarılı sonuç alınsa da yeterli debi açısından bizi sınırlandıran faktör olmuştur. Elektronik kontrol ünitesine bağlanan ekran sayesinde ms ve KMA cinsinden püskürtme süresi ve devir izlenmiş, öncelikle gaz keleşi kapalı konumda iken, 1.5 bar hidrojen basıncında püskürtmeye başlanmıştır. Tutuşma başlangıcının; 11.5 ms, 35⁰ KMA, 500 d/dk 'da, motorun hidrojen ile çalışmaya başlamasının ise, 13.5 ms, 54⁰ KMA, 665 d/dk 'da gerçekleştiği görülmüştür.

Bir hidrojen motorunda, motorun yağ yakması göz önüne alınmadığı sürece CO, HC ve CO₂ emisyonları bulunmamakta, sadece NO_x emisyonu görülmektedir. Deney sonrasında farklı devir ve yüklerde, 1 bar püskürtme basıncı ve 25ms püskürtme süresi için moment ve güç değerleri belirlenirken emisyon ölçümleri de yapılmış, farklı devir ve yük değerleri için 82-370 ppm değerleri arasında NO_x emisyonu görülmüştür.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada, motorda yapılacak bazı ufak modifikasyonlarla motorun hidrojenle çalıştırılabileceği görülmüştür. Fakat yaygın olarak araç üzerinde hidrojenin yakıt olarak kullanılabilmesi için, öncelikle hidrojen üretim maliyetleri düşürülmeli, araç üzerinde depolama ve güvenlik önlemleri gibi konularda çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca motor püskürtme sistemi, ateşleme sistemi, soğutma ve yağlama sistemlerinde, araç üzerinde uzun süre kullanımda problem oluşturmayacak şekilde yeni tasarımlar yapılmalıdır.

Bahsedilen mevcut zorluklara rağmen, egzoz emisyonları açısından üstün olması ve yenilenebilir olmasından dolayı sınırsız olması, hidrojeni geleceğin yakıtları arasında ilk sırada tutacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Soruşbay C., “Hidrojeni Doğrudan Yakıt Olarak Kullanan Taşıt Uygulamaları”
- [2] Acaroğlu M.,2003 , “Alternatif Enerji Kaynakları”
- [3] www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/yenilenebilen_enerji_kaynaklari.htm
- [4] Hidrojen Enerjisi Dergisi, 12 şubat 2006
- [5] www.bmwteam.net/veribank/teknikbilgi/Hidrojen.asp
- [6] Sarıca T.,1988, “Hidrojenin Motorlara Yakıt Olarak Kullanılmasında Sağlanan Avantajlar, Uygulama Teknikleri, Karşılaşılan Problemler ve Geleceğe Yönelik Değerlendirme”, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] BAYKARA, Z.Sema, “Sudan Hidrojen Üretimi ve Enerji Sektöründe Hidrojen”, YTÜ, Kim.Müh.Böl., İstanbul
- [8] Hatipoğlu, A., 2004,“Güneş Enerjisi İle Hidrojen Üretimi”, Bitirme Tezi,Y.T.Ü. İstanbul.
- [9] www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/hirojen_arabada_kullanimi.htm
- [10] www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2003/agustos/makale_enerji.htm
- [11] Engin C., 2001, “Alternatif Enerji Kaynaklarıyla Taşıt Tahriki”, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Temelci F.E., 2000, “Taşıtlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [13] www.hidrener.com

- [14] BMW, Clean Energy Technical Information.
- [15] Albay, A. O., 1993, “Fakir Karışımli Benzin Motorlarında Hidrojen veya Doğal Gazın Ek Yakıt Olarak Kullanılması”, İTÜ Fen Bilimleri Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [16] Soruşbay C., Arslan E., “Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlarda Yanma Performansı”, Mühendis Ve Makine Dergisi, Cilt:29, Sayı:339.
- [17] Ültanır, M.Ö., 1994, “Hidrojen Enerjisi ve Türkiye'de Hidrojene Geçiş Sorunları”, Türkiye 6.Enerji Kongresi, Teknik Oturum Tebliğleri, Cilt:1, İzmir.
- [18] Blarigan P.Van, Keller J.O., “A Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engine Designed For Single Speed/Power Operation”, Int. J. Hydrogen Energy.
- [19] Bosch Automotive Handbook 6th Edition, “Engines Fueled By Hydrogen”
- [20] Ünalın, S. “Alternatif Enerji Kaynakları, Ders Notları”
- [21] Yazıcıoğlu M.T.,1995, “Taşıtlarda Alternatif Tahrik ve Yakıt Tiplerinin Etüdü”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Gulati Rohit, Gupta P.K., Das L.M., “ A Comparative Evaluation of the Performance Characteristics of a Spark İgnition Engine Using Hydrogen and Compressed Natural Gas as Alternative Fuels”, Int. J. Hydrogen Energy.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	09.05.1981	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1992-1999	Cağaloğlu Anadolu Lisesi
Lisans	1999-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2005-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Mak. Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2004-2005	EZ-CAM Yazılım Ltd. Şti.
2005-2005	Yıldız Kalıp A.Ş.
2005-Devam ediyor.	Uzel Makina Sanayi A.Ş.