

T.C.
BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJENİN
KATALİZÖR OLARAK KULLANIMI**
Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan:

Murat Çağrı SÜCÜLLÜ

İstanbul, 2017

T.C.
BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJENİN
KATALİZÖR OLARAK KULLANIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan:

Murat Çağrı SÜCÜLLÜ

Öğrenci No:

140893005

Danışman:

Prof. Dr. Ahmet CİHAN

İstanbul, 2017

YEMİN METNİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “İçten yanmalı motorlarda hidrojenin katalizör olarak kullanımı ” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın için kullandıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım. 10/04/2017



...

Aday: Murat Çağrı SÜCÜLLÜ

T.C.
BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ SAVUNMA SINAVI SONUÇ TUTANAĞI




Beykent Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

SÜCÜLLÜ

Aşağıda tez adı belirtilen yüksek lisans öğrencisi, 140893.005.no'lu Murat Çağrı'nın 10/8/2017 tarihinde yapılan tez savunma sınavı¹ sonucunda, 60. dakika süreyle sunduğu ve savunduğu tezi hakkında² oybirliğiyle, KABUL kararı verilmiştir.

Bilgilerinize saygılarımızla arz ederiz.

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Programı : Makine
Tez Başlığı³ : İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojenin Katalizör Olarak Kullanımı

Tez Sınav Jürisi	Öğretim Üyesi	İmza
Danışman	Prof. Dr. Ahmet CİHAN	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Osman SİMAV	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Dincer AKAL	

¹ Jüri üyeleri söz konusu tezin kendilerine teslim edildiği tarihten itibaren en geç bir ay içinde toplanarak öğrenciyi tez savunma sınavına alır. Belirlenen günde yapılamayan jüri toplantısı, katılanların hazırladığı bir tutanakla enstitü yönetimine bildirilir. Bu durumda jüri en geç onbeş gün içinde toplanarak adayı tez savunma sınavına alır. Tez savunma sınav süresi en az 45 dakikadır. Yüksek lisans tez savunma sınavı, tez çalışmasının sunulması ve bunu izleyen soru-yanıt bölümlerinden oluşur ve dinleyiciye açıktır. (Beykent Lisansüstü eğitim ve Öğretim Yönetmeliği-Madde30-3)

² Tez sınavının tamamlanmasından sonra jüri, tez hakkında "kabul", "düzeltme" veya "red" kararı verir. Jüri başkanı, jüri üyelerince imzalanmış sınav tutanağını, tez sınavını izleyen üç gün içinde ilgili enstitü yönetimine teslim eder. Tezi başarısız bulunan öğrencinin Enstitü ile ilişkisi kesilir. Tezi hakkında düzeltme kararı verilen öğrenci en geç üç ay içinde gerekli düzeltmeleri yaparak ve yönetmelikte belirtilen usullere uygun olarak tezinin aynı jüri önünde yeniden savunur. Bu savunma sınavında da tezi kabul edilmeyen öğrencinin enstitü ile ilişkisi kesilir. (Beykent Lisansüstü eğitim ve Öğretim Yönetmeliği-Madde30-4)

³ Heride doğabilecek aksaklıkların engellenmesi için tezin başlığının yazılması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet CİHAN 'a, ilgisini ve önerilerini göstermekten kaçınmayan Beykent Üniversitesi tezli yüksek lisans programında görev alan Y. Doç. Dr Osman SİMAV hocama, tezimde yol gösterici olan ve hiçbir yardımını esirgemeyen Y. Doç. Dr. Dinçer AKAL hocama ve diğer eğitmenlerime sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tezimde bulunan, hidrojenin katalizör olarak kullanılması deneyinde destek olan "Bemser Oto Servis" firmasına,

Çalışmalarım boyunca yardımını esirgemeyen Uludağ Üniversitesi Kütüphanesi çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan eşim Aslıhan SÜCÜLLÜ 'ye, aileme, arkadaşlarıma ve çalışmanı olduğum Ayza-Mızrak Ahşap İşleme Makineleri A.Ş firmasına sonsuz teşekkür ederim.

İstanbul, 2017

Murat Çağrı SÜCÜLLÜ

Adı ve Soyadı : Murat Çağrı SÜCÜLLÜ
Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet CİHAN
Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans, 2017
Alanı : Makine Mühendisliği
Anahtar kelimeler : Hidrojen yakıtı, içten yanmalı motor, yenilebilir enerji, düşük emisyon,

ÖZ

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA HİDROJENİN KATALİZÖR OLARAK KULLANIMI

Bu çalışmada, hidrojenin element olarak yapısı, üretilmesi, depolanması ve yanma özellikleri daha önce yapılmış olan akademik çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin derlenmesi sonucu, içten yanmalı motorlu araçlarda katalizör olarak kullanılması için belirli yöntemler ve araştırmaları ortaya koymuştur. Enerji kaynağı olarak hidrojen kullanımının çevresel faydaları ve enerji verimi değerleri diğer yakıt türleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu karşılaştırmalar sonucunda hidrojenin avantajları ve dezavantajları açıklanmıştır.

Name and Surname : Murat Çağrı SÜCÜLLÜ
Supervisor : Prof. Dr. Ahmet CİHAN
Degree and Date : Master , 2017
Major : Mechanical engineering
Key Words : Hydrogen fuels, Internal combustion engines,
Renewable energy, Low environmental impact and
emission

ABSTRACT

USE OF HYDROGEN AS CATALYST IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

In this study, specific methods and researches are mentioned for the use of hydrogen as an element and its production, storage and combustion characteristics are evaluated and used as catalyst in internal combustion motor vehicles. The environmental benefits of using hydrogen as energy source and energy efficiency values are compared with other fuel types. In addition, these comparisons interpreted the advantages and disadvantages of hydrogen.

İÇİNDEKİLER

ÖZ.....	i
ABSTRACT	ii
TABLOLAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
KISALTMALAR.....	vii
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM HİDROJENİN ÜRETİMİ, DEPOLANMASI VE TAŞITLARDAKİ KULLANIMI

1. HİDROJEN ELEMENTİNİN ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	1
1.1. Hidrojen Elementinin Özellikleri.....	2
1.2. Hidrojen Üretilmesi İçin Kullanılan Yöntemler.....	2
1.2.1. Buhar İyileştirme Yöntemi İle Hidrojen Üretimi.....	3
1.2.2 Atık Gazların Saflaştırılması Yöntemi İle Hidrojen Üretimi.....	3
1.2.3 Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretimi.....	3
1.2.4 Fotosüreçler Yardımı İle Hidrojen Üretimi.....	4
1.2.5 Termo-Kimyasal Yöntemler İle Hidrojen Üretimi.....	5
1.2.6 Verimi Düşük Diğer Yöntemler İle Hidrojen Üretimi.....	5
2. HİDROJENİN DEPOLANMASI.....	7
2.1. Hidrojenin Gaz Olarak Depolanması	8
2.2. Hidrojenin Sıvı Olarak Depolanması	11
2.3. Hidrojenin Katı Olarak Depolanması	12

İKİNCİ BÖLÜM İÇTEN YANMALI TAŞITLARDA HİDROJENİN KULLANIMI

1. İÇTEN YANMALI MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE TERİMLER.....	14
2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN YAKIT ÇEŞİTLERİ.....	19
3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA EMİSYON DEĞERLERİ VE ÖNEMİ.....	19
3.1 EURO Emisyon Standartları.....	21
3.2 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması ve Emisyon Verileri.....	23
4. HİDROJENİN TAŞITLARDA KULLANIM YÖNTEMLERİ.....	24
4.1 Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı.....	24
4.2 Hidrojenin Yakıt Katalizörü Olarak Kullanılması.....	24
5. HİDROJENİN YAKIT OLARAK YANMA ODASINA AKTARIM YÖNTEMLERİ	25
5.1 Gaz Fazında Hidrojen Yakıtlı Motor Yanma Çevrimi	25
5.2 Likitleştirilmiş Hidrojenin Birincil Yakıt Olarak Yanma Odasına Aktarımı.....	25
5.3 Yüksek Basıncılı Gaz Fazında Bulunan Hidrojenin Yanma Odasına Enjeksiyon İle Aktarımı.....	26
6. HİDROJENİN YANMASI SIRASINDA OLUŞAN PROBLEMLER.....	26
6.1 Geri Tutuşma ve Erken Tutuşma Sorunu.....	27

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM İÇTEN YANMALI MOTORLU TAŞITLARDA HİDROJEN KULLANIMININ FAYDALARI VE UYGULANABİLİRLİĞİ

1. DEĞİŞKENLER VE YÖNTEM	29
1.1 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılma Yöntemleri İçin Literatür ve Kaynak Taraması	29
1.2 Hidrojenin Katalizör Olarak Kullanılması Yöntemi.....	30

2. UYGULAMALAR	30
2.1 Hidrojen Katalizörlü Olarak Kullanılması Deney Düzeniği.....	30
2.2.1 Hidrojenin Katalizör Olarak Kullanılması Deney Sonuçları	34
SONUÇ	47
KAYNAKÇA	48



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 1: Hidrojen Üretim Yöntemleri	6
Tablo 2: Hidrojenin farklı depolama şartlarında depolama kapasiteleri, hacimsel yoğunluğu ve enerji yoğunluğu.....	7
Tablo 3: Metal hidrürlerin depolama kapasitesi.....	13
Tablo 4 : Yakıt Karşılaştırma Tablosu	19
Tablo 5: BMW 3.18i standart 1993 model araç bilgileri.....	39
Tablo 6: 1993 model benzin yakıtlı BMW 3.18i tork değişimi.....	40
Tablo 7: 1997 model benzin yakıtlı Ford Mondeo 1.8i fabrika çıkış araç bilgileri ..	41
Tablo 8: 1997 Ford Mondeo 1.8i ölçüm tork değişimi.....	42
Tablo 9: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat araç bilgileri.....	43
Tablo 10: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat tork değişimi.....	44
Tablo 11: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner araç bilgileri.....	45
Tablo 12: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner tork değişimi.....	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1: Elektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi Şeması.....	4
Şekil 2: Termo-Kimyasal Yolla Hidrojen Üretimi Şeması.....	5
Şekil 3: MAN Firmasının Ürettiği Dizel Prensipli H-2876-66 Motoru	9
Şekil 4: Basınçlı Gaz Olarak Hidrojenin Depolanması Örnek Tank Yerleşimi	11
Şekil 5: Hidrojenin Sıvı Olarak Depolanması	11
Şekil 6: Metal-Hidrid ile H ₂ Depolanması Örneği.....	13
Şekil 7: Volümetrik Verim ile Devir Sayısı Arasındaki İlişki.....	18
Şekil 8: İçten Yanmalı Motorlarda Girenler ve Ürünler Şeması.....	20
Şekil 9 : Benzinli Araçlar İçin EURO Emisyon Kısıtlamaları.....	21
Şekil 10 : Dizel Araçlar İçin EURO Emisyon Kısıtlamaları.....	22
Şekil 11: Silindirlere %5-10-15 oranında hidrojen gazı ilavesi sonucu CO emisyonu grafiği.....	23
Şekil 12: Silindirlere %5-10-15 oranında hidrojen gazı ilavesi sonucu HC emisyonu grafiği.....	23
Şekil 13: Hidrojenin Yakıt Olarak Silindirlere İletilmesi.....	25
Şekil 14: Hidrojen Elektroliz Hücresi Sistem Elemanları.....	31
Şekil 15: 2 farklı kapasiteli HHO cihazı örneği.....	32
Şekil 16: HHO kiti devre şeması.....	35
Şekil 17: HHO kiti çalışma şeması.....	35
Şekil 18: Hava emme borusu H ₂ gazı girişi.....	36
Şekil 19: Ölçüm gerçekleştirilen sistem arayüzü.....	38
Şekil 20: Anlık ölçüm takibi.....	38
Şekil 21: 1993 BMW 3.18i Benzin Yakıtlı Dyno Testi Veri Grafiği	39
Şekil 22: 1993 BMW 3.18i Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği	39
Şekil 23: 1997 model benzin yakıtlı Ford Mondeo 1.8i Dyno Testi Veri Grafiği....	41
Şekil 24: 1997 model benzin yakıtlı Ford Mondeo 1.8i Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği.....	41
Şekil 25: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat Dyno Testi Veri Grafiği.....	43
Şekil 26: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği	43
Şekil 27: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner Testi Dyno Veri Grafiği	45
Şekil 28: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği	45

KISALTMALAR

HHO: Elektroliz İle Hidrojen Üretim Cihazı

L: Litre

mL: Mililitre

Km: Kilometre

m: Metre

h: Saat

VW: Volkswagen

Dyno: Araç Tork ve Beygir Gücü Ölçümü Yapılan Test Platformu

Kit: Sistem

TDI: Turbo Dizel Enjeksiyonlu Motor



GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, fosil yakıtların sonlu bir enerji kaynağı olması ve çevresel olumsuz etkilerinin katlanarak artmasından kaynaklı olarak, alternatif yenilenebilir bir yakıt kaynağı olan hidrojen elementinin üretimi, depolanması, kullanım çeşitleri, sorunları ve çözümleri ile ilgili bir yol haritası oluşturmak ve mevcut yakıt sistemlerine kıyaslayarak etkilerini ve üstünlüklerini otomotiv sektöründe içten yanmalı motorlarda kullanmak üzerine geliştirilmesi için bilgi sağlamaktır.

Deneysel veriler ile desteklenerek hidrojen elementinin içten yanmalı motora katalizör olarak ilave edilmesinin etkileri araştırılmış ve bu alanda yapılan diğer akademik çalışmalar ile bir bütünlük oluşturması amacıyla farklı kaynaklarda ortaya konulmuş olan benzer çalışmalara da yer verilmiştir.

Projenin nicel araştırma kısmında, 1400cc ile 2000 cc motor hacmi aralığında bulunan 5 farklı araca HHO (Elektroliz ile hidrojen üretim cihazı) sistemi uygulanarak belirli veriler elde edilmiştir.

Birinci Bölüm

HİDROJENİN ÜRETİLMESİ, DEPOLANMASI VE TAŞITLARDAKİ KULLANIMI

1. HİDROJEN ELEMENTİNİN ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

1.1.Hidrojen Elementinin Özellikleri

Hidrojen elementi, “1” atom numarası ile periyodik cetvelin 1. sırasında bulunan bir ametaldir. Atmosferimiz şartlarında, doğal bulunduğu hal renksiz, kokusuz, yanıcıdır. H₂ bileşiği ikili apolar kovalent bağlı bir atomik yapıya sahiptir. 1 mol hidrojen elementinin kütlesi, 1.00794 g/mol'dür. Diğer elementlere kıyasla hafiftir. Hidrojen elementi, evrende kütleli olarak %75 oranında yer işgal eder. Buna rağmen dünya atmosferindeki yoğunluğu kütleli olarak, milyonda bir seviyelerindedir. Hidrojen elementi, m.s 1500 yılında keşfedilmiştir. Henry Cavendish bu elementin yanma özelliğine sahip olduğunu farkederek bu alanda çalışmalar gerçekleştirmiştir.(BESERGİL, 2007)

Hidrojen, güneş ve diğer yıldızların yakıt olarak termonükleer reaksiyonlarda kullandığı, ana enerji kaynağıdır. Likit hale -252,77 °C sıcaklığında geçer. Sıvı hale geçtiğindeki hacmi, gaz halindeki hacmine kıyasla 1/700 oranında daha küçüktür.

Hidrojen bir yakıttır ve kullanılan diğer yakıtlara kütleli olarak kıyaslandığında, birim kütle için en yüksek enerji kapasitesine sahiptir.

1 kg hidrojenden üretilen enerjiyi diğer yakıt türleri ile üretebilmek için daha yüksek kütlede yakıt kullanma ihtiyacı vardır. Örneğin; 2,80 kg petrol türevi yakıtlar ve 2,10 kg doğalgaz ancak 1 kg hidrojenin ürettiği enerjiye denk olabilmektedir. Olumsuz yanı ise hacimce kıyaslandığında diğer yakıtlara göre birim enerji için kullanılması gereken hidrojen hacmi yüksektir.(Palmer,David, 1997)

Tüm evrenin enerji kaynağı olan bu elementi, teknolojinin halen birincil yakıt çeşidi olarak kullanamamasının sebebi ise birim enerji başına hacim miktarının büyüklüğü ve bu özellikten dolayı depolama sorununun ortaya çıkmasıdır.

1.2.Hidrojenin Üretilmesi İçin Kullanılan Yöntemler

Alt başlıklarda, temelde kullanılan 5 ana yöntem ve yaygın kullanımı olmayan alt yöntemler açıklanmıştır.

1.2.1.Buhar İyileştirme Yöntemi İle Hidrojen Üretimi

Fosil yakıt kullanılarak, hidrojen üretme metodudur. Çoğunlukla doğalgaz yani metan, hidrojen üretim kaynağı olarak kullanılır. Metan ile su buharı bir araya getirilerek yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altına alındığında karbondioksit ve hidrojen üretir. Elde edilen hidrojenin enerji miktarı, harcanan doğalgazın enerji miktarından daha fazladır. Fakat daha yüksek kapasiteli üretim için, daha yüksek sıcaklığa, dolayısıyla enerjiye ihtiyaç vardır. Bundan kaynaklı olarak, aktarılan yöntemin dönüşüm verimi %65 değerlerinde kalmaktadır.(TEZCAN ÜN, 2010), (KINCAY, AĞUSTOS, AKBULUT, 2008)

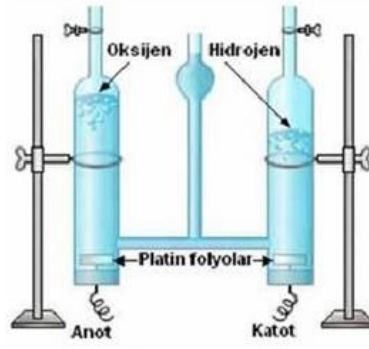
Aktarıldığı üzere, hidrojen üretiminin gerçekleştirilmesi için fosil yakıt kullanımı gerektiğinden, çevresel olumsuz etkileri bulunan bir üretim metodudur.

1.2.2 Atık gazların Saflaştırılması Yöntemi İle Hidrojen Üretimi

Petrol rafinerileri, termik santraller ve kimyasal üretim tesislerinin endüstriyel kullanım sonu atık çıkışlarındaki gaz karışımlarında yüksek oranda hidrojen bulunmaktadır. Bu karışım içerisindeki hidrojen bir takım yöntemler ile ayrılarak elde edilir. Burada elde edilen hidrojen yeniden endüstriyel amaçlar ile kullanılmaktadır. Atık gaz olarak etanol, metan, metanol gibi tekrar yakıt olarak kullanılabilir türler de bulunmaktadır. Aralarında en az yapılandırma sıcaklığına ihtiyaç duyan metanoldür. Bu özellik diğerlerine göre metanolü daha maliyetsiz şekilde ayrıştırabilmeyi sağlamaktadır.(TEZCAN ÜN, 2010),(Gül,2006)

1.2.3 Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretimi

Elektroliz yöntemi, içerisinde elektrolit bulunan sudan, doğru akım geçirilerek suyun hidrojen ve oksijen bileşiklerine ayrılmasıdır. Diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında yöntemin enerji verimi %65 dolaylarındadır. Bu yöntem ile üretilen hidrojen düşük miktar dahi olsa, üretim kaynağı olarak su kullanılması yöntemi cazip hale getirmektedir. Fakat hidrojen üretimi sırasında meydana gelen aşırı gerilimler üretim maliyetinin yükseltmektedir. Üretilen hidrojen miktarının yetersiz kalmasından dolayı metodun gelecekte pazar payı sınırlı görülmüştür. (TEZCAN ÜN, 2010) (KARDAŞ, SOLMAZ, YAZICI, ERBİL)



Şekil 1: Elektroliz Yoluyla Hidrojen Üretimi Şeması (KILIÇ,2005)

Elektroliz ile hidrojen üretiminde kullanılmak üzere tüketilen temel enerji kaynağı elektriktir ve bu sebeple öncelikle elektrik üretimi gereklidir. Elektrik üretimi için kullanılan enerji de hesaba katıldığında elektroliz ile üretilen hidrojenin enerjisi, harcanan toplam enerjinin yarısıdır. Elektroliz işlemi, suya daldırılan elektrolitlere doğru akım verilmesi ile gerçekleştirilir. Saf su iletken özelliğe olmadığından dolayı potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) bileşiklerinden ilave edilerek su iletken hale getirilir.

Yöntemin verimini yükseltmek için elektroliz elektrotu olarak kullanılmak üzere yeni malzeme çeşitleri üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu yöntemde kullanılacak elektrotlar çok fazla bakıma gereksinim duymazlar ve kullanım ömürleri uzundur. (Yalçın ve Ark, 1993)

Elektroliz için elde edilmesi gereken elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi ile tamamen çevreci bir üretim gerçekleştirilebilme imkanı vardır. Güneş ve rüzgar ile elde edilen elektrik enerjisinin kullanılacağı hidrojen elektroliz tesisleri, ihtiyaç duyulacak olan hidrojen miktarını sağlamak için geleceği açık olan ve hidrojen üretiminin sürekliliğini kapalı bir çevrim ile sağlayabilecek yeterlilikte bir yöntemdir. (Yalçın ve Ark, 1993)

1.2.4 Fotosüreçler Yardımı İle Hidrojen Üretimi

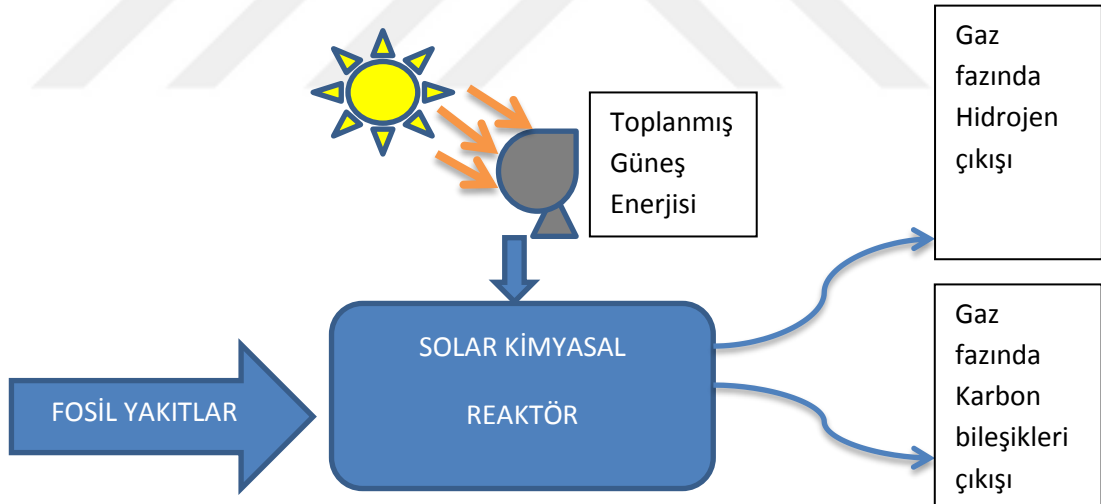
Fotosüreçler, güneşten gelen ışığın enerji kaynağı olarak kullanıldığı biyokütleden hidrojen üretimi sağlayan yöntemlerdir ve üç temel sınıflandırması vardır. İlk fotosüreç yöntemi olan fotobiyolojik yöntem, bitkilerin, çeşitli alglerin ve bakterilerin fotosentez sirkülasyonu ile sağlanır. Fotobiyolojik teknikler ile hidrojen üretiminin verimi %1 ile %5 aralığında kalmaktadır. İkinci fotosüreç ise fotokimyasal yöntemdir. Bu yöntem ise sentetik moleküller ile uygulanıp fotosenteze benzer bir üretim yapar ancak verimi %0.1 civarında kalmaktadır. Bir diğer fotosüreç

olan fotoelektrokimyasal sürecin uygulaması ile yarı iletken malzemelerin güneş ışığı altında kaldığında içerisinde gerilim farklılığı oluşması esasına dayanır. Farkın oluşması ise suyun oksijen ve hidrojen bileşiklerine ayrışmasını sağlayacaktır. (TEZCAN ÜN, 2010)

Verimi çok düşük olan bu hidrojen üretim yöntemi ise, yeterli üretim miktarını sağlayamadığı için şu an ki teknolojik şartlar ile geliştirilemeyen bir yöntemdir.

1.2.5 Termo-Kimyasal Yöntemler İle Hidrojen Üretimi

Sudan hidrojen ve oksijen elde edilmesi suyun 3400K sıcaklığına kadar ısıtıldığı ve bu sayede hidrojen elde edilen doğrudan ısıl bir çevrimdir. Yöntemde yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulması, üretimde harcanan enerjiyi yükselttiği için kullanışlı değildir. Bu yöntemde kullanıldığı birbirini takip eden adımlar için araştırma yapılmaktadır. Ek olarak üretim adımlarından bir veya birkaçında elektroliz yönteminin de entegre edilebildiği hibrit çalışmalar geliştirilmeye çalışılmaktadır. (TEZCAN ÜN, 2010), (Calculating Hydrogen Production Costs, 2003)



Şekil 2: Termo-Kimyasal Yolla Hidrojen Üretimi Şeması(RAISSI, 1996)

1.2.6 Verimi Düşük Diğer Yöntemler İle Hidrojen Üretimi

Radyoliz yöntemi: Nükleer reaktörlerde üretilmiş yüksek enerji içeren parçacıkların çarpışmaları ile su bileşiği, hidrojen atomlarına ve oksijen atomlarına ayırır. Ancak bu atomlar tekrar bir araya gelerek hızlı bir şekilde su bileşiğine dönüştüğü için yöntemin verimi %1 civarındadır. (TEZCAN ÜN, 2010)

Solar hidrojen yöntemi: Fotovoltaik hücrelerin güneş ışığını kullanarak elektrik elde etmesi ve elde edilen elektrik enerjisinin elektroliz yönteminde enerji kaynağı olarak kullanılıp hidrojen üretilmesi yöntemidir. Temel prensibi, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi ile elektroliz gerçekleştirilmesi ve hidrojen üretimi yapılmasıdır.(TEZCAN ÜN, 2010)

Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu: Hidrokarbonların katalitik olmayan kısmi yükseltgenmesi ile hidrojen üretimi yapılan bir yöntemdir. Hidrokarbon kaynağının pompalanabilecek veya sıkıştırılabilecek özellikte olması gereklidir. Fakat yöntem %50 civarında verimli olabilmektedir ve uygulanabilmesi için oksijen kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Açıklanan çevrimin kullanıldığı ticari örnekleri vermek gerekirse: Texaco ve Shell Gazifikasyon süreçleridir. (TEZCAN ÜN, 2010)

Bu yöntemlerin yatırım maliyetleri yüksek olması ve verimlerinin düşük olması tercih edilmesi önünde bir engeldir. Bu engellerin aşılması, gelişen teknolojik imkânlar ile mümkün olabilecektir.

Özetleyecek olursak, hidrojen üretim yöntemlerinin kaynağa ve metoda göre üretimi sonucu çevreye verdiği gazların emisyonları tablo-1 de gösterilmiştir.

Yöntem	Metot	Kaynak	Enerji	Emisyon
Isıl	Buharlı Dönüşüm	Doğalgaz	Yüksek sıcaklıkta buhar	CO, CO ₂
	Termokimyasal su ayrışımı	Su	Nükleer reaktörlerden elde edilen yüksek sıcaklık	Yok
	Gazifikasyon	Kömür, Biyo-kütle	Yüksek sıcaklık ve basınçta su buharı ve oksijen	CO, CO ₂
	Proliz	Biyo-kütle	Orta sıcaklıkta su buharı	CO, CO ₂
Elektro-Kimyasal	Elektroliz	Su	Elektrik(Rüzgar,Güneş,Nükleer)	Yok
	Elektroliz	Su	Elektrik (Kömür, Doğalgaz)	Elektrik üretiminden kaynaklanan emisyon
	Foto elektrokimyasal	Su	Güneş ışığı	Yok
Biyolojik	Foto biyolojik	Su ve alg bakterisi	Güneş ışığı	Yok
	Oksijensiz sindirim	Biyo-kütle	Yüksek ısı	Az
	Fermantatif mikroorganizmalar	Biyo-kütle	Yüksek ısı	Az

Tablo 1: Hidrojen Üretim Yöntemleri (Apak ve Ark, 2009)

Aktarılan yöntemler dışında çeşitli hidrojen üretim teknolojileri vardır. Fakat bu metotların çoğunluğu ya teorik aşamadır yahut verimi çok düşük veya maliyeti çok yüksek sistemlerdir.

2. HİDROJENİN DEPOLANMASI

Hidrojen elementinin depolanması, yakıt olarak kullanımı önündeki en büyük engellerden biridir. Halen çok yüksek enerji kapasitesine sahip bu elementin depolanmasında ideal bir yöntem geliştirilememiş. Üretilen hidrojenin kullanılmayan kısmını depolamak mümkün olsaydı enerji sorunu büyük ölçüde çözülebilirdi. Enerjiyi dolaylı yollar ile depolamanın iki yolu vardır. Birincisi güneş enerjisini fotosentez yolu ile bitkilerde depolamak, ikincisi de hidrojen elde edip depolamaktır. Bu depolama yöntemleri, ihtiyaç anında tekrar yakılarak enerjiye dönüştürülebilir

Depolama Ortamı	Hidrojen Miktarı (ag.%)	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

Tablo 2: Hidrojenin farklı depolama şartlarında depolama kapasiteleri, hacimsel yoğunluğu ve enerji yoğunluğu(ÖZER, 1991)

Normal şartlar altında, hidrojen bileşiği (H₂), gaz halinde bulunduğu için birim hacimde enerji yoğunluğu düşüktür. Fakat kütlece enerji yoğunluğu diğer yakıtlardan çok daha yüksektir. Depolama tekniklerinin önemi burada devreye girmektedir. Daha yüksek kütlede hidrojeni, olabilecek en düşük hacimde depolayabildiğimiz durumda depolama sorunları çözülebilecektir. (ÖZER, 1991)

2.1.Hidrojenin Gaz Olarak Depolanması

Yakıt olarak hidrojen kullanan prototip taşıtlarda, hidrojenin depolanması için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem yüksek basınca dayanıklı çelik tüpler ile hidrojenin depolanması ile uygulanmaktadır. Hidrojenin difüzyon katsayısı çok yüksektir. Çok ufak bir moleküle sahip olduğundan rahatlıkla difüzyona uğrayabilir. Gaz halinde bilinen bütün depolama şekillerinde difüzyon kayıpları oluşturmaktadır. Bu da depolama sırasında bazı sorunlar yaşanmasına sebep olmaktadır. Bu sorunlar haricinde çelik tüplerin araçta oluşturduğu ek ağırlıklar da taşıtın hareket edebilmesi için ihtiyaç duyulan enerji miktarını arttırmaktadır. Kütlesel olarak değerlendirdiğimizde benzinli bir binek otomobilin yakıt deposu 65 litre yani yaklaşık 47 kg benzin dolumu kapasitesindedir. Bu kapasitenin sahip olduğu enerji, 17 kg hidrojenin sahip olduğu enerjiye eşittir. Bu yöntemde hidrojen, normal şartlar altında gaz halinde olduğu için çevre sıcaklığından etkilenmeden taşınabilmektedir. Ayrıca çelik tüp içerisindeki yüksek basınçtan kaynaklı olarak sıvı hale geçen hidrojende bir enerji kaybı söz konusu olmayacaktır. (Temiz Enerji Yayınları Dergisi: Hidrojen Enerjisi, Anonim) (Özer, 1991)

Hidrojenin gaz olarak depolanması yönteminde çoğunlukla 200 ila 250 bar basınç altında ve hacim olarak 50 litreye yakın kapasitedeki silindir biçimli çelik tüplerde hidrojen depolanır. İç basınç 600 bar ila 700 bar değerlerine kadar yükseltilebilmektedir. Hidrojen gazı, 50 litreye yakın kapasitelerde çelik tüplere depolansa elementin özelliklerinden kaynaklı olarak birim hacimde bulunan enerji yoğunluğu çok düşük değerlerdedir. Bir diğer sorun ise yüksek basınç altında bulunan hidrojeni muhafaza edebilmesi için çelik tüplerin kalın cidarlı olmasının gerektiği ve bu tüplerin ağırlığının da olumsuz etkileri bulunmasıdır. Hidrojen gazı, yüksek basınçlarda veya düşük sıcaklıklarda dahi ideal gaz özelliğindedir. Bu özellikten dolayı belirli bir basınç değeri, sıcaklık değeri ve molekül sayısı bilindiğinde, kütlesi ideal gaz kanununa göre hesaplanabilmektedir.(MAT, 2003)

Hidrojenin taşıtlarda yakıt olarak kullanılması için gaz olarak depolandığı durumda, tankın ısınma ve soğutma sistemlerine ihtiyaç duymaması olumlu bir özellik olsa dahi, araca kattığı tank ağırlığının, aracın yakıt sarfiyatını ve motorda üretilmesi gereken tork miktarını arttırmaktadır.

İdeal gaz kanunlarını incelediğimizde:

$$P.V=n.R.T$$

Denklemine göre

n: hidrojenin molekül sayısı,

T: sıcaklık,

R: evrensel gaz sabiti,

Hidrojenden açığa çıkacak enerji;

$$E=m.\Delta H$$

formülü ile hesaplanmaktadır ve bu denklemdeki ΔH hidrojen gazı için 120(MJ/kg) dir. Hidrojenin hacimsel yoğunluğu;

$$W_{Hac} = \frac{E}{V} = \frac{\Delta HP}{RT} = \frac{-n\Delta HP}{-nRT} = \frac{P\Delta H}{RT}$$

olarak hesaplanabilmektedir.

Denklemde görüldüğü gibi basınç yükseldikçe, enerji yoğunluğu da artmaktadır. Fakat basıncın maksimum sınır değerinde, depolama kabının malzeme dayanıklılığı belirleyici olmaktadır. MAN firmasının hidrojen yakıtlı prototip otobüsünde hidrojeni depolamak için, 250 bar iç basınca sahip, 172 litre hacminde çelik tüplerden 9 adet kullanılmıştır.(MAT, 2003)

Uygulamanın yapıldığı aracın cinsinin otobüs olması, araçtaki depolama alanının geniş tutulabilmesini sağladığı için tankların kapladığı alan sorunu aşılmıştır. Fakat binek araçlarda bu tüplerin yerleştirilebileceği alan sıkıntısı yaşanmaktadır.



Şekil 3: MAN Firmasının Ürettiği Dizel Prensipli H-2876-66 Motoru
(KILIÇ, 2005)

MAN firmasının şekil 3 te bulunan motoru kullandığı araç için uyguladığı depolama sistemi 250 bar basınç altında ve 1548 litre hacminde yaklaşık olarak 30 kg ağırlığında hidrojen gazını muhafaza etmektedir. Depolanan gazın enerji kapasitesi bu kütle için 46 Gj değerindedir. Ancak bu gazın 250 bar basınca ulaşana kadar sıkıştırılması için 40 Mj değerinde enerji harcanması gereklidir. Basınçlı tankın ağırlıkça enerji yoğunluğunda tankın üretildiği malzemenin özellikleri etkilidir. Ağırlıkça enerji yoğunluğu çelik kaplarda 0.45 Wh/kg değerindedir. Bu değer ise depolanmış hidrojenin, deponun toplam ağırlığına oranının %1.1 civarında olduğu göstermektedir. Depolama tanklarının yüksek basınçlara dayanıklı olabilmesi için, malzeme olarak çoğunlukla ostenitik çelik veya bir takım alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Ancak bahsedilen depolama tanklarının üretildiği malzemelerin, özgül ağırlığının yüksek olmasından dolayı, tank ağırlıkları yüksektir. Bu tanklarda muhafaza edilen hidrojenin, tüm depolama sistemine ağırlıkça oranı %2-%3 değerleri arasındadır. Kompozit malzeme teknolojisindeki gelişmeler ile bu depolama sorunlarının aşılabilmesi ihtimal dahilindedir. (KILIÇ, 2005)

Kompozit malzeme teknolojisindeki gelişmeler, hidrojenin gaz halinde depolanması yöntemini yeniden gündeme getirmiştir. Karbon kompozit malzeme kullanarak Quantum Technology firması, depolama kabının toplam ağırlığına oranla %11.3 miktarında hidrojen gazı (5.02 kWh/kg) depolayabilme başarısına ulaşmışlardır.(MAT, 2003)

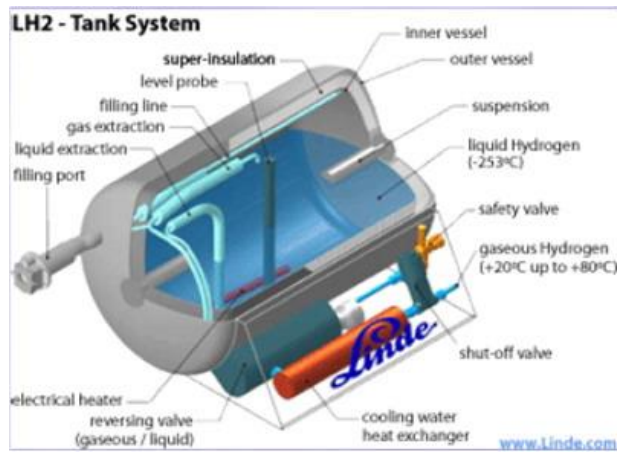
Şekil 4 örneğinde görüldüğü üzere gaz fazında hidrojen depolaması yapılan bir tankın binek araçta işgal ettiği alanın büyüklüğü araç hacmine oranlandığında yaklaşık 1/5 oranına ulaşabilir. Mevcut binek araçlardaki yakıt depolama sistemlerinin yayılı hacim prensibiyle üretilmesi mümkün olursa eğer bu hacim araç tabanına yahut bagaj ve arka yolcu alanının tabanına gizlenerek nispeten daha uygun bir yerleşim sağlanabilecektir.



Şekil 4: Basıncı Gaz Olarak Hidrojenin Depolanması Örnek Tank Yerleşimi

2.2.Hidrojenin Sıvı Olarak Depolanması

Hidrojen bileşimini sıvı halde depolamak ise tanklardaki ağırlık problemlerine çözüm olmaktadır fakat tankın hacminin büyüklüğü artmakta ve hidrojeni likit halde tutmak için soğutma ve izolasyon sistemleri uygulanması tank maliyetini arttırmaktadır. Hidrojenin sıvı halde depolanmasının birtakım yararları ve sakıncaları vardır; Ağırlık olarak nispeten hafif bir depolama şeklidir. Lakin sıvı fazda hidrojeni tutabilmek için tank iç sıcaklığının -253 derece olması gerekliliği vardır. Ve bu gereklilik ekstra bir soğutma sistemine ve bu sistemi çalıştırılacak enerjiye ihtiyaç duymaktadır.



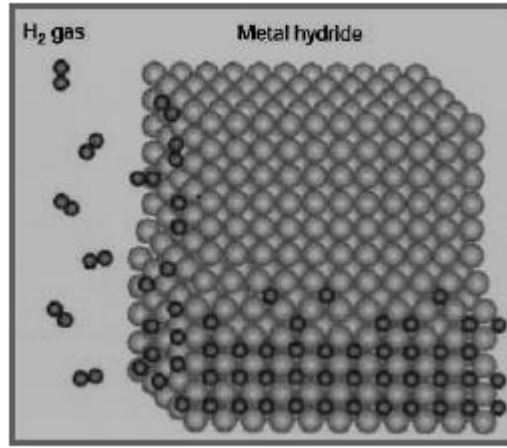
Şekil 5: Hidrojenin Sıvı Olarak Depolanması (linde-engineering)

Hidrojenin sıvı olarak depolandığı tanklarda tank hacminin büyüklüğüne göre %0.06 oranına kadar, tank hacmi küçüldükçe ise %3 oranına kadar 24 saatlik dilimde

buharlaşma gerçekleşebilmektedir. İzolasyonun kalitesi bu kayıpları dūřürebilmektedir. Bu yüzden sıvı halde depolama yapılan bu tanklarda bir kaç farklı izolasyon metodu uygulanmaktadır. Bu metotlar aynı anda uygulanan buhar ile soğutulan radyasyon kalkanı ile ışınım izolasyonu, vakum ile taşınım izolasyonu ve çok katlı ısıl izolasyon metotlarıdır. Işınım ve taşınımdan kaynaklanan kayıplar için vakum izolasyonu uygulanmaktadır. Taşınımdan kaynaklanan ısı transferinin oluşturduğu kayıp depoda bulunan gaz basıncı ve gaz yoğunluğu ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Bir diğer ısı transferi çeşidi olan iletim ile ısı transferi moleköl seviyesinde bir ısı transferi çeşidi olduğundan, ısı kaybı oluşan ortamda bulunan madde miktarı dūřürüldüėünde bu kayıp azalabilmektedir.(MAT, 2003).

2.3.Hidrojenin Katı Olarak Depolanması

Bu yöntemde, depolama tankı görevini metal hidritler olarak tanımladığımız grupların, kimyasal olarak hidrojen ile baė oluşturması metodu ile bu katı gruplar üstlenmektedir. Diėer üç metal hidrit çeşidi arasında, magnezyum-nikel çifti, en yüksek miktarda hidrojen depolama kapasitesine sahip olmasına rağmen, kullanılması gereken miktarda hidrojeni taşımak için ağırlık olarak taşıta 500kg civarında bir ilave yüke sebep olmaktadır. İşletme sorunu olarak karşımıza çıkan ise, metal hidrite bağlanmış olan hidrojenin tekrar koparılabilmesi için metal hidrite 250°C sıcaklığına ulaşana kadar enerji verilmesi gerekliliğidir. Burada gereken enerji, araçta bulunan egzoz sistemindeki yüksek sıcaklıktaki gazların enerjisi kullanılarak karşılanabilmektedir ancak araç motorunun ilk hareket haline geçmesi sırasında dūřük sıcaklıkta olması ve yeterince yüksek sıcaklıkta bir egzoz gazı oluşmaması ikinci bir ısıtıcı sistemin entegrasyonuna ihtiyaç duymakta sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 6: Metal-Hidrid ile H₂ Depolanması Örneği (RAISSI T, 1996)

Alaşım	Hidrojen Depolama Kapasitesi (%)	Desorpsiyon Basıncı (Bar)	Desorpsiyon Sıcaklığı (T)	Reaksiyon I (kJ/mol)
MgH ₂	7.6	1.0	290	-74.5
Fe _{0.8} Ni _{0.2} TiH ₆	5.5	1.0	80	---
Mg ₂ NiH ₄	3.6	1.0	250	-64.5
Ti _{0.9} Zr _{0.1} Mn _{0.15} V _{0.2} Cr _{0.4} H _{3.2}	2.1	9.0	20	-29.3
Ti _{0.98} Zr _{0.02} V _{0.45} Fe _{0.19} Cr _{0.05} Mn _{1.5} H _{3.4}	2.1	10.0	24	
TiFeH _{1.9}	1.8	10.0	50	-23.0
TiFe _{0.85} Mn _{0.15} H _{1.9}	1.8	5.0	40	
TiMn _{1.5} H _{2.47}	1.8	7.0	20	-28.5
Ti _{0.8} Zr _{0.2} Cr _{0.3} Mn _{1.2} H _{3.0}	1.8	5.0	20	-28.9
Ti _{0.8} Zr _{0.2} Mn _{1.8} Mo _{0.3} H _{3.6}	1.7	≈ 58	20	-7.0
MmNi _{4.5} Mn _{0.5} H _{6.6}	1.5	≈ 58	50	-4.2
LaNi ₅ H _{6.7}	1.4	≈ 58	50	-7.2
MmNi ₅ H _{6.3}	1.4	493	50	-6.3
LaNi _{4.6} Al _{0.4} H _{5.3}	1.3	≈ 29	80	-9.1
TiCoH _{1.4}	1.3	≈ 15	130	-1.38

Tablo 3: Metal hidrürlerin depolama kapasitesi(RAISSI, 1996)

Tablo 3'te çeşitli alaşımların depolama kapasiteleri yüzdesel olarak verilmiştir. Depolama kapasitelerinin yüzdesel verim olarak düşük olması alaşım kütlelerinin miktarını, depolanmak istenen hidrojen kütlesi oranında yükseltmektedir.

İkinci Bölüm

İÇTEN YANMALI MOTORLU TAŞITLARDA HİDROJENİN KULLANIMI

1. İÇTEN YANMALI MOTORLARIN ÇALIŞMA PRENSİBİ VE TERİMLER

İçten yanmalı motorların temel çalışma prensibi, motor içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucu elde edilen enerjinin, mekanik enerjiye dönüştürülmesidir. (DENİZ, 2008)

İçten yanmalı motorlarda yaygın kullanım pistonlu tip modellerden oluşmaktadır. Bu pistonlu tip modeller otto ve dizel çevrimleri ile çalışmakta ve yanma reaksiyonundan elde edilen yüksek basıncın piston yüzeyini itmesi ile mekanik hareket meydana getirmektedir. Bu hareket krank ve biyel elemanlarını tahrik ederek dönme hareketi meydana getirmektedir. Wankel çevrimi ile çalışan rotary motorlar ise dönme hareketini, yanma odasındaki basınç ile motor içerisinde dönel hareket yapan bir rotor sayesinde meydana getirir. İçten yanmalı motorların pistonlu motorların, diğer motor tekniklerine göre avantajları;

- Diğer motor teknolojilerine göre verimleri daha yüksek olmaktadır.

Örnek olarak;

Dizel motorunun toplam verimi: 0.40-0.50

Benzin motorunun toplam verimi: 0.20

LPG motorunun toplam verimi: 0.16

değerlerindedir.

- Kimyasal enerjinin, mekanik enerjiye dönüştürülmesi çevrimi kompakt bir sistem içerisinde gerçekleştiği için ek enerji sistemlerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

- Yakıt sarfiyatı kıstas alındığında ekonomik olduğu söylenebilir. Üretilmesi amaçlanan birim güç için kullanılan yakıt miktarı diğer motor tekniklerine kıyaslandığında daha düşüktür.

- Bu motorların ilk hareketi gerçekleştirme süreleri, diğer termik motor tekniklerine göre daha kısa sürmektedir.

Ancak yukarıda açıklanan olumlu özellikleri dışında, olumsuz özellikleri de vardır;

- Yapılandırma ve teknolojik geliştirmeler göz önüne alındığında karmaşık sistemlerdir.

- Üretilmesi için kullanılan malzemelerden dolayı, maliyetleri yüksektir.

- Yanma kalitesi yüksek ve tortu oluşturma kapasitesi düşük yakıtlara gereksinimi vardır.

Ancak bu olumsuz özelliklerin önüne geçilebilmesi için, gelişen teknoloji ve elektronik sistemlerin bu tip motorlara entegrasyonu ile motorların verimleri yükseltilebilmektedir. Uygulamalar sonucunda bu tip motorlarda en yüksek verimler sağlanmıştır. Mevcut sisteme kıyasla daha iyi yanma ve daha iyi çevrim faktörleri ile bu tip motorlar geliştirilebilme olasılığına sahiptir. Bu geliştirmeler gerçekleştirilirse düşük miktarda yakıt sarfiyatı ile daha yüksek performanslı motorlar üretilebilir. Ayrıca atık gazlarda bulunan enerjinin geri dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi, yüksek devir sayılarına bağlı olarak motor ebatlarının küçülmesi, sistemde ağırlıkların azaltılması için yeni malzeme türlerinin kullanılması ve daha yüksek enerji kapasitelerine sahip yeni yakıt türlerinin kullanılması gibi isteklerin uygulanabilirliği konusunda ise araştırmalar yapılmaktadır.(DENİZ, 2008)

Pistonlu motorlarda üretilebilecek güç 60.000 BG değerine kadar çıkabilmektedir. Motorun, krank milinde ulaşılabilen devir sayıları ise 90 ila 7500 devir/dakika değerlerine hatta daha yüksek değerlere çıkarılabilmektedir. Bu motorların yaygınlaşma sebeplerinden birkaçı ise kullanım kolaylığı, bakım kolaylığı, işletme maliyetinin düşüklüğü ve ömürlerinin uzunluğu olarak farklı amaçlarda kullanıma hızlı entegre edilebilme özelliklerinden dolayıdır. Çoğunlukla taşıtlarda, pompalarda, jeneratörlerde tahrik mekanizması olarak kullanılmaktadırlar.(DENİZ, 2008)

Motorların kullanılmasının ana nedeni, güç üretme ihtiyacıdır. Güç ise, birim zamanda yapılan iş olarak adlandırılır.

Güç formülü:

$$\text{Güç (kg.m/s)} = \text{İş} / \text{Zaman} = \text{Kuvvet} \times \text{Yol} / \text{Zaman}$$

Bir motorun iş yapabilme hızı ise beygir gücü ile ölçülmektedir.

Beygir gücü (BG) 'nün tanımı ise 1 saniyelik süre içerisinde yapılan 75 kg.m değerinde iştir.

Beygir gücü biriminin diğer iş birimleri ile dönüşüm denklemleri aşağıdadır;

$$1 \text{ BG} = 75 \text{ kg.m/sn}$$

$$1 \text{ BGS} = \text{Beygir Saat} = 1 \text{ BG} \times 1 \text{ saat} (3600\text{sn}) = 75 \text{ (kg.m/sn)} \times 3600 \text{ (sn)} \\ = 270000 \text{ (kg.m)}$$

$$1 \text{ BG} = 0,736 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ BG}$$

$$1 \text{ kCal} = 427 \text{ kg.m}$$

$$1 \text{ BGS} = 632 \text{ kCal}$$

(ÇELİK, Ders Notları)

Bir motorun momenti ise o motorun iş yapabilme yetkinliğini belirtmektedir. Tanımlamak gerekirse, belli uzaklıktaki bir kuvvetin, dönme ekseninde oluşturduğu etki olarak tarif edilmesi mümkündür.

$$2 \times \pi \times M = W_e = P_{em} \times V_h / i$$

Bu denklemde belirtilen;

M = Moment

W_e = Efektif İş

V_h = Strok Hacmi

i = Bir çevrimin tamamlanması için gerekli olan dönüş sayısıdır.

4 stroklu motor için bir çevrim iki kez dönüş yapar, yani $i=2$ ' dir.

Bu parametreyi denklemde yerine yerleştirdiğimizde;

$$2 \times \pi \times M = P_{em} \times V_h / 2$$

$M = (P_{em} \times V_h) / (4 \times \pi)$ formülü elde edilir.

2 stroklu bir motor için ise bir çevrim bir kez dönüşte tamamlanır, yani $i=1$ ' dir. Bu parametreyi denklemde yerine yerleştirdiğimizde;

$M = (P_{em} \times V_h) / (4 \times \pi)$ formülüne ulaşılır.

Günümüz teknolojisindeki otomobil motorlarında 4000 ila 6000 d/d değerleri aralığında, 200 ila 300 N.m değerleri arasında moment elde edilebilir. (DENİZ,2008)

i= Bir çevrimin tamamlanması için gerekli olan dönüş sayısı,

n= Motorun dakikada devir sayısıdır.

$$\hat{W} = W \times n / i$$

$$\hat{W} = 2 \times \pi \times M \times n / i$$

$$\hat{W} = (0,5 \times i) \times P_{im} \times A_p \times U_p$$

$$\hat{W} = P_{im} \times A_p \times U_p / 4 \text{ (4 stroklu motor denklemi)}$$

$$\hat{W} = P_{im} \times A_p \times U_p / 2 \text{ (2 stroklu motor denklemi)}$$

Yukarıdaki formülde;

W = Çevrim Başına Yapılan İş

A_p = Piston Alanı

U_p = Ortalama Piston Hızı ($U_p = 2 \times S \times n$; S: Strok ; n: devir sayısı)

(DENİZ, 2008)

Güç için yapılan tanımlarda, birkaç farklı güç türünden bahsedilebilir. Bunların isimleri efektif güç, emme gücü, indike güç, sürtünme güçleridir.

Ek olarak;

$$\hat{W}_e = \eta_m \cdot W_i$$

Bir motorun gücü, silindir sayısına göre birkaç watt değeri ile binlerce watt yüksekliğinde bir değere sahip olabilir. Günümüz teknolojisine ait otomobillerin motorlarında 50 ila 300 beygir gücü hatta daha fazlasına ulaşılabilir. Moment olarak tanımladığımız parametre ve güç, hızın fonksiyonudur. Aralarında şöyle bir bağlantı vardır; düşük hızlarda moment motorun krank milindeki hızın artması ile yükselişe geçmektedir, motor devrinin belirli bir limiti aşması sonrasında ise moment en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu durum oluştuktan sonra indike güç motorun hızı ile doğru orantılı olarak yükselmektedir. Efektif güç olarak tanımladığımız parametre ise bir limit noktasına kadar yükselir ve bu limit noktasından sonra düşme eğilimi gösterir. Bu düşüş, hız belirli bir değere yükseldiğinde, maksimum bir limitten sonra sürtünmelerden kaynaklanan kayıpların yükselmesinden dolayı oluşmaktadır. Bir çok otomobilin motor karakteristiğinde, efektif güç maksimum limitine 6000 ila 7000 devir/dakika değerlerinde erişebilmektedir. Ulaşılan efektif gücün yükseltilebilmesi için motor stroku, motor devri, ortalama efektif basınç parametrelerinde yükseltme yapılması gereklidir. Strok büyüdüğünde harcanan yakıt miktarı yükselmektedir. Bu durum da göz önünde bulundurulduğunda günümüz teknolojisinin otomobil motorlarının tasarımları, yüksek hızlara ulaşan ancak küçük ve kompakt gövdelere sahip olma eğilimindedir. Ortalama efektif basınç olarak bahsi geçen parametre ise turbo benzeri sistemler ile silindir içerisine aşırı doldurma yönteminin uygulanması ile yükseltilebilmektedir.(ÖZ, BORAT, SÜRME, 2013)

Motorun emme kabiliyetini hidromekanik, termik ve motorun sahip olduğu silindir hacmi, piston uzunluğu, piston çapı gibi konstrüktif öğeler direkt olarak etkiler. Emme zamanında silindir içerisine alınan karışımın miktarı, motordan elde edilebilecek iş değerini belirleyici olacaktır. Burada elde edilecek olan iş, ne kadar yüksek olur ise motor gücünü de doğru orantılı olarak etkileyecektir. Bu performansın sağlanabilmesi için silindir içerisine alınan karışımı olabilecek en doğru oranda ve en yüksek miktarda motorun emmesi sağlanmalıdır. Burada bahsedilen doldurma parametresi ise, volümetrik verim olarak adlandırılır. (ÖZ, BORAT, SÜRME, 2013)

$$\eta_{vol} = L_{ger} / L_o$$

Burada ;

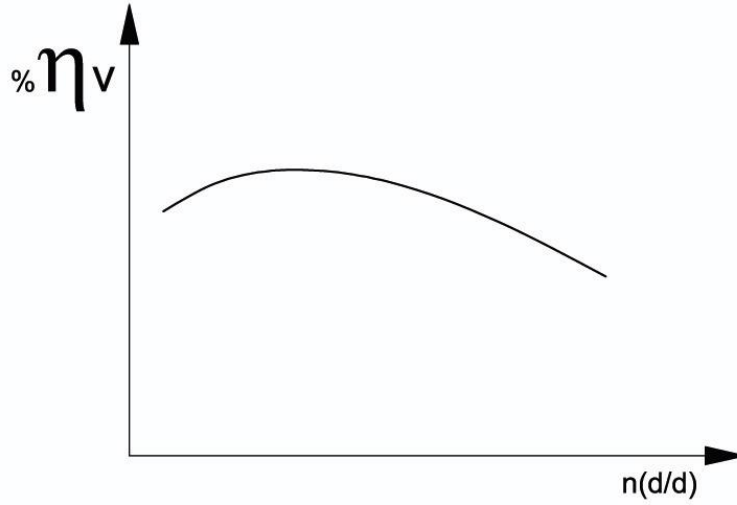
vol η – volümetrik verim

L_{ger} - Emme zamanında silindir içersine gerçek değerde alınan maksimum taze karışım miktarıdır.

L_o - Normal çalışma şartlarında, silindir içersine alınabilecek en yüksek taze karışım miktarıdır.

(ÖZ, BORAT, SÜRME, 2013)

Volümetrik verim silindir içersine alınan, yakıt-hava karışımının miktarına göre değişmektedir. Volümetrik verimin ayrıca, motorun devir sayısına ve motor emmeve egzoz sisteminde oluşan hidrolik kayıp miktarını direkt olarak etkilemektedir. Motor devir sayısının etkilenmesi sonucu, volümetrik verim de etkilenecektir.(ÖZ, BORAT, SÜRME, 2013)



Şekil 7: Volümetrik verim ile devir sayısı arasındaki ilişki
(DENİZ,2008)

Şekil 7’de bulunan grafikten de görülebildiği gibi motorun devir sayısı yükseldikçe volümetrik verim düşmektedir. Devir sayısındaki yükselme sonucu, emme ve egzoz sisteminde hidrolik kayıplar oluşmaktadır ve bu durum ise volümetrik verimin azalmasına sebep olmaktadır.(DENİZ,2008)

2. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN YAKIT ÇEŞİTLERİ

Benzin, dizel ve LPG yakıtlı araçlar seri üretim olarak ulaşılabilen en yaygın araç çeşitleridir. Lakin bu fosil yakıtlı araçların verimlerini fiyat ve performans kriterlerine göre analiz ettiğimizde fosil yakıt azaldıkça bu tip araçların işletme maliyeti yükselecek ve yakıt pahalılığından kullanılamaz duruma geleceklerdir. Bu yüzden yenilenebilir yeni yakıt çeşitlerine olan ihtiyaç günden güne artmaktadır.

Hidrojen elementinin, yaygın kullanılan diğer iki fosil yakıt olan metan(LPG) ve benzin ile kıyaslanmasının tablosu, tablo 4 tedir.

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk, (kg/m ³)	4,40	0,65	0,084
Hava İçindeki Difüzyonu (cm ³ /s)	0,05	0,16	0,61
Sabit Basınçta, Özgül Isısı (J.g/K)	1,2	2,22	14,89
Havada Ateşlenme Sınırı (%hacim)	1,0-7,6	5,3-15,0	4,0-75,0
Havada Ateşlenme Enerjisi (MJ)	0,24	0,29	0,02
Ateşlenme Sıcaklığı (C°)	228-471	540	585
Havada Alev Sıcaklığı (C°)	2197	1875	2045
Patlama Enerjisi (g.TNT.k/J)	0,25	0,19	0,17
Alev Yayılması (Emissivitesi), (%)	34-42	25-33	17-25

Tablo 4 : Yakıt Karşılaştırma Tablosu (Varınca K)

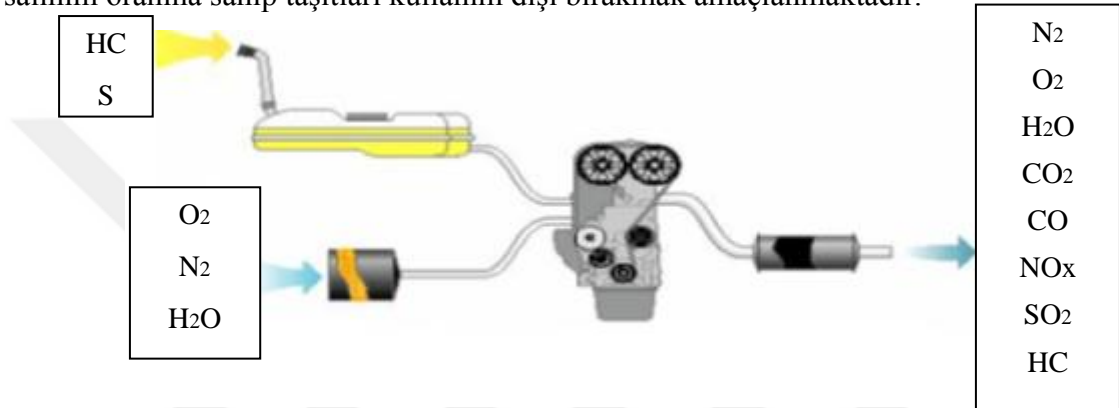
Ekteki tabloyu yorumladığımızda, hidrojen elementinin 3 temel avantajı ile karşılaşıyoruz. Hava içindeki difüzitesinin %61 oranında olması sebebiyle, bulunduğu ortama homojen ve hızlı dağılabilmekte ki, bu özellik sayesinde yanma odasında çok hızlı ve homojen bir şekilde yayılacağı için daha yüksek verimde yanma ve daha kısa ateşleme süresi ile üst seviye bir ateşleme çevrimi sağlayacaktır. Tutuşma için verilmesi gereken enerjinin çok düşük olması, büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca hava fazlalık katsayısı olarak adlandırılabilen, havada ateşlenme hacmi % si değer aralığının diğer yakıtlara kıyas ile çok geniş bir aralıkta olması sayesinde değişik oranlarda hava ile karıştırılarak yanabilmektedir.

3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA EMİSYON DEĞERLERİ VE ÖNEMİ

Fosil yakıtların tükenecek olması dışında, bir diğer önemli problemi ise yanma sonucu çevreye verdiği geri dönüşü olmayan zararlardır. Bu zararları enerji üretmek ve güç üretmek için, şu süreçte göze alabiliyoruz; fakat atmosfere

verdiğimiz sera gazları etkisi ile ileride yaşanamayacak kadar kirli ve kısa ömürlü bir gezegene dönüşebiliriz.

Bu durumun önüne geçilebilmesi için ülkeler bazı normlara ve kanunlara göre enerji üretilmesi ve fosil yakıt kullanılması yönünde önlemler almaktadır. Özellikle içten motorlu araçlar için çıkarılan “Euro emisyon normları”, içten yanmalı motorlu araçların yanma sonu ürünleri ile ilgili sınırlamalar getirerek daha düşük çevre zararı için çalışmalar yapmaktadır. Bu sınırlamaları yıllar bazında daha da düşük seviyeye çekerek kademeli bir azaltma ile daha temiz bir atmosfer oluşturulmak istenmektedir ve normlara uymayan araçların ülkelere ve bölgelere girişi yasaklanarak yüksek salınım oranına sahip taşıtları kullanım dışı bırakmak amaçlanmaktadır.



Şekil 8: İçten Yanmalı Motorlarda Girenler ve Ürünler Şeması (Saravanan, N. Nagarajan, 2009)

Şekil 8’de görüldüğü gibi yakıtların hava ile yanma tepkimesi sonucu, reaksiyon ürünleri oluşur. Bu ürünler ise çevresel olumsuz etkilere sahip olan CO, CO₂, HC ve NO_x gazlarını da içermektedir. Bu gazların motorlu taşıtlarda çevreye salınımını azaltmak için bazı önlemler alınmaktadır. Örnek olarak benzin yakıtlı kara taşıtlarında, yanma sonrasında egzozdan atılan yanma sonu ürünlerinin hacimsel yüzdeleri aşağıda bulunmaktadır. (megep.meb.gov.tr, ÇEVRE SAĞLIĞI- HAVA KİRLİLİĞİ 850CK0032)

BİLEŞEN	HACİMSEL YÜZDE
CO	0,85
HC	0,05
NO _x	0.08
Katı Partiküller	0,005

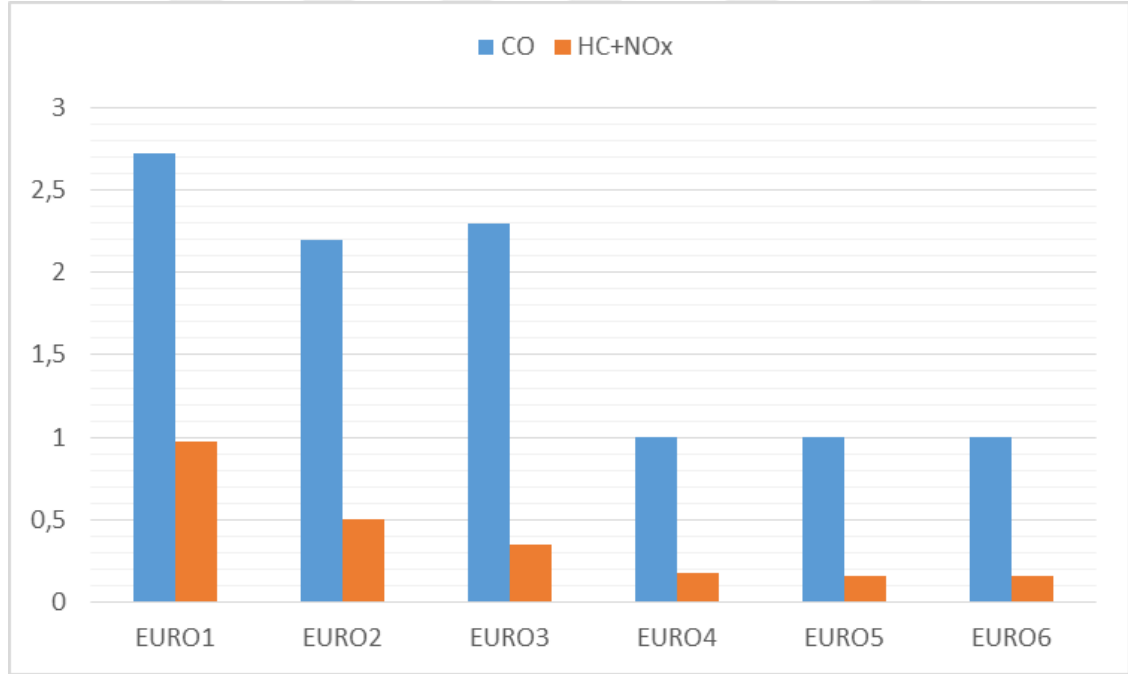
(obitet.gazi.edu.tr, T14_Hidrojen Makaleler)

3.1 EURO Emisyon Standartları

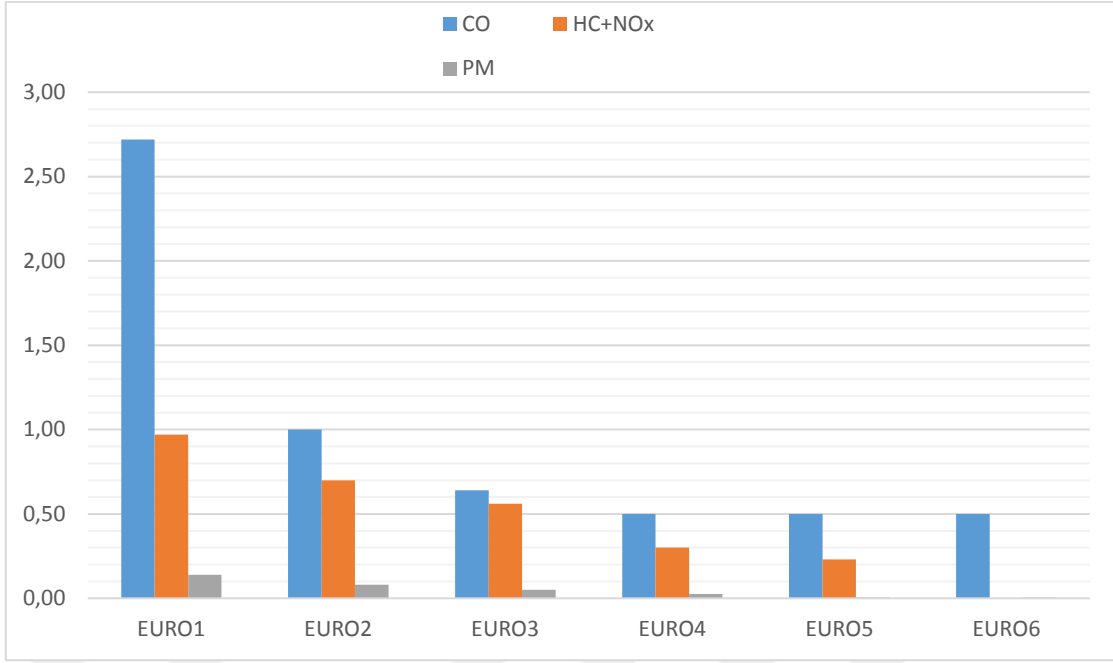
Araç sayısında ki büyük artıştan kaynaklı olarak, egzoz gazlarının çevresel etkilerini azaltmak için çözümler üretilmesi gerekmektedir. Bu sebeple belli sınırlamalar ile egzoz emisyonlarının çevresel etkileri azaltılması amaçlanmaktadır.

Belirli araç tiplerine göre, belirli kısıtlamalar getirilmesi kararlaştırılarak, bu kısıtlamaların yıllar içerisinde kademeli olarak daha alt seviyelere indirilmesi uygun görülmüş ve bu uygulama, araç sayısının artması ile çevresel olumsuz etkilerin de doğru orantı ile artması engellemek amacıyla AB ülkeleri tarafından kabul edilmiştir. Ülkemizde ise 2009 yılında Euro-4 standartları kabul edilmiş ve uygulanması için yasal düzenlemeler gerçekleştirilmiştir.

Önceden kararlaştırılmış bir takvim ile, egzoz gazlarının çevreye salınım miktarlarının azaltılması ve zararlı etkilerin önlenmesi için AB ülkeleri tarafından kabul edilen bu standartlar, 2008 yılında ilk norm seviyesi olan EURO-1 standartları ile kabul edilmiştir. Ardından 1 yıl içerisinde Euro-4 standartlarına geçiş yapılarak salınım oranlarında hızlı bir düşüş sağlamak amaçlanmıştır. Euro emisyon standartlarının, ülkemiz tarafından kabul edilerek uygulanması gecikmeli bir süreç olduğundan dolayı, ilk kabul edilen norm EURO-4 olmuştur.



Şekil 9: Benzinli Araçlar İçin EURO Emisyon Kısıtlamaları (ÇEVRE SAĞLIĞI- HAVA KİRLİLİĞİ 850CK0032, Milli Eğitim Yayınları)

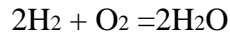


Şekil 10: Dizel Araçlar İçin EURO Emisyon Kısıtlamaları (ÇEVRE SAĞLIĞI- HAVA KİRLİLİĞİ 850CK0032, Milli Eğitim Yayınları)

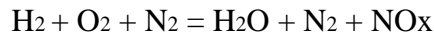
Grafiklerden de görüldüğü üzere EURO 6 değerleri, çok düşük miktarda yanma sonu ürünleri talep etmekte olup mevcut katalitik konvertör vb. sistemler ile bu değerlere ulaşmak çok zor ve maliyetli olmaktadır. Bu yüzden hibrit araçların ve hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı araçların ar-ge çalışmalarına ağırlık verilmekte ve teknolojik yatırımlar yapılmaktadır.

Hidrojenin yanma sonu ürünleri oksijen ile yakıldığı takdirde yalnızca su(H₂O), hava ile yakıldığında su ve çok düşük miktarda Azot Oksit(NO_x) olmaktadır.

Hidrojenin oksijen ile yanması sonucu ürün olarak sadece su oluşur.



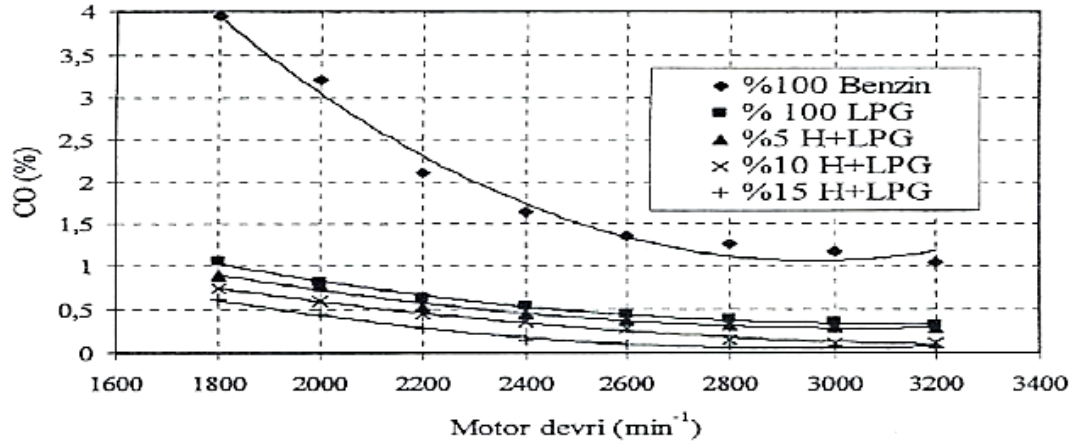
Hidrojenin hava ile yanması sonucu ise NO_x oluşabilir.



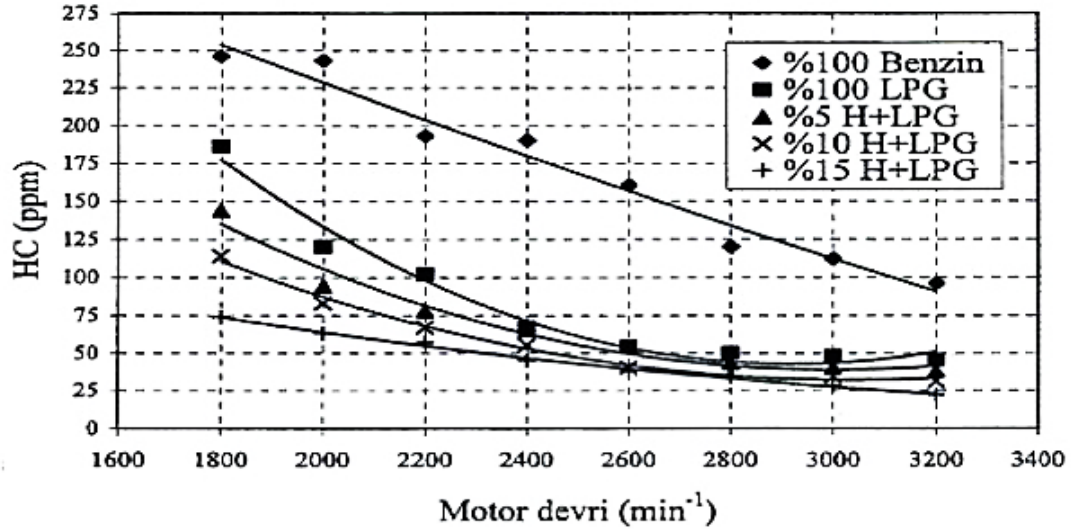
Hidrojenin yanma tepkimesini bir içten yanmalı ve hava beslemeli bir motor için analiz ettiğimizde karşılaştığımız denklem NO_x oluşumunun gerçekleştiği denklem olacaktır.

3.2 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması ve Emisyon Verileri

Hidrojenin, LPG yakıtlı araçta silindirlere içerisine düşük oranda verilmesi sonucu emisyon oranlarında düşüşlerin görüldüğü akademik çalışmalar bulunmaktadır. Silindirlere %15 hidrojen gazı gönderilmesi durumunda aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.(Yıldız, 2004)



Şekil 11: Silindirlere %5-10-15 oranında hidrojen gazı ilavesi sonucu CO emisyonu grafiği (Yıldız, 2004)



Şekil 12: Silindirlere %5-10-15 oranında hidrojen gazı ilavesi sonucu HC emisyonu grafiği (Yıldız, 2004)

Bu etki hidrojenin, yalnızca katkı olarak eklendiği metot için dahi grafikler görüldüğü üzere emisyonunda düşüş etkisi gerçekleştirebilmektedir.

4.HİDROJENİN TAŞITLARDA KULLANIM YÖNTEMLERİ

4.1 Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanımı

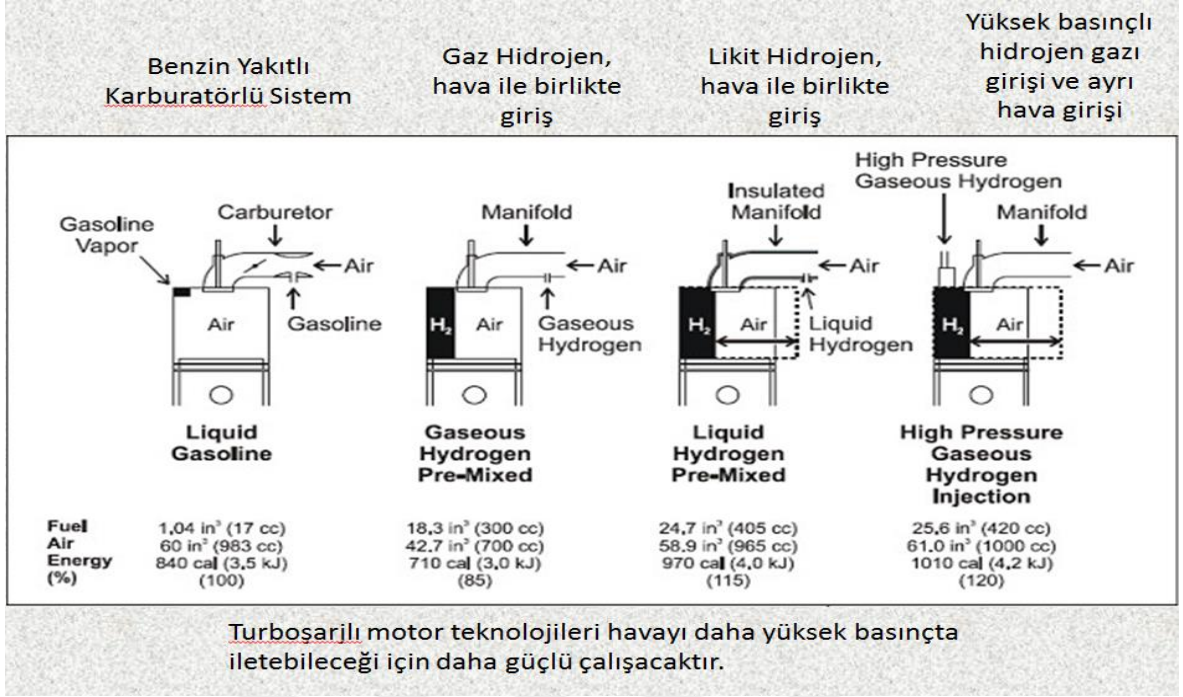
İçten yanmalı motorlarda hidrojen elementinin yakıt olarak kullanılması için bir çok prototip çalışma yapılmaktadır. Ancak bu çalışmalar benzin yakıtlı motorlarda yeniden yapılandırma ve geliştirmeler yapılarak hidrojen yakılabilir hale getirilmesi ile test edilmektedir. Birincil yakıt olarak, hidrojeni kullanılarak motorda yanma ve güç üretimi sağlanır. Hidrojen diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında kütlelesel ağırlık olarak en yüksek enerjiye sahiptir. Hidrojenin en yüksek ısıl değeri 141.9 MJ/kg'dır ve fosil yakıtlara göre yaklaşık üç kat daha yüksektir. Hidrojenin alev hızı 270cm/s'dir. Bu durum silindir içerisindeki basıncın yüksek oranda artmasına sebep olabilir. Hidrojenin yayılma hızı 0.63 cm²/s'dir. Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı 858 K iken motorinin tutuşma sıcaklığı 530 K'dir. Bu verilere göre hidrojenin yakıt olarak özellikleri, sıkıştırma oranı yüksek olan motorlarda uygulanabilirliğini yükseltmektedir. (Saravanan ve Nagarajan, 2009)

4.2 Hidrojenin Yakıt Katalizörü Olarak Kullanılması

Bu yöntem son yıllarda özellikle popüler olan elektroliz ile hidrojen üretim cihazları ile uygulanmaktadır. Birincil yakıt olarak fosil bir yakıt (benzin, dizel, LPG) kullanan araçlara, yakıt ve hava dışında yanma odasına hidrojen tatbiki yapılarak yanma verimi yükseltilmekte ve gerekli güç için harcanan birincil yakıt(fosil yakıt) miktarı azaltılmaktadır. Bu yöntemin, motor için oluşturduğu riskler, olumsuz etkiler olabilir. Ancak üzerinde yapılan geliştirmeler ile bu risklerin çoğu çözümlenmiş ve sistemlerin verimleri yükseltilmiştir. Yanlış montaj ve uygulamalar olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Genellikle aracın iç ateşleme elektroniği ile haberleşmesi sırasında oluşan zamanlama hataları ve silindir içerisinde düşük veya yüksek hacimde sıkıştırma ile vuruntu meydana gelmesinden dolayı sorunlar yaşanabilmektedir. Burada bahsedilen sorunların çözümlenmesi için bir takım yöntemler ve bazı firmaların hazırladığı paket sistemler üretilmekte ve tüketiciye sunulabilmektedir. Katalizör olarak hidrojen kullanımında bir diğer metot ise; basınçlı çelik tüp ile depolanmış hidrojenin, hava emme manifoldundan hesaplanmış sabit bir debi ile motora gönderilmesi yöntemidir. Ancak hidrojenin depolama sorunlarından dolayı binek araçlarda uygulanabilirliği düşük görülmektedir.

5. HİDROJENİN YAKIT OLARAK YANMA ODASINA AKTARIM YÖNTEMLERİ

Hidrojenin yanma odasına direkt aktarımı konusunda 3 temel yöntem vardır.



Şekil 13: Hidrojenin Yakıt Olarak Silindirlere İletilmesi (KILIÇ, 2005)

Benzin ve hava karışımı, değişmez bir oranda silindirlerin giriş manifolduna verilmekte olup, motor gücü benzin-hava karışım miktarlarını değiştiren gaz keleşbeği açıklığı benzin yüzdesini artırmak yoluyla ayarlanmaktadır. Ve bu yanma sonucunda 840 cal enerji elde edilmektedir.

5.1 Gaz Fazında Hidrojenin Yanma Odasına Aktarımı Yöntemi

Gaz fazında bulunan hidrojen, sabit bir oranda hidrojen-hava karışımı oluşturularak motor silindirlerine emme manifoldu üzerinden gönderilmektedir. Valf yardımı ile ayarlanan hidrojen ve hava karışım oranı, motor gücünü değiştirmektedir.

Bu uygulamada, motorda vuruntu oluşmaması için silindir içerisine su buharı girişi de yapılabilmektedir. Etkisi ise tek bir ateşleme ile tutuşma sağlanabilmesidir. Bu aktarma sistemi sonucu elde edilecek enerji 710 cal olarak ölçülmüştür. (KÖSE, 2012)

5.2 Sıvı Hidrojenin Birincil Yakıt Olarak Yanma Odasına Aktarımı Yöntemi

Likit hidrojenin aktarılmasında ise silindirlere ayrı girişler üzerinden tatbik edilen hidrojen ve hava karışımı, normal şartlar altında veya ortalama basınç

değerlerinde tutularak motora gönderilmektedir. Motorun gücünü değiştirmek için ise karışımdaki hidrojen miktarı yükseltilmektedir. (Deniz ve Teknik, Nisan 2013, 1. Sayı)

Bu yöntemde emmedeki hava miktarı değişmemektedir. Hidrojenin havada ateşlenme yüzdesel hacim aralığının %4 ila %75 oranları arasında olmasından dolayı, hidrojen miktarı yükseltilerek geniş bir aralıkta ayarlama yapılabilme imkanı vardır.

5.3 Basınçlı Gaz Fazında Bulunan Hidrojenin Yanma Odasına Enjeksiyon İle Aktarımı Yöntemi

İki farklı girişi bulunan yanma odasına, basınçlı hidrojen gazı ve hava girişi ayrı olarak gönderilmektedir. Bu yöntem sayesinde silindir içerisine dolum gerçekleştirilene kadar patlayıcı karışım oluşmamaktadır ve diğer yöntemlere kıyasla daha güvenlidir. Hidrojen 14 ila 70 atmosfer basıncı değerleri aralığında, silindirler içerisine gönderilerek motor gücünün değişimi sağlanabilmektedir. (KÖSE, 2012)

6. HİDROJENİN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA YANMASI ESNASINDA OLUŞAN PROBLEMLER

İçten yanmalı motorlarda hidrojenin yakıt olarak kullanımı, konusunda geliştirmeler yapılmaktadır. Ancak benzin motorlarının, yapılan değişiklikler ile hidrojen yakıtlı olarak çalışabilir duruma getirilmesinden kaynaklı olarak bazı uyumsuzluklar ile karşılaşılabilir. Bu değişiklikler sonucu hidrojen ile çalışabilir hale getirilen motorların termik verimleri, benzin yakıtlı sürümüne yakın değerler verebilmektedir. Ancak hidrojen motorunun stokiometrik çalışma şartlarında, %20 ye ulaşabilen güç kaybı yaşanmaktadır ve silindir içerisindeki yanma reaksiyonunun yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesi NO_x oluşma oranını yükseltebilmektedir. Hidrojen-hava karışımı fakirleştirildiğinde NO_x oluşum oranı azalmaktadır ancak, bu etki motor gücünü de düşürücü etkide bulunabilmektedir.

Katı halde hidrojenin depolanması yönteminde, ilk çalışmayı gerçekleştirmek için hidrojenin depolandığı metal-hidritten ayrıştırılması gereksinimi vardır. Ancak bu ayrışma için metal hidritin sıcaklığını yükseltme ihtiyacı doğmaktadır. Taşıtlar ilk çalıştırma aşamasında soğuk formda olduğu için düşük enerji ile sıcaklığın yükseltilmesine ihtiyaç vardır. Bu depolama metoduna sahip otobüslerde, demir-titanyum alaşımında depolanmış hidrojenin daha az enerji ihtiyacı ile düşük

sıcaklıkta ayrıştırılabildiği çift ilk çalışma için kullanılır. Daha sonra motor sıcaklığı yükseldiğinde, bu enerjinin daha fazlasına ihtiyaç duyan ancak hidrojen depolama kapasitesi daha yüksek olan magnezyum-nikel alaşımını kullanılmaktadır.

Ayrıca karbüratör sistemi ile çalışan motorların emme manifoldunda, hidrojenin tutuşma hızından kaynaklanan bir sorun olan alev tepmesi de aşılması gereken sorunlar arasında görülür.

Benzin motorundan dönüştürülen hidrojen motorlarında, güç kaybı oluşabilmektedir. Motorun sıkıştırma oranını yüksek olur ise, oluşan güç kaybı azalabilmektedir. Turbo gibi aşırı doldurma metotları uygulanarak daha fazla güç üretilmesi mümkün olmaktadır. Fakir karışım ile aşırı doldurma uygulanarak, yüksek sıkıştırma gerçekleştirilir ise benzin motoruna yakın veya daha yüksek verimler elde edilebilmesi mümkün olabilir.

Fosil yakıtlı motorlarda oluşan yakıtın soğuk yüzeyler ile teması durumunda yoğunlaşma, buharlaşmadan kaynaklanan enjeksiyon sorunlarına hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı motorlarda genellikle rastlanmamaktadır. Ayrıca 20,13 K sıcaklığındaki koşullarda ilk hareketi gerçekleştirebilecek özelliklere sahip bir yakıt çeşididir.

Emisyon özellikleri için değerlendirdiğimizde ise diğer fosil yakıtların yanma sonu ürünlerinden olan hidrokarbon(HC) atık üretimi, hidrojen yakıtlı motorlarda reaksiyona karbon elementi girmediği için, ürünlerde oluşmamaktadır.(KAHRAMAN, AKANSU, ALBAYRAK)

6.1 Geri Tutuşma ve Erken Tutuşma Sorunu

Gerçek tutuşma;

Hidrojen-hava karışımının silindirlere gönderildiğinde, silindir içi sıcaklıktan etkilenerek yanma odasına dolmuş sağlanmadan tutuşması olarak tanımlanır. Bu durumun yaşanması, emme sisteminin hasar görmesine ve infilak tehlikesine sebep olabilmektedir. Çoğunlukla hidrojen-hava karışımında, hava fazlalık katsayısı olarak tanımladığımız oranın 2 ile 3 aralığında bulunması bu duruma neden olabilmektedir. Hidrojenin iyonlaşma enerjisi, benzine göre daha düşük olduğundan dolayı silindirlerde oluşan sıcaklık hidrojenin tutuşması için yeterli olabilmektedir. Ateşleme sisteminde yapılacak geliştirmeler ile bu sorunun tutuşma sorununun aşılması mümkün olabilir. (KILIÇ, 2005)

Erken tutuşma;

Hidrojen-hava karışımının silindir içerisine dolumu sağlanmasına rağmen, buji ateşlemesi gerçekleşmeden tutuşması olarak tanımlanır. Bu durumun yaşanması, ateşlemenin sıkıştırma öncesinde gerçekleşmesinden dolayı motorda vuruntulu çalışmaya sebep olacak düzensiz çalışmaya neden olabilir. (KILIÇ, 2005)

İçten yanmalı motorlarda hidrojen kullanımının sorunsuz gerçekleştirilebilmesi için depolama metotlarında kompozit malzeme teknolojisinin çalışmaları kullanılarak geliştirmeler yapılması ihtimal dahilindedir.

Ayrıca geri tutuşma, erken tutuşma problemlerinin önüne geçilebilmesi için ateşleme ve enjeksiyon sistemlerinde geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. (KAHRAMAN, AKANSU, ALBAYRAK)



Üçüncü Bölüm

İÇTEN YANMALI MOTORLU TAŞITLARDA HİDROJEN KULLANIMININ UYGULANABİLİRLİĞİ

1. DEĞİŞKENLER VE YÖNTEM

Bu çalışma, nicel araştırma yöntemlerinden; deneysel ve tarama yöntemi ile yapılmış olan tez çalışmaları, makaleler ve diğer akademik kaynaklar incelenerek tümevarım yöntemiyle kurulan teorik ve deneysel bilgilerin değerlendirilmesi ile hazırlanmıştır.

1.1 Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılma Yöntemleri İçin Literatür ve Kaynak Taraması

Bu çalışmanın, hazırlık aşamasında literatür taraması yapılmış ve aşağıda sonuç özetleri bulunan tezler incelenmiştir.

Hidrojenin birincil yakıt olarak kullanılması metodunda, Gönenç USTA(2010) çalışmasında deneysel verileri elde edilmiş olan Quanchai Brand markasının ZS1110 modeli, silindir kafasına buji takılarak Otto çevrimiyle %100 hidrojen yakıtlı olarak çalıştırılarak elde edilmiş verilere göre; Deneyin gerçekleştirilmesi sırasında, düzensiz yanma ve vuruntu oluşmamıştır. Ancak motor maksimum yükte uzun süre çalıştığı zaman motorun hıza bağlı regülasyon sisteminden dolayı, devir düşmesiyle elektronik kontrol ünitesi enjektörün açık kalma süresini arttırmasıyla silindir içine gönderilen hidrojen miktarı artmış ve aynı zamanda silindir cidarlarındaki ısınmalardan dolayı alev tepmesi oluşmuştur.(USTA, 2010)

Hidrokarbon ve karbonmonoksit olarak yanma sonu ürünü oluşmadığı için hidrojenin yanması sonucu oluşan emisyonu NO_x miktarı ölçülerek değerlendirdiğimizde az miktarda hidrojenin yakılması sonucu motorda üretilen gücün düşmesine karşın, çevreye salınan azotoksit miktarı sıfırdır. Hidrojen besleme miktarı yükseltildiğinde ise yanma karışımındaki havanın yüksek sıcaklık ile alevlenmesi sonucu benzin motoruna yakın oranlarda azotoksit oluşabilmektedir. (USTA, 2010)

Başka bir akademik kaynak olarak, “Hidrojenin çift yakıt modunda ilavesinin motor performans ve emisyon üzerine etkisi” çalışmasında ise aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Dizel yakıtlı motora, hacimsel olarak %2,5-%5 ve %7,5 oranında hidrojen tatbiki gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda tüm oranlar için motor performansında ve egzoz sıcaklığında yükselme ölçülmüştür. HC,CO₂ ve CO ürünlerinin miktarında ise azalma görülmüştür. Motor torku %7,5 hidrojen oranı için stok dizel motorlu ölçüme göre 1250d/d değerinde %8,3 oranında yükselmiştir. Emisyon ölçümleri için ise; %7,5 hidrojen tatbiki deneyinde, 2250 d/d değeri için CO, CO₂, HC ve NO_x miktarları için %0.013 oranında stok haline göre azalma görülmüştür. (Hüseyin KÖSE,2012)

Bir diğer akademik kaynak olarak, “LPG’ye hidrojen ilavesinin buji ile ateşlemeli bir motorun performans ve emisyonlarına etkisi” çalışmasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Dört silindirli ve 270cm³ motor hacmine sahip içten yanmalı motora hidrojen ve LPG oranları değiştirilerek farklı oranlarda yakıt verilmiştir. Farklı devir değerleri için motor performansında azalma meydana gelmiştir. Ancak emisyon verilerinde karbon içerikli ürünlerin seviyeleri azalmış, azotoksit ürün miktarı kontrol verilerine kıyasla yükselme göstermiştir.(ÖZERTAŞ, 2014)

1.2 Hidrojenin Katalizör Olarak Kullanılması Yöntemi

Hidrojenin katalizör olarak kullanılması metodunda ise, 1400cc ile 2000cc silindir hacimleri aralığında bulunan 5 farklı araca HHO elektroliz kiti uygulanarak araçların motor performansı ölçüm verileri incelenmiştir.

2. UYGULAMALAR

2.1 Hidrojen Katalizör Olarak Kullanılması Deney Düzenegi:

Hidrojenin katalizör olarak kullanılması yönteminde, “HHO Kit” olarak adlandırılan elektroliz hücresinden elde edilen H₂ gazının; hava emme manifoldu üzerinden, yanma odasına iletilmesi yöntemi ile silindirler içerisinde yüksek verimli yanma elde ederek, daha düşük miktarda fosil yakıtın (Benzin, Dizel, LPG) yakılabileceği ve torkun yükseltilebileceği düşünülmektedir.

Bu uygulamaların temel düzeneği 12 V (akü gerilimi) ile çalışan elektroliz hücresi, ayrıştırılacak suyun bulunacağı rezervuar, oluşan hidrojen gazının gönderileceği çıkış rezervuarı, H₂ gazının motora iletilmeden önce debisini ayarlayacak olan bir dijital göstergeli ayar valfi ve elektronik kontrol ünitesinden oluşmaktadır.



Şekil 14: Hidrojen Elektroliz Hücresi Sistem Elemanları

Bu düzenekler birçok araçta uygulanabilir şekilde paketli ve hazır set olarak satın alınabilmektedir. TÜV motorlu araç muayene standartlarına göre sistemi ruhsata işletme zorunluluğu bulunmamaktadır. Araç üzerinde, basınçlı gaz bulunmadığından ruhsata işletmek şuan ki yasal düzenlemelere göre gerekmemektedir. Elektroliz ile anlık olarak üretilen hidrojen sadece akış debisi ayarlanarak yanma odasına gönderildiğinden basınçlı olarak hidrojeni depolama gereksinimi duyulmamaktadır.

Elektroliz hücrelerinin içeriğinde iyonlaşma için KOH ve NaOH bileşikleri elektrolit olarak kullanılarak saf su iletken hale getirilmektedir.

Üretici firmalar tarafından, kitlerin uygulanacağı aracın motor hacmine göre seçilerek kullanılması gerektiği aktarılmaktadır. Çeşitli motor hacmi aralıkları için satılan hazır kitler arasında fark, anlık olarak üretilen ve motor yanma odasına sevk edilen H₂ miktarıdır.



Şekil 15: 2 farklı kapasiteli HHO cihazı örneği

Bu bilgiler haricinde elektroliz hücresinde kullanılan plakaların durumu sistemin ömrünü belirleyici olabilir. Örnek olarak;

304 paslanmaz krom sac	3 ile 6 ay
316 paslanmaz krom sac	12 ile 15 ay
316 l paslanmaz krom sac	15 ile 18 ay
% 50 titanyum alaşımlı paslanmaz	10 yıl ve üzeri
% 70 titanyum alaşımlı paslanmaz	20 yıl ve üzeri

Elektroliz hücreleri markadan markaya da çeşitlilik göstermektedir. Bazı hücreler 20-30 amper aralığında sistem enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bu hücrelerde aracın aküsünden çekilen yükün yüksek olması düzensiz çalışmaya sebep olabilmektedir. Bu yüzden yüksek amper ihtiyacı olan sistemlerde ikinci bir akü kullanılarak harici şarj dinamosu ilavesi ile aracın temel ihtiyaçlarını karşılayan aküdeki yük kaldırılmaktadır. 3 ila 7 amper aralığında çalışan hücrelerde ise harici aküye ihtiyaç duyulmamaktadır.

Sistemin düzenli bir çalışma sağlayabilmesi için önemli hususlardan biri; amperin sabit kalması ve bu sayede anlık üretilen hidrojen gazı miktarının sabit tutulması gereksinimidir. Motor çevriminde ateşleme sirkülasyonu sırasında her bir çevrim için değişken miktarda hidrojen gazı girişi olması, motorda vuruntulu çalışmaya sebep olabilmektedir ve bu durum gaz pedalına aynı oranda basılmasına rağmen aracın motor devrinde, değişken torktan dolayı dengesiz çalışmaya yol açabilir.

Oksijen ve hidrojenin motora aynı bağlantı kanalından girmesi durumunda, yanıcı olan hidrojen yakıcı özelliğe sahip saf oksijen sayesinde daha yüksek verim ile yanabilir. Sadece yakıt ve hava+H₂ karışımına kıyaslandığında silindir içerisinde daha çok oksijen bulunması daha yüksek sıcaklık oluşturabilmektedir. Yüksek sıcaklık özellikle alüminyum alaşımlı yeni nesil motorlarda zamanla piston başlarında oyuklara ve sübaplarda çap bozulmalarına yol açabilir. Bu nedenle motora yollanacak hidrojenin saf olması, güvenlik ve araç sağlığı için daha uygun görülmektedir. Bu çalışmada uygulanacak HHO sistemlerde bu montaj detayı dikkate alınmıştır. Yüksek oranda su buharı oluşumu, pistonlarda ve motor yataklarında zaman ile korozyona ve ağır hasara sebep olabilecek bir tehlikedir.

Kullanım süresinde dikkat edilecek sürücü detaylarından biri de su miktarının göstergeden takip edilerek takviye gerektiğinde, hücreye bağlantısı bulunan su rezervuarına saf su ilave edilmesi gereksinimidir. Saf su ilave sıklığı uygulanan kitin mL/h olarak ürettiği hidrojen miktarına göre değişkenlik gösterebilir. Saf su kullanılması ise hücrenin içinde bulunan elektroliz plakalarında korozyon ve yabancı madde birikiminin önlenmesi amacıyla önerilmektedir.

HHO kitlerinin hidrojen üretim kapasitesi, üretilen hidrojen gazı hacimi/saat ölçütü ile belirlenebilir.

$$\text{HHO ÜRETİM KAPASİTESİ} = \text{HACİM (mL)} / \text{ZAMAN (h)}$$

HHO kitlerinin uygulandığı sistemlerde, etkinliğin hesaplanması için temel formüller aşağıdaki gibidir.

\dot{m}_{H_2} = Yanma odasına(silindirlere) aktarılan hidrojenin kütleli debisidir.(kg/h)

$\dot{m}_{H_2} =$

$$\frac{\text{Silindire Aktarılan Hidrojen Gazı Hacmi (m}^3\text{)}}{1 \text{ Hidrojen Molünün Kapsadığı Hacim (} 22.4 \frac{\text{m}^3}{\text{Kmol}}\text{)}} \times 1 \text{ Kmole Hidrojenin Ağırlığı (} \frac{\text{kg}}{\text{Kmol}}\text{)}$$

1 Kmole Hidrojenin Ağırlığı = 2 kg/Kmole

Hesaplanan hidrojen kütleli enerjisi potansiyeli ise aşağıdaki denkleme göre hesaplanabilir.

$$\text{HHO Kit Enerji Potansiyeli (kJ)} = \dot{m}_{H_2(\text{kg})} \times \text{LHV}_{H_2(\text{kJ/kg})}$$

$$\text{LHV}_{H_2} = 120,700 \text{ kJ/kg (Hidrojenin alt ısı değeri)}$$

Buraya kadar olan formüller ile HHO hücresinde üretilen ve motora aktarılan H₂ gazının enerji kapasitesi içindir. Yapılan hesaplamaların 2. adımı olan, aküden alınan enerjinin hesaplanması ise şu şekildedir;

$$\text{Aküden Karşıl原因 Enerji} = \text{Volt} \times \text{Amper} \times \text{Zaman}$$

Yapılan hesaplamaların birleştirilerek, düzeneğin uygulandığı sistemin etkinliğinin bulunmasında aşağıdaki formül kullanılmaktadır;

$$\text{HHO Kit Uygulanmış Sistem Etkinliği} = \frac{\text{HHO Kit Enerji Potansiyeli}}{\text{Aküden Karşıl原因 Enerji}}$$

Sistemin etkinliği bu ideal çevrime göre hesaplandığında yukarıdaki formüller yeterli olmaktadır. Fakat ısı enerjisi kayıpları da hesaplamalara katılırsa sistem etkinliği negatif olarak etkilenebilir. Isıl kayıplar, HHO hücresinde iyonlaşma için verilen enerjinin elektrot plakalarının sıcaklığının yükselmesinden kaynaklanabilir.

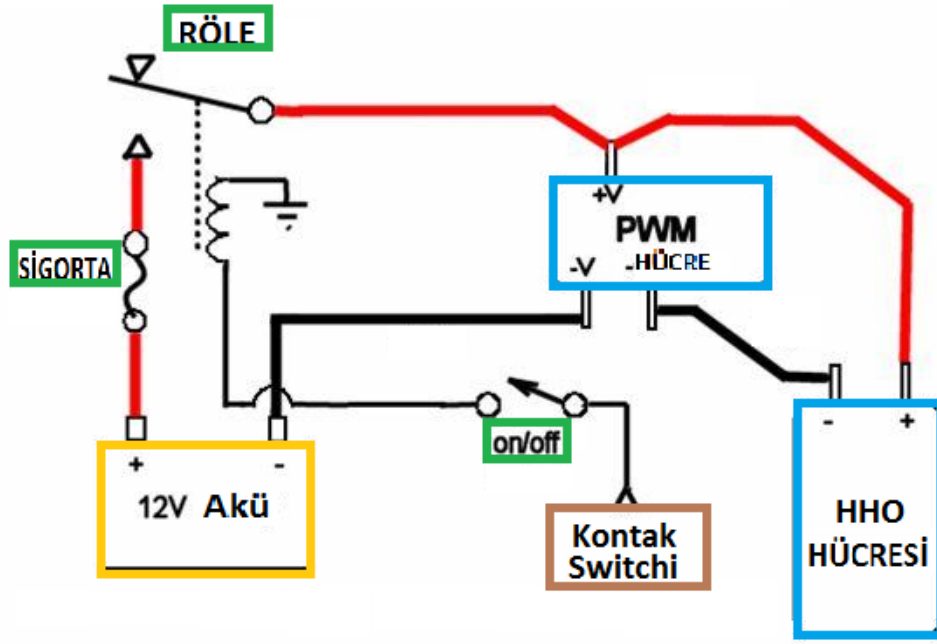
Motor hacimleri 1400cc ile 2000cc aralığında bulunan araçlarda ortalama olarak yanma odasına 200-700mL/h aralığında hidrojen girişi sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada, test edilen araçlara uygulanan HHO cihazının hidrojen üretim miktarı, maksimum çalışma akımında ürettiği, maksimum gaz miktarının bilinmesi sayesinde, akım değeri ile maksimum akım değeri arasında doğru orantı kurularak deney düzeneğinin açıklandığı bölümde hesaplanmıştır.

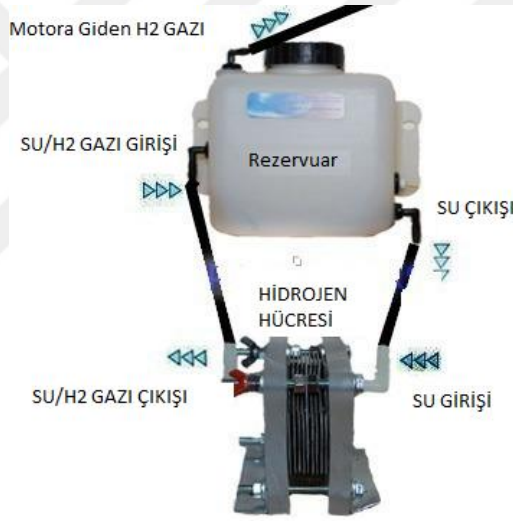
2.1.1 Hidrojenin Katalizör Olarak Kullanılması Deney Sonuçları

Bu sistemlerin uygulanması sonucu paylaşılan verilerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla HHO kiti araştırması yapılmıştır. Kit satın alma maliyeti yüksek olacağı için, direkt olarak satın alınmamış ve Bursa/Küçük Sanayi Sitesi'nde bireysel kullanıcısı olduğu öğrenilmiştir, deneyde kullanılmak üzere kullanılmak izin istenerek temin edilmiştir.

Kit montajı tarafımdan uygulanmıştır. Devre şeması şekil 14 teki gibidir.



Şekil 16: HHO kiti devre şeması



Şekil 17: HHO kiti çalışma şeması

Deneyde kullanılan HHO kit sisteminin özellikleri:

2.2 lt kapasiteli elektroliz hücresi

Su rezervuarı

Adaptif ampermetre

Soğutma radyatörü

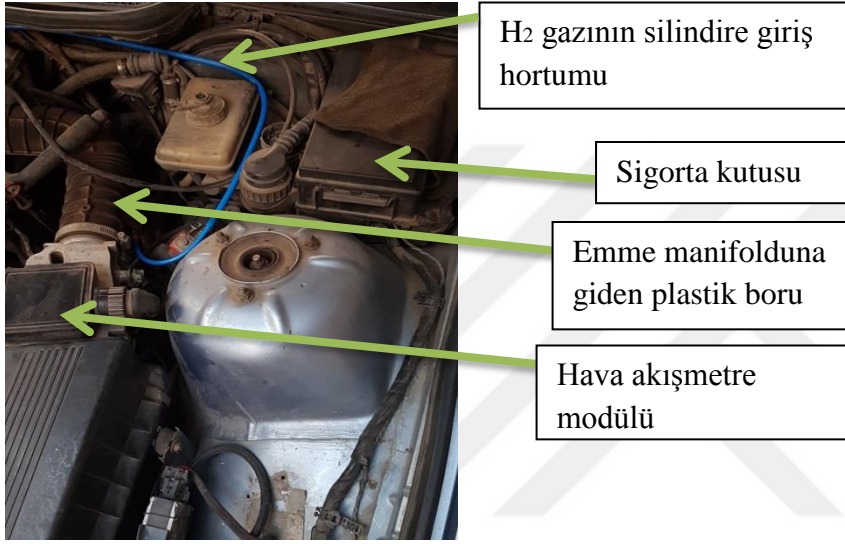
Dijital yakıt debisi ayar cihazı

Çalışma voltajı: 12V ve 14V

Max. çalışma akımı: 14 Amper

Max çalışmada gaz çıkış kapasitesi: 1000mL/h

Sistemin araçlara bağlantısı, tek hücreli elektroliz hücresinin akünün + kutbuna ve bağlantının arasında bir dijital ampermetre ve switch olacak şekilde – kutbuna bağlanması ile gerçekleştirildi. Burada switch görevini görmesi için kontak anahtarından gelen kablo kullanılmıştır. Su tankı, elektroliz hücresi giriş rekoruna sıvı hortumu ile bağlandı. Hücrede bulunan O₂ çıkış rekoru ise ucu atmosfere açık hortum ile direkt tahliye edildi. H₂ çıkış rekoruna bağlanan hortum ise araç hava akışmetresinin arkasından olacak şekilde plastik emme borusu üzerine 10mm çapında delik açılarak sızdırmaz kontakt yapıştırıcı ile sabitlenmiş 1/2" diş yapısına sahip, hortum giriş çapı 8mm olan rekora bağlandı.



Şekil 18: Hava emme borusu H₂ gazı girişi

Bu deneyde, elektroliz sonucu açığa çıkarılacak H₂ miktarı değişken dirençli ampermetre ile sürekli olarak aynı debi değeri ile yanma odasına aktarım amaçlanmıştır. Oluşan gazın hangi debi değerinde(mL/h) gönderileceği ve zamanlama ayarı ise dijital yakıt debisi ayar cihazı ile sağlanmıştır.

2,2 litrelik su kabının elektroliz hücresine bağlantısı sağlanarak araç çalıştırılmış ve 7 amper ile debi ayarı gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan cihazın katalog verilerine göre; maksimum çalışma akımı olan 14A değerinde 1000 mL/h gaz çıkışı gerçekleştiği kabul edilerek, sistem 7 amper akım, 12 volt besleme ile devreye alındığında 500mL/h hacimsel debi ile gaz çıkışı gerçekleşeceği kabul edilmiştir.

Sistemin etkinlik hesaplaması aşağıdadır;

$$\begin{aligned} \text{Aküden karşılanan enerji} &= 7 \text{ (amper)} \times 12 \text{ (volt)} \times 3600 \text{ (sn)} = 302400 \text{ J/sn} \\ &= 302,4 \text{ kJ/sn bulunur.} \end{aligned}$$

Hidrojenin özkütlesi: 0,084 kg/m³ ise

500 mL/h hidrojen gazının kütleli debisini hesaplırsak;

$$\dot{m} \text{ (kg/h)} = d \text{ (kg/m}^3\text{)} \times V \text{ (m}^3\text{/h)} = 0,084 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 0,0005 \text{ (m}^3\text{/h)} = 42 \times 10^{-6}$$

kg/h bulunur.

HHO Kit Enerji Potansiyeli (kJ/h) =

$$\dot{m}_{\text{H}_2 \text{ (kg/h)}} \times \text{LHV}_{\text{H}_2 \text{ (kJ/kg)}} = 42 \times 10^{-6} \text{ (kg/h)} \times 120700 \text{ (kJ/kg)} = 5,0694 \text{ kJ/h}$$

bulunur. Dönüştürsek 18249,84 kJ /sn değerine ulaşılır.

$\text{HHO Kit Uygulanmış Sistem Etkinliği} = \frac{\text{HHO Kit Enerji Potansiyeli}}{\text{Aküden Karşılana Enerji}} = \frac{18249,84 \text{ (kJ)}}{302,4 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{sn}}\right)} = 60,35$
--

olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplama, testlerde uyguladığımız HHO kit cihazı için; aküden karşılanan her 1 birim enerji için, elektroliz ile 60,35 birim hidrojen enerjisi elde edebileceğimizi göstermektedir.

Ölçüm verileri, ise araç OBD1 girişinden GA Auto Dyno Tools programına devir değerlerinin alınacağı ve tekerleklerin makaralar üzerinde dönüşü ile torkun hesaplanacağı şekilde elde edilmiştir. Böylece; d/d, tork, kayıp güç gibi verilere de ulaşılmıştır. Burada bahsi geçen kayıp güç, motordan ölçülen gücün, sürtünmelerden dolayı tekerleklere %100 oranda iletilememesinden dolayı oluşan kayıp değeri belirtmektedir. Ancak çalışmada, ağırlıklı olarak tork değerlerine yer verilmiştir.

Uygulanan kitin montajı yaklaşık 30 dk sürmüş olup, dyno veri ölçüm cihazı ile birlikte araç OBD1 soket bağlantısı sayesinde bağlanarak veriler elde edilmiştir. Burada yapılan test sonrasında uygulanan kitin amper ayarının tam olarak yapılamamasından kaynaklı olarak, 1. test aracı aküsünden yüksek enerji çekilmesi sonucu, araç elektronik kontrol ünitesi bloke olmuştur.

Bu hasarın sebeplerinden biri de, akünün eski ve yarı şarj durumunda olmasından kaynaklanabilir. ECU olarak adlandırdığımız araç elektronik kontrol ünitesi, dalgalanan akımdan etkilenerek devre hasarı almış ve kullanılamaz duruma gelmiştir. HHO sistemi, araçtan sökülüp ECU değişimi yapıldıktan sonra araçta başka bir hasar görülmemiştir.

Elektroliz hücresinden H₂ gazı çıkışının gerçekleşeceği çıkış rekoruna termal dayanıklı ve yalıtımlı hortum bağlantısı sağlanarak yanma odasına hava vakumu ile eş zamanlamalı şekilde hidrojen gazı tatbik edilmesi amaçlanmıştır. Çünkü hava akışmetre modülünün önünden, hidrojen gazının sisteme verilmesi emme limiti

hatası vererek araç göstergesinde sağlıklı olmayan hata mesajları verme ihtimaline sahiptir. Bu yüzden H₂ girişi hava akışmetre modülünün arkasından plastik emme borusuna verilecek şekilde konumlanmış bir rekordan yapılmıştır.



Şekil 19: Ölçüm gerçekleştirilen sistem arayüzü



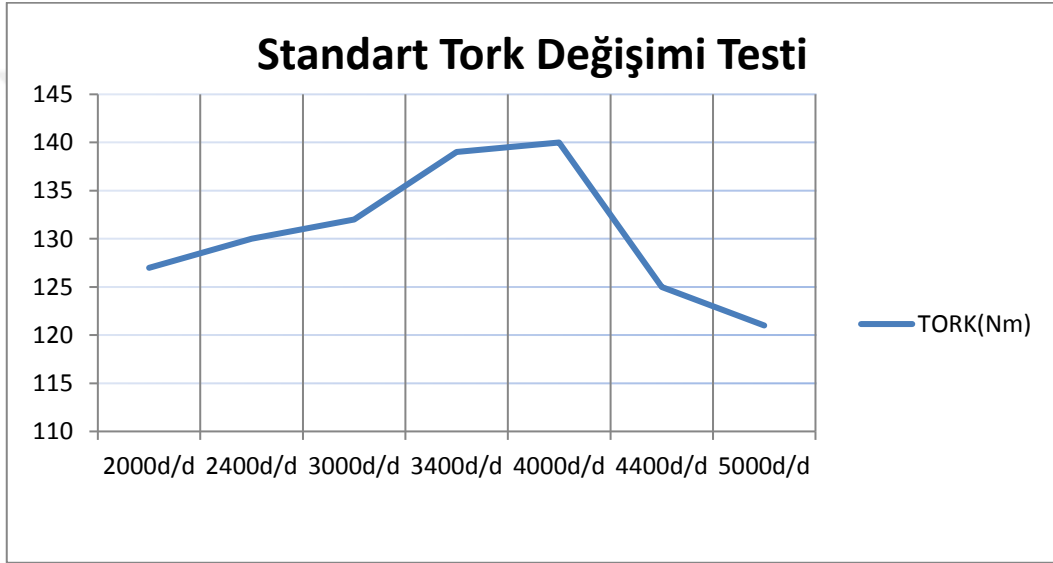
Şekil 20: Anlık ölçüm takibi

Deney araçlarının dyno testi, 4.vites kademesinde yapılmıştır.

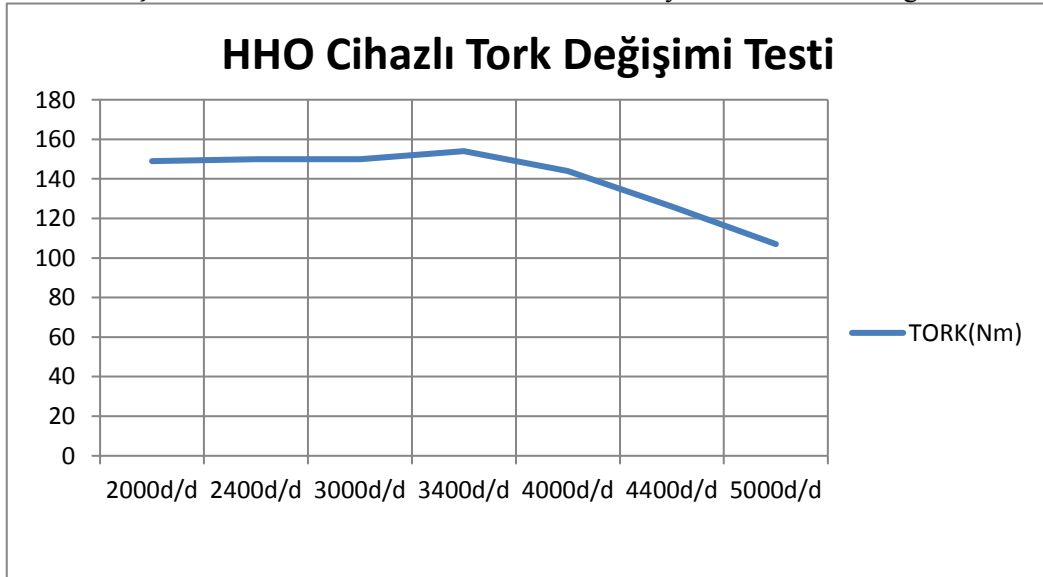
Sistemin uygulandığı 1. aracın fabrika çıkış özellikleri;

Motor Kodu:	M43B18
Yakıt Tipi:	Benzin
Yakıt Sistemi:	Bosch DME M1.7.1
Motor Pozisyonu:	Longitudinal
Silindir Hacmi:	1796 cm ³
Silindir Çapı ve Stroğu:	84mm-81mm
Valf Sayısı:	8
Sıkıştırma Oranı:	9.7
Maksimum Güç:	115PS@5500 d/d
Maksimum Tork:	168Nm@3900d/d
Çekiş:	RWD
Şanzıman:	Getrag 5 vites manual

Tablo 5: BMW 3.18i standart 1993 model araç bilgileri



Şekil 21: 1993 BMW 3.18i Benzin Yakıtlı Dyno Testi Veri Grafiği



Şekil 22: 1993 BMW 3.18i Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği

Aracın ölçüm verilerini karşılaştırdığımızda elde ettiğimiz sonuç aşağıdaki gibidir;

Devir/Dakika	CİHAZSIZ ÖLÇÜM	CİHAZLI ÖLÇÜM	TORK DEĞİŞİMİ
2000	127 Nm	149 Nm	+% 17,33
2400	130 Nm	150 Nm	+% 15,38
3000	132 Nm	151 Nm	+% 13,63
3400	139 Nm	154 Nm	+% 10,79
4000	140 Nm	144 Nm	+% 2,85
5000	121 Nm	107 Nm	-% 11,5

Tablo 6: 1993 model benzin yakıtlı BMW 3.18i tork artışı

H₂ gazının tatbiki ile motor volümetrik veriminin yükselmesi, aynı zamanda motor mekanik verimini de yükseltmiş olabilir, torkun arttığı devir değerlerinde görülen artış bu sebep ile gerçekleşmiş olabilir.

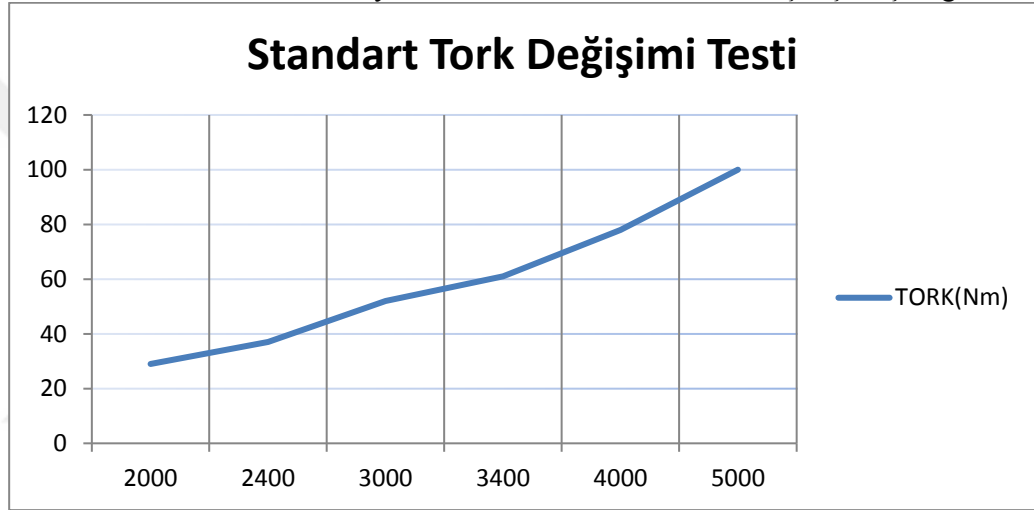
5000d/d değerinde torkta azalma meydana gelmiştir. Bu durum ise, yüksek devirlerde silindirlerde oluşan yüksek sıcaklık ve daha kısa süren emme-egzoz zamanlamasından dolayı hidrojenin verimli yanmayı sağlayamayarak tutuşma enerjisini düşürmesinin etkisiyle, benzin-hava karışımının yeterli dolumu gerçekleştiremeden erken tutuşma oluşmasından kaynaklanmış olabilir.

Bu araçta yapılan test sonucunda 4000 d/d değerinin üzerinde araç kullanımında cihazın motor performansını etkileyerek deney aracında olumsuz etkide bulunduğu düşünülmektedir.

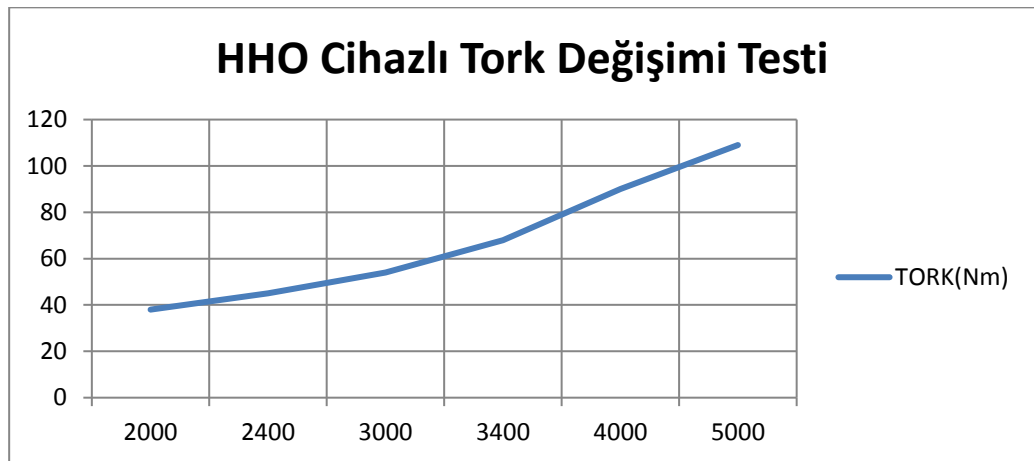
Sistemin uygulandığı 2. aracın fabrika çıkış özellikleri;

Motor Kodu:	- Ford Mondeo 1997
Yakıt Tipi:	Benzin
Yakıt Sistemi:	Çok Noktalı Enjeksiyon
Motor Pozisyonu:	Ön, transverse
Silindir Hacmi:	1796 cc
Silindir Çapı ve Stroğu:	80,6 mm-88 mm
Valf Sayısı:	16
Sıkıştırma Oranı:	9.8
Maksimum Güç:	115PS @5750 d/d
Maksimum Tork:	160Nm@4500d/d
Çekiş:	FWD
Şanzıman:	5 vites manual

Tablo 7: 1997 model benzin yakıtlı Ford Mondeo 1.8i fabrika çıkış araç bilgileri



Şekil 23: : 1997 model benzin yakıtlı Ford Mondeo 1.8i Dyno Testi Veri Grafiği



Şekil 24: 1997 model benzin yakıtlı Ford Mondeo 1.8i Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği

Devir/Dakika	CİHAZSIZ ÖLÇÜM	CİHAZLI ÖLÇÜM	TORK DEĞİŞİMİ
2000	29 Nm	38 Nm	+%23,68
2400	37 Nm	45 Nm	+%21,62
3000	52 Nm	54 Nm	+%3,84
3400	61 Nm	68 Nm	+%11,47
4000	78 Nm	90 Nm	+%16,66
5000	100 Nm	109 Nm	+%9,00

Tablo 8: 1997 Ford Mondeo 1.8i ölçüm tork değişimi

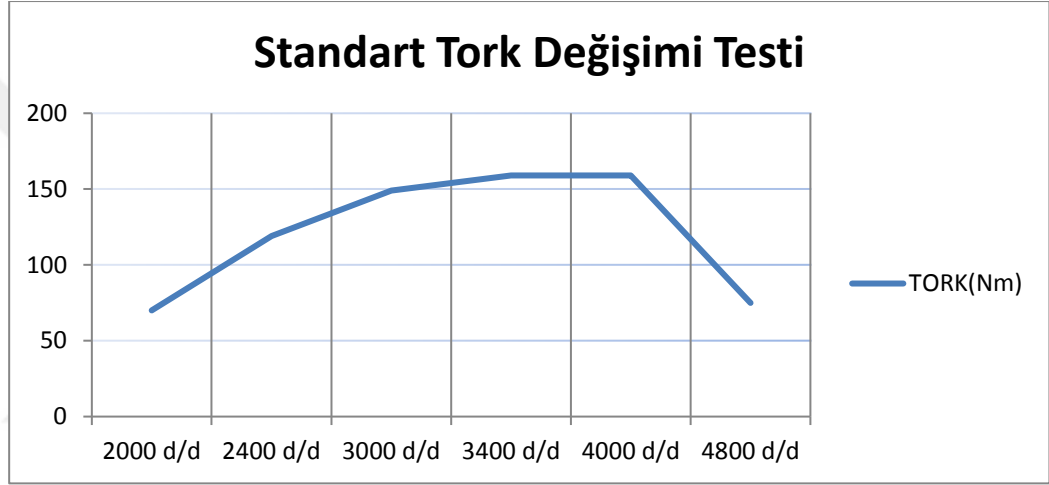
Bu testte elde edilen verilere göre; araçta düşük devirlerde tork artışı görülmüştür. Bu artış miktarı yüzdeler olarak her devir değerinde sabit bir değere yakınsayarak değişmemiştir. Düzensiz bir artış oranı olduğu ölçülmüştür.



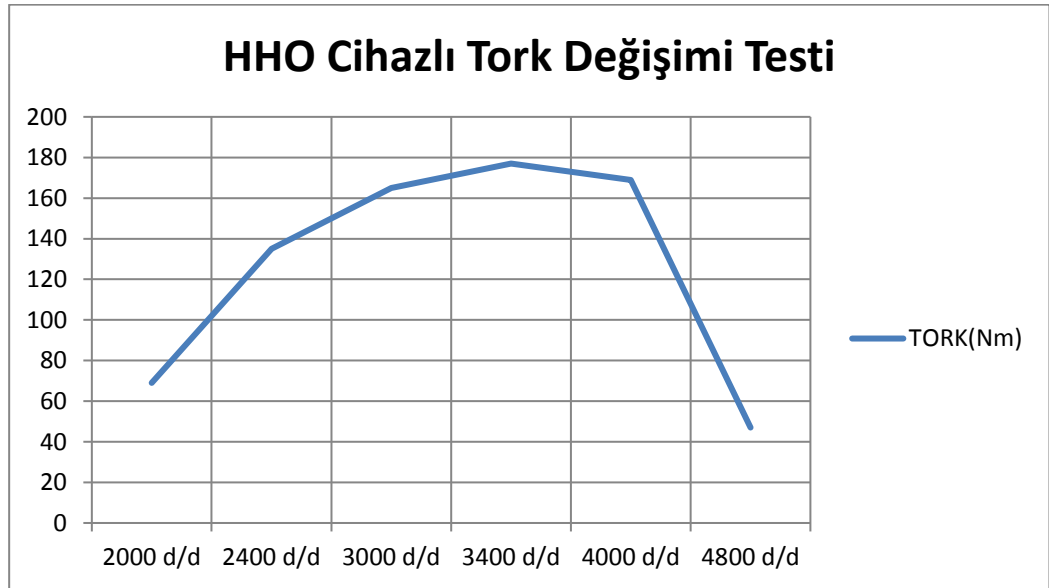
Sistemin uygulandığı 3. aracın fabrika çıkış özellikleri;

Motor Kodu:	Passat B5-AHH
Yakıt Tipi:	Dizel
Yakıt Sistemi:	Standart Diesel Injec.
Motor Pozisyonu:	Longitudinal
Silindir Hacmi:	1896 cc
Silindir Çapı ve Stroğu:	79,5 mm-95,5 mm
Valf Sayısı:	8
Sıkıştırma Oranı:	19,5
Maksimum Güç:	90PS - 4000 d/d
Maksimum Tork:	210Nm@3000d/d
Çekiş:	FWD
Şanzıman:	5 vites manual

Tablo 9: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat araç bilgileri



Şekil 25: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat Dyno Testi Veri Grafiği



Şekil 26: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği

VW Passat TDI Ölçüm Karşılaştırması aşağıdaki gibidir;

Devir/Dakika	CİHAZSIZ ÖLÇÜM	CİHAZLI ÖLÇÜM	TORK DEĞİŞİMİ
2000	70 Nm	69 Nm	-% 1.42
2400	119 Nm	135 Nm	+% 13.44
3000	149 Nm	165 Nm	+% 10.73
3400	159 Nm	177 Nm	+% 11.33
4000	159 Nm	169 Nm	+% 6.28
4800	75 Nm	47 Nm	-% 37.33

Tablo 10: 2000 model dizel yakıtlı VW Passat tork değişimi

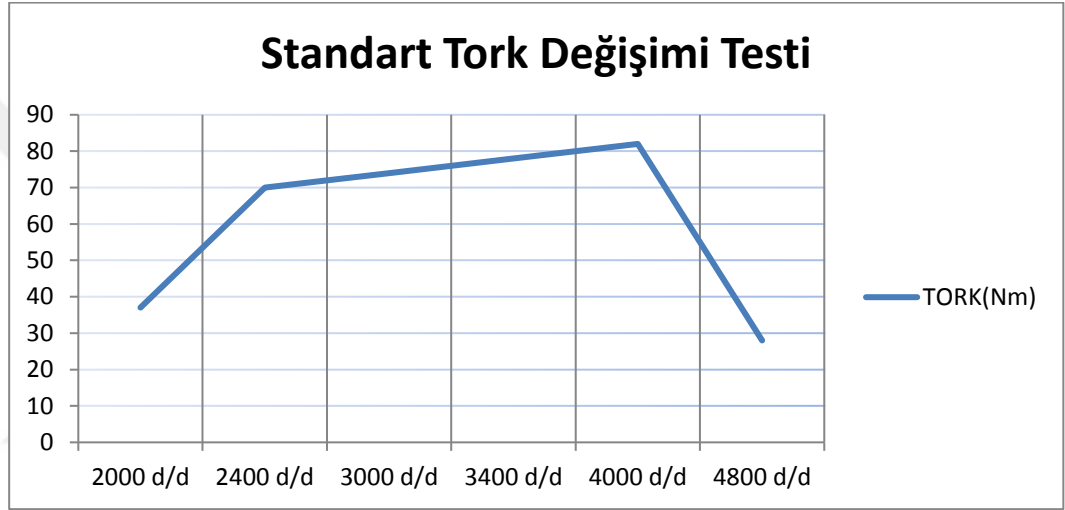
Elde ettiğimiz verilere göre; HHO kit uygulanmış dizel yakıtlı araçta, 2400 ile 4400 d/d değerleri arasında tork artışı pozitif bir grafik izlemiştir. Sonrasında ise tork azalmaya başlamış ve 4000 devirden sonrasında; kontrol değerlerinin de altında kalmış ve negatif etkide bulunmuştur.

Dizel araçta sistemin kullanımında, yüksek devirde yaşanan negatif etki çok diğer test araçlarına göre daha yüksek oranda olmuştur. Bu durum dizel yakıtının, silindirler içerisinde yayılma hızının düşük olması ve H₂ gazının volümetrik verime kısa çevrim sürelerinde negatif etkide bulunmasından kaynaklı oluşmuş olabilir. Dizel yakıtlı motorların piston çapları daha dar ve uzundur. Bu özellikten dolayı düşük devirlerde istenen gücü üretebilir ve yüksek devirlerde kullanımı performans düşmesine sebep olabilir.

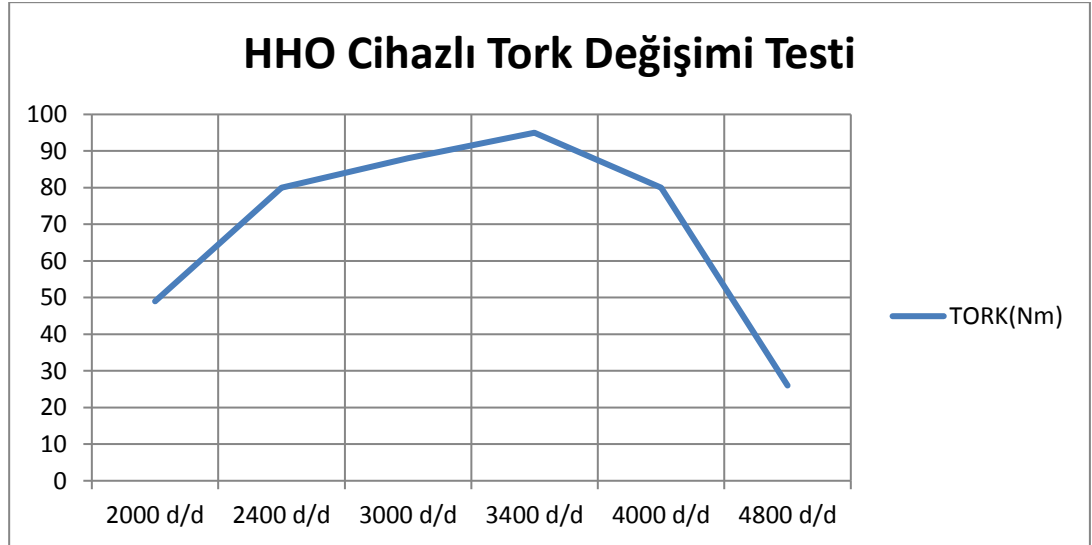
Sistemin uygulandığı 4. aracın fabrika çıkış özellikleri;

Motor Kodu:	-1.9D Peugeot
Yakıt Tipi:	Dizel
Yakıt Sistemi:	Standart Diesel Injec.
Motor Pozisyonu:	Longitudinal
Silindir Hacmi:	1868 cc
Silindir Çapı ve Stroğu:	82,2mm-88mm
Valf Sayısı:	8
Sıkıştırma Oranı:	23
Maksimum Güç:	69PS@4600 d/d
Maksimum Tork:	125Nm@3200d/d
Çekiş:	FWD
Şanzıman:	5 vites manual

Tablo 11: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner araç bilgileri



Şekil 27: : 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner Testi Dyno Veri Grafiği



Şekil 28: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner Hidrojen Destekli Dyno Testi Veri Grafiği

Devir/Dakika	CİHAZSIZ ÖLÇÜM	CİHAZLI ÖLÇÜM	TORK DEĞİŞİMİ
2000	37 Nm	49 Nm	+%32,43
2400	70 Nm	80 Nm	+%14,28
3000	74 Nm	88 Nm	+%18,91
3400	78 Nm	95 Nm	+%21,79
4000	82 Nm	80 Nm	-%2,43
4800	29 Nm	25 Nm	-%7,14

Tablo 12: 2000 model dizel yakıtlı Peugeot Partner tork değişimi

Veriler değerlendirildiğinde, cihaz uygulandıktan sonra bazı devir değerlerinde torkta artış, 4000 ve 4800 d/d değerlerinde ise azalma olduğu görülmüştür.

1.deneyde kullanılan aracın yakıt tüketimi olarak değerlendirilmesi ise;

HHO cihazsız araçta 4. vites kademesine gelinerek gaz pedalına sabit oranda (%50 açık) basıldığında, araç göstergesinden anlık yakıt tüketimi 9.8 lt/100 km olarak okunmuştur.(3000 d/d için)

HHO cihazının takılması sonrasında ise araçta 4. vites kademesine gelinerek gaz pedalına sabit oranda (%30 açık) basıldığında kontrol kademesi ile aynı devire ulaşılmış olup, araç göstergesinden anlık yakıt tüketimi 7.9 lt/100 km olarak okunmuştur.(3000 d/d için)

Burada aktarılan %50 basılı gaz pedalı değeri; motor üzerinde bulunan gaz kelebeği braketi gerginlik oranı tam ortaya getirilerek sabit tutulduğunda elde edilmiş değerdir. Birinci ölçümdeki aynı devir değerine ulaşıldığında gaz kelebeği braketinin üzerinden açölçer vasıtasıyla ölçülen değer ise ilk açıklığın %30'una tekabül etmektedir.

Bu testte aracın cihazsız yakıt sarfiyatı, cihazlı yakıt sarfiyatı ile karşılaştırıldığında 4. vites 3000 d/d değerinde, taşıt gösterge panelinde okunan verilere göre %19.3 oranında tasarruf edildiği hesaplanmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre; birincil yakıt olarak kullanılan hidrojenin, fosil yakıtlara göre yanma sonu ürünleri kıyaslandığında çevresel olumsuz etkilerinin daha düşük değerlerde olduğunu görülmüştür Benzinli bir motora kıyasla, hidrojen motoru emisyon olarak daha çevreci yanma sonu ürünlerine sahiptir.

Bu çalışmada ele aldığımız içten yanmalı motorlu taşıtlarda hidrojen katalizör olarak kullanılması, birincil yakıt olarak H₂ kullanımı çalışmalarına kıyasla, mevcut araçlara daha hızlı adapte edilebilen ekonomik bir sistemdir.

Silindir hacmi 1800-1900cc olan 4 adet farklı motora HHO kiti uygulanması sonucunda şu sonuçlar gözlemlenmiştir:

İlk olarak, Benzinli BMW marka araçta ölçülen maksimum tork değeri 140 Nm, 4000 d/d' da elde edilmiştir. HHO kit uygulamasından sonra ise 154 Nm. 3400 d/d' da elde edilmiştir.

İkinci olarak, Benzinli Ford marka Mondeo araçta ölçülen maksimum tork değeri 100 Nm.5000 d/d' da elde edilmiştir. HHO kit uygulamasından sonra ise 109 Nm. 5000 d/d' da elde edilmiştir.

Üçüncü olarak, Dizel VW marka Passat araçta ölçülen maksimum tork değeri 159 Nm. 3400 – 4000 d/d' da elde edilmiştir. HHO kit uygulamasından sonra ise 177Nm. 3400 d/d' da elde edilmiştir.

Dördüncü olarak, Dizel Peugeot marka Partner araçta ölçülen maksimum tork değeri 82Nm. 4000 d/d' da elde edilmiştir. HHO kit uygulamasından sonra ise 95Nm. 3400 d/d' da elde edilmiştir.

Yapılan dört farklı motordaki deneysel verilere göre HHO kit sisteminin araçtan araca farklı etkileri olmuştur. Ancak kit uygulamasından sonra her motorun maksimum tork değeri artmış ve elde edildiği devir aralığı Ford Marka Mondeo araç haricinde düşmüştür. Bu motorlarda hedeflenen bir durum olduğu için pozitif olarak değerlendirilebilir. Yüksek devirlerde ise negatif bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; farklı hacimde, özellikteki motorlarda, daha fazla ve kapsamlı deneyler, yapılarak bu sistem değerlendirilmelidir. Ayrıca HHO kitinin motor üzerindeki sistemlere ve ömrüne etkileri de araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

1. Prof. Dr. Engin TÜRE, “Hidrojen Enerjisi, Temiz Enerji Raporu “ İstanbul, 2001.
2. Palmer, David,”Hydrogen in the Universe” 1997-09-13.
3. Yrd. Doç. Dr. Ümran Tezcan, “21.Yüzyılın Enerjisi Hidrojen”Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir, 2010.
4. Raissi T,”Metal Hydride Storage Requirements for Transportation, Applications, 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference “2280-2285Washington DC, USA, 1996.
5. Prof. Dr. Birsen BESERGİL “Ref-e Makaleler, Hidrojen”, “<http://www.bayar.edu.tr/besergil/hidrojen.pdf>.”, 2007
6. Yalçın ve Ark, “Tübitak Makaleleri”, 1993
7. İnternet: Obitet, “Hidrojen Enerjisinin Araçlarda Yakıt Olarak Kullanılması”www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/hirojen_arabada_kullanimi.htm, 2007.
8. Gönenç USTA,”Hidrojen ve Hidrojen Metan(Hythane) Karışımının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması” Yüksek Lisans Tezi,33-59, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 2010.
9. İnternet: Varınca K., “21.Yüzyılın Enerjisi Hidrojen” <http://www.arşiv.emo.org.tr> ,2005.
10. Şimoğlu C, Civiniz M, Uçar G. “Günümüzde İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Yakıtının Kullanılması” http://www.obitet.gazi.edu.tr/makale/Makaleler/T14_Hidrojen.htm,2002
11. Otomotiv Bilim Ve Teknoloji Topluluğu,”Hidrojen Enerjisinin Araçlarda Yakıt Olarak Kullanılması” 7-12, Ankara, 2003
12. “Hidrojen”, Temiz Enerji Yayinlari Dergisi http://habitatdernegi.org/tr/dl/yayin/TemizEnerjiYayinlari/Y_O_Hidrojen.pdf
13. “ÇEVRE SAĞLIĞI- HAVA KİRLİLİĞİ 850CK0032”, Milli Eğitim Yayınları,3-8, Ankara, 2011 megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Hava%20Kirlili%C4%9Fi.pdf

14. Nafiz KAHRAMAN, Selahattin Orhan AKANSU, Bilge ALBAYRAK, "İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Olarak Hidrojen Kullanılması" Mühendis Makina • Cilt:48 Sayı: 569.
15. Özer Ü "Fosil Yakıtlar Yerine Solar Hidrojen, Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü", 1. Ulusal Yanma Sempozyumu, 27-51, Gazi Üniversitesi, Ankara,1991.
16. Saravanan, N. Nagarajan, G., Sanjay, G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, K.M., "Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen in dual fuel mode, Fuel" 87, 3591-3599, 2009.
17. "İTÜ DF Denizcilik Teknolojileri Kulübü Dergisi" ,Deniz ve Teknik Nisan, 1. Sayı),12, 2013.
18. Mehmet Emre Kılıç, "Hidrojen Enerjisi ve Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı Tezi",30-32, 2005.
19. "İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları", Prof. Dr. Orhan DENİZ,Yıldız Teknik Üniversitesi,4-16, 2008.
20. Selahattin ÇELİK,"IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, İdeal Yakıt ve Hava Oranlarının İncelenmesi"Osmangazi Üniversitesi,1-4, Eskişehir, 2014.
21. "https://www.cyberenerji.com", 2017.
22. "http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/hidrojen-yakitli-motorlar/14506#ad-image-0", 2017.
23. Bocarsly, A., Mingos, D.M.P. "Fuel Cells and Hydrogen Storage", CRC Press, USA, 2011.
24. Gülfeza KARDAŞ, Ramazan SOLMAZ, Birgül YAZICI, Mehmet ERBİL , "ELEKTROLİZ YÖNTEMİYLE HİDROJEN GAZI ELDESİ", Çukurova Üniversitesi, 2-5, 2010.
25. Olcay KINCAY, Haluk AĞUSTOS, Uğur AKBULUT, "Doğalgazdan Hidrojen Üretiminde Isıl Yöntemler", Yıldız Teknik Üniversitesi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Cilt:26 Sayı:1, 2008.
26. İ.Hakkı ÖZ, Oğuz BORAT, Ali SÜRMEK, "İçten Yanmalı Motorlar", Birsen Yayınevi 30-85, 2013.

27. Hüseyin Köse, “Hidrojenin çift yakıt modunda ilavesinin motor performans ve emisyon üzerine etkisi”, Yüksek Lisan Tezi, Selçuk Üniversitesi, 40-56, 2012.
- <http://acikerisim.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1343/302509.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
28. Gül E.E. “Hidrojenin İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performans etkileri” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 10-40, 50-74,, 2006
29. Zühtü ÖZERTAŞ, ”LPG’ye hidrojen ilavesinin buji ile ateşlemeli bir motorun performans ve emisyonlarına etkisi” ,Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 27-50 2014.
30. “EV World: The World of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles Calculating Hydrogen Production Costs” 5-28, 2003
31. MAT MD, ” Hidrojen Depolama Teknolojileri, 2. Ulusal Kongresi”, 117-143, Ankara, 2003.
32. Yıldız, E.İ, ”Buji Ateşlemeli Motorda LPG ve Hidrojen Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 5-24, 60-80, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Murat Çağrı SÜCÜLLÜ, 1991 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Bursa'da tamamladı. 2009 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı ve 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir. 1 yıl analiz mühendisliği dalında çalışmış ve 2 yıl otomotiv sektörüne proses makineleri ve kaynak fikstürü tasarımı, imalatı yapmıştır. Şu an,

2017 yılında Bursa' da sektöründe öncü bir firmada özel makine tasarımcısı olarak çalışmaktadır.

Murat Çağrı SÜCÜLLÜ